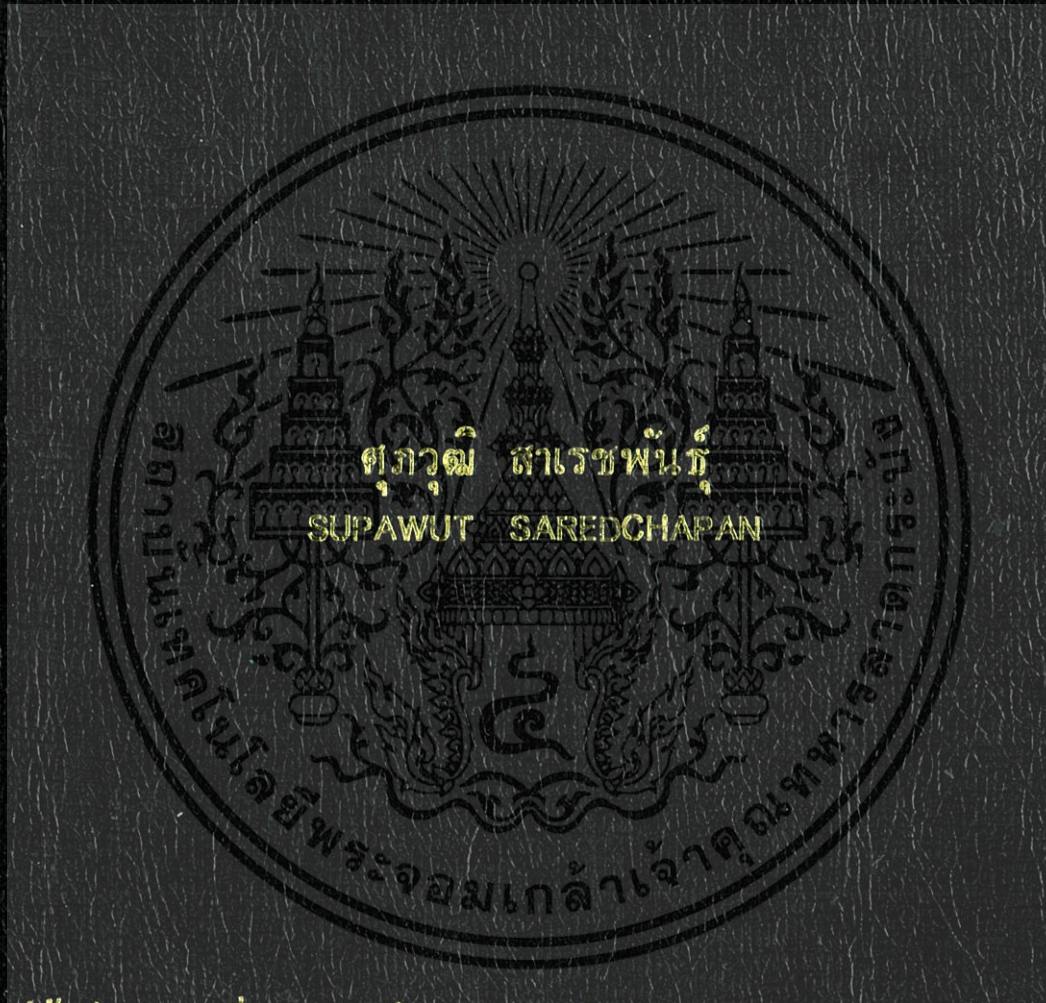


การปรับปรุงช่วงเวลาไล่อากาศของหม้อฆ่าเชื้อเพื่อการประหยัดพลังงาน  
ในอุตสาหกรรมอาหารกระป๋อง

IMPROVE VENTING TIME OF RETORT FOR ECONOMIC ENERGY  
IN FOOD CANNING MANUFACTURING



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2547

ISBN 974-9708-33-4

การปรับปรุงช่วงเวลาได้อากาศของหม้อฆ่าเชื้อเพื่อการประหยัดพลังงาน  
ในอุตสาหกรรมอาหารกระป๋อง

IMPROVE VENTING TIME OF RETORT FOR ECONOMIC ENERGY  
IN FOOD CANNING MANUFACTURING



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2547

ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไป  
ก่ให้มีให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุก

ISBN 974-9708-33-4

**IMPROVE VENTING TIME OF RETORT FOR ECONOMIC ENERGY  
IN FOOD CANNING MANUFACTURING**



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

**2004**

**ISBN 974-9708-33-4**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 2004**

**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์การสงวนลิขสิทธิ์ของเอกสารฉบับนี้ไม่มีอยู่ให้เห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การปรับปรุงช่วงเวลาไล่อากาศของหม้อฆ่าเชื้อ เพื่อการประหยัดพลังงานในอุตสาหกรรมอาหารกระป๋อง
นักศึกษา	นายสุภวุฒิ สารพันธ์
รหัสนักศึกษ	44061406
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมการวัดคุม
พ.ศ.	2547
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ประสิทธิ์ จุลเสรีวงศ์

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอการใช้พลังงานในช่วงการไล่อากาศสำหรับกระบวนการหม้อฆ่าเชื้อในอุตสาหกรรมการผลิตอาหารกระป๋อง โดยหม้อฆ่าเชื้อที่ใช้ไอน้ำเป็นตัวกลางการให้ความร้อนสามารถแบ่งเป็นขั้นตอนที่สำคัญ 3 ส่วน ได้แก่ การไล่อากาศ, การฆ่าเชื้อ และการทำเย็น ซึ่งการไล่อากาศเป็นช่วงที่ใช้พลังงานสูงสุด และในช่วงเริ่มต้นของการไล่อากาศ ตำแหน่งการเปิดสูงสุดของวาล์วควบคุมไอน้ำ ส่วนใหญ่จะอยู่ที่ 100 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งการควบคุมอุณหภูมิเป็นแบบพีไอดีจากการศึกษาพบว่าช่วงเวลาไล่อากาศของกระบวนการหม้อฆ่าเชื้อหลายแห่งมีการใช้พลังงานเกินความจำเป็น วิธีการที่นำเสนอได้บรรยายถึงการควบคุมการไหลของไอน้ำอย่างเหมาะสม จากการจำลองกระบวนการหม้อฆ่าเชื้อเพื่อศึกษาการใช้พลังงาน เทคนิคการควบคุมที่นำเสนอคือ เทคนิคการเปิดตารางร่วมกับการควบคุมแบบพีไอดี ตารางดังกล่าวสร้างขึ้นจากสูตรการคำนวณค่า  $C_v$  ของวาล์วควบคุม ซึ่งได้แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไอน้ำกับตำแหน่งการเปิดของวาล์วควบคุม โดยในช่วงเริ่มต้นของการไล่อากาศเป็นการใช้เทคนิคการเปิดตารางเข้ามาควบคุมตำแหน่งการเปิดสูงสุดของวาล์วควบคุมไอน้ำในตำแหน่งที่เหมาะสม หลังจากนั้นจึงเข้าสู่การควบคุมแบบพีไอดีดั้งเดิม จากการทดลองในกระบวนการหม้อฆ่าเชื้ออาหารกระป๋องจำนวน 3 โรงงาน พบว่าเทคนิคที่นำเสนอสามารถนำไปใช้เพื่อลดต้นทุนการใช้พลังงานได้จริง และยังคงสามารถรักษามาตรฐานตามข้อกำหนดของการไล่อากาศอยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Thesis Title</b>	Improve Venting Time of Retort for Economic Energy in Food Canning Manufacturing
<b>Student</b>	Mr. Supawut Saredchapan
<b>Student ID.</b>	44061406
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Programme</b>	Instrumentation Engineering
<b>Year</b>	2004
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc.Prof. Prasit Julsereewong

### ABSTRACT

This thesis presents the improving venting time of retort process in food canning manufacturing. In order to minimize the energy costs, the optimal steam flow is applied to control the desired temperature of retort process. The proposed control technique is based on the look-up table in combination with the PID control. At the beginning of venting period, the appropriate opening position of steam control valve is obtained from the look-up table technique. If the temperature of the retort process nearly achieves the target, the steam control valve is then controlled using the PID technique. The performances of the proposed control technique were observed using three canned food plants as the illustrative examples. The experimental results are given to support the saving in energy costs without quality and standard detriments of the retort process.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี ด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาเกี่ยวกับระบบควบคุมหม้อฆ่าเชื้อจากคุณเดชา อรรถคำภีวงศ์ ซึ่งเป็นผู้ที่ได้ให้การช่วยเหลือด้านความรู้และเครื่องมือในการทดลองต่างๆ มาโดยตลอด ผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ รศ.ประสิทธิ์ จุลเสวีวงศ์ อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ในด้านเทคนิคการควบคุมและข้อเสนอแนะต่างๆ ด้านในการศึกษาปริญญาโท

ขอขอบพระคุณอาจารย์ชูชัย จันทร์จรัสวัฒน์ ผู้เชี่ยวชาญสภาอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย ที่ได้จุดประกายสำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณ บริษัท บี.เอ็น.เอช. แคนนิ่ง จำกัด, บริษัท เกียรติเจริญฟู๊ด จำกัด, บริษัท สห-ปราจีนบุรีอุตสาหกรรมอาหาร (สาขาฝาง) จำกัด และ สภาอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อและคุณแม่และผู้มีพระคุณทุกท่านที่ได้เป็นกำลังใจและสนับสนุนในการศึกษามาโดยตลอด

ศุภวุฒิ สารพันธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	II
กิตติกรรมประกาศ .....	III
สารบัญ .....	IV
สารบัญตาราง .....	VIII
สารบัญรูป .....	IX
<b>บทที่ 1 บทนำ .....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา .....	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา .....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย .....	3
1.5 ขอบเขตการวิจัย .....	3
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา .....	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง .....</b>	<b>4</b>
2.1 ทฤษฎีทางด้านวิทยาศาสตร์อาหาร .....	4
2.1.1 จุลชีววิทยาของอาหารกระป๋อง .....	4
2.1.2 การใช้ความร้อนในกระบวนการแปรรูปอาหาร .....	5
2.1.3 กระบวนการผลิตอาหารกระป๋อง .....	7
2.1.4 กระบวนการฆ่าเชื้ออาหารกระป๋อง .....	9
2.1.5 การกระจายความร้อนภายในอาหารกระป๋อง .....	10
2.1.6 การนำความร้อนภายใต้สภาวะคงตัว .....	13
2.2 ทฤษฎีการควบคุม .....	18
2.2.1 การควบคุมอัตโนมัติต่างๆ .....	18
2.2.2 การควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า .....	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 กระบวนการหม้อฆ่าเชื้อ .....	28
3.1 ประเภทของหม้อฆ่าเชื้อ .....	28
3.1.1 ประเภทของหม้อฆ่าเชื้อแบ่งตามลักษณะการฆ่าเชื้อ .....	28
3.1.2 ประเภทของหม้อฆ่าเชื้อแบ่งตามลักษณะการหมุนของกระป๋อง/บรรจุ .....	31
3.1.3 ประเภทของหม้อฆ่าเชื้อแบ่งตามลักษณะการวางของหม้อ .....	32
3.1.4 ประเภทของหม้อฆ่าเชื้อแบ่งตามตัวกลางการให้ความร้อน .....	33
3.2 โครงสร้างและอุปกรณ์ .....	34
3.2.1 แหล่งกำเนิดไอน้ำ.....	34
3.2.2 ท่อส่งไอน้ำ .....	34
3.2.3 ท่อไอน้ำเข้า .....	35
3.2.4 ระบบควบคุมการจ่ายไอน้ำ .....	35
3.2.5 ท่อขนาน .....	36
3.2.6 ท่อกระจายไอน้ำ .....	37
3.2.7 ท่อระบายอากาศ .....	37
3.2.8 ท่อหายใจ .....	38
3.2.9 ท่อระบายน้ำจากการควบแน่น .....	39
3.2.10 ท่อน้ำเข้า .....	39
3.2.11 ท่อกระจายน้ำทำเย็น .....	39
3.2.12 ท่อระบายน้ำ .....	39
3.2.13 ท่อน้ำล้น .....	40
3.2.14 ท่อลม .....	40
3.2.15 วาล์วนิรภัย .....	40
3.2.16 เทอร์โมมิเตอร์แบบปรอทแก้ว.....	40
3.2.17 เครื่องบันทึกอุณหภูมิ .....	40
3.2.18 มาตรวัดความดัน.....	41
3.2.19 ตะกร้าใส่ผลิตภัณฑ์.....	41
3.2.20 แผ่นแยกชั้น .....	41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์อื่นใด การค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.2.21 เครื่องดูเวลาและเครื่องจับเวลา .....	41
3.2.22 ระบบตรวจสอบผลิตภัณฑ์.....	41
3.3 กระบวนการทำงาน .....	42
3.3.1 การปฏิบัติในการใช้หม้อฆ่าเชื้อ .....	42
3.3.2 การควบคุมอุณหภูมิในหม้อฆ่าเชื้อ .....	45
3.4 การจำลองกระบวนการหม้อฆ่าเชื้อ .....	50
3.4.1 หลักการพื้นฐานระบบความร้อน .....	50
3.4.2 การจำลองกระบวนการ .....	52
<b>บทที่ 4 เทคนิคการเปิดตาราง .....</b>	<b>61</b>
4.1 วาล์วควบคุม .....	61
4.1.1 ชนิดของวาล์วควบคุม .....	63
4.1.2 ตัวขับวาล์วควบคุม .....	64
4.1.3 คุณลักษณะภายในของวาล์ว .....	65
4.1.4 การเลือกขนาดวาล์วควบคุม .....	67
4.2 การออกแบบตัวควบคุม .....	69
<b>บทที่ 5 การทดลอง .....</b>	<b>74</b>
5.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง .....	75
5.1.1 การสอบเทียบอุปกรณ์เครื่องมือวัด .....	77
5.2 การทดลอง .....	80
5.3 การวัดและการเปรียบเทียบผล .....	82
5.3.1 การวัดและเปรียบเทียบผลทางทฤษฎี .....	82
5.3.2 การวัดและเปรียบเทียบผลทางปฏิบัติ .....	84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....	92
เอกสารอ้างอิง .....	93
ภาคผนวก .....	94
ภาคผนวก ก. รายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง .....	95
ภาคผนวก ข. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ .....	107
ประวัติผู้เขียน .....	113



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

รูปที่	หน้า
1.1 การใช้พลังงานรวมในแต่ละส่วนของประเทศไทย .....	1
1.2 การส่งออกในแต่ละส่วนของประเทศไทย .....	2
2.1 ลักษณะการนำและการพาความร้อนในอาหารกระป๋อง .....	6
2.2 การวัดจุดที่เย็นที่สุดในอาหารกระป๋องที่บรรจุอาหารแข็งและเหลว .....	7
2.3 แสดงขั้นตอนของกระบวนการผลิตอาหารกระป๋อง .....	8
2.4 การเปรียบเทียบการนำความร้อนกับวงจรทางไฟฟ้า .....	13
2.5 เปรียบเทียบการนำความร้อนของแผ่นระนาบกับวงจรไฟฟ้า .....	14
2.6 การนำความร้อนในพิกัดทรงกระบอก .....	16
2.7 บล็อกไดอะแกรมของตัวควบคุมแบบ Proportional .....	19
2.8 บล็อกไดอะแกรมของตัวควบคุมแบบ Integral .....	20
2.9 บล็อกไดอะแกรมของตัวควบคุมแบบ PI .....	21
2.10 บล็อกไดอะแกรมของตัวควบคุมแบบ PD .....	22
2.11 บล็อกไดอะแกรมของตัวควบคุมแบบ PID .....	23
2.12 ผังสัญญาณระบบควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า .....	24
2.13 หม้อไอน้ำและระบบควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า .....	25
2.14 หม้อไอน้ำและระบบควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าและป้อนกลับ .....	25
2.15 ผังสัญญาณระบบควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าพร้อมอุปกรณ์ต่างๆ .....	26
3.1 หม้อฆ่าเชื้อแบบทำงานเป็นรอบการทำงาน .....	29
3.2 Continuous pressure cooker-cooler .....	29
3.3 Continuous rotary sterilizer .....	30
3.4 Hydrostatic sterilizer .....	31
3.5 หม้อฆ่าเชื้อแบบหมุน .....	31
3.6 หม้อฆ่าเชื้อแบบไม่หมุน .....	32
3.7 หม้อฆ่าเชื้อแบบตั้ง .....	32
3.8 หม้อฆ่าเชื้อแบบนอน .....	32
3.9 Steam retort .....	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.10 Hot water retort .....	33
3.11 การเดินท่อส่งไอน้ำและการต่อท่อไปใช้งาน .....	35
3.12 โครงสร้างและอุปกรณ์ต่างๆ ของหม้อฆ่าเชื้อ .....	36
3.13 ท่อกระจายไอน้ำและลักษณะการเจาะรู .....	37
3.14 การติดตั้งท่อระบายอากาศแบบต่างๆ .....	38
3.15 ท่อกระจายน้ำเย็น .....	39
3.16 ท่อระบายน้ำ .....	39
3.17 การไหลผลิตภัณฑ์เข้า .....	42
3.18 ช่วงการไล่อากาศ .....	43
3.19 ช่วงการทำเย็น .....	44
3.20 ไดอะแกรมกระบวนการควบคุมอุณหภูมิของหม้อฆ่าเชื้อ .....	45
3.21 เครื่องควบคุมและบันทึกอุณหภูมิแบบใช้หลักการทางกล .....	46
3.22 ระบบคั่น โยค .....	47
3.23 โครงสร้างและหลักการควบคุมทางกล .....	47
3.24 หลักการควบคุมอุณหภูมิโดยระบบไฟฟ้า .....	48
3.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาของกระบวนการหม้อฆ่าเชื้อ .....	49
3.26 หลักการถ่ายเทความร้อนและฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบความร้อน .....	51
3.27 การตอบสนองแบบขั้นบันได .....	52
3.28 แบบจำลองกระบวนการหม้อฆ่าเชื้อ .....	52
3.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและอุณหภูมิ .....	60
3.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและพลังงานที่ใช้ในแต่ละส่วน .....	60
3.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและการใช้พลังงานรวม .....	60
4.1 บ่वालวที่ใช้งานโดยส่วนใหญ่ .....	61
4.2 ตัวอย่างบริษัทผู้ผลิตวาล์วควบคุมสำหรับกระบวนการฆ่าเชื้ออาหารกระป๋อง .....	62
4.3 โครงสร้างของวาล์วควบคุม .....	63
4.4 ไดอะแกรมแสดงชนิดของวาล์วควบคุม .....	64
4.5 การทำงานของวาล์วควบคุม .....	65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6 ตัวอย่างของปลั๊กวาล์วในการควบคุมการไหลแบบต่างๆ .....	66
4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการไหลผ่านวาล์วกับตำแหน่งของวาล์ว .....	67
4.8 Inherent flow characteristics .....	70
4.9 แสดงผังขั้นตอนการทำงานของระบบควบคุมที่นำเสนอ .....	73
5.1 เครื่องบันทึกอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง .....	76
5.2 เครื่องวัดพลังงานแบบสะสม .....	76
5.3 การวัดอัตราการไหล .....	77
5.4 หลักการควบคุมอุณหภูมิ .....	77
5.5 แสดงวิธีการวัดผลการทดลองที่นำเสนอ .....	78
5.6 แสดงวิธีการสอบเทียบเครื่องวัดพลังงานสะสมกรณีไม่เป็นเชิงเส้น .....	79
5.7 การสอบเทียบเครื่องวัดพลังงานแบบสะสม .....	79
5.8 ภาพการทดลอง .....	80
5.9 ไดอะแกรมการทดลอง .....	80
5.10 ภาพการติดตั้ง Totalizer และ Data logger .....	81
5.11 คุณลักษณะการไหลของวาล์วที่ตำแหน่งการเปิด 80 % .....	83
5.12 แสดงภาพการวัดและบันทึกข้อมูลจากการทดลอง โรงงานที่ 1 .....	84
5.13 แสดงการวัดผลก่อนปรับปรุงจาก Totalizer และ Data logger โรงงานที่ 1 .....	85
5.14 แสดงการวัดผลหลังปรับปรุง โรงงานที่ 1 .....	86
5.15 หม้อฆ่าเชื้อที่ใช้ในการทดลองและการบรรจุกระป๋องทดลองลงตะกร้า .....	87
5.16 แสดงภาพการวัดปริมาณไอน้ำสะสมก่อนการปรับปรุง โรงงานที่ 2 .....	87
5.17 แสดงภาพการบันทึกอุณหภูมิก่อนการปรับปรุงจาก Data logger โรงงานที่ 2 .....	88
5.18 แสดงภาพการวัดปริมาณไอน้ำสะสมหลังก่อนการปรับปรุง โรงงานที่ 2 .....	88
5.19 แสดงภาพการบันทึกอุณหภูมิหลังการปรับปรุงจาก Data logger โรงงานที่ 2 .....	89
5.20 แสดงภาพการบันทึกอุณหภูมิโรงงานที่ 3 .....	90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

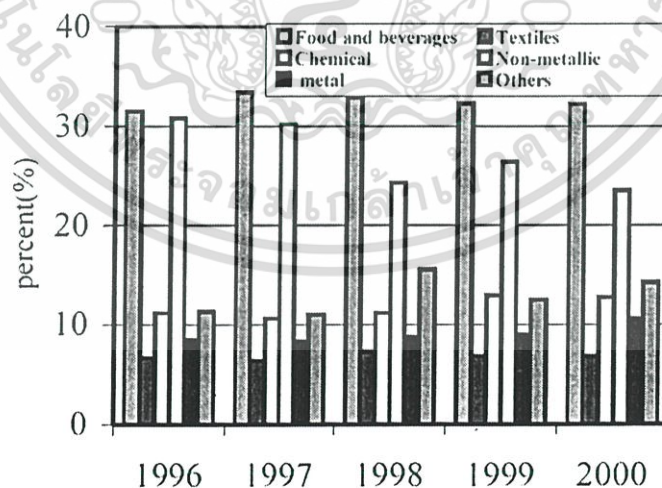
## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปีพ.ศ. 2541 การใช้พลังงานในสาขาการผลิตต่างๆ (Final Energy Demand) มีจำนวนทั้งสิ้น 970.5 พันบาร์เรลน้ำมันดิบต่อวัน ประกอบด้วย ภาคคมนาคมขนส่ง ซึ่งใช้พลังงานมากที่สุดร้อยละ 40.1 รองลงมาได้แก่ ภาคอุตสาหกรรมร้อยละ 32.5 ภาคที่อยู่อาศัยและการพาณิชย์ร้อยละ 24.5 และภาคเกษตรร้อยละ 3.0

ความต้องการพลังงานในภาคคมนาคมขนส่งและภาคอุตสาหกรรมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในอัตราที่สูงกว่าภาคการผลิตอื่นๆ โดยภาคอุตสาหกรรมใช้พลังงานมากเป็นอันดับสอง รองจากภาคคมนาคมขนส่ง โดยในปี 2541 มีการใช้พลังงานทั้งสิ้น 315 พันบาร์เรลน้ำมันดิบต่อวัน ซึ่งใช้พลังงานหมุนเวียนได้แก่ ฟืน, ถ่าน, แกลบ และชานอ้อย เป็นเชื้อเพลิงหลัก และมีแนวโน้มจะลดบทบาทลงเรื่อยๆ โดยมีพลังงานเชิงพาณิชย์ ซึ่งได้แก่ ก๊าซธรรมชาติ ถ่านหิน ไฟฟ้า และน้ำมันเตา เข้ามามีบทบาทมากขึ้น

สำหรับอุตสาหกรรมอาหารเป็นส่วนหนึ่งของภาคอุตสาหกรรมที่มีการใช้พลังงานค่อนข้างสูง เมื่อพิจารณาการใช้พลังงานในแต่ละส่วนของประเทศดังในรูปที่ 1. จะเห็นว่าในส่วนของอาหารและเครื่องดื่มมีสัดส่วนการใช้พลังงานสูงกว่าในส่วนอื่น

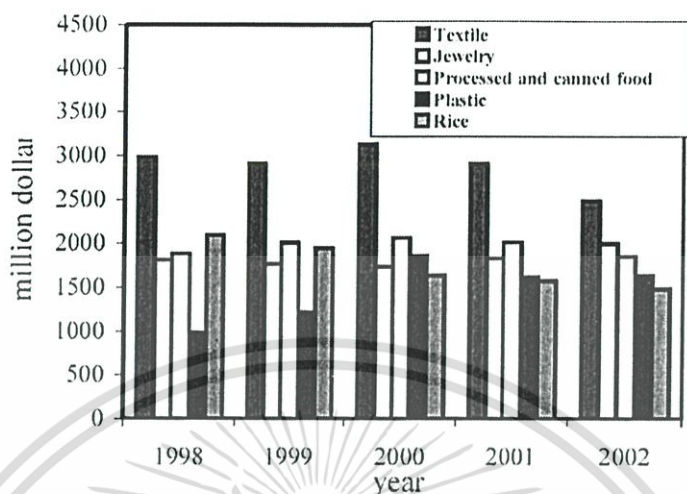


รูปที่ 1.1 การใช้พลังงานรวมในแต่ละส่วนของประเทศไทย

การผลิตอาหารนั้นมีอยู่หลายวิธีด้วยกันขึ้นอยู่กับผลิตภัณฑ์ สำหรับอุตสาหกรรมอาหารกระป๋องมีอยู่จำนวนมากในประเทศ ซึ่งผลิตผลต่างๆ ประกอบด้วยผักและผลไม้, ปลาทูน่า, พาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แอบเปิด และอาหารทะเล โดยผลรวมของการส่งออกทั้งสิ้นของผลิตผลดังกล่าวในปี 1998 คิดเป็นมูลค่า 89.6 พันล้านบาท (23% ของการส่งออกทางอาหารทั้งหมด)



รูปที่ 1.2 การส่งออกในแต่ละส่วนของประเทศไทย

ถ้ากล่าวถึงการผลิตอาหารกระป๋อง จุดที่ใช้พลังงานสูงที่สุดในกระบวนการผลิตอาหารกระป๋องคือ กระบวนการหม้อฆ่าเชื้อ (Retort process) โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงการไล่อากาศจะมีการใช้พลังงานเป็นจำนวนมาก ถ้าสามารถทำการควบคุมการใช้พลังงานให้เหมาะสมกับกระบวนการ ดังนั้นผลการประหยัดพลังงานจะเกิดขึ้นอย่างมาก ซึ่งนำไปสู่การลดต้นทุนในการผลิตและช่วยลดการเข้าน้ำมัน ที่สำคัญคือสินค้าที่มีคุณภาพในราคาต้นทุนที่ต่ำนี้ยังง่ายต่อการเข้าไปแข่งขันในตลาดโลกได้เป็นอย่างดี

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

- 1.2.1 เพื่อศึกษาพฤติกรรมการใช้พลังงานและสมดุลพลังงานในกระบวนการหม้อฆ่าเชื้อสำหรับอุตสาหกรรมการผลิตอาหารกระป๋อง
- 1.2.2 นำเทคนิคการควบคุมที่นำเสนอมาใช้ในการควบคุมการไหลของไอน้ำให้มีความเหมาะสมกับกระบวนการ
- 1.2.3 นำผลงานครั้งนี้ไปใช้ในกระบวนการผลิต ซึ่งสามารถลดต้นทุนการใช้พลังงานจริง

## 1.3 สมมติฐานของการศึกษา

ในกระบวนการหม้อฆ่าเชื้อสำหรับอุตสาหกรรมการผลิตอาหารกระป๋อง สามารถแบ่งช่วงการทำงานได้ 3 ขั้นตอน คือ การไล่อากาศ, การฆ่าเชื้อ และการทำให้เย็น ในการไล่อากาศเป็นการใช้ไอน้ำแทนที่อากาศภายใน ดังนั้นจึงมีการใช้พลังงานความร้อนในช่วงนี้สูงมาก ซึ่งในทางปฏิบัติส่วนใหญ่ไม่ได้คำนึงถึงการใช้พลังงานเท่าใดนัก ดังนั้นถ้าสามารถควบคุมการไหลของไอน้ำให้มีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเหมาะสมกับกระบวนการ โดยไม่ส่งผลกระทบต่อช่วงการฆ่าเชื้อ จะสามารถประหยัดพลังงานได้อย่างมาก

#### 1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

โดยการจำลองกระบวนการหม้อฆ่าเชื้อเพื่อศึกษาการใช้พลังงาน จากทฤษฎีการออกแบบระบบความร้อนแบบสภาวะไม่คงที่ (Dynamics) ซึ่งสามารถแบ่งภาระทางความร้อนได้เป็น 3 ส่วน คือ กระจก, ตัวหม้อฆ่าเชื้อ, ตะกร้ารถเข็น จากนั้นจะได้รับความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลา และจะได้การใช้พลังงานรวม (Energy Consumption) ของกระบวนการ ซึ่งนำไปสู่การออกแบบการควบคุมการไหลของไอน้ำที่เหมาะสม โดยวิธีจำลองอ้างอิงจากโปรแกรมการจำลองกระบวนการหม้อฆ่าเชื้ออาหารกระป๋องจากบริษัท Enconet (Thailand)

#### 1.5 ขอบเขตการวิจัย

ทำการศึกษาการใช้พลังงานในกระบวนการหม้อฆ่าเชื้อ และนำเทคนิคที่นำเสนอมาใช้ควบคุมการไหลของไอน้ำในช่วงการไล่อากาศอย่างเหมาะสม จากนั้นทำการเปรียบเทียบผลก่อนและหลังการปรับปรุง จากการคำนวณผลการประหยัดพลังงานจากทางทฤษฎีและการประหยัดจริงที่ได้จากการทดลอง

#### 1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

- 1.6.1 ทำการศึกษาหลักการทำงานและการใช้พลังงานของกระบวนการหม้อฆ่าเชื้อ
- 1.6.2 ออกแบบระบบควบคุมด้วยเทคนิคการเปิดตาราง
- 1.6.3 ทำการทดลองในโรงงานเพื่อวัดผลการประหยัดจากเครื่องบันทึกแบบสะสม
- 1.6.4 ทำการเปรียบเทียบผลก่อนและหลังการปรับปรุง
- 1.6.5 สรุปผลและข้อเสนอแนะจากการทดลอง

## บทที่ 2

# ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับวิทยาศาสตร์อาหาร

ในปัจจุบันอาหารสำเร็จรูปที่จำหน่ายในร้านค้า ส่วนใหญ่มักจะผ่านการแปรรูปด้วยวิธีการต่างๆ กัน เพื่อให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภคมากที่สุด ในการแปรรูปดังกล่าว จำเป็นต้องอาศัยหลักการทางด้านเคมี จุลินทรีย์และวิศวกรรม รวมถึงการบรรจุด้วย ซึ่งในการศึกษาทางด้านวิศวกรรมแปรรูปอาหาร จำเป็นต้องมีความรู้เบื้องต้นทางด้านคณิตศาสตร์ มิติและหน่วยที่ใช้ เทอร์โมไดนามิกส์ สมดุลของมวลและพลังงานที่เกิดขึ้นในกระบวนการ เนื่องจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีส่วนเกี่ยวข้องกับการผลิตอาหาร ดังนั้นในส่วนนี้จึงเป็นการกล่าวถึงหลักการทางด้านวิทยาศาสตร์อาหาร (Food science) ที่จำเป็นดังนี้

#### 2.1.1 จุลชีววิทยาของอาหารกระป๋อง (Microbiology of Canned Foods)

จุลินทรีย์เป็นสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กมาก แต่ละหน่วยของจุลินทรีย์อาจเป็นเซลล์เดี่ยวหรือประกอบด้วยเซลล์หลายเซลล์ หน่วยของจุลินทรีย์แต่ละหน่วยสามารถดำรงชีพอยู่ได้อย่างอิสระ จุลินทรีย์เป็นสิ่งมีชีวิตที่มีหลากหลายชนิดที่สุด และมีการแพร่กระจายในสิ่งแวดล้อมของโลกมากที่สุด จุลินทรีย์ที่มีความสำคัญต่อการผลิตอาหาร ได้แก่ แบคทีเรีย, ยีสต์ และรา ตัวที่สำคัญที่สุดคือ *Clostridium botulinum* ซึ่งเป็นเชื้อแบคทีเรียที่สร้างสารพิษและไม่ต้องการอากาศในการเจริญเติบโต สามารถทนความร้อนได้สูง ดังนั้นจึงใช้เชื้อตัวนี้เป็นดัชนีที่บ่งบอกว่า ปริมาณความร้อนที่ให้แก่อาหารนั้นเพียงพอหรือไม่

อาหารกระป๋องเป็นกรรมวิธีการถนอมอาหารที่บรรจุในภาชนะผนึกปิดสนิทและให้ความร้อนเพื่อป้องกันการเน่าเสีย ความร้อนที่ใช้นั้นมีจุดมุ่งหมายเพื่อทำลายจุลินทรีย์ทั้งหมด แต่ในทางปฏิบัติมักทำได้เพียงการฆ่าจุลินทรีย์ที่จะทำให้เกิดการเน่าเสียในสภาวะการเก็บรักษาปกติเท่านั้นซึ่งเรียกว่า “การฆ่าเชื้อเชิงการค้า” (Commercial Sterile) ซึ่งหมายถึง สภาวะที่ได้จากการให้ความร้อนอย่างเดียวในปริมาณที่เพียงพอหรือใช้ความร้อนร่วมกับวิธีการอื่นที่จะทำให้อาหารปราศจากจุลินทรีย์ที่สามารถเจริญได้ในลักษณะที่ไม่ต้องเก็บแช่เย็น ซึ่งเป็นสภาพปกติที่อาหารถูกเก็บรักษาหรือจัดจำหน่าย เซลล์ของสปอร์ของจุลินทรีย์สามารถทนความร้อนได้ต่างๆ กัน ทั้งนี้ขึ้นกับปัจจัยสำคัญได้แก่

- ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลา
- ปริมาณของเซลล์หรือสปอร์ของจุลินทรีย์เมื่อเริ่มให้ความร้อน
- สภาพของจุลินทรีย์ในขณะให้ความร้อนที่มีผลต่อการทนความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่โดยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ซึ่งประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ส่วนประกอบของอาหารที่ผ่านกรรมวิธีให้ความร้อน

ตารางที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการทำลายสปอร์ของจุลินทรีย์

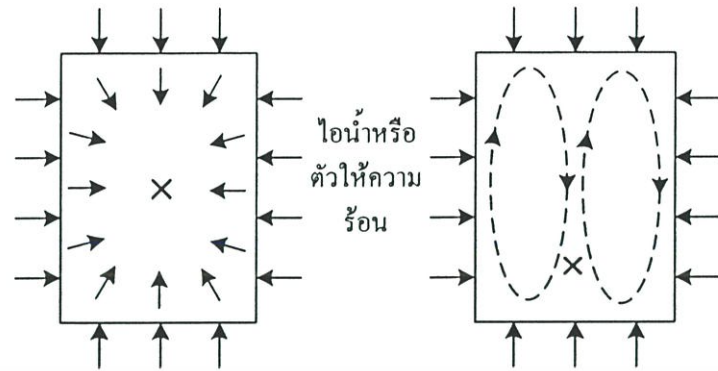
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)
100	1,200
105	600
110	190
115	70
120	19
125	7
130	3
135	1

### 2.1.2 การใช้ความร้อนในกระบวนการแปรรูปอาหาร

การใช้ความร้อนในกระบวนการแปรรูปอาหารในที่นี้หมายถึง การใช้อุณหภูมิสูงๆ เพื่อช่วยให้อาหารมีความคงตัว จึงเป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้ในการเก็บรักษาถนอมอาหาร

#### 2.1.2.1 การแบ่งชนิดของอาหารตามลักษณะการถ่ายเทความร้อน

ลักษณะการถ่ายเทความร้อนในอาหารมีผลต่อการคำนวณหาเวลาที่เหมาะสมในการฆ่าเชื้อ การถ่ายเทความร้อนเข้าไปในภาชนะบรรจุแบ่งได้ 3 วิธีคือ การพาความร้อน การนำความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน การพาความร้อนหมายถึง การที่ความร้อนจะถูกพาเข้าไปในอาหารกระป๋อง โดยโมเลกุลของตัวกลางที่สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ การนำความร้อนหมายถึง การส่งผ่านความร้อนจากโมเลกุลของตัวกลางโมเลกุลหนึ่งไปยังอีกโมเลกุลหนึ่ง ซึ่งวิธีนี้จะถ่ายเทความร้อนได้ช้ากว่าวิธีแรก สำหรับการแผ่รังสีความร้อนนั้น จะเป็นการถ่ายเทพลังงานความร้อนเช่น แสง ฯลฯ จากกฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์กล่าวว่า พลังงานความร้อนจะไหลไปในทิศทางเดียวกันจากส่วนที่ร้อนไปสู่ส่วนที่เย็นจนเกิดความสมดุล แต่ภายในภาชนะบรรจุจะเกิดจุดๆ หนึ่งที่ความร้อนเข้าถึงได้ช้าที่สุด (Cold spot) ซึ่งจุดนี้จะเกิดขึ้นในตำแหน่งต่างๆ กันไป ขึ้นกับวิธีการส่งผ่านความร้อนแสดงดังรูปที่ 2.1 สำหรับการถ่ายเทความร้อนภายในตัวอาหารเอง จะเป็นแบบวิธีการพาความร้อน หรือวิธีการนำความร้อน หรือเกิดขึ้นทั้งสองแบบผสมกัน ขึ้นกับลักษณะทางกายภาพของอาหารและลักษณะการบรรจุอาหารในภาชนะบรรจุ



การส่งผ่านความร้อนแบบการนำ

การส่งผ่านความร้อนแบบการพา

รูปที่ 2.1 ลักษณะการนำและการพาความร้อนในอาหารกระป๋อง จุด x เป็นจุดที่ความร้อนเข้าถึงช้าที่สุด

มีการแบ่งชนิดของอาหารตามลักษณะการถ่ายเทความร้อนและลักษณะการบรรจุของอาหารกระป๋องไว้ดังนี้คือ

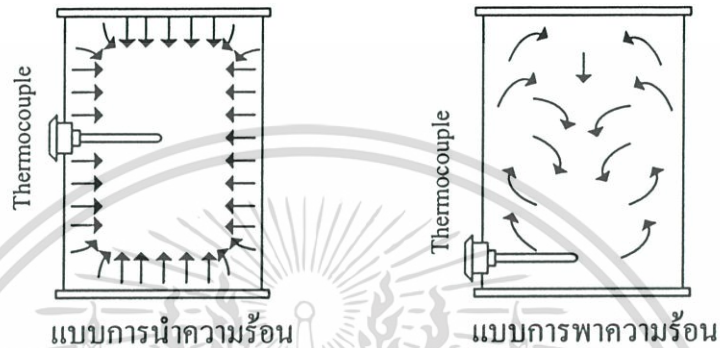
- ผลิตภัณฑ์ที่มีการถ่ายเทความร้อนแบบการพาอย่างรวดเร็วตลอดระยะเวลาการฆ่าเชื้อเช่น น้ำผัก น้ำผลไม้ นม ผลไม้บรรจุในน้ำเชื่อม ผักบรรจุน้ำเกลือ เนื้อสัตว์บรรจุในน้ำเกลือ ซึ่งผลิตภัณฑ์เหล่านี้ ถ้ามีชิ้นใหญ่จะมีการพาความร้อนช้าลง
- ผลิตภัณฑ์ที่มีการถ่ายเทความร้อนแบบการพาแต่ช้ากว่าแบบแรกเช่น ผลิตภัณฑ์ผักผลไม้หรือเนื้อสัตว์ที่บรรจุแน่นขึ้น ทำให้มีน้ำซึ่งเป็นตัวพาความร้อนลดลง
- ผลิตภัณฑ์ที่มีการถ่ายเทความร้อนเปลี่ยนจากการพาความร้อนเป็นการนำความร้อนในระหว่างการฆ่าเชื้อเช่น นมอะซิโตน ชูปังบางชนิด หรืออาหารที่มีแข็งเป็นส่วนประกอบอยู่มาก
- ผลิตภัณฑ์ที่มีการถ่ายเทความร้อนแบบการนำตลอดเช่น ผักที่บรรจุแน่น โดยไม่มีช่องเหลวครีมชูปัง ผลิตภัณฑ์ในซอสข้น แยม เป็นต้น
- ผลิตภัณฑ์ที่มีการถ่ายเทความร้อนแบบการนำ แล้วเป็นการพาความร้อนในช่วงหลังของการให้ความร้อน พบได้ในอาหารที่มีการละลายของเจล เช่น พุดดิ้งและน้ำมะเขือเทศบางชนิด

จากลักษณะของอาหารเช่น ขนาดของชิ้นอาหาร ความหนืด จะมีผลต่อการถ่ายเทความร้อนภายในอาหารแล้ว ยังมีปัจจัยอื่นที่เกี่ยวข้องด้วยได้แก่ รูปร่างและขนาดของภาชนะบรรจุ ลักษณะการจัดเรียงชิ้นอาหาร วิธีการฆ่าเชื้อ เป็นต้น

### 2.1.2.2 ความร้อนในภาชนะบรรจุอาหาร

การศึกษาความร้อนที่ใช้เพื่อทำลายจุลินทรีย์ในอาหารที่บรรจุในภาชนะปิด จะต้องทราบเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ลักษณะการแผ่กระจายของความร้อนในอาหารซึ่งบรรจุอยู่ในภาชนะเพื่อให้สามารถคำนวณไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การใช้อุณหภูมิและเวลาฆ่าเชื้อได้ถูกต้องเหมาะสม โดยทั่วไปนั้นจะทำการศึกษาหาจุดใดจุดหนึ่งในภาชนะซึ่งเป็นส่วนที่ได้รับความร้อนน้อยที่สุด (Cold spot or Critical point) ถ้าให้ความร้อนกับจุดนี้ไม่เพียงพออาจทำให้จุลินทรีย์ยังมีชีวิตอยู่ต่อไปได้ ดังนั้นการใช้จุดที่ได้รับความร้อนน้อยที่สุดนี้เป็นหลักการในการหาอุณหภูมิและเวลาในการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ได้โดยสมบูรณ์ จึงกล่าวได้ว่าจุดอื่นๆ ภายในภาชนะบรรจุอาหารก็ได้รับความร้อนซึ่งเพียงพอต่อการทำลายเชื้อจุลินทรีย์เช่นกัน



รูปที่ 2.2 การวัดจุดที่เย็นที่สุดในอาหารกระป๋องที่บรรจุอาหารแข็งและเหลว

จากรูปที่ 2.2 สามารถวัดค่าของการแผ่กระจายความร้อนได้โดยใช้เครื่องมือที่เรียกว่า เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) สอดเข้าไปในจุดที่เย็นที่สุดเพื่อบันทึกเวลาและอุณหภูมิมีจุดนั้นในขณะฆ่าเชื้อ

### 2.1.3 กระบวนการผลิตอาหารกระป๋อง

การผลิตอาหารกระป๋องประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆ ดังนี้คือ

- การเตรียมวัตถุดิบ (Prepare raw material)

ขั้นตอนนี้จะมีความแตกต่างกันไปตามชนิดของวัตถุดิบที่ใช้ เริ่มจากการทำความสะอาดวัตถุดิบเพื่อกำจัดสิ่งสกปรกหรือสิ่งแปลกปลอมออกไป แล้วทำการคัดขนาดและความแก่อ่อนเพื่อความสม่ำเสมอของคุณภาพผลิตภัณฑ์ จากนั้นจึงทำการตัดแต่งส่วนที่ไม่ต้องการออกไป

- การลวกด้วยน้ำร้อน (Blanching)

มีหลายวิธีทั้งการจุ่มวัตถุดิบลงในน้ำเดือดหรือการนึ่งด้วยไอน้ำ ในโรงงานอุตสาหกรรมอาหารจะมีเครื่องมือเฉพาะที่ใช้สำหรับลวกวัตถุดิบเรียกว่า Blancher ซึ่งสามารถควบคุมอุณหภูมิและเวลาได้อย่างเหมาะสม

- การบรรจุ (Filling)

เป็นขั้นตอนการนำวัตถุดิบบรรจุลงในภาชนะบรรจุที่ทำจากขวดแก้วหรือกระป๋องโลหะ โดยจะบรรจุส่วนที่เป็นของแข็งลงไปก่อนแล้วจึงบรรจุส่วนที่เป็นของเหลว

- การไล่อากาศ (Exhausting)

เป็นขั้นตอนการไล่อากาศในภาชนะบรรจุออกไปให้มากที่สุดเพื่อวัตถุประสงค์ต่อไปนี้คือ

- ลดแรงดันภายในภาชนะบรรจุอาหาร
- รักษาคุณภาพของอาหาร
- ช่วยให้เก็บอาหารกระป๋องได้นาน

- การปิดผนึก (Sealing)

สำหรับกระป๋องโลหะจะมีการยึดกันระหว่างฝาและขอบกระป๋องหลังการผนึกเป็นแบบตะเข็บคู่ ถ้าเป็นขวดแก้วจะใช้ฝาเหล็กเคลือบดีบุกแบบหมุนเกลียวหรือตะเข็บงอ

- การฆ่าเชื้อ (Processing)

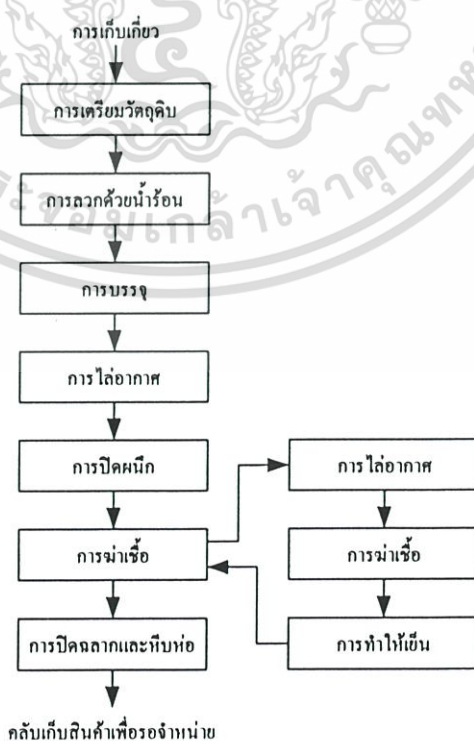
หมายถึงการใช้ความร้อนทำลายจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในอาหาร ซึ่งบรรจุอยู่ในภาชนะปิดสนิท รายละเอียดต่างๆ ในส่วนนี้จะกล่าวในตอนต่อไป

- การทำให้เย็น (Cooling)

มีจุดประสงค์เพื่อป้องกันการสูญเสียคุณภาพของอาหารเนื่องจากความร้อนส่วนเกิน โดยการลดอุณหภูมิของอาหารหลังการฆ่าเชื้อแล้วลงอย่างรวดเร็วด้วยน้ำเย็นจนอุณหภูมิลดลงถึงระดับหนึ่งซึ่งยังมีความร้อนเหลืออยู่พอที่จะทำให้ผิวนอกของกระป๋องแห้งสนิทปราศจากหยดน้ำที่เกาะอยู่บนกระป๋องเพื่อป้องกันการเกิดสนิมบนกระป๋องขณะเก็บรักษา

- การปิดฉลากและบรรจุหีบห่อ (Labeling)

เป็นขั้นตอนสุดท้ายของการผลิต ก่อนที่จะจัดจำหน่ายผลิตภัณฑ์ไปสู่ผู้บริโภคต่อไป



รูปที่ 2.3 แสดงขั้นตอนของกระบวนการผลิตอาหารกระป๋อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.4 กระบวนการฆ่าเชื้ออาหารกระป๋อง

จุดมุ่งหมายของการฆ่าเชื้ออาหารกระป๋อง คือทำให้อาหารนั้นอยู่ในสภาพปลอดเชื้อแบบเชิงการค้า หมายความว่าทำให้อาหารปราศจากเชื้อโรคที่เป็นอันตรายต่อผู้บริโภค และไม่มีจุลินทรีย์ที่เป็นสาเหตุของการเน่าเสียของอาหาร ซึ่งสามารถจะเจริญเติบโตในอาหารภายใต้สภาวะอุณหภูมิในการเก็บรักษาปกติ นั่นคือเก็บรักษาไว้ได้นานที่อุณหภูมิห้องโดยไม่เน่าเสีย

ในการรักษาระดับอุณหภูมิและปริมาณความร้อนที่ต้องการใช้เพื่อทำลายจุลินทรีย์และสปอร์ที่ปนเปื้อนมาในอาหาร จุลินทรีย์และสปอร์ที่ศึกษากันมาก คือ กลอสทริเดียมโบทูลินัม (*Clostridium botulinum*) เพราะเป็นจุลินทรีย์ที่สามารถเจริญเติบโตในที่ที่ไม่มีอากาศที่อุณหภูมิปกติ และสร้างสารพิษที่เป็นอันตรายต่อชีวิตมนุษย์ นอกจากนี้ยังสามารถสร้างสปอร์ที่ทนความร้อนได้ดี จากผลการศึกษากระบวนการฆ่าเชื้อในอาหารเพื่อความปลอดภัยในการบริโภคต้องให้ความร้อนเพื่อทำลายสปอร์ของจุลินทรีย์ชนิดนี้ ให้มีอัตราการเหลือรอดไม่เกินหนึ่งในล้านล้าน ( $10^{-12}$ ) และเพื่อให้อาหารกระป๋องมีคุณภาพคงที่ในระหว่างการเก็บรักษา ต้องกำหนดให้สปอร์ของจุลินทรีย์พวก Thermophilic bacteria มีอัตราการเหลือรอดไม่เกินหนึ่งในร้อย ( $10^{-2}$ ) ซึ่งสูงกว่าอัตราการเหลือรอดของจุลินทรีย์ กลอสทริเดียมโบทูลินัม เพราะ Thermophilic bacteria ที่ปนเปื้อนในอาหารนั้นไม่เป็นอันตรายต่อผู้บริโภคแต่ทำให้คุณภาพของอาหารเสียลงไป และจุลินทรีย์เหล่านี้จะเจริญเติบโตที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส ซึ่งสูงกว่าอุณหภูมิปกติที่ใช้ในการเก็บรักษาอาหารกระป๋อง

2.1.4.1 การกำหนดอุณหภูมิและเวลาสำหรับกระบวนการฆ่าเชื้อ จุลินทรีย์และสปอร์ ในอาหารกระป๋องจะต้องพิจารณาจาก

- คุณสมบัติในการต้านทานความร้อน (Heat Resistance) ของจุลินทรีย์และสปอร์ในอาหารกระป๋อง จุลินทรีย์และสปอร์มีคุณสมบัติต้านทานความร้อนได้มากน้อยเพียงใดขึ้นกับปัจจัยต่างๆ ดังนี้
- ชนิดและจุลินทรีย์และสปอร์เริ่มต้น
- อายุของจุลินทรีย์
- อุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์และสปอร์
- ลักษณะของอาหาร
- ความเป็นกรดและด่างของอาหาร

2.1.4.2 การถ่ายเทความร้อน (Heat Penetration) ณ จุดรับความช้าที่สุดของอาหารกระป๋องในการฆ่าเชื้อ ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนของอาหารกระป๋องได้แก่

- น้ำหนักบรรจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้วงเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

- ความขุ่นหนืดของผลิตภัณฑ์

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ต่อสาธารณะ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- อัตราส่วนของแข็งต่อของเหลวที่บรรจุในกระป๋อง
- ชนิด ขนาด รูปร่าง และการเรียงผลิตภัณฑ์ในกระป๋อง
- ตำแหน่งของกระป๋องในหม้อฆ่าเชื้อ
- ช่องว่างเหนืออาหารกระป๋อง
- ขนาด และรูปร่างของภาชนะบรรจุ

## 2.1.5 การกระจายความร้อนภายในอาหารกระป๋อง

### 2.1.5.1 การระบายอากาศของหม้อฆ่าเชื้อ (Venting of Retort)

ในช่วงเวลาเริ่มต้นของการระบายอากาศในหม้อฆ่าเชื้อ หม้อฆ่าเชื้อเริ่มมีอุณหภูมิสูงขึ้น เนื่องจากได้รับความร้อนจากไอน้ำที่ป้อนเข้าหม้อฆ่าเชื้อ อากาศที่อยู่ภายในจะเริ่มมีอุณหภูมิสูงขึ้น และถูกระบายออกจากหม้อฆ่าเชื้อทางท่อระบายอากาศทางด้านบน ไอน้ำที่เข้ามาแทนที่อากาศภายในหม้อฆ่าเชื้อทำให้อุณหภูมิของหม้อฆ่าเชื้อสูงขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งถึงอุณหภูมิที่ใช้ในการฆ่าเชื้อ ซึ่งจะถือว่าเป็นการสิ้นสุดของช่วงเวลาในการไล่อากาศภายในหม้อฆ่าเชื้อ ส่วนน้ำที่ได้จากการกลั่นตัว (Condensate) จะถูกกำจัดออกโดยกับดักไอน้ำ (Steam Trap) ออกทางส่วนล่างของหม้อฆ่าเชื้อ

การระบายอากาศที่อยู่ภายในหม้อฆ่าเชื้อจะปรากฏว่าอากาศที่อยู่ตามช่องว่างระหว่างกระป๋องจะถูกระบายออกไปได้ช้ากว่าอากาศที่อยู่ตามช่องว่างระหว่างตะกร้ากับผนังหม้อฆ่าเชื้อ โดยเฉพาะอากาศที่อยู่บริเวณกระป๋องที่อยู่กลางๆ มักถูกระบายออกได้ยาก ดังนั้นถ้าทางระบายอากาศไม่ถูกเปิดออกให้กว้างเต็มที่ในเวลานานเพียงพอก็จะมีอากาศบางส่วนที่แทรกอยู่ในบริเวณช่องว่างระหว่างกระป๋อง

ปัญหาของการระบายอากาศขึ้นอยู่กับ การเปิดทางระบายอากาศที่กว้างเต็มที่ในเวลายาวนานเท่าใดจึงจะเป็นที่แน่ใจว่า อากาศทั้งหมดถูกไล่ออกจากภายในหม้อฆ่าเชื้อหมดก่อนที่จะนำไปสู่อุณหภูมิฆ่าเชื้อ ปัญหาการระบายอากาศนั้น ไม่สามารถประเมินได้จากการสังเกตอุณหภูมิหม้อฆ่าเชื้อ ในทางปฏิบัติอุณหภูมิที่ทำการไล่อากาศมักสูงกว่า 100 องศาเซลเซียส ในช่วงเวลาที่อุณหภูมิเกิน 100 องศาเซลเซียส อุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นค่อนข้างช้าและมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ อย่างไรก็ตามกราฟบันทึกอุณหภูมิที่ตู้ควบคุม ซึ่งอ่านได้ในช่วงเวลาก่อนถึงอุณหภูมิฆ่าเชื้อ ไม่อาจแสดงถึงผลการระบายอากาศได้สมบูรณ์

ในช่วงเวลาสุดท้ายของการระบายอากาศ เมื่อเปิดทางระบายอากาศ อุณหภูมิภายในหม้อฆ่าเชื้อจะสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว และค่อยๆ ซาลงเมื่อใกล้ถึงอุณหภูมิฆ่าเชื้อ ในขั้นนี้ถือว่ามิเฉพาะไอน้ำบริสุทธิ์เข้าหม้อฆ่าเชื้อ ฉะนั้นอุณหภูมิจะแปรผันกับความดัน แต่ก็ไม่ได้หมายความว่า ได้ทำการไล่อากาศอย่างสมบูรณ์ วิธีการตรวจสอบการไล่อากาศจะพิจารณาจากข้อมูลการกระจายความร้อนภายในหม้อฆ่าเชื้อ ซึ่งพบว่าบริเวณที่มีอากาศคั่งค้างอยู่ทำให้ไอน้ำเข้าไม่ถึง และการไหลเวียนของ

ไอน้ำไม่ดี พอทำให้อุณหภูมิในบริเวณนั้นต่ำกว่าบริเวณอื่น แต่ความดันและอุณหภูมิหม้อฆ่าเชื้อคงที่ ในหม้อฆ่าเชื้อแบบตั้งมักพบว่าจุดที่มีอุณหภูมิต่ำจะอยู่บริเวณกึ่งกลาง แต่ในหม้อฆ่าเชื้อแบบนอนไม่สามารถบอกได้ว่าอยู่ที่จุดใดเพราะมีความแตกต่างกันในการวางตำแหน่งของอุปกรณ์

### 2.1.5.2 การประเมินเวลาที่ใช้ในการระบายอากาศในเครื่องฆ่าเชื้อ

#### (Establishment of Venting Time in Retort)

การกำหนดเวลาที่ใช้ในการระบายอากาศในหม้อฆ่าเชื้อที่จะกล่าวถึงในที่นี้ ได้เน้นเกี่ยวกับการกระจายความร้อนไปยังจุดต่างๆ ทุกจุดภายในหม้อฆ่าเชื้อเมื่อทำการบรรจุกระป๋องเต็มที่ เพื่อให้ได้มาซึ่งอุณหภูมิของจุดต่างๆ ภายในหม้อฆ่าเชื้อจึงใช้เทอร์โมคัปเบิลเสียบจากแหล่งวัดอุณหภูมิแล้วให้ปลายสายกระจายไปยังจุดต่างๆ ในหม้อฆ่าเชื้ออย่างน้อย 6 จุดหรือมากกว่าจุดที่วัดนั้นเราพิจารณาแล้วว่าควรเป็นจุดที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดอื่นๆ

ในการดำเนินการทดลองเพื่อหาเวลาที่ใช้ในการไล่อากาศจะกระทำกับสภาพต่างๆ ดังต่อไปนี้

- เมื่อเกิดสภาพการไหลของไอน้ำต่ำที่สุด (The lowest rate of steam flow)
- เมื่อใช้กระป๋องขนาดเล็กที่สุด (The smallest can size)
- เมื่อจัดเรียงกระป๋องให้แน่นที่สุด (The tightest arrangement of can)
- เมื่อใช้แผ่นกั้นแบ่ง (Divider plate)
- เมื่อจำนวนหม้อฆ่าเชื้อที่ทำการไล่อากาศพร้อมกันสูงสุด

ในการปฏิบัติขณะทดลองไล่อากาศ สิ่งที่ต้องคำนึงถึงคืออุณหภูมิเริ่มต้น (Initial temperature) ของกระป๋องต้องเท่ากัน หรือแตกต่างกันไม่เกิน 5 องศาเซลเซียส แล้วเริ่มเปิดไอน้ำไล่อากาศตามวิธีที่กำหนด เมื่อไล่อากาศหมดแล้วอ่านอุณหภูมิของเทอร์โมคัปเบิลแต่ละตัวว่าที่อุณหภูมิเท่ากันหรือไม่ ในทางปฏิบัติมักพบว่าที่จุดต่างๆ ได้อุณหภูมิไม่ค่อนเท่ากัน ถ้าทำการนำอุณหภูมิขึ้นสู่อุณหภูมิฆ่าเชื้อเร็วไป และที่อุณหภูมิที่แตกต่างกันดังกล่าวนี้ไม่ควรแตกต่างกันเกินกว่า 2 องศาเซลเซียส จึงจะถือได้ว่าการไล่อากาศสมบูรณ์

### 2.1.5.3 การทดสอบการกระจายความร้อนในหม้อฆ่าเชื้อ

#### (Temperature Distribution Test)

การทดสอบการกระจายความร้อนภายในหม้อฆ่าเชื้อจะแสดงให้เห็นทราบว่าอากาศที่อยู่ภายในหม้อฆ่าเชื้อถูกระบายออกหมดในทางทฤษฎี หรือมีปริมาณที่ไม่ก่อความเสียหายกับกระบวนการฆ่าเชื้อ เพื่อใช้ประเมินเวลาที่ใช้ในการไล่อากาศออกได้หมดตามอุณหภูมิที่กำหนด (อุณหภูมิไล่อากาศที่กำหนดสูงกว่า 100 องศาเซลเซียส) การพิจารณาผลของการกระจายความร้อน โดยการพิจารณา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากค่าความสม่ำเสมอของอุณหภูมิ (Uniformity) และค่าความเสถียรภาพของอุณหภูมิ (Stability) ซึ่งถูกนำมาใช้พิจารณาในช่วงเวลาฆ่าเชื้อ (Processing Time)

ค่าความสม่ำเสมอของอุณหภูมิ คือค่าความแตกต่างของอุณหภูมิที่มีค่าสูงสุดกับอุณหภูมิที่มีค่าต่ำสุดจากเทอร์โมคัปเปิลภายในหม้อฆ่าเชื้อ ถ้าค่าผลต่างนี้มีค่าประมาณ 1 องศาเซลเซียส แสดงว่าการไล่อากาศทำได้สมบูรณ์

$$R_T = |T_{\max} - T_{\min}| \quad (2.1)$$

เมื่อ  $R_T$  เป็นค่าความสม่ำเสมอของอุณหภูมิ,  $T_{\max}$  เป็นค่าอุณหภูมิสูงสุดและ  $T_{\min}$  เป็นค่าอุณหภูมิต่ำสุด

ค่าความเสถียรภาพของอุณหภูมิ คือค่าเฉลี่ยของความแตกต่างของอุณหภูมิทุกๆ ตำแหน่งกับค่าอุณหภูมิเฉลี่ยที่เวลานั้นๆ ซึ่งค่านี้บอกให้ทราบว่าอุณหภูมิที่เวลาต่างๆ ในช่วงเวลาการฆ่าเชื้อมีความคงที่มากน้อยเพียงใด

$$R_T^* = \left( \sum_{j=1}^n |T_j - T_{av}| \right) / n \quad (2.2)$$

$$T_{av} = \left( \sum_{j=1}^n T_j \right) / n \quad (2.3)$$

เมื่อ  $R_T^*$  เป็นค่าความเสถียรภาพของอุณหภูมิ,  $T_j$  เป็นค่าอุณหภูมิกระป๋องใดๆ,  $T_{av}$  เป็นค่าอุณหภูมิเฉลี่ยและ  $n$  เป็นจำนวนจุดที่ทำการวัด

#### 2.1.5.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการกระจายความร้อนภายในหม้อฆ่าเชื้อ

##### (Critical Factors that Affect Temperature Distribution in Retort)

- อุณหภูมิเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์ (Initial Temperature) ในสภาวะที่อุณหภูมิเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์มีค่าต่ำ เช่น ในกรณีที่อุณหภูมิบรรยากาศมีค่าต่ำในประเทศแถบยุโรป ทำให้ต้องกำหนดช่วงเวลาที่ใช้ในการไล่อากาศนานขึ้น
- ลักษณะการออกแบบหม้อฆ่าเชื้อและอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง (Retort Design) ลักษณะและรูปร่างของหม้อฆ่าเชื้อแต่ละตัว มีผลต่อการกระจายความร้อน รวมไปถึงการวางตำแหน่งอุปกรณ์ต่างๆ ขนาดของท่อที่ติดตั้งเข้ากับตัวถังของหม้อฆ่าเชื้อควรเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ การติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ หรือการเจาะรูตัวถังหม้อฆ่าเชื้อเพิ่มเติม จะมีผลต่อการกระจายความร้อนของไอน้ำ ดังนั้นจึงต้องทำการทดสอบการกระจายความร้อนใหม่
- ปริมาณการบรรจุ (Number of Container) ช่วงเวลาการไล่อากาศจะมีค่าน้อยลง ถ้าปริมาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ใดๆ การค้า การบรรจุ น้อยก็จะลดเวลาที่ใช้ในการไล่อากาศ แต่ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการฆ่าเชื้อในไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

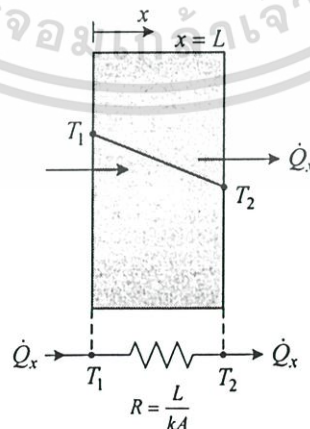
แต่ครั้งก็จะมีค่าน้อยลงด้วย ดังนั้นควรหาจุดที่เหมาะสมระหว่างเวลาที่ใช้ในการทำงานแต่ละครั้ง แต่ในการทำงานจริงมักจะบรรจุกระป๋องเข้าไปจนเต็มแล้วใช้ความดันไอน้ำสูงๆ เพื่อลดเวลาช่วงการไล่อากาศให้น้อยลงเพื่อสามารถฆ่าเชื้อผลิตภัณฑ์ให้ได้ปริมาณมาก ใช้เวลาน้อย เพื่อเป็นการลดต้นทุนค่าแรงงาน

- ขนาดและรูปร่างของกระป๋อง (Size and Dimension of Can) การกระจายความร้อนภายในหม้อฆ่าเชื้อขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างของกระป๋อง การใช้กระป๋องขนาดเล็กจะทำให้เวลาที่ใช้ในการกระจายความร้อนภายในหม้อฆ่าเชื้อเพิ่มขึ้น
- การจัดเรียงกระป๋องในตะกร้า (Can Configuration) การจัดเรียงกระป๋องและการใช้แผ่นกั้น (Divider Plate) ในการฆ่าเชื้อมีผลต่อการกระจายความร้อนในหม้อฆ่าเชื้อเป็นอย่างมาก เนื่องจากการจัดเรียงกระป๋องและการใช้แผ่นกั้นเป็นสิ่งที่กำหนดทางเดินของกระแสของไอน้ำจากรอบๆ ตะกร้าและท่อไอน้ำไปสู่กระป๋องที่อยู่ภายในตะกร้า ตัวอย่างเช่น กรณีที่ใช้แผ่นกั้นไอน้ำไม่สามารถไหลผ่านชั้นลงระหว่างแต่ละชั้นของกระป๋องได้สะดวก ทำให้เวลาในการไล่อากาศนานขึ้น และการกระจายความร้อนเลวลง หรือในกรณีการจัดเรียงกระป๋องแบบสลับ (ลักษณะเหมือนการก่อกอง) ไอน้ำจะไหลเข้าสู่ภายในตะกร้าได้ช้ากว่าในกรณีเรียงแบบวางซ้อนกันตรงๆ เพราะกรณีการเรียงแบบสลับกระป๋องเป็นตัวขัดขวางการไหลของไอน้ำเข้าสู่ภายในตะกร้า

## 2.1.6 การนำความร้อนภายใต้สภาวะคงตัว

### 2.1.6.1 การนำความร้อนผ่านผนังแผ่นระนาบ

การพิจารณาการนำความร้อนผ่านแผ่นระนาบหนา  $L$  ภายใต้สภาวะคงตัวในพิกัดฉากบนแกน  $x$  ไม่มีแหล่งผลิตความร้อนในแผ่นระนาบนั้น จะได้การกระจายอุณหภูมิเป็นสมการเชิงเส้นดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 การเปรียบเทียบการนำความร้อนกับวงจรทางไฟฟ้า

เมื่อ  $Q_x$  เป็นอัตราการไหลของความร้อน,  $L$  เป็นความยาวของตัวกลาง,  $A$  เป็นพื้นที่ผิวของตัวกลางและ  $T_1, T_2$  เป็นอุณหภูมิใดๆ ( $T_1 > T_2$ ) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หากเปรียบเทียบกับวิชาทางไฟฟ้า อัตราความร้อนไหลผ่านตัวกลาง ( $\dot{Q}_x$ ) เปรียบเสมือนเป็นกระแสไฟฟ้า ผลต่างของอุณหภูมิเปรียบเสมือนความต่างศักย์ไฟฟ้า ในส่วนของ  $L/kA$  ในสมการฟูเรียร์เปรียบเสมือนค่าความต้านทาน จากกฎของฟูเรียร์

$$q_x'' = -k \frac{dT}{dx} = -k \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (2.4)$$

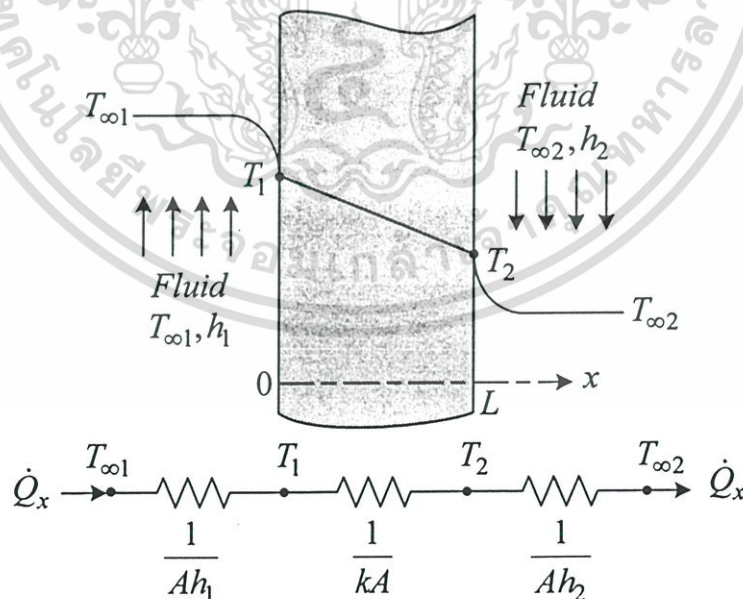
$$\frac{\dot{Q}_x}{A} = -\frac{k}{L}(T_2 - T_1) \quad (2.5)$$

$$\dot{Q}_x = \frac{(T_2 - T_1)}{(L/kA)} = \frac{(T_2 - T_1)}{R_{cond}} \quad (2.6)$$

โดยที่  $L/kA$  เรียกว่าความต้านทานต่อการนำความร้อนมีหน่วยเป็น K/W ดังนั้น

$$R_{cond} = \frac{L}{kA} \quad (2.7)$$

### 2.1.6.2 การวิเคราะห์การนำความร้อนของแผ่นระนาบที่ผิวทั้งสองด้านสัมผัสกับของไหล



รูปที่ 2.5 เปรียบเทียบการนำความร้อนของแผ่นระนาบกับวงจรไฟฟ้า

โดยที่  $T_{\infty 1}, T_{\infty 2}$  เป็นอุณหภูมิของของไหลที่บริเวณทางด้านผิว  $x=0$  และ  $x=L$  ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$h_1, h_2$  เป็นสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของของไหลที่ผิว  $x=0$  และ  $x=L$  ตามลำดับ

ที่ผิว  $x = 0$

$$\dot{Q}_x = h_1 A (T_{\infty 1} - T_1) \quad (2.8)$$

ในแผ่นระนาบ

$$\dot{Q}_x = \frac{kA}{L} (T_1 - T_2) \quad (2.9)$$

ที่ผิว  $x = L$

$$\dot{Q}_x = h_2 A (T_2 - T_{\infty 2}) \quad (2.10)$$

ดังนั้น

$$T_{\infty 1} - T_1 = \left( \frac{1}{h_1 A} \right) \dot{Q}_x \quad (2.11)$$

$$T_1 - T_2 = \left( \frac{L}{kA} \right) \dot{Q}_x \quad (2.12)$$

$$T_2 - T_{\infty 2} = \left( \frac{1}{h_2 A} \right) \dot{Q}_x \quad (2.13)$$

จัดสมการใหม่จะได้

$$\dot{Q}_x = \frac{(T_2 - T_{\infty 2})}{\frac{1}{h_1 A} + \frac{L}{kA} + \frac{1}{h_2 A}} = \frac{(T_2 - T_{\infty 2})}{R_{tot}} \quad (2.14)$$

โดยที่  $R_{tot}$  คือความต้านทานรวม มีหน่วยเป็น K/W ซึ่ง

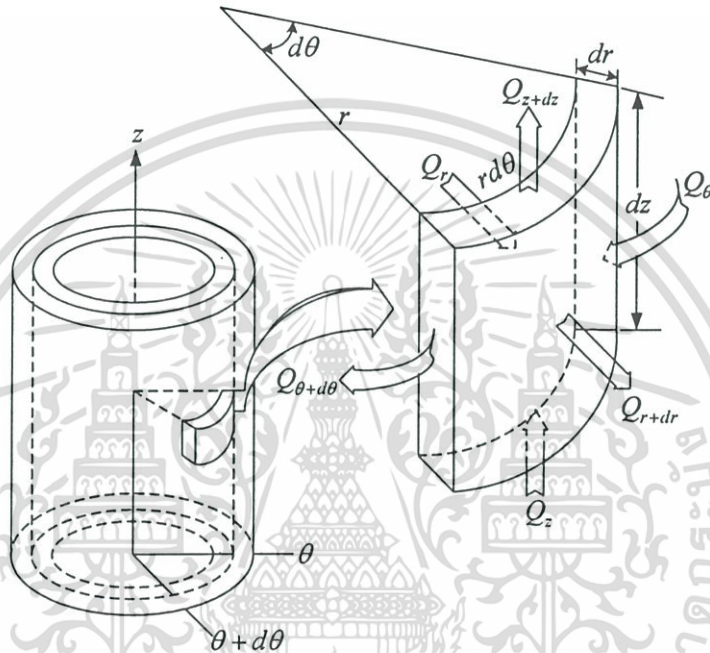
$$R_{tot} = R_{conv1} + R_{cond} + R_{conv2} \quad (2.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_{tot} = \frac{1}{h_1 A} + \frac{L}{kA} + \frac{1}{h_2 A} \tag{2.16}$$

โดยที่  $R_{conv}$  เรียกว่าความต้านทานต่อการพาความร้อน มีหน่วยเป็น K/W

2.1.6.3 การนำความร้อนในพิกัดทรงกระบอก



รูปที่ 2.6 การนำความร้อนในพิกัดทรงกระบอก

พิจารณาการนำความร้อนผ่านผนังทรงกระบอกภายใต้สภาวะคงที่และไม่มีแหล่งผลิตความร้อนในพิกัด r เท่านั้น พบว่า

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) = 0 \tag{2.17}$$

สมมติให้ตัวกลางมี k เป็นค่าคงที่ จะได้

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) = 0 \tag{2.18}$$

อินทิเกรตครั้งแรก

$$r \frac{dT}{dr} = C_1 \tag{2.19}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อินทิเกรตครั้งที่ 2

$$T = C_1 \ln r + C_2 \quad (2.20)$$

เงื่อนไขขอบเขตที่ 1 (BC 1) :  $T = T_{s1}$  ที่  $r = r_1$ , เงื่อนไขขอบเขตที่ 2 (BC 2) :  $T = T_{s2}$  ที่  $r = r_2$  ดังนั้น

$$T_{s1} = C_1 \ln r_1 + C_2 \quad (2.21)$$

$$T_{s2} = C_1 \ln r_2 + C_2 \quad (2.22)$$

$$C_1 = \frac{T_{s1} - T_{s2}}{\ln(r_1/r_2)} \quad (2.23)$$

$$C_2 = T_{s2} - \frac{T_{s1} - T_{s2}}{\ln(r_1/r_2)} \ln r_2 \quad (2.24)$$

$$T = \frac{T_{s1} - T_{s2}}{\ln(r_1/r_2)} \ln r + T_{s2} - \frac{T_{s1} - T_{s2}}{\ln(r_1/r_2)} \ln r_2 \quad (2.25)$$

$$T = \frac{T_{s1} - T_{s2}}{\ln(r_1/r_2)} \ln \frac{r}{r_2} + T_{s2} \quad (2.26)$$

อัตราการนำความร้อนผ่านผนังทรงกระบอก

$$\dot{Q}_r = -kA \frac{dT}{dr} = -k(2\pi rL) \frac{dT}{dr} \quad (2.27)$$

$$\dot{Q}_r = -k(2\pi rL) \frac{T_{s1} - T_{s2}}{\ln(r_1/r_2)} \left( \frac{1}{r} \right) \quad (2.28)$$

$$\dot{Q}_r = \frac{(T_{s1} - T_{s2})}{\ln(r_2/r_1)/2\pi Lk} = \frac{(T_{s1} - T_{s2})}{R_{cond}} \quad (2.29)$$

เอกสารโดยที่  $R_{cond}$  คือความต้านทานการนำความร้อนผ่านผนังทรงกระบอก มีหน่วยเป็น K/W  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_{cond} = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi Lk} \quad (2.30)$$

## 2.2 ทฤษฎีเกี่ยวกับระบบควบคุม

ตัวควบคุมอัตโนมัติที่ใช้ในระบบควบคุมจะทำหน้าที่เปรียบเทียบหาค่าความแตกต่าง (ค่าความคลาดเคลื่อน) ระหว่างค่าของเอาต์พุตจริงของระบบกับค่าของอินพุตอ้างอิง (ค่าที่ต้องการ) จากนั้นจะสร้างสัญญาณควบคุมขึ้นเพื่อที่จะไปทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนมีค่าลดลงจนเป็นศูนย์ หรือมีค่าน้อยที่สุด ลักษณะของการสร้างสัญญาณควบคุมของตัวควบคุมอัตโนมัตินี้จะเรียกว่า กิริยาการควบคุม (Control action) ในส่วนนี้จะกล่าวถึงการควบคุมแบบอัตโนมัติที่ใช้ศึกษาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แก่

### 2.2.1 การควบคุมอัตโนมัติแบบต่างๆ

ตัวควบคุมอัตโนมัติที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมสามารถจำแนกออกได้ตามลักษณะของกิริยาการควบคุมดังนี้

1. ตัวควบคุมแบบสองตำแหน่ง (Two-position) หรือแบบ on-off
2. ตัวควบคุมแบบ Proportional
3. ตัวควบคุมแบบ Integral
4. ตัวควบคุมแบบ Proportional + Integral หรือแบบ PI
5. ตัวควบคุมแบบ Proportion + Derivative หรือแบบ PD
6. ตัวควบคุมแบบ Proportion + Integral + Derivative หรือแบบ PID

#### 2.2.1.1 ตัวควบคุมแบบสองตำแหน่งหรือแบบ on-off

ในระบบควบคุมแบบสองตำแหน่งนั้น ตัวกระทำจะทำงานในตำแหน่งที่คงที่เพียงสองตำแหน่งเท่านั้น ในบางครั้งจึงมีชื่อเรียกง่ายๆ ว่า on และ off การควบคุมแบบสองตำแหน่งหรือแบบ on-off นี้จะเป็นการควบคุมแบบง่ายๆ และราคาไม่แพง ดังนั้นจึงนิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในงานควบคุมทางอุตสาหกรรม

กำหนดให้สัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมเป็น  $m(t)$  และสัญญาณค่าความคลาดเคลื่อนเป็น  $e(t)$  ดังนั้นในการควบคุมแบบสองตำแหน่งนั้น สัญญาณ  $m(t)$  จะมีค่าอยู่เพียงค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดเท่านั้น โดยจะขึ้นอยู่กับว่าสัญญาณค่าความคลาดเคลื่อนมีค่าเป็นบวกหรือเป็นลบ นั่นคือ

$$\left. \begin{aligned} m(t) &= M_1 \text{ สำหรับ } e(t) > 0 \\ m(t) &= M_2 \text{ สำหรับ } e(t) < 0 \end{aligned} \right\} \quad (2.31)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่  $M_1$  และ  $M_2$  เป็นค่าคงที่

ค่าที่น้อยที่สุด  $M_2$  นั้น โดยทั่วไปจะมีค่าเป็นศูนย์หรือมีค่าเท่ากับ  $-M_1$  ตัวควบคุมแบบสองตำแหน่งนี้ส่วนใหญ่จะเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้า ที่นิยมใช้กันมากได้แก่ Solenoid valve แบบไฟฟ้า

### 2.2.1.2 ตัวควบคุมแบบ Proportional

สำหรับตัวควบคุมที่มีวิธีการควบคุมแบบ Proportion นั้น ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณควบคุม (เอาต์พุตของตัวควบคุม)  $m(t)$  กับสัญญาณค่าความคลาดเคลื่อน  $e(t)$  คือ

$$m(t) = K_p e(t) \quad (2.32)$$

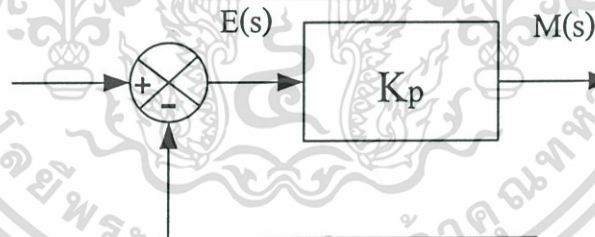
หรือ

$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_p \quad (2.33)$$

โดยที่  $K_p$  จะอยู่ในเทอมของ Proportional sensitivity หรือ Gain

ตัวควบคุมแบบ Proportional จึงต้องเป็นแอมพลิฟายที่สามารถปรับค่าของ Gain ได้ รูปที่

2.7 แสดงถึงบล็อกไดอะแกรมของตัวควบคุมแบบ Proportional ที่กล่าวมานี้



รูปที่ 2.7 บล็อกไดอะแกรมของตัวควบคุมแบบ proportional

### 2.2.1.3 ตัวควบคุมแบบ Integral

ในตัวควบคุมแบบ Integral นั้นค่าของเอาต์พุตของตัวควบคุม  $m(t)$  จะมีความสัมพันธ์กับค่าความคลาดเคลื่อน  $e(t)$  ดังนี้

$$\frac{d}{dt} m(t) = K_i e(t) \quad (2.34)$$

หรือ

$$m(t) = K_i \int_0^t e(t) dt \quad (2.35)$$

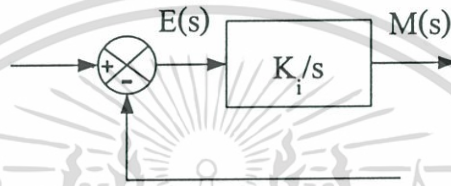
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ในท้องถิ่นเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ใดๆ (2.35) ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่  $K_i$  เป็นค่าคงที่ที่สามารถปรับค่าได้

ฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer function) ของตัวควบคุมแบบนี้คือ

$$\frac{M(s)}{E(s)} = \frac{K_i}{s} \quad (2.36)$$

กิริยาการควบคุมแบบ Integral นี้บางครั้งเรียกว่า Reset control รูปที่ 2.8 แสดงถึงบล็อกไดอะแกรมของตัวควบคุมแบบ integral



รูปที่ 2.8 บล็อกไดอะแกรมของตัวควบคุมแบบ Integral

#### 2.2.1.4 ตัวควบคุมแบบ Proportional + Integral (PI)

กิริยาการควบคุมของตัวควบคุมแบบ Proportional + Integral นั้นสามารถจะแสดงได้ด้วยสมการต่อไปนี้

$$m(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt \quad (2.37)$$

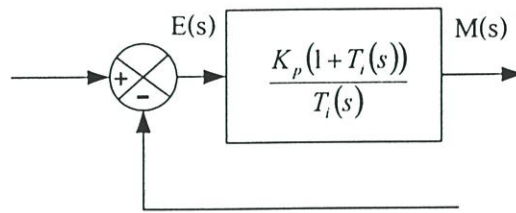
หรือ

$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i(s)} \right) \quad (2.38)$$

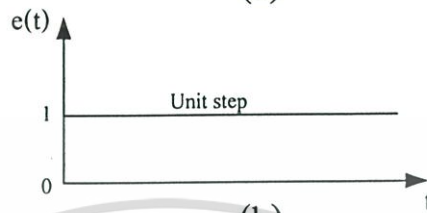
โดยที่  $K_p$  เป็นค่าของ Proportional sensitivity หรือ Gain

$T_i$  เป็นค่าของ Integral time

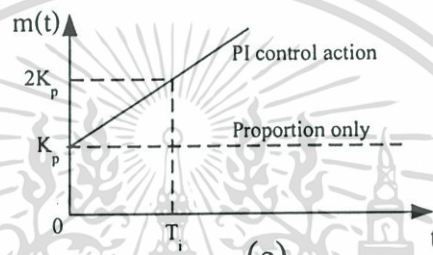
ทั้งค่า  $K_p$  และ  $T_i$  เป็นค่าที่ปรับค่าได้ โดยที่การปรับค่า  $T_i$  นั้นจะเป็นการปรับกิริยาการควบคุมแบบ Integral ส่วนการปรับค่าของ  $K_p$  นั้นจะมีผลต่อส่วน Proportional และส่วน Integral ของกิริยาการควบคุม และค่าของส่วนกลับของ  $T_i$  นั้นจะเรียกว่า Reset rate รูปที่ 2.9 แสดงถึงการควบคุมแบบ PI



(a)



(b)



(c)

รูปที่ 2.9 (a) บล็อกไดอะแกรมของตัวควบคุมแบบ PI  
 (b) อินพุตของตัวควบคุมซึ่งเป็นแบบ Unit step  
 (c) เอาต์พุตของตัวควบคุมแบบ PI เมื่ออินพุตเป็น Unit step

2.2.1.5 ตัวควบคุมแบบ Proportional + Derivative (PD)

กิริยาการควบคุมของตัวควบคุมแบบ Proportional + Derivative จะอยู่ในรูปของสมการต่อไปนี้

$$m(t) = K_p e(t) + K_p T_d \frac{d}{dt} e(t) \tag{2.39}$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบคือ

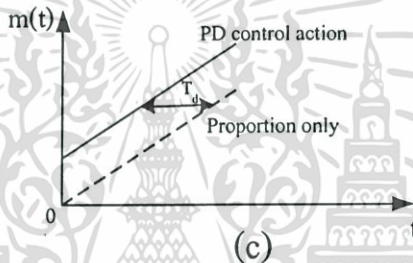
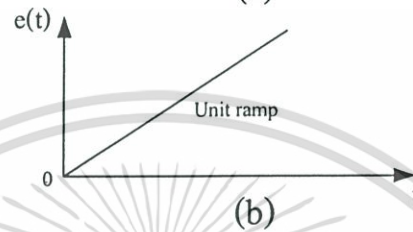
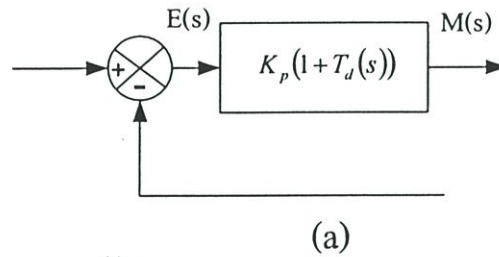
$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i(s)} \right) \tag{2.40}$$

โดยที่  $K_p$  เป็นค่าของ Proportional sensitivity หรือ Gain

$T_d$  เป็นค่าของ Derivative time

ค่าของ  $K_p$  และ  $T_d$  นั้นจะเป็นค่าที่สามารถปรับค่าได้ และในบางครั้งจะเรียกว่า กิริยาการควบคุมแบบ Derivative ว่า Rate control ทั้งนี้เพราะขนาดของสัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมจะ

เป็นส่วนสำคัญกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณค่าความคลาดเคลื่อน รูปที่ 2.10 แสดงถึงการควบคุมแบบ PD



รูปที่ 2.10 (a) บล็อกไดอะแกรมของตัวควบคุมแบบ PD  
(b) อินพุตของตัวควบคุมซึ่งเป็นแบบ Unit ramp  
(c) เอาต์พุตของตัวควบคุมแบบ PD

ถึงแม้ว่ากิริยาการควบคุมแบบ Derivative มีข้อดีคือมีคุณลักษณะของการคาดการณ์ล่วงหน้า แต่ก็มีข้อเสียคือจะขยายสัญญาณรบกวน (Noise) และอาจจะเป็นสาเหตุให้เกิดการอิ่มตัว (Saturation) ในตัวกระทำได้ นอกจากนี้ตัวควบคุมแบบ Derivative ยังไม่สามารถจะใช้ตัวเดียวโดดๆ ได้เพราะกิริยาการควบคุมของมันจะมีผลเฉพาะช่วง Transient เท่านั้น

#### 2.2.1.6 ตัวควบคุมแบบ Proportional + Integral + Derivative (PID)

กิริยาการควบคุมแบบ Proportional + Integral + Derivative หรือเรียกง่ายๆ ว่า PID นั้นได้จากการรวมเอากิริยาการควบคุมทั้งสามแบบเข้าด้วยกัน สามารถจะแสดงในรูปของสมการต่อไปนี้

$$m(t) = K_p e(t) + K_p T_d \frac{d}{dt} e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt \quad (2.41)$$

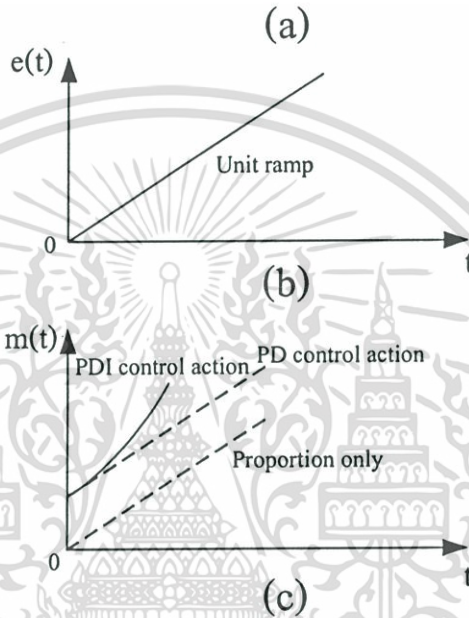
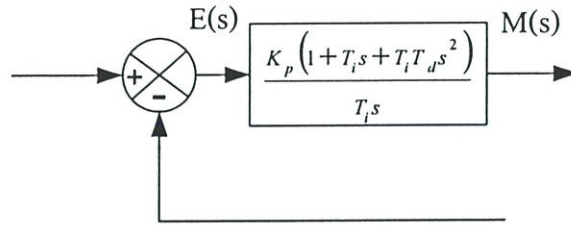
ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานใช้ทางการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องขอเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_p \left( 1 + T_d(s) + \frac{1}{T_i(s)} \right) \quad (2.42)$$

บล็อกไดอะแกรมตลอดจนอินพุตและเอาต์พุตของตัวควบคุมแบบ PID แสดงได้ดังรูปที่

2.11



รูปที่ 2.11 (a) บล็อกไดอะแกรมของตัวควบคุมแบบ PID  
 (b) สัญญาณอินพุต Unit ramp  
 (c) สัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมแบบ PID

2.2.2 การควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า (Feed Forward Control)

การควบคุมกระบวนการส่วนใหญ่นิยมใช้แบบป้อนกลับ อันที่จริง โครงสร้างที่นิยมใช้ในการควบคุมไม่ใช่มีเพียงการควบคุมแบบป้อนกลับเท่านั้น ยังมีโครงสร้างอื่นๆ อีก จุดอ่อนของการควบคุมแบบป้อนกลับคือ

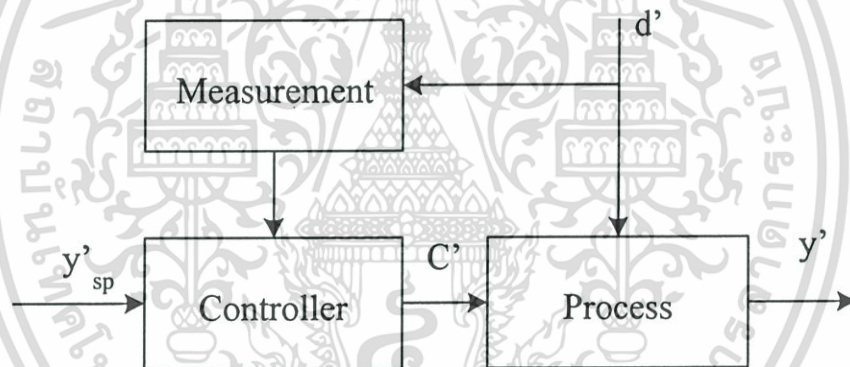
1. ระบบจะรองนกว่าเกิดความเบี่ยงเบนหรือความผิดพลาดในกระบวนการ จึงจะลงมือแก้ไข ดังนั้น โครงสร้างดังกล่าวจะไม่สามารถให้ผลการควบคุมที่สมบูรณ์แบบได้
2. การควบคุมแบบป้อนกลับไม่มีการคาดการณ์เพื่อการแก้ไขผลกระทบที่เกิดขึ้นจากสิ่งรบกวนระบบหรือการเปลี่ยนแปลงภายนอกล่วงหน้า
3. การตอบสนองของระบบควบคุมอาจไม่ดีพอในกรณีที่กระบวนการมีค่าคงที่กระบวนการ

(Time Constant) หรือค่าเวลาหน่วง (Delay Time) มากๆ โดยเฉพาะกรณีที่สิ่งรบกวน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการแต่ละครั้งมีขนาดใหญ่หรือกระบวนการถูกรบกวนบ่อยๆ เพราะกระบวนการ อาจจะไม่มีการปรับตัวเข้าสู่สภาวะคงตัวได้เลย

ดังนั้นกรณีที่การทำงานภายใต้โครงสร้างการควบคุมแบบป้อนกลับไม่เป็นที่น่าพอใจ โครงสร้างอื่นๆ อาจเข้ามามีส่วนช่วยในการปรับปรุงการตอบสนองของกระบวนการให้ดีขึ้น เช่น การใช้การควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า ในการใช้การควบคุมซึ่งมีโครงสร้างป้อนไปข้างหน้า นั้น ประเด็นที่สำคัญคือจะต้องสามารถวัดค่าหรือประมาณค่าสิ่งรบกวนกระบวนการได้

ระบบควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าเริ่มนำแนวคิดดังกล่าวมาใช้ในระบบควบคุมระดับของเหลวในหม้อไอน้ำตั้งแต่ปี ค.ศ.1925 หลักการพื้นฐานของการควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าคือ ควบคุมกระบวนการ โดยการวัดค่าตัวแปรรบกวนระบบที่มีผลกระทบต่อกระบวนการและทำการปรับเปลี่ยนตัวแปรปรับค่าได้เพื่อชดเชยกับการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในกระบวนการทันทีที่เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรรบกวนระบบ (Disturbance) ดังแสดงในรูปที่ 2.12



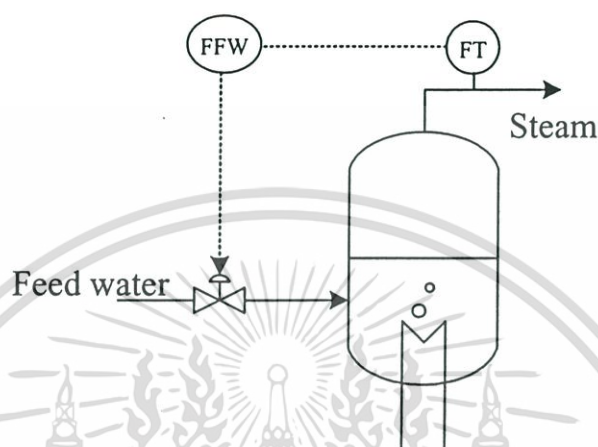
รูปที่ 2.12 ผังสัญญาณระบบควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า

การควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้ามีข้อจำกัดหลายประการเช่นคือ

1. ต้องสามารถวัดค่าสิ่งรบกวนได้แบบ On-line ซึ่งไม่สามารถทำได้ในทุกกระบวนการ
2. การใช้ระบบควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าให้มีประสิทธิภาพ ต้องมีแบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับกระบวนการ โดยคุณภาพของการควบคุมขึ้นอยู่กับคุณภาพของแบบจำลองคณิตศาสตร์ ปัจจุบันแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ใช้พัฒนาได้สมมติฐานมีอยู่มากมาย
3. สมการการควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าซึ่งจะนำไปสู่การควบคุมแบบสมบูรณ์ แต่ไม่สามารถใช้งานได้จริงในทางปฏิบัติ โดยเฉพาะกรณีที่กระบวนการมีการหน่วงเวลา

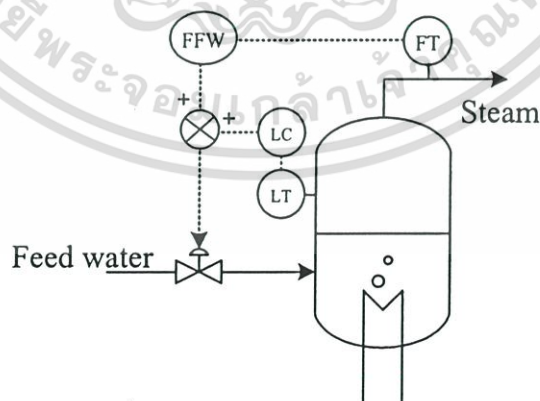
ตัวอย่างการควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าดังรูปที่ 2.13 เป็นระบบควบคุมระดับของเหลวในหม้อไอน้ำ ขั้นตอนแรกต้องพิจารณาว่าตัวแปรใดเป็นตัวแปรสำคัญที่ก่อให้เกิดความเบี่ยงเบนในกระบวนการ ในกรณีนี้คืออัตราการไหลออกของไอน้ำจากหม้อไอน้ำ ขั้นตอนที่สอง ติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าอัตราการไหลของไอน้ำเพื่อติดตามการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรรบกวนระบบ ขั้นตอนที่สาม

นำสัญญาณจากอุปกรณ์วัดส่งเข้ามาเครื่องควบคุมเพื่อการปรับเปลี่ยนตัวแปรปรับค่าได้ที่เหมาะสม เพื่อชดเชยกับการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเพื่อรักษาระดับของเหลวภายในหม้อไอน้ำไว้ให้คงที่ ซึ่งเครื่องควบคุมจะทำการคำนวณว่าต้องปรับตัวแปรปรับค่าได้อย่างไร ในกรณีนี้ตัวแปรที่เหมาะสมได้แก่อัตราการไหลเข้าสู่หม้อไอน้ำ



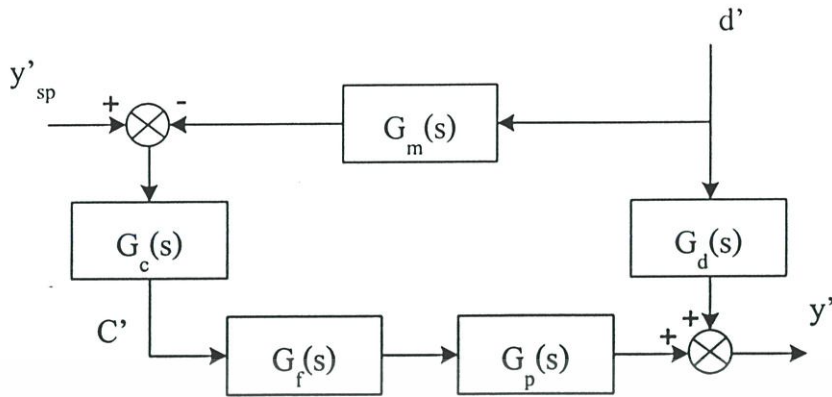
รูปที่ 2.13 หม้อไอน้ำและระบบควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า

โดยทั่วไปเรามักไม่ใช้ระบบการควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าเพียงระบบเดียว เพราะไม่สามารถรับประกันได้ว่าตัวแปรที่ต้องการควบคุมจะมีค่าตรงตามเป้าหมายตลอดเวลา ในที่นี้คือระดับของของเหลวในหม้อไอน้ำ โดยเฉพาะกรณีที่ระบบควบคุมไม่ได้ออกแบบไว้รองรับตัวแปรรบกวนระบบครบทุกตัวที่อาจเกิดขึ้นในกระบวนการ ดังนั้นการควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้ามักใช้ร่วมกับการควบคุมแบบป้อนกลับ โดยลักษณะการทำงานของระบบแสดงดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 หม้อไอน้ำและระบบควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าและป้อนกลับ

สมการพีชคณิตสำหรับเครื่องควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า



รูปที่ 2.15 ผังสัญญาณระบบควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าพร้อมอุปกรณ์ต่างๆ

พิจารณารูปที่ 2.10 สามารถเขียนสมการพีชคณิตของผังสัญญาณระบบควบคุมได้ดังนี้

$$\bar{y}'(s) = G_p(s)G_f(s)\bar{e}'(s) + G_d(s)\bar{d}'(s) \quad (2.43)$$

$$\bar{y}'(s) = G_p G_f G_c(s) [G_{sp}(s)y_{sp}(s) - G_m(s)\bar{d}'(s)] + G_d(s)\bar{d}'(s) \quad (2.44)$$

$$\bar{y}'(s) = G_p G_f G_c y_{sp}(s) - [G_p G_f G_c G_m - G_d]\bar{d}'(s) \quad (2.45)$$

จากสมการที่ 2.45 สามารถนำมาใช้ในการกำหนดรูปแบบสมการเครื่องควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าได้ โดยมีหลักสองประเด็นคือ การกำจัดสิ่งรบกวนของระบบ และการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมาย

### 2.2.2.1 การกำจัดสิ่งรบกวนของระบบ

ในกรณีนี้สมมติให้ไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมาย เพื่อให้การควบคุมเป็นไปตามความต้องการของระบบควบคุมจึงควรกำจัดสิ่งรบกวนได้อย่างสมบูรณ์ สามารถเขียนในเชิงความหมายทางคณิตศาสตร์ได้คือ  $\bar{y}'(s)/\bar{d}'(s) = 0$  จากสมการที่ 2.45 ปรับปรุงสมการให้มีความหมายตรงตามที่ต้องการได้ดังนี้

$$G_p G_f G_c G_m - G_d = 0 \quad (2.46)$$

แก้สมการที่ 2.46 เพื่อหาสมการสำหรับ  $G_c(s)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการ  $G_c(s) = \frac{G_d(s)}{G_p G_f G_m(s)}$  นั้น ไม่นิยามให้หน้าไปใช้ประโยชน์ (2.47) ถ้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการที่ 2.47 คือสมการเครื่องควบคุมเพื่อแก้ปัญหาอันเนื่องมาสิ่งรบกวนภายนอกกระบวนการ

### 2.2.2.2 การติดตามค่าเป้าหมาย

สำหรับกรณีนี้ถือว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงขึ้นกับสิ่งรบกวนภายนอกกระบวนการ ดังนั้นเพื่อให้การควบคุมเป็นไปตามความต้องการระบบควบคุมจึงควรปรับเปลี่ยนตัวแปรปรับได้เพื่อให้ค่าตัวแปรขาออกสามารถติดตามค่าเป้าหมายได้อย่างสมบูรณ์ ซึ่งความหมายทางคณิตศาสตร์คือ  $\bar{y}(s)/\bar{y}_{sp}(s) = 1$  ดังนั้นเขียนสมการที่ 2.45 ใหม่ได้ดังนี้

$$G_p G_f G_c G_{sp}(s) = 1 \quad (2.48)$$

แก้สมการที่ 2.48 เพื่อหาสมการสำหรับ  $G_{sp}(s)$

$$G_{sp}(s) = \frac{1}{G_p G_f G_c(s)} \quad (2.49)$$

แทนค่า  $G_c(s)$  จากสมการที่ 2.47 ในสมการที่ 2.49 ได้สมการสำหรับ  $G_{sp}(s)$

$$G_{sp}(s) = \frac{1}{G_p G_f(s)} \frac{G_p G_f G_m(s)}{G_d(s)} = \frac{G_m(s)}{G_d(s)} \quad (2.50)$$

สมการที่ 2.50 คือสมการเครื่องควบคุมเพื่อแก้ปัญหาอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมาย

## บทที่ 3

# กระบวนการหม้อฆ่าเชื้อ

กระบวนการฆ่าเชื้ออาหารกระป๋องถือว่าเป็นจุดวิกฤตที่ต้องควบคุมสำหรับระบบการวิเคราะห์อันตรายจุดสำคัญที่ต้องควบคุม (Hazard Analysis Critical Control Point concept : HACCP) ซึ่งเป็นระบบป้องกันของการควบคุมการผลิต โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่เกี่ยวข้องกับอันตรายจากเชื้อจุลินทรีย์ โดยในปัจจุบันได้เริ่มมีการบังคับให้โรงงานผลิตอาหารต้องผ่านการตรวจสอบระบบ HACCP ด้วย ดังนั้นสำหรับโรงงานผลิตอาหารกระป๋องนั้น ระบบที่ใช้ควบคุมกระบวนการหม้อฆ่าเชื้อต้องเป็นแบบกึ่งอัตโนมัติหรืออัตโนมัติเท่านั้น

หม้อฆ่าเชื้ออาหารกระป๋อง คืออุปกรณ์ที่ใช้ในการให้ความร้อนแก่อาหารในกระป๋องโดยผ่านตัวกลางไอน้ำหรือน้ำร้อนเพื่อทำลายจุลินทรีย์และสปอร์ภายในภาชนะปิดสนิท สร้างจากโลหะหนาประกอบเป็นรูปทรงปิดที่มีฝาครอบ ซึ่งสามารถใช้งานได้อย่างปลอดภัยที่ความดัน 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว หรือมากกว่า หม้อฆ่าเชื้อต้องมีส่วนประกอบต่างๆ ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน

### 3.1 ประเภทของหม้อฆ่าเชื้อ

หม้อฆ่าเชื้อที่ใช้กันมีอยู่หลายประเภท ซึ่งสามารถแบ่งได้ตามลักษณะต่างๆ ดังนี้

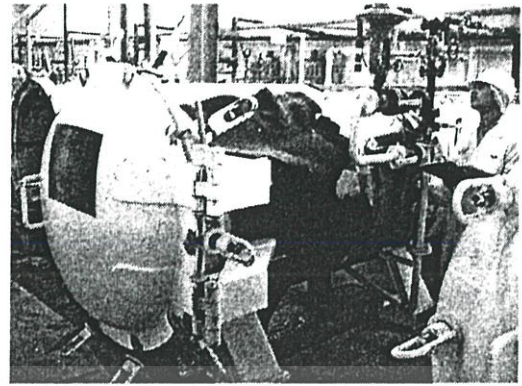
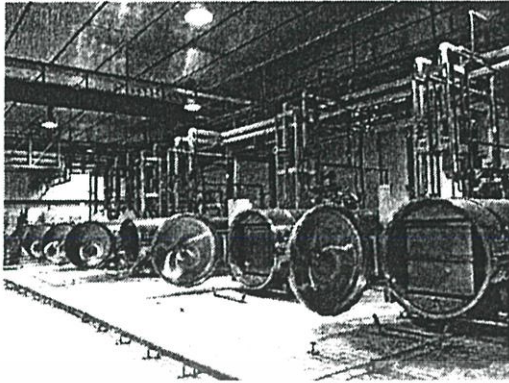
1. แบ่งตามลักษณะการฆ่าเชื้อ
2. แบ่งตามลักษณะการหมุนของกระป๋อง/บรรจุ
3. แบ่งตามการวางของหม้อฆ่าเชื้อ
4. แบ่งตามตัวกลางการให้ความร้อน

#### 3.1.1 ประเภทของหม้อฆ่าเชื้อแบ่งตามลักษณะการฆ่าเชื้อ

- หม้อฆ่าเชื้อแบบทำงานเป็นรอบการทำงาน (Discontinuous Batch Retort)

หม้อฆ่าเชื้อประเภทนี้เป็นเครื่องมือที่เก่าที่สุดที่ใช้ในการแปรรูปด้วยความร้อน (Thermal Processing) ซึ่งนิยมใช้ในโรงงานอาหารกระป๋องทั้งขนาดใหญ่และเล็ก รวมทั้งผลิตภัณฑ์ที่บรรจุในภาชนะแก้วด้วย

วิธีการ โดยพื้นฐานประกอบด้วยการนำตะกร้าภาชนะเข้าไปยังภาชนะเหล็ก ปิดฝาหม้อและให้ความร้อน โดยมีเครื่องควบคุมอุณหภูมิและระยะเวลาที่ให้ความร้อน หากได้จากอัตราการถ่ายเทความร้อนเข้าไปยังภาชนะ เมื่อได้เวลาตามที่กำหนดแล้วจะให้ความเย็น โดยการปิดท่อจ่ายความร้อน แล้วเปิดน้ำเย็นเข้าไป อย่างไรก็ตาม ภาชนะบรรจุโลหะขนาดใหญ่ และขวดแก้วที่มีฝาแบบกด (Press-on) จำเป็นต้องกำจัดความดันอากาศก่อนเริ่มต้นให้ความเย็น เนื่องจากความดันที่แตกต่างกันระหว่างภายนอกและภายในภาชนะ จะทำให้กระป๋องโค้งงอ (Buckle) และฝาหลุดได้ (Dislodge) ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 หม้อฆ่าเชื้อแบบทำงานเป็นรอบการทำงาน

หม้อฆ่าเชื้อแบบทำงานเป็นรอบการทำงานมักนิยมใช้กันมาก แม้ว่าจะต้องใช้แรงงานมากก็ตาม เนื่องจากสามารถใช้ได้กับภาชนะขนาดใดก็ได้ และยังสามารถใช้กับอาหารชนิดต่างๆ กัน

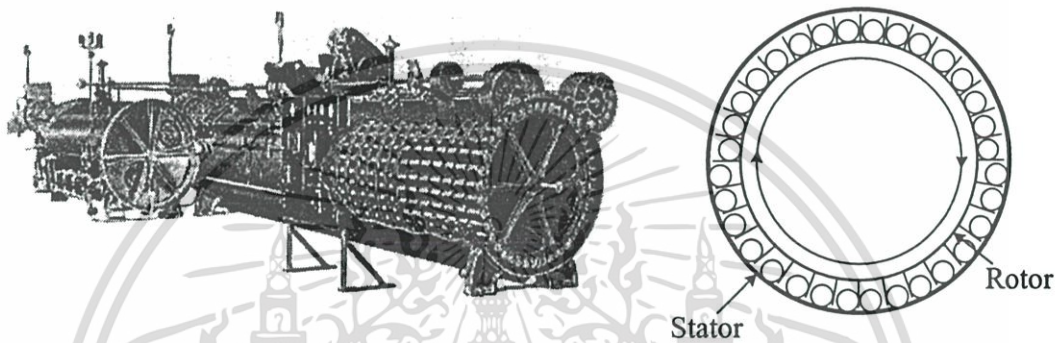
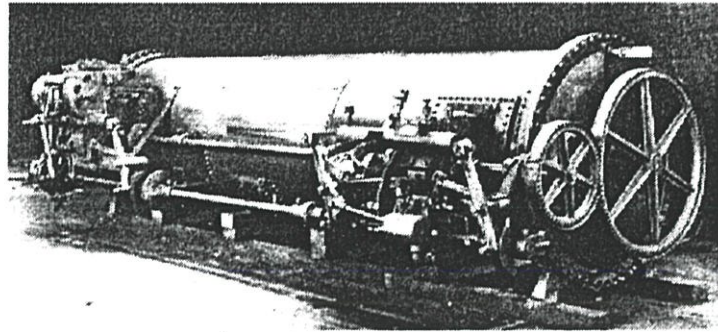
- เครื่องฆ่าเชื้อแบบทำงานต่อเนื่อง (Continuous Retort)

a) Continuous Pressure Cooker-Cooler เป็นเครื่องฆ่าเชื้อที่ไม่มีการกวนภาชนะจะอยู่บนล้อหมุนหรือสายพานส่วนที่ให้ความร้อนเบื้องต้น การฆ่าเชื้อและการทำให้เย็น การส่งผ่านไปยังแต่ละส่วนซึ่งมีความดันแตกต่างกันกระทำได้โดยใช้ตัวล๊อคความดัน



รูปที่ 3.2 Continuous Pressure Cooker-Cooler

b) Continuous Rotary Sterilizer กระจบองจะเคลื่อนที่ไปตามทางที่เป็นวงก้นหอย ซึ่งยึดแน่นกับผนังด้านในของทรงกระบอกทั้งสามส่วนส่วนปีก (Flanges) ซึ่งติดกับเส้นรอบวงถึงกลวงที่หมุนอย่างช้าๆ จะส่งกระจบองไปรอบตลอดความยาวของแต่ละส่วนของทรงกระบอก โดยมีตัวล๊อคความดันช่วยขนถ่ายเข้าและออกจากเครื่องและระหว่างส่วนทั้งสาม การกวนภายในกระจบองจะเกิดขึ้นจากการหมุนและคลื่น ไถล ขณะที่กระจบองเคลื่อนที่รอบวงโค้ง (Helix) ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 Continuous Rotary Sterilizer

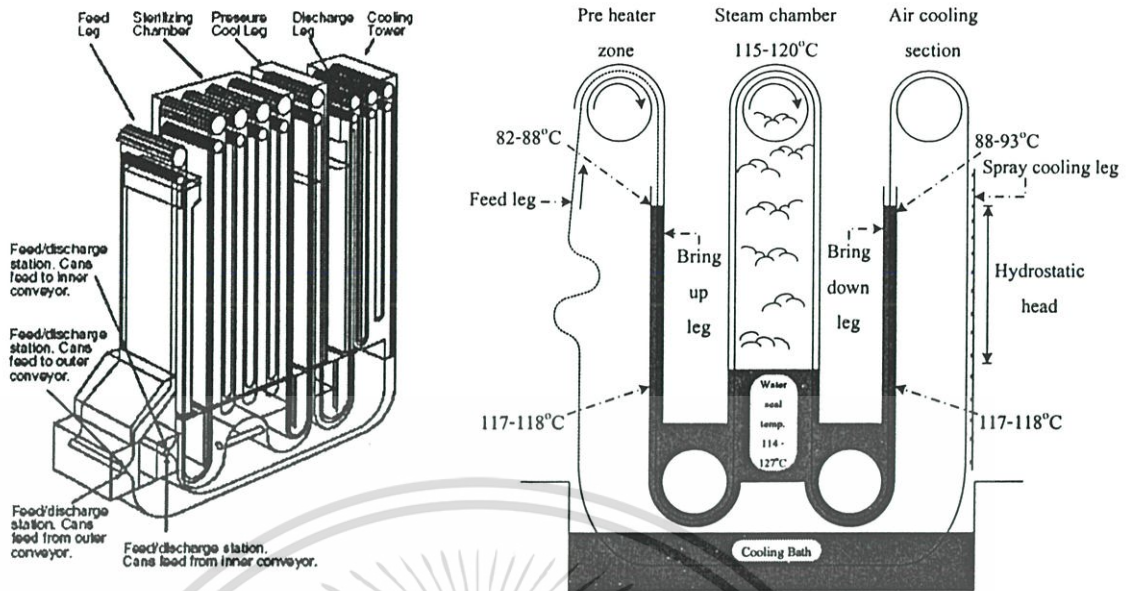
เครื่องฆ่าเชื้อประเภทนี้มีความจุสูง (ถึง 500 กระป๋องต่อนาที) และทำให้การฆ่าเชื้อเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอแต่มีข้อเสียคือ กระป๋องจำนวนมากจะได้รับความร้อน ณ เวลาหนึ่งๆ ดังนั้นถ้ามีการขาดช่วงขึ้นระหว่างการขนถ่าย จะทำให้เกิดปัญหาขึ้นรวมทั้งความเครียดจากความดัน (Pressure Strain) และการช็อกเนื่องจากความร้อน (Thermal Shock)

c) Hydrostatic Sterilizer เครื่องฆ่าเชื้อชนิดนี้จะใช้วิธีกักไอน้ำสูงด้วยคอลัมน์น้ำดังแสดงในรูปที่ 3.4 กระป๋องจะเคลื่อนผ่านหอไอน้ำ (Steam Tower) แล้วได้รับความดันจากน้ำที่อยู่ในคอลัมน์ (Water Column) สายพานประกอบด้วยคู่โซ่หมุนที่เคลื่อนที่อย่างช้าๆ (ประมาณ 2 เมตรต่อนาที) กระป๋องจะเคลื่อนที่ในลักษณะแนวอนตามแกนยาวกระป๋อง ซึ่งช่วยถ่ายเทความร้อนแบบการพาภายในกระป๋อง

กระป๋องจะเข้าสู่ส่วนที่ให้ความร้อนเบื้องต้น (Lag) ในท่อของน้ำที่เป็นรูปตัวยู จะพบว่าอุณหภูมิน้ำตอนต้นของส่วนนี้ประมาณ 82-88 องศาเซลเซียส และทางออกประมาณ 107-118 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นกระป๋องจะเคลื่อนที่ไปยังห้องไอน้ำ (Steam Chamber) ภายในช่วงเวลาที่เหมาะสมค่าหนึ่ง ซึ่งกระป๋องจะเคลื่อนที่ขึ้นและลงและออกจากห้องนี้ไปยังท่อน้ำรูปตัวยูอีกด้านหนึ่ง จากนั้นจะให้ความเย็นแก่กระป๋อง

เครื่องฆ่าเชื้อแบบนี้มีข้อดีคือ อาหารและกระป๋องเกิดการช็อกเนื่องจากอุณหภูมิและความดันน้อยที่สุด ใช้ได้กับภาชนะบรรจุทุกชนิด และใช้ไอน้ำและน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ

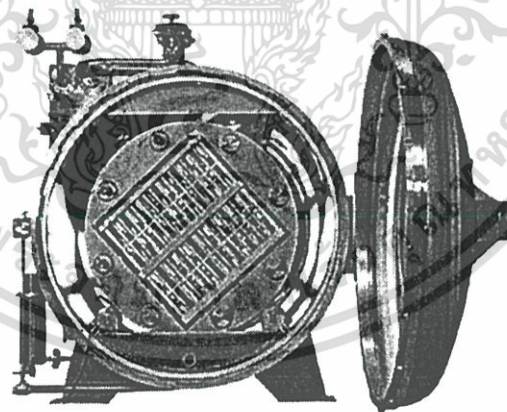
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 Hydrostatic Sterilizer

### 3.1.2 ประเภทของหม้อฆ่าเชื้อแบ่งตามลักษณะการหมุนของกระป๋อง/บรรจุ

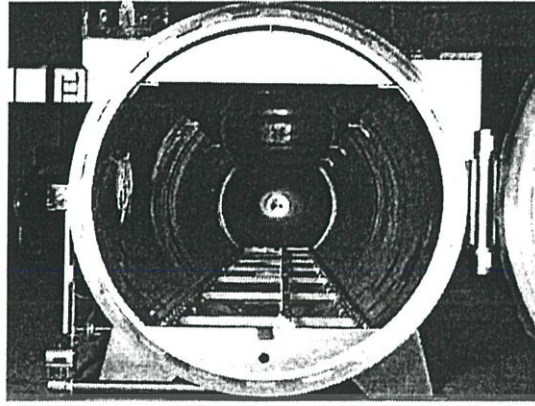
- หม้อฆ่าเชื้อที่มีการหมุนของบรรจุภัณฑ์ขณะฆ่าเชื้อ (Agitation Retort)
  - ลักษณะการหมุนในขณะฆ่าเชื้อนั้นภายในจะสามารถถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่าแบบไม่หมุน ดังนั้นจึงประหยัดพลังงานได้มากกว่า แต่ราคาค่อนข้างแพง



รูปที่ 3.5 หม้อฆ่าเชื้อแบบหมุน

- หม้อฆ่าเชื้อที่ไม่มีการหมุนของบรรจุภัณฑ์ขณะฆ่าเชื้อ (Non-agitation Retort)
  - หม้อฆ่าเชื้อแบบไม่หมุนจะใช้พลังงานมากกว่าเนื่องจากการถ่ายเทความร้อนภายในได้ช้ากว่า แต่ส่วนใหญ่ยังใช้กันอยู่มากเนื่องจากราคาถูก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

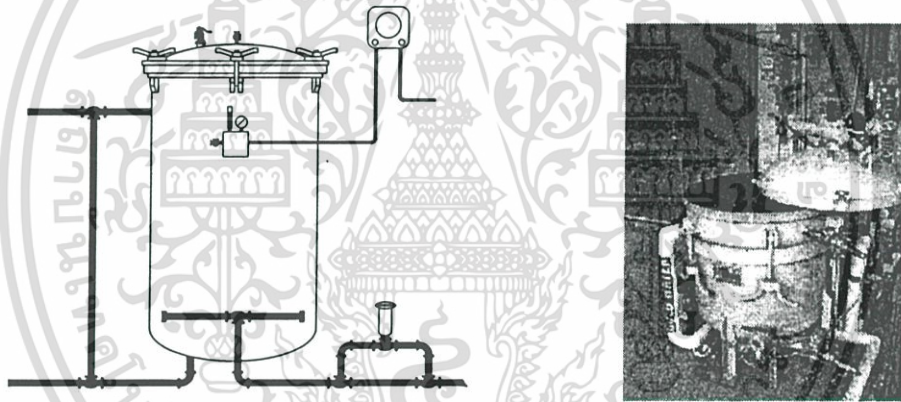


รูปที่ 3.6 หม้อฆ่าเชื้อแบบไม่หมุน

### 3.1.3 ประเภทของหม้อฆ่าเชื้อแบ่งตามลักษณะการวางของหม้อ

- หม้อฆ่าเชื้อแบบตั้ง (Vertical Retort)

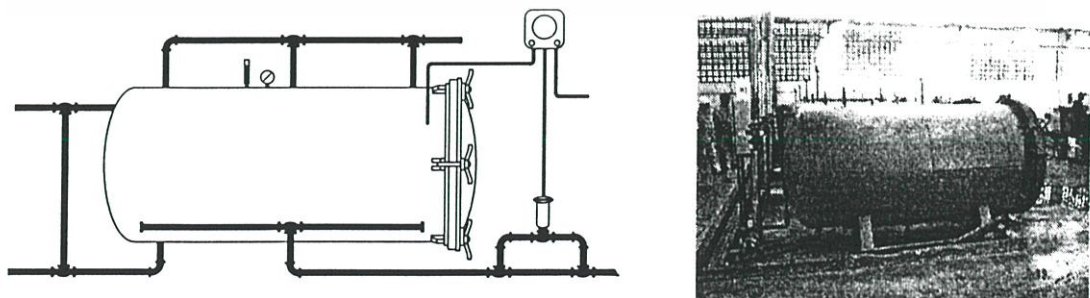
หม้อฆ่าเชื้อแบบนี้ไม่ค่อยเป็นที่นิยมใช้ เนื่องจากไหลครบบรรจุภัณฑ์ ไม่สะดวก ซ่อมคือสามารถประหยัดพื้นที่



รูปที่ 3.7 หม้อฆ่าเชื้อแบบตั้ง

- หม้อฆ่าเชื้อแบบนอน (Horizontal Retort)

เป็นแบบที่นิยมใช้กันมาก เนื่องจากสะดวกในการขนย้ายบรรจุภัณฑ์



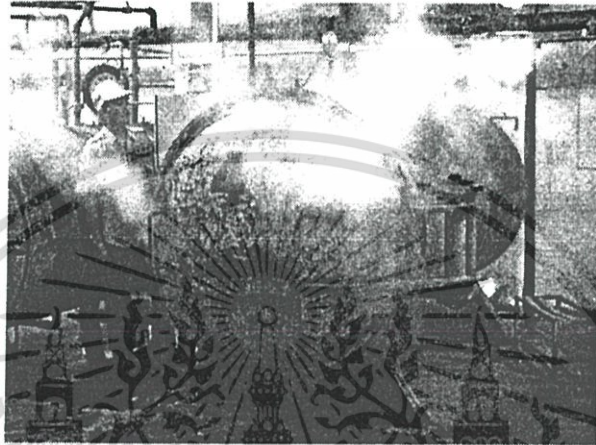
รูปที่ 3.8 หม้อฆ่าเชื้อแบบนอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.4 ประเภทของหม้อฆ่าเชื้อแบ่งตามตัวกลางให้ความร้อน

- หม้อฆ่าเชื้อที่ใช้ไอน้ำในการฆ่าเชื้อ

หม้อฆ่าเชื้อประเภทนี้เป็นที่นิยมใช้มากที่สุด เนื่องจากราคาถูกกว่าแบบใช้น้ำร้อนมาก และการปฏิบัติงานส่วนใหญ่ยังใช้พนักงานเป็นผู้ควบคุมการทำงาน ใช้ได้เฉพาะบรรจุภัณฑ์ที่เป็นกระป๋องเท่านั้น

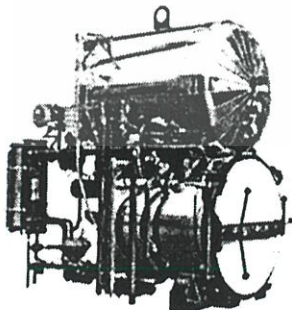


รูปที่ 3.9 Steam Retort

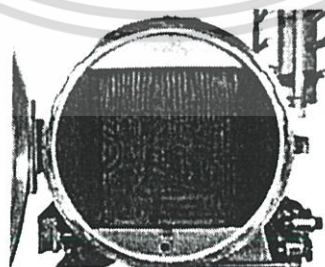
- หม้อฆ่าเชื้อที่ต้องใช้ความดันสูงในการฆ่าเชื้อ

หม้อฆ่าเชื้อประเภทนี้ส่วนใหญ่พบในอุตสาหกรรมขนาดกลางและใหญ่ เนื่องจากมีราคาแพง และต้องใช้พนักงานควบคุมที่มีความชำนาญ ซึ่งสามารถถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ผลิตภัณฑ์ได้ดีมาก และใช้กับบรรจุภัณฑ์ได้หลากหลายเช่น ขวดแก้ว, ถูพลาสติก เป็นต้น สามารถแบ่งได้เป็นแบบต่างๆ ดังนี้

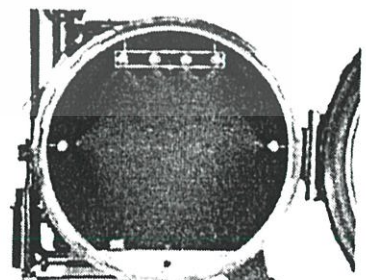
- ใช้น้ำร้อนความดันสูง



(a) Water Immersion Retort



(b) Water Cascading Retort



(c) Water Spray Retort

รูปที่ 3.10 Hot water retort

เอกสารนี้เป็นเอกสาร (b) ที่ใช้น้ำและอากาศผสมกัน โดยใช้พัดลมดูดไอน้ำและอากาศที่ผสมกันเข้ามาให้การค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความร้อนภายใน ซึ่งทำให้การกระจายความร้อนดีมาก

### 3.2 โครงสร้างและอุปกรณ์

เนื่องจากหม้อฆ่าเชื้อเกือบทั้งหมดที่ใช้ในประเทศไทยเป็นแบบ Horizontal Still Retort ที่ใช้หม้อไอน้ำเป็นตัวกลางจ่ายความร้อนในผลิตภัณฑ์อาหาร จึงขอกกล่าวถึงรายละเอียดเฉพาะหม้อฆ่าเชื้อแบบนี้เท่านั้น

#### 3.2.1 แหล่งกำเนิดไอน้ำ (Steam Supply)

แหล่งกำเนิดไอน้ำคือ หม้อไอน้ำ (Boiler) ซึ่งการเลือกหม้อไอน้ำให้พิจารณาจากปริมาณไอน้ำที่ต้องการใช้ ความสามารถในการผลิตไอน้ำ ความดันสูงสุดที่ทำได้ เพื่อให้ง่ายแก่การกำหนดว่าแหล่งกำเนิดไอน้ำควรเป็นเท่าใด จึงใช้ความดันเป็นตัวกำหนดคือ

ความยาว Retort น้อยกว่า	8	ฟุต ใช้ความดันไอน้ำขั้นต่ำ	90	psig
ความยาว Retort อยู่ระหว่าง	8 – 15	ฟุต ใช้ความดันไอน้ำขั้นต่ำ	100	psig
ความยาว Retort มากกว่า	15	ฟุต ใช้ความดันไอน้ำขั้นต่ำ	125	psig

ปริมาณไอน้ำก็มีผลต่อกระบวนการฆ่าเชื้อเช่นกัน ดังนั้นการที่หม้อไอน้ำสามารถผลิตไอน้ำได้รวดเร็วและปริมาณมาก ก็จะสามารถตอบสนองความต้องการใช้ไอน้ำได้ ช่องว่างสำหรับส่วนไอน้ำก็มีผลต่อปริมาณไอน้ำในระบบได้เช่นกัน ซึ่งได้แก่

- ช่องว่างในหม้อไอน้ำ
- ท่อส่งไอน้ำ
- ถังพักไอน้ำ

#### 3.2.2 ท่อส่งไอน้ำ (Main Steam Pipe)

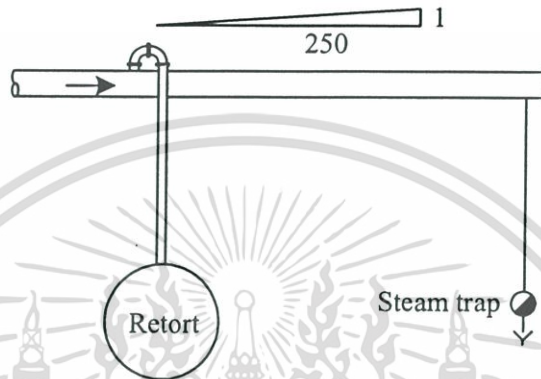
การเลือกขนาดของท่อให้พอเหมาะกับจำนวนหม้อฆ่าเชื้อที่ใช้ใล่อากาศพร้อมกัน เพราะช่วงการใล่อากาศจะเป็นช่วงที่ใช้ปริมาณไอน้ำมากที่สุด นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงจำนวนหม้อฆ่าเชื้อและอุปกรณ์อื่นที่ใช้ไอน้ำร่วมกัน ขนาดของท่ออย่างดามีข้อกำหนดดังนี้

ตารางที่ 3.1 ขนาดของท่อส่งไอน้ำขั้นต่ำตามจำนวนหม้อฆ่าเชื้อที่ใล่อากาศพร้อมกัน

จำนวนหม้อฆ่าเชื้อที่ใล่อากาศพร้อมกัน	ขนาดท่อส่งหลัก
1	2 – 2½ นิ้ว
2	3 – 3½ นิ้ว
3	3½ – 4 นิ้ว
4	4 – 5 นิ้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณภาพของไอน้ำเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่สำคัญและมีผลต่อการถ่ายเทความร้อนสู่อาหาร กระจกป้อง ไอน้ำที่ต้องการคือไอน้ำหรือไอแห้งและมีการเดินท่อส่งก็มีส่วนสำคัญต่อคุณภาพของไอน้ำ การต่อท่อควรมีจุดระบายระบาย น้ำจากการควบแน่น (Condensate) ออกไปและป้องกันระบาย Condensate เข้าสู่อุปกรณ์หรือเครื่องมือ โดยการวางท่อควรมีความลาดเอียงมากกว่า 1/250 ที่ปลายท่อหรือจุดหักควรมีส่วนระบาย น้ำจากการควบแน่น และการต่อท่อโดยดึงท่อขึ้นข้างบนดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 การเดินท่อส่งไอน้ำและการต่อท่อไปใช้งาน

### 3.2.3 ท่อไอน้ำเข้า (Steam Inlet)

ขนาดของท่อไอน้ำเข้าต้องมีขนาดใหญ่พอเพื่อจ่ายไอน้ำกับหม้อฆ่าเชื้อ และการต่อท่อควรต่อเข้ากับบริเวณกึ่งกลางด้านล่าง ถ้าหม้อฆ่าเชื้อมีความยาวมากกว่า 30 ฟุต ควรต่อเข้า 2 จุด และวาล์วมือที่ใช้ควรเป็น Glove Valve ขนาดของท่อที่ต่อเข้าหม้อฆ่าเชื้อดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ขนาดของท่อตามความยาวของหม้อฆ่าเชื้อ

ความยาวของหม้อฆ่าเชื้อ	ขนาดท่อเข้า
น้อยกว่า 8 ฟุต	1 นิ้ว
8 – 15 ฟุต	1¼ นิ้ว
มากกว่า 15 ฟุต	2 นิ้ว

### 3.2.4 ระบบควบคุมการจ่ายไอน้ำ (Steam Controller System)

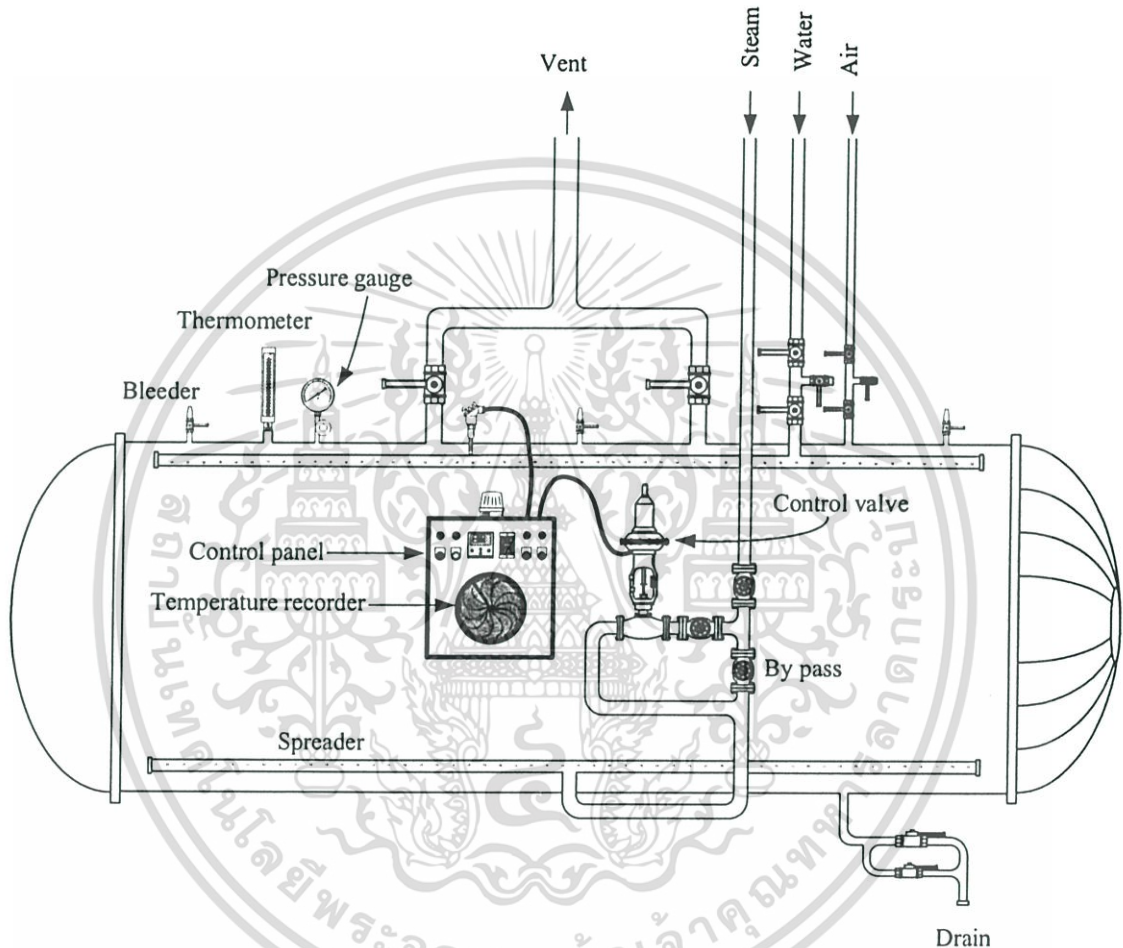
เครื่องควบคุมไอน้ำ (Steam Controller) หม้อฆ่าเชื้อแต่ละหม้อจะต้องมีเครื่องควบคุมไอน้ำแบบอัตโนมัติสำหรับรักษาระดับอุณหภูมิในหม้อฆ่าเชื่อนั้น หรืออาจใช้เครื่องบันทึกและควบคุมอุณหภูมิร่วมกับเทอร์โมมิเตอร์สำหรับบันทึกได้ เครื่องควบคุมไอน้ำนี้อาจจะควบคุมการทำงานโดยระบบอัตโนมัติจากเครื่องวัดอุณหภูมิ หรืออาจควบคุมโดยความดันของไอน้ำจากหม้อฆ่าเชื้อก็ได้ โดยสามารถควบคุมอุณหภูมิภายในให้คงที่ตามอุณหภูมิที่กำหนดในช่วงการฆ่าเชื้อ (Cooking

Period) เอกสารที่ส่งจนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การควบคุมอุณหภูมิภายในหม้อน้ำเชื้อที่พบในประเทศไทยแบ่งเป็น 2 พวกใหญ่ๆ คือ

- ใช้เครื่องควบคุมอุณหภูมิ
- ใช้คนควบคุมอุณหภูมิ เหมาะสำหรับการระบวนการสั้นๆ แต่ที่ยังใช้มาก เนื่องจาก

ราคาถูก ในปัจจุบันการใช้คนควบคุมไม่เป็นที่ยอมรับ



รูปที่ 3.12 โครงสร้างและอุปกรณ์ต่างๆ ของหม้อน้ำเชื้อ

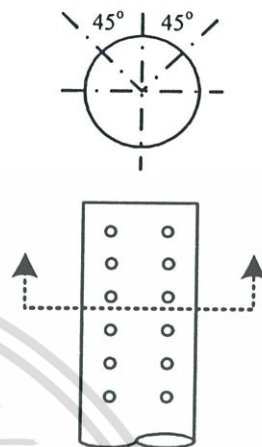
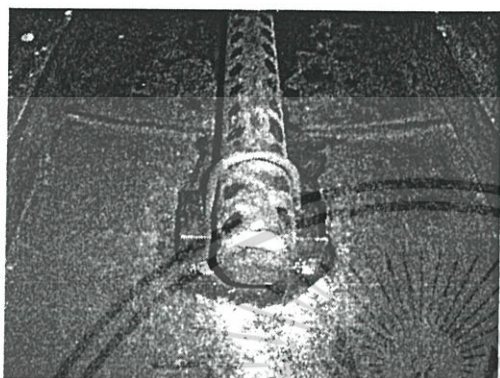
### 3.2.5 ท่อขนาน (By Pass)

กรณีติดตั้งเครื่องควบคุมการจ่ายไอน้ำ จะต้องมีย่อขนานกับท่อที่ติดตั้งหม้อ ท่อขนานนี้เรียกว่า ท่อ By pass แสดงดังรูปที่ 3.12 ไว้ใช้เปิดให้ไอน้ำเข้าหม้อกรณี

- เครื่องควบคุมการจ่ายไอน้ำขัดข้อง
- ใช้ปิดในช่วงโล่อากาศ ในกรณีที่วาล์วของหม้อน้ำเชื้อมีขนาดเล็กกว่าท่อไอน้ำเข้า เพื่อให้สามารถโล่อากาศได้รวดเร็วและมีประสิทธิภาพ

### 3.2.6 ท่อกระจายไอน้ำ (Steam Spreader)

เป็นท่อที่ต่อกับท่อไอน้ำเข้าภายในหม้อน้ำเชื้อ นิยมต่อตามความยาวด้านล่างของหม้อน้ำเชื้อ ขนาดท่อเท่ากับท่อเข้า และถูกเจาะรูตลอดแนวยาวของท่อ เพื่อให้ไอน้ำกระจายเข้าหม้อเตาๆ กันตลอดแนวยาว



รูปที่ 3.13 ท่อกระจายไอน้ำและลักษณะการเจาะรู

การเจาะรูจะต้องให้ได้พื้นที่หน้าตัดของรูทั้งหมดเท่ากับ 1.5 ถึง 2 เท่าของพื้นที่หน้าตัดของท่อไอน้ำเข้า ขนาดรู และจำนวนรูแสดงดังตารางที่ 3.3 และวิธีการเจาะรูแสดงดังรูปที่ 3.13

ตารางที่ 3.3 จำนวนรูบนท่อกระจายไอน้ำ

ขนาดรู (นิ้ว)	จำนวนรู : ขนาดท่อไอน้ำเข้า				
	1 นิ้ว	1 ¼ นิ้ว	1 ½ นิ้ว	2 นิ้ว	2 ½ นิ้ว
3/16	47 - 62	31 - 108	111 - 148	183 - 244	260 - 346
7/32	35 - 56	60 - 80	71 - 108	135 - 180	190 - 254
1/4	27 - 36	45 - 60	63 - 84	102 - 137	147 - 196
5/16	*	30 - 40	40 - 54	66 - 68	93 - 124
3/8	*	21 - 28	28 - 37	45 - 60	66 - 83
7/16	*	*	21 - 28	33 - 45	48 - 64
1/2	*	*	15 - 20	26 - 36	36 - 48

\* จำนวนรูขนาดเท่ากับ 1 ½ ถึง 2 เท่าของพื้นที่หน้าตัดของท่อไอน้ำเข้า

### 3.2.7 ท่อระบายอากาศ (Vent)

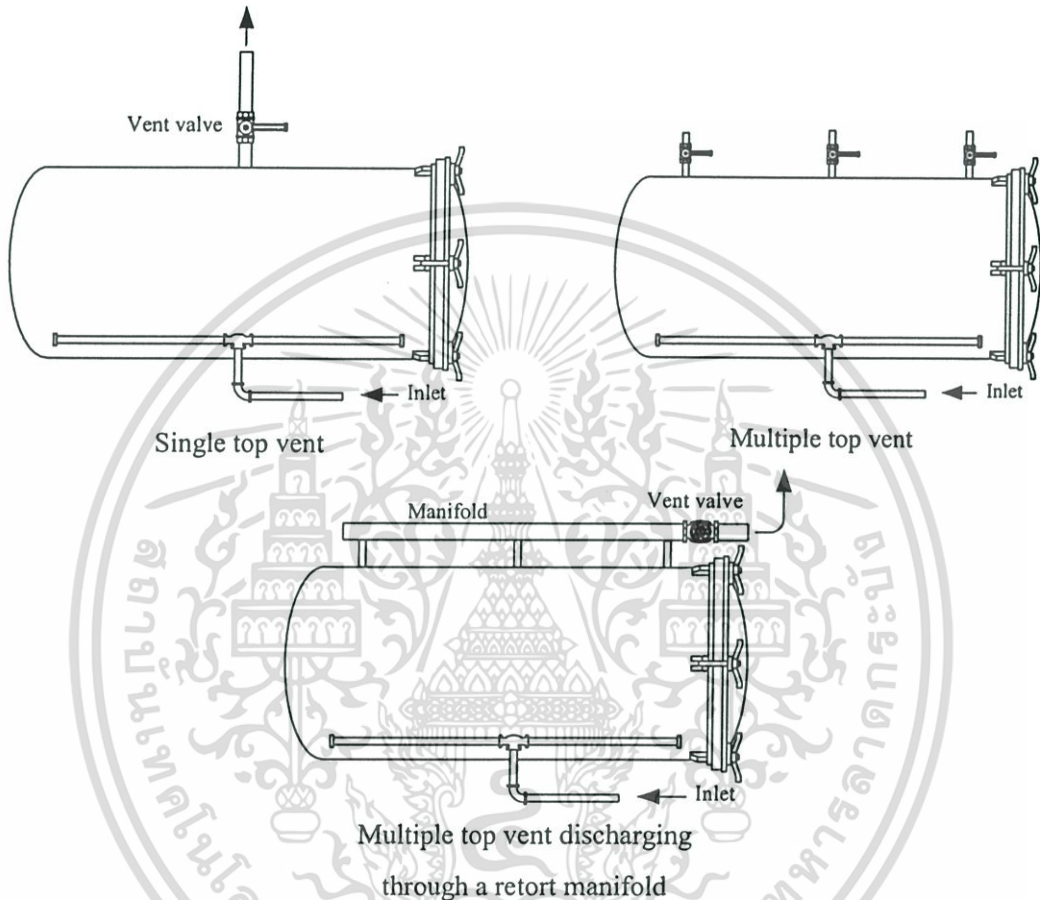
เป็นท่อที่ใช้ระบายอากาศภายในออกจากหม้อน้ำเชื้อในช่วงไต่อากาศ ซึ่งมีข้อกำหนดว่า

- ขนาดของท่อระบายอากาศจะต้องใหญ่กว่าท่อไอน้ำเข้า 1 ขนาดเสมอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษานี้เท่านั้น เมื่อผู้จัดทำเห็นว่าไม่เหมาะสมจะขอแจ้งการดำเนินการแก้ไขทันที ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ตำแหน่งการติดตั้ง ส่วนใหญ่อยู่ด้านบนของหม้อ กรณีเป็นแบบท่อเดี่ยวให้ติดตั้งตรงข้ามกับท่อไอน้ำเข้า

รูปแบบการต่อท่อระบายอากาศมีหลายแบบ แต่หลักสำคัญคือจะต้องต่อให้ตรงและสั้นที่สุดเพื่อให้อากาศถูกขจัดออกได้ง่ายและรวดเร็ว ลักษณะการติดตั้งท่อระบายอากาศแบบต่างๆ แสดงดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 การติดตั้งท่อระบายอากาศแบบต่างๆ

การต่อแบบท่อร่วม (Manifold) ที่ติดตั้งต้องเลือกท่อขนาดที่มีพื้นที่หน้าตัดมากกว่าพื้นที่หน้าตัดของท่อระบายอากาศทั้งหมดรวมกัน และใช้วาล์วแบบประตู (Gate Valve)

### 3.2.8 ท่อหายใจ (Bleeders)

ขนาด 1/8 นิ้ว หรือ 1/4 นิ้ว หรือเป็นท่อเล็กๆ ที่เจาะรูขนาดดังกล่าวติดตั้งด้านบนของหม้อ ทำหน้าที่ระบายไอน้ำออกจากหม้อ เพื่อให้ไอน้ำเกิดการหมุนเวียนและระบายอากาศหรือก๊าซที่หลงเหลืออยู่ออกไประหว่างการฆ่าเชื้อ

หลักการต่อท่ออยู่ที่ตำแหน่งด้านบน 1 ฟุตจากปลายทั้งสองของหม้อ และทุกระยะ 5 ฟุตให้เพิ่มท่อหายใจ 1 ตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.9 ท่อระบายน้ำจากการควบแน่น (Condensate Bleeder)

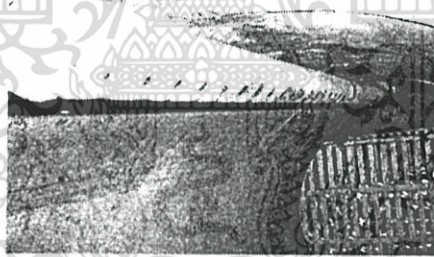
ขนาดมากกว่า 3/8 นิ้ว ติดตั้งอยู่ด้านล่างตำแหน่งที่น้ำไหลไปรวมกันเพื่อระบายน้ำจากการควบแน่นที่เกิดขึ้นระหว่างการฆ่าเชื้อ ไม่จำเป็นต้องมีที่ใดแต่ต้องระบายน้ำที่ออกจากหม้อฆ่าเชื้อได้ด้วยทางอื่น

### 3.2.10 ท่อน้ำเข้า (Water Inlet)

เป็นท่อนำน้ำเข้าหม้อสำหรับทำเย็นผลิตภัณฑ์ ควรต่อเข้าด้านบนบริเวณกึ่งกลางตามความยาวหม้อ และควรมีขนาดและความดันที่เหมาะสมเพื่อให้ น้ำไหลเข้าเต็มหม้อในเวลาอันสั้น เพื่อทำเย็นผลิตภัณฑ์อย่างรวดเร็ว ความดันของน้ำจะต้องสูงเพื่อให้ชนะแรงดันภายใน และต้องระวังว่าลว่น้ำรั่วระหว่างการฆ่าเชื้อ เพราะจะทำให้ผลิตภัณฑ์ไม่ผ่านการฆ่าเชื้อที่สมบูรณ์ได้

### 3.2.11 ท่อกระจายน้ำทำเย็น (Water Spreader)

เป็นท่อที่ต่อกับท่อน้ำเข้า มักวางท่อตามแนวยาวตอนบนของหม้อ ขนาดท่อเท่ากับท่อน้ำเข้า ท่อจะถูกเจาะหรือบากตลอดตามแนวยาวของท่อเพื่อให้ น้ำกระจายทั่วภายใน



รูปที่ 3.15 ท่อกระจายน้ำ

### 3.2.12 ท่อระบายน้ำ (Drain)

เป็นท่อสำหรับระบายน้ำหลักจากทำเย็นผลิตภัณฑ์ออกจากหม้อ มีขนาดมากกว่าท่อน้ำเข้า และในช่วงไต่อากาศแรกๆ จะเกิดน้ำจากการควบแน่นจำนวนมาก จึงต้องเปิดท่อนี้ช่วยระบายออก



เอกสารรูปที่ 3.16 ท่อระบายน้ำ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.13 ท่อน้ำล้น (Water Flow)

เป็นท่อระบายน้ำเมื่อน้ำเต็มหม้อฆ่าเชื้อในช่วงทำเย็น เพื่อป้องกันน้ำเต็มกระแทกหม้อฆ่าเชื้อ ทำให้อุปกรณ์เสียหายและผลิตภัณฑ์เสียหายได้ ควรต่อท่อที่ตำแหน่งเหนือระดับผลิตภัณฑ์ชั้นบนสุดในหม้อฆ่าเชื้อเล็กน้อย และขนาดท่อควรใหญ่กว่าท่อน้ำเข้า

### 3.2.14 ท่อลม (Air Line)

ใช้ช่วยรักษาความดันภายในหม้อฆ่าเชื้อในช่วงแรกของการทำเย็น เพื่อป้องกันปัญหาการเกิดกระป๋องบวม ตำแหน่งท่อควรอยู่ใกล้กับท่อน้ำเข้า และควรมีขนาดความดันตามที่กำหนด

### 3.2.15 วาล์วนิรภัย (Safety Valve)

ทำหน้าที่ระบายความดันส่วนเกิน เพื่อป้องกันการเกิดความดันที่หม้อฆ่าเชื้อจะทนได้ ควรตั้งความดันสูงกว่าความดันที่ใช้งานเล็กน้อยประมาณ 20 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

### 3.2.16 เทอร์โมมิเตอร์แบบปรอทแก้ว (Mercury in Glass Thermometer)

หม้อฆ่าเชื้อแต่ละตัวจะต้องมีเทอร์โมมิเตอร์ชนิดปรอทในปรอทแก้ว ที่มีการแบ่งขีดอ่านได้ละเอียดถึง 0.5 องศาเซลเซียส (หรือ 1 องศาฟาเรนไฮต์) และมีสเกลไม่เกิน 4 องศาเซลเซียสต่อเซนติเมตร (หรือ 17 องศาฟาเรนไฮต์ต่อนิ้ว) เทอร์โมมิเตอร์จะต้องผ่านการสอบเทียบกับเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐานก่อนการติดตั้ง และหลังจากนั้นอย่างน้อยปีละครั้ง หรือมากกว่าในกรณีที่จำเป็น จะต้องเก็บรักษามันที่การตรวจสอบเทอร์โมมิเตอร์ไว้เป็นหลักฐาน โดยบันทึกนั้นจะต้องระบุวัน เดือน ปี มาตรฐาน วิธีตรวจและผู้ตรวจสอบ เทอร์โมมิเตอร์แต่ละอันควรมีป้ายหรือแผ่นกระดาษขาวหรือวิธีอื่นๆ แสดง วัน เดือน ปีที่ทำการตรวจสอบครั้งสุดท้าย เทอร์โมมิเตอร์นี้จะต้องซ่อมแซมหรือเปลี่ยนใหม่เมื่อไม่สามารถปรับให้ตรงกับเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐานได้ และต้องติดตั้งไว้ในที่ๆ อ่านได้ง่าย กระจาเปาะของเทอร์โมมิเตอร์ชนิดนี้จะต้องอยู่ระหว่างผนังของหม้อฆ่าเชื้อหรือในช่องภายนอกซึ่งต่อกับหม้อฆ่าเชื้อโดยทางรูเปิดซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดอย่างน้อย 3/4 นิ้ว และจะต้องมีช่องระบายอย่างน้อย 1/16 นิ้ว ตั้งอยู่ในตำแหน่งที่สามารถให้อิน้ำผ่านไปได้ตลอดความยาวของกระจาเปาะของเทอร์โมมิเตอร์ ช่องระบายจะต้องติดตั้งเพื่อให้อิน้ำผ่านออกมาต่อเนื่องกันตลอดเวลาการฆ่าเชื้อ เทอร์โมมิเตอร์แบบปรอทนี้จะเป็นเครื่องชี้อุณหภูมิขณะฆ่าเชื้อ

### 3.2.17 เครื่องบันทึกอุณหภูมิ (Temperature Recorder)

หม้อฆ่าเชื้อแบบนั่งแต่ละตัวจะต้องมีอุปกรณ์บันทึกอุณหภูมิที่ถูกต้อง การแบ่งขีดวัดอุณหภูมิบนเครื่องบันทึกจะต้องวัดได้ละเอียดถึง 1 องศาเซลเซียส (หรือ 2 องศาฟาเรนไฮต์) ในช่วง  $\pm 5$  องศาเซลเซียส (หรือ  $\pm 10$  องศาฟาเรนไฮต์) ของอุณหภูมิที่ใช้ในการฆ่าเชื้อ แผ่นกระดาษบันทึกจะต้องมีการแบ่งขีดไม่เกิน 12 องศาเซลเซียสต่อเซนติเมตร (หรือ 55 องศาฟาเรนไฮต์ต่อนิ้ว) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในช่วง  $\pm 10$  องศาเซลเซียส (หรือ  $\pm 20$  องศาฟาเรนไฮต์) ของอุณหภูมิที่ใช้ในการฆ่าเชื้อ จะต้องปรับการบันทึกอุณหภูมิบนแผ่นกระดาษบันทึกให้อ่านค่าได้ใกล้เคียงกับเทอร์โมมิเตอร์แบบปรอทเท่าที่จะทำได้แต่ต้องไม่สูงกว่า ตลอดเวลาที่มีการผลิตจะต้องป้องกันการเปลี่ยนหรือการแก้ไขอุณหภูมิโดยพลการ กระเปาะของอุปกรณ์บันทึกอุณหภูมิจะต้องอยู่ระหว่างผนังของหม้อฆ่าเชื้อหรือในช่องภายนอกซึ่งต่อกับหม้อฆ่าเชื้อ โดยมีช่องระบายขนาดตั้งแต่ 1/16 นิ้วขึ้นไปติดตั้งไว้เพื่อให้ไอน้ำผ่านออกมาต่อเนื่องกันตลอดเวลาการฆ่าเชื้อ

### 3.2.18 มาตรวัดความดัน (Pressure Gauge)

หม้อฆ่าเชื้อแต่ละตัวจะต้องมีมาตรวัดความดันที่มีการแบ่งขีดอ่านได้ละเอียดถึง 0.14 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (หรือ 2 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว) ควรมีหน้าปัทม์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 4 นิ้วโดยใช้อ่านค่าขณะฆ่าเชื้อเพื่อดูความดันเทียบกับอุณหภูมิมาตรฐาน และขณะทำเย็นไว้ดูความดันเพื่อรักษาความดันภายในหม้อฆ่าเชื้อ

### 3.2.19 ตะกร้าใส่ผลิตภัณฑ์ (Basket, Tray)

เป็นภาชนะใช้ใส่วาง, จัดเรียงผลิตภัณฑ์สำหรับนำเข้าสู่หม้อฆ่าเชื้อ โดยโครงสร้างจะต้องแข็งแรง ไม่มีส่วนยื่น ส่วนคมที่จะขูดขีดกระป๋อง และต้องมีช่องว่างมากกว่า 39% เพื่อให้ไอน้ำกระจายเข้าสู่ผลิตภัณฑ์ได้สะดวก

### 3.2.20 แผ่นแยกชั้น (Divider Plate)

คืออุปกรณ์ที่ใช้แบ่งแยกพวก หรือรหัสผลิตภัณฑ์ภายในตะกร้าเดียวกันหรือใช้รองรับผลิตภัณฑ์เพื่อลดการขูดขีด หรือใช้ช่วยในการเรียงผลิตภัณฑ์ลงตะกร้าโดยอัตโนมัติ แผ่นแยกชั้นจะต้องไม่ขูดขีดกระป๋อง และมีช่องว่างมากกว่า 39% ของพื้นที่แผ่น

### 3.2.21 เครื่องดูเวลาหรือเครื่องจับเวลา (Counter)

เป็นอุปกรณ์ใช้ดูเวลาในขั้นตอนต่างๆ ของการใช้งาน ในส่วนของหม้อฆ่าเชื้อควรมีนาฬิกาขนาดใหญ่และอ่านได้ละเอียดเพียงพอ ที่ผู้ควบคุมสามารถอ่านเวลาได้อย่างชัดเจนจากทุกจุดที่ทำการควบคุมหม้อฆ่าเชื้อ และสามารถอ่านได้ละเอียดถึงหน่วยนาที

### 3.2.22 ระบบตรวจสอบผลิตภัณฑ์ (Cook Check System)

เพื่อทำการตรวจสอบผลิตภัณฑ์ว่าผ่านการฆ่าเชื้อที่สมบูรณ์หรือไม่ โดยการให้เทปตรวจสอบอุณหภูมิ ซึ่งจะมีสีไวต่อความร้อนบนแผ่นเทป จะเปลี่ยนรหัสเมื่อได้รับความร้อนปริมาณหนึ่ง ทำให้ใช้เป็นตัวแสดงว่าผลิตภัณฑ์ผ่านการฆ่าเชื้อแล้วหรือยังอย่างคร่าวๆ ได้

### 3.3 กระบวนการทำงาน

ในส่วนนี้กล่าวถึงกระบวนการทำงานของหม้อฆ่าเชื้อแบบใช้ไอน้ำเป็นตัวกลางให้ความร้อน และหลักการควบคุมอุณหภูมิหม้อฆ่าเชื้อดังนี้

#### 3.3.1 การปฏิบัติในการใช้หม้อฆ่าเชื้อ

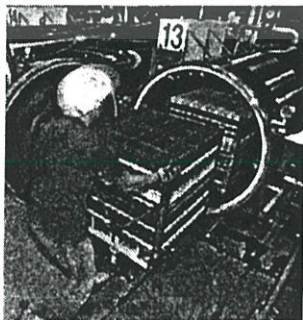
วัฏจักรโดยสมบูรณ์ของการใช้หม้อฆ่าเชื้อแบ่ง เป็น 5 ขั้นตอน คือ

1. การนำผลิตภัณฑ์เข้า (Loading)
2. ช่วงการไล่อากาศ (Venting Period)
3. ช่วงการฆ่าเชื้อ (Cooking Period)
4. ช่วงการทำเย็น (Cooling Period)
5. การนำผลิตภัณฑ์ออก (Unloading)

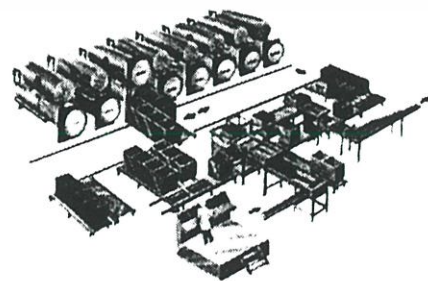
##### 3.3.1.1 การนำผลิตภัณฑ์เข้า (Loading)

เป็นการบรรจุกระป๋องเข้าหม้อฆ่าเชื้อ โดย

- นำกระป๋องใส่ตะกร้าแบบเรียงหรือไม่เรียง ต้องระวังไม่ให้กระป๋องบวม
- ต้องควบคุม Delay Time ของผลิตภัณฑ์อย่างเคร่งครัด
- การเข็นตะกร้าเข้าหม้อ ควรหลีกเลี่ยงการกระแทกอย่างรุนแรง
- ถ้ามีการใช้หม้อฆ่าเชื้อก่อนหน้านี้ ต้องแน่ใจว่าได้นำกระป๋องออกจากหม้อแล้ว
- ตรวจสอบว่าลวดน้ำและวาล์วลมว่าได้ปิดสนิท และปราศจากลมรั่ว
- ตรวจสอบว่ามีเทปตรวจสอบการฆ่าเชื้อว่ามีอยู่ทุกตะกร้า และมี Code และจำนวนถูกต้อง
- ให้ตรวจสอบเครื่องบันทึกอุณหภูมิว่าตั้งอุณหภูมิตรงตามกำหนดหรือไม่ เกจวัดความดัน และเทอร์โมมิเตอร์ ปกติดีหรือไม่
- ตรวจสอบอุณหภูมิเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์



แบบใช้พนักงาน



แบบอัตโนมัติ

เอกสารรูปที่ 3.17 การโหลดผลิตภัณฑ์เข้าใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.1.2 ช่วงการไล่อากาศ (Venting or Bring up Period)

เป็นช่วงการไล่อากาศ และดึงอุณหภูมิถึงอุณหภูมิฆ่าเชื้อ (Come-up Time)

- เปิดไอน้ำไปไล่อากาศภายในหม้อฆ่าเชื้อออกให้หมด
- วิธีการไล่อากาศจะต้องผ่านการตรวจสอบการกระจายความร้อน (Heat Distribution Test)

ตัวอย่างขั้นตอนการไล่อากาศ

1. เปิดท่อ Vent, Drain และ Bleeders อย่างเต็มที่
2. เปิดไอน้ำเข้าเต็มที่
3. ปิดท่อ Drain เมื่ออ่านอุณหภูมิได้มากกว่า 100 องศาเซลเซียส ตามเวลาที่กำหนด
4. ปิดท่อ Vent เมื่ออ่านอุณหภูมิได้มากกว่า 107 องศาเซลเซียส ตามเวลาที่กำหนด
5. ควบคุมอุณหภูมิให้ได้ตามอุณหภูมิที่ฆ่าเชื้อ



รูปที่ 3.18 ช่วงการไล่อากาศ

### 3.3.1.3 ช่วงการฆ่าเชื้อ (Cooking or Holding Period)

คือช่วงการควบคุมอุณหภูมิและเวลาให้ได้กำหนด โดยผู้ควบคุมต้องรักษาอุณหภูมิให้คงที่ไม่เกิน  $\pm 0.5$  องศาเซลเซียส จากอุณหภูมิที่กำหนดตลอดการฆ่าเชื้อและอ่านอุณหภูมิจากเทอร์โมมิเตอร์เท่านั้น

ขั้นตอนสำหรับการปฏิบัติในช่วงนี้มีดังนี้

1. เมื่อควบคุมอุณหภูมิให้คงที่สม่ำเสมอแล้ว ตรวจสอบและอ่านค่าจากเทอร์โมมิเตอร์, เครื่องบันทึกอุณหภูมิ และเกจวัดความดัน
2. เริ่มจับเวลาเมื่อเทอร์โมมิเตอร์ได้ตามอุณหภูมิฆ่าเชื้อ พร้อมทั้งบันทึกเวลาในสมุดบันทึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. กำหนดเวลาสิ้นสุดการฆ่าเชื้อ พร้อมทั้งบันทึกทบทวน
4. รักษาอุณหภูมิฆ่าเชื้อตามที่กำหนดจนครบเวลา และหมั่นเฝ้ามองตรวจสอบความผิดปกติ
5. เมื่อสิ้นสุดเวลาการฆ่าเชื้อ บันทึกเวลาและปิดไอน้ำ

#### 3.3.1.4 ช่วงการทำเย็น (Cooling Period)

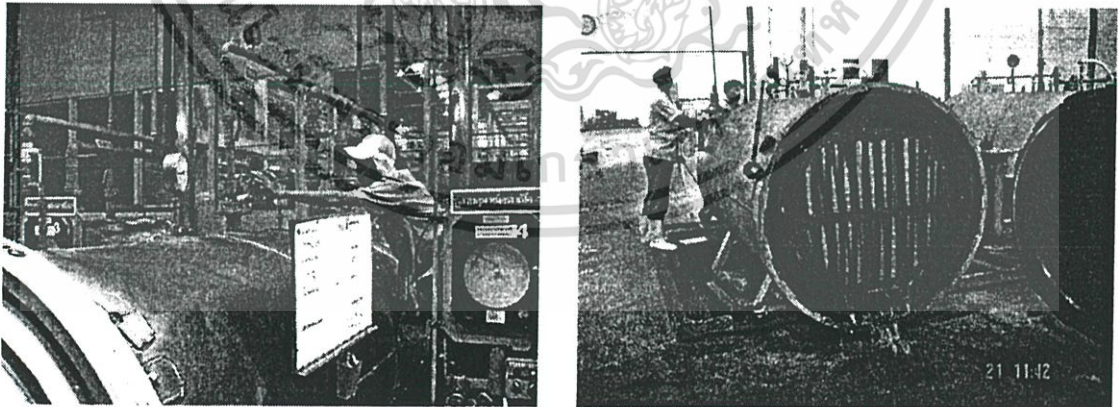
ผลิตภัณฑ์หลังจากการฆ่าเชื้อแล้วรีบทำเย็นทันทีเพื่อ

- Microbial shock ทำให้สปอร์ของจุลินทรีย์เสื่อมความสามารถในการเจริญเติบโต
- รักษาคุณภาพของอาหาร ไม่ให้อาหารเสื่อมคุณภาพจากความร้อนที่หลงเหลือ (Overcook) โดยอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์เมื่อออกจากหม้อฆ่าเชื้อควรมีอุณหภูมิ 35 – 40 องศาเซลเซียส และน้ำเย็นสำหรับทำเย็นผลิตภัณฑ์ควรมีอุณหภูมิต่ำและมีความสะอาดของเสียที่จะเกิดขึ้นในช่วงการทำเย็นมี 2 ลักษณะคือ

1. การบวม (Peaking) เกิดจากความดันภายในกระป๋องผลิตภัณฑ์สูงกว่าความดันภายนอกจนฝาชนแรงดันไม่ได้จึงถูกดันออกจนเสียรูปเป็นสันนูน
2. การบุบ (Paneling) เกิดจากภายในกระป๋องผลิตภัณฑ์เป็นสุญญากาศมาก และถูกแรงดันภายนอกกระป๋องกระทำตัวให้กระป๋องบุบ

ดังนั้นการทำเย็นจึงต้องใช้ลมเข้าไปรักษาความดันในหม้อฆ่าเชื้อเรียกว่า การทำเย็นแบบควบคุมความดัน (Pressure Cooling) โดยพนักงานควบคุมความดัน โดยดูจากเกจวัดความดันดังรูปที่

3.18



รูปที่ 3.19 ช่วงการทำเย็น

#### 3.3.1.5 การนำผลิตภัณฑ์ออก (Unloading)

เป็นการนำกระป๋องออกจากหม้อฆ่าเชื้อโดย

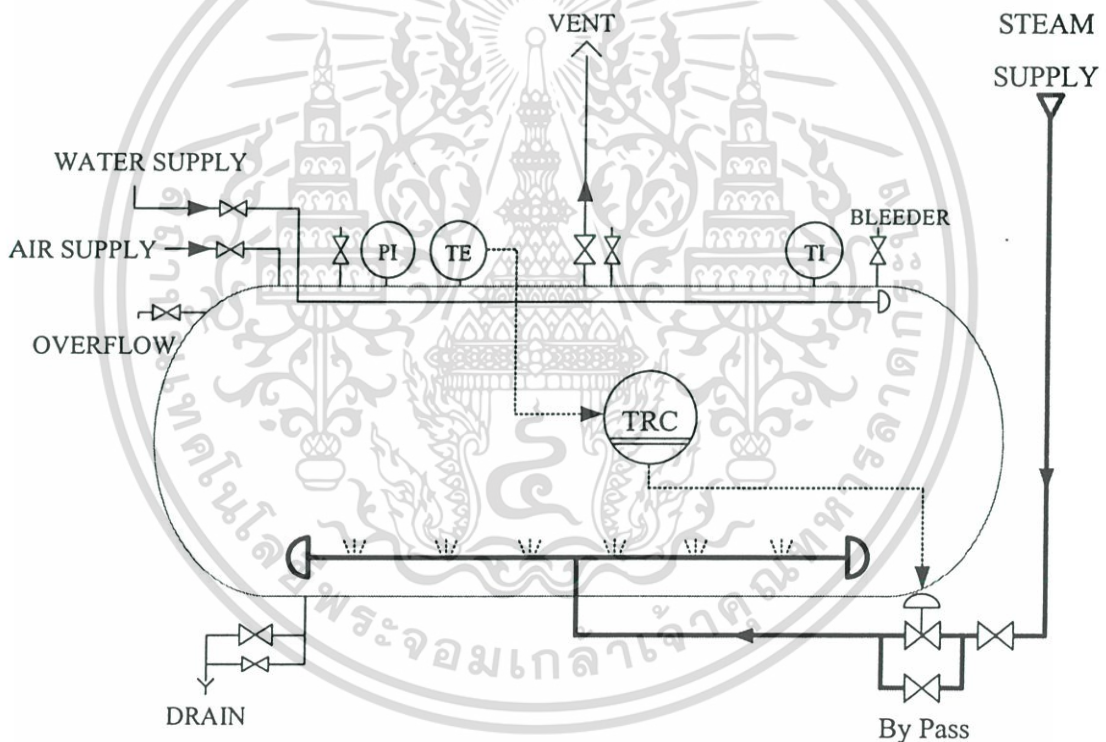
- ตรวจสอบว่าน้ำถูกระบายออกจากหม้อฆ่าเชื้อหมดแล้ว โดยดูที่วาล์วระบายน้ำทิ้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตเห็นไปไซ้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เปิดฝามือฆ่าเชื้อ นำผลิตภัณฑ์ออกอย่างระมัดระวัง หลีกเลี่ยงการกระทบกระแทก การจับและกระป๋องผลิตภัณฑ์
- ตรวจสอบเทปความร้อนว่าสีเปลี่ยนถูกต้องหรือไม่
- นำตะกร้าผลิตภัณฑ์ไปเก็บในห้องเก็บ โดยเฉพาะ และห้ามบุคคลที่ไม่เกี่ยวข้องเข้าห้องเก็บผลิตภัณฑ์นี้
- กระจกที่ติดอยู่ตามพื้น ต้องคัดแยกออก

### 3.3.2 การควบคุมอุณหภูมิในมือฆ่าเชื้อ

การควบคุมอุณหภูมิในกระบวนการมือฆ่าเชื้อเป็นระบบควบคุมแบบพื้นฐานที่พบกันในการควบคุมทั่วไป ซึ่งเป็นแบบลูปเดียว (Single Loop) ดังรูปที่ 3.19

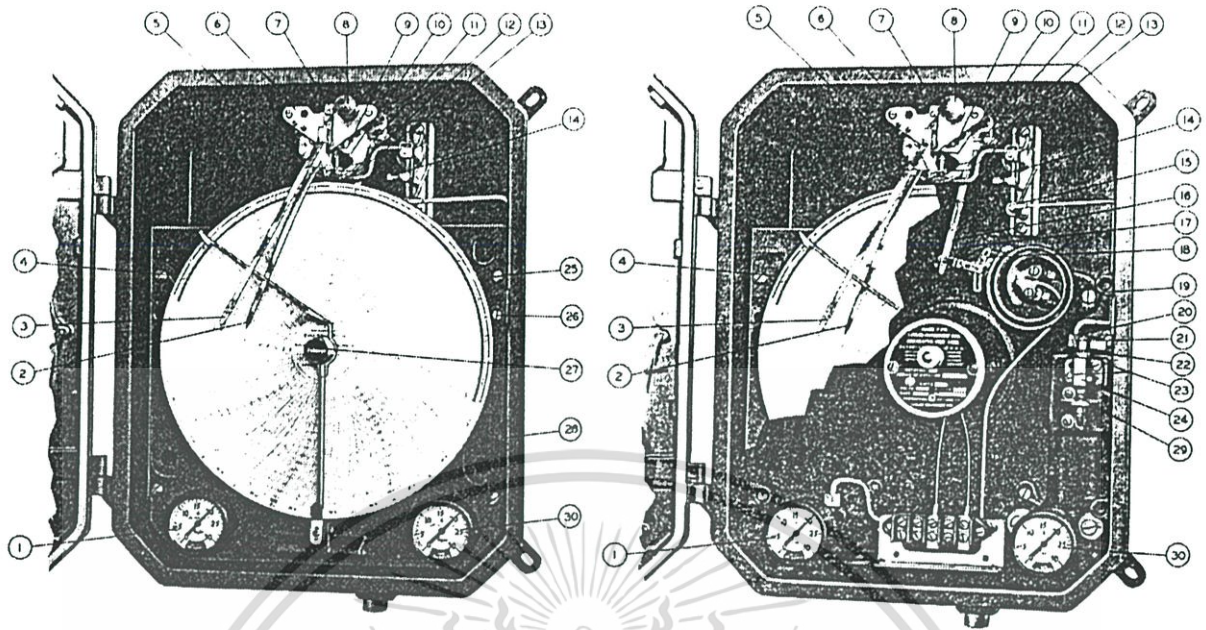


รูปที่ 3.20 โค้ดแกรมกระบวนการควบคุมอุณหภูมิของมือฆ่าเชื้อ

การควบคุมอุณหภูมิในกระบวนการมือฆ่าเชื้อสามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบคือ

#### 3.3.2.1 ระบบทางกล

การควบคุมอุณหภูมิแบบระบบทางกลเป็นรุ่นแรกที่น่ามาใช้ โดยผู้บุกเบิกที่มีชื่อเสียงในวงการอาหารกระป๋องคือ บริษัท Taylor และในยุคต่อมาหลายบริษัทได้เข้ามาแข่งขันมากขึ้น

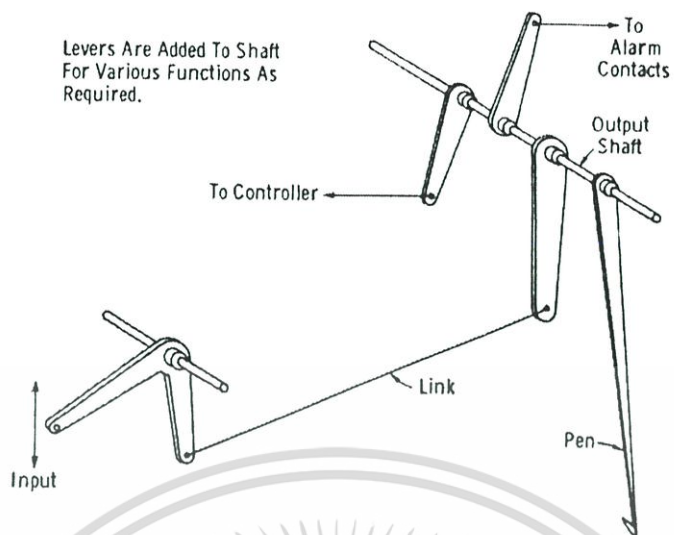


รูปที่ 3.21 เครื่องควบคุมและบันทึกอุณหภูมิแบบใช้หลักการทางกล

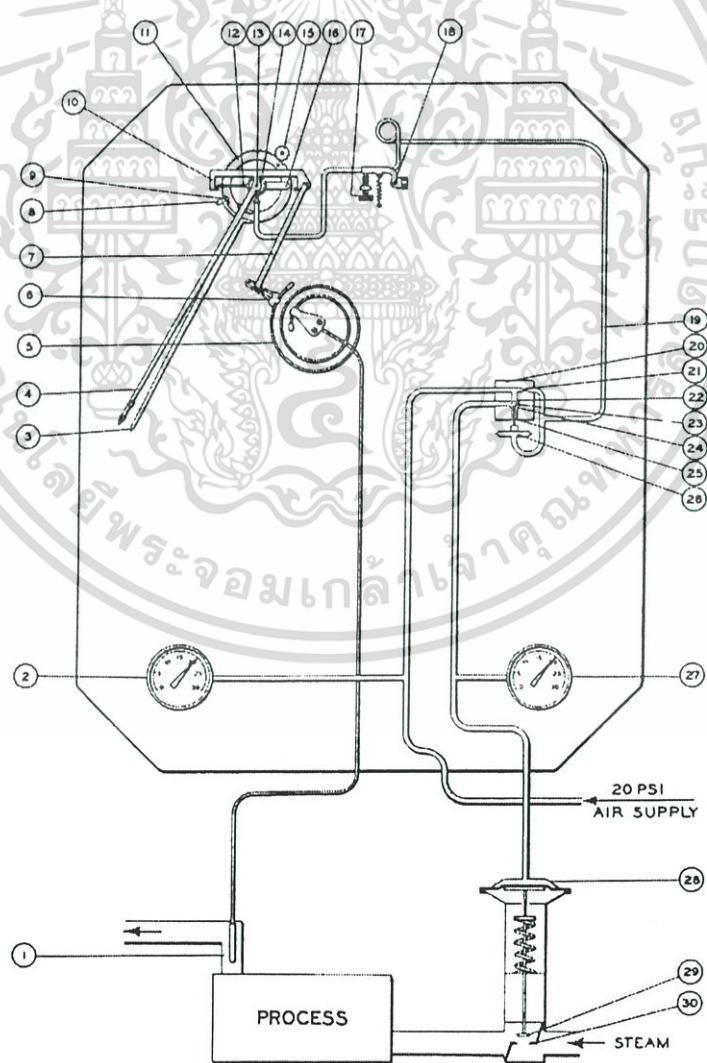
หมายเลขดังรูปที่ 3.21 มีรายละเอียดดังต่อไปนี้คือ

- |                          |                      |                           |
|--------------------------|----------------------|---------------------------|
| 1. Supply Pressure Gauge | 11. Screw            | 21. Orifice Nut           |
| 2. Set Pointer           | 12. Pen arm Screw    | 22. Orifice Nut           |
| 3. Pen                   | 13. Micrometer Screw | 23. Screws                |
| 4. Reference Arc         | 14. Adjusting Screw  | 24. Relay Valve           |
| 5. Locking Tab           | 15. Nozzle           | 25. Four Screws           |
| 6. Movement Plate        | 16. Connecting Link  | 26. Screw                 |
| 7. Pen movement Arm      | 17. Take-off Arm     | 27. Pull Knob             |
| 8. Knob                  | 18. Screw            | 28. Chart Plate           |
| 9. -                     | 19. Screw            | 29. Capsular Chamber      |
| 10. Nozzle Tip           | 20. Manifold         | 30. Output Pressure Gauge |

ระบบควบคุมอุณหภูมิแบบนี้จะใช้หลักการทางกล โดยกลไกการทำงานใช้พื้นฐานของระบบคันโยก (Basic Lever Mechanisms) เป็นตัวควบคุมและการบันทึกอุณหภูมิแสดงดังรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.22 ระบบคันโยก



รูปที่ 3.23 โครงสร้างและหลักการควบคุมทางกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.23 มีรายละเอียดดังนี้

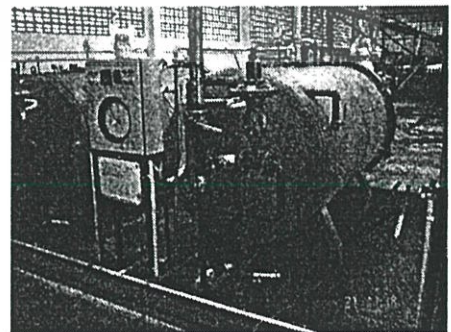
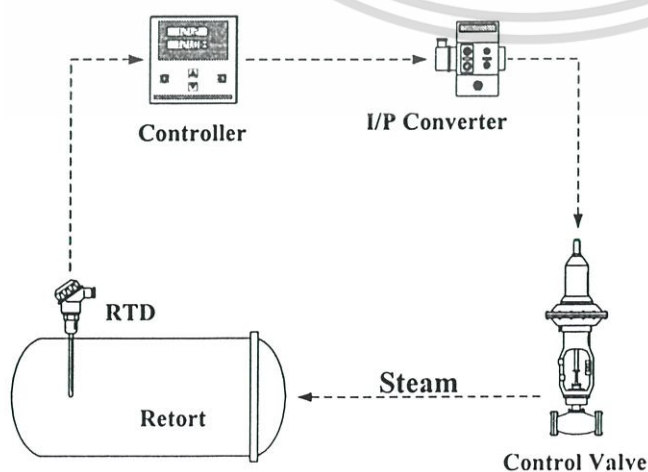
- |                          |                      |                           |
|--------------------------|----------------------|---------------------------|
| 1. Bulb                  | 11. Gear             | 21. Orifice               |
| 2. Supply pressure gauge | 12. Circular baffle  | 22. Relay valve seat      |
| 3. Set pointer           | 13. Micrometer screw | 23. Air relay ball        |
| 4. Recording arm         | 14. Nozzle           | 24. Relay valve seat      |
| 5. Bourdon spring        | 15. Small gear       | 25. Pin                   |
| 6. Movement plate        | 16. Pivot            | 26. Capsular chamber      |
| 7. Pen movement arm      | 17. Adjusting screw  | 27. Output pressure gauge |
| 8. -                     | 18. -                | 28. Remove chart plate    |
| 9. -                     | 19. Nozzle tube      | 29. Valve disc            |
| 10. Moving arm           | 20. Pneumatic relay  | 30. Seat valve            |

หลักการทำงานของระบบเป็นดังนี้ แขนเคลื่อนที่ (10) เป็นตัวควบคุมระยะห่างระหว่างแขนวงกลม (12) กับหัวนอชเช็ด (14) ซึ่งเป็นสัญญาณลมที่ป้อนกลับไปยังรีเลย์วาล์ว (23) ซึ่งทำหน้าที่ควบคุมการจ่ายลมให้กับวาล์วควบคุมไอน้ำ เมื่ออุณหภูมิไปถึงค่าเป้าหมายแขนบันทึก (4) จะอยู่ตรงกับตำแหน่งแขนตั้งอุณหภูมิ (3) ทำให้รีเลย์วาล์ว (23) ปิด ซึ่งทำให้ลมที่ส่งไปยังวาล์วควบคุมลดลงไปด้วย

การวัดอุณหภูมิโดยกระเปาะปรอท (1) ขยายตัวไปดันสปริงบูคองร์ (5) ที่เชื่อมต่อกับแขนเคลื่อนที่ (10) หมุนไปตามเข็มนาฬิกาไปยังแขนเชื่อมต่อ (7) ไปยังแขนบันทึกอุณหภูมิ (4)

### 3.3.2.2 ระบบไฟฟ้า

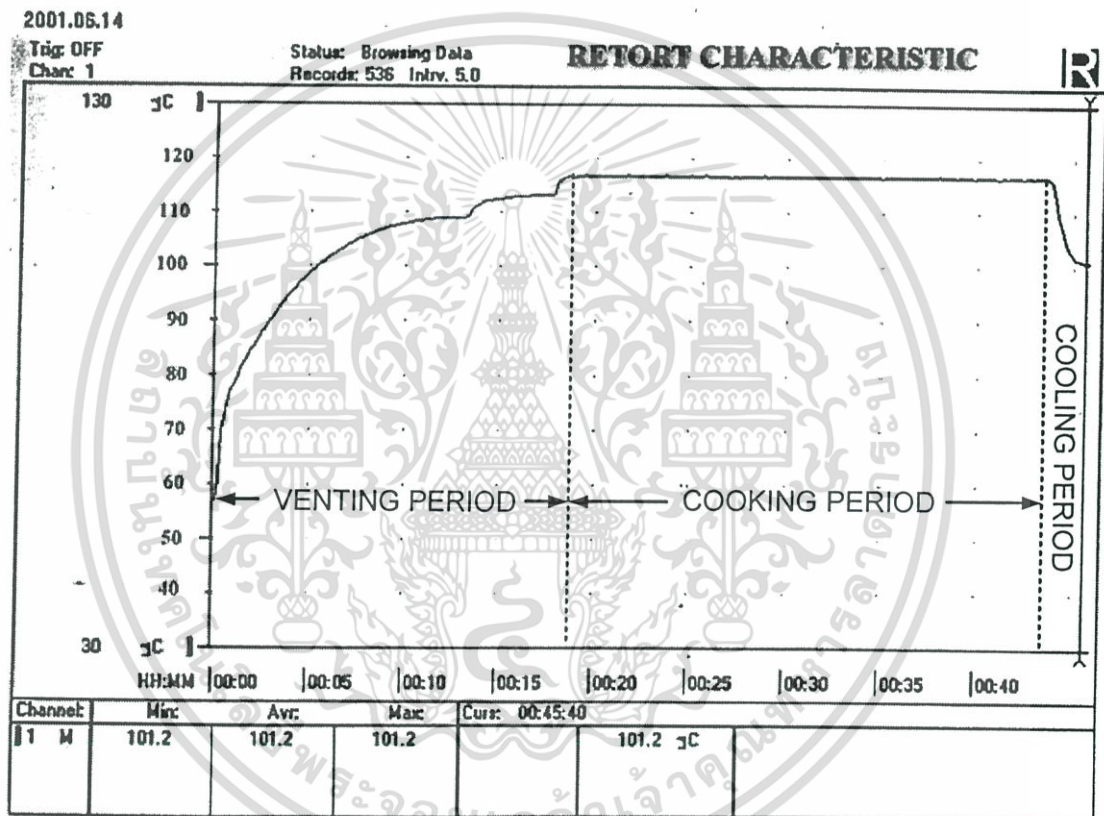
หลังจากการพัฒนาการควบคุมสูงขึ้น ระบบไฟฟ้าจึงได้เข้ามาใช้ในการควบคุมอุณหภูมิหม้อฆ่าเชื้อ โดยหลักการควบคุมมีดังนี้



เอกสารรูปที่ 3.24 หลักการควบคุมอุณหภูมิโดยระบบไฟฟ้า ทำนั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เริ่มจากไอน้ำไหลผ่านวาล์วควบคุมเข้าไปในหม้อฆ่าเชื้อ สังเกตค่าความดันและอุณหภูมิในเครื่องได้จากเกจวัดความดัน (PI) และเทอร์โมมิเตอร์แบบปรอทแก้ว (TI) โดยใช้ RTD (TE) เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิในหม้อฆ่าเชื้อและส่งสัญญาณไปยังตัวควบคุมอุณหภูมิ (TRC) โดยใช้ในการควบคุมเป็นแบบ PID และส่งสัญญาณเอาต์พุตเป็นสัญญาณไฟฟ้าขนาด 4-20 mA. ไปยังตัวแปลงสัญญาณไฟฟ้าเป็นสัญญาณลม (I to P Transducer) ขนาดความดัน 3-15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (PSI) ไปยังวาล์วควบคุมเพื่อควบคุมปริมาณไอน้ำ

### 3.3.2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลา



รูปที่ 3.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาของกระบวนการหม้อฆ่าเชื้อ

จากรูปที่ 3.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาของกระบวนการหม้อฆ่าเชื้อเป็น 3 ช่วง โดยสามารถอธิบายได้ดังนี้

1. **การไล่อากาศ** เป็นช่วงเวลาการเพิ่มอุณหภูมิตั้งแต่อุณหภูมิบรรยากาศไปสู่อุณหภูมิพร้อมฆ่าเชื้อในทางวิทยาศาสตร์อาหารเรียกว่า “Come up Time” และ “Come-up Temperature” โดยศึกษาอุณหภูมิและเวลาในการไล่อากาศจากการกระจายความร้อน (Heat distribution) ช่วงนี้จึงเป็นช่วงที่ใช้พลังงานสูงมาก ดังนั้นวาล์วควบคุมไอน้ำในช่วงนี้จะเปิดอย่างเต็มที่ ส่วนใหญ่จะเปิด 100%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การฆ่าเชื้อ เป็นการรักษาระดับอุณหภูมิให้คงที่ตามข้อกำหนด โดยศึกษาอุณหภูมิและเวลาในการฆ่าเชื้อจากการแทรกผ่านความร้อน (Heat Penetration) ของแต่ละผลิตภัณฑ์ ช่วงนี้จึงต้องการปริมาณไอน้ำเพียงเล็กน้อยในการควบคุมอุณหภูมิ ดังนั้นวาล์วควบคุมไอน้ำในช่วงนี้จะลอยตัวอยู่ในช่วงแคบๆ ประมาณ 20-50 %
3. การทำเย็น เป็นการลดอุณหภูมิลงอย่างทันที เพื่อให้เชื้อโรคช็อกและตายในที่สุด ดังนั้นวาล์วควบคุมไอน้ำในช่วงนี้จะปิดสนิทที่ตำแหน่ง 0%

### 3.4 การจำลองกระบวนการหม้อฆ่าเชื้อ

#### 3.4.1 หลักการพื้นฐานระบบความร้อน

การจำลองระบบเป็นการคำนวณตัวแปรการทำงานต่างๆ ในระบบความร้อนเช่น ความดัน, อุณหภูมิ และอัตราการไหลของไอน้ำ เป็นต้น วิธีการจำลองระบบของส่วนต่างๆ ได้จากพื้นฐานทางเทอร์โมไดนามิกส์ได้แก่ สมดุลพลังงานและสมดุลมวล โดยการตั้งสมการที่สัมพันธ์กับตัวแปรการทำงานเหล่านี้ในระบบจริง

สำหรับการจำลองของหม้อฆ่าเชื้อในอุตสาหกรรมการผลิตอาหารสร้างขึ้นมาเพื่อใช้วิเคราะห์การใช้พลังงานในระบบ โดยใช้หลักคณิตศาสตร์ คือ สมการความแตกต่างเชิงเส้นแบบชั้นแรก (First order linear differential equation) ดังต่อไปนี้

จากหลักการออกแบบระบบความร้อน (Designed of Thermal Systems) สมดุลพลังงานเขียนเป็นสมการความแตกต่างได้ดังนี้

$$mc \frac{dT}{dt} = (T_f - T)hA \quad (3.1)$$

เมื่อ  $m$  = มวล

$c$  = ค่าความร้อนจำเพาะ

$T_f$  = อุณหภูมิของของไหล

$T$  = อุณหภูมิของวัสดุ

$h$  = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

$A$  = พื้นที่ผิว

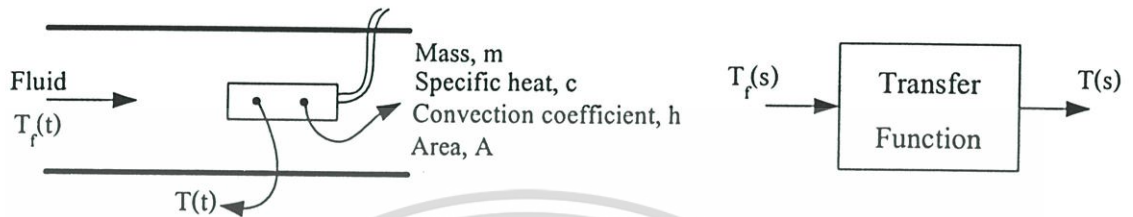
แปลงลาปลาซตลอดสมการได้เป็น

$$\left(\frac{mc}{hA}\right)[sL\{T\} - T(0)] = L\{T_f\} - L\{T\} \quad (3.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น เขียนเป็นฟังก์ชันถ่ายโอนได้เป็น

$$TF = \frac{1 + T(0) \left[ \frac{(mc/hA)}{L\{T_f\}} \right]}{(mc/hA)s + 1} \quad (3.3)$$



รูปที่ 3.26 หลักการถ่ายเทความร้อนและฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบความร้อน

กรณีที่มีค่าอุณหภูมิเริ่มต้น  $T = T - T_o$  จะได้

$$mc \frac{d(T - T_o)}{dt} = [(T_f - T_o) - (T - T_o)]hA \quad (3.4)$$

ดังนั้น เขียนเป็นฟังก์ชันถ่ายโอนได้เป็น

$$TF = \frac{L\{T - T_o\}}{L\{T_f - T_o\}} = \frac{1}{\left(\frac{mc}{hA}\right)s + 1} \quad (3.5)$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนตามสมการที่ 3.5 เป็นผลตอบสนองของ  $T$  ที่เปลี่ยนแปลงตามค่า  $T_f$  ถ้า  $T_f$  เป็นการเพิ่มขึ้นแบบขั้นบันไดโดยมีค่าเป็น  $\Delta$  จากค่า  $T_o$  ดังรูปที่ 3.27 ดังนั้นสามารถแปลงรูป  $(T - T_o)$  จากสมการที่

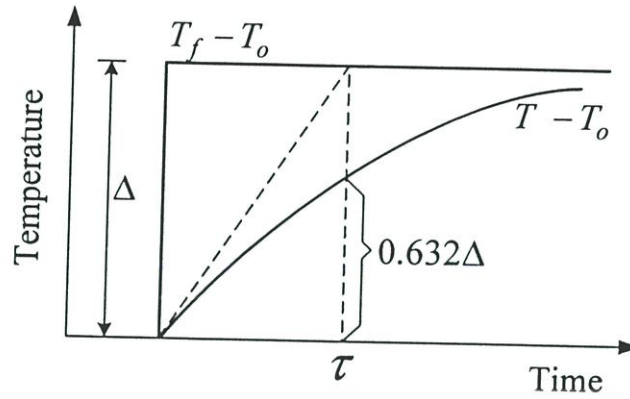
$$L\{T - T_o\} = L\{T_f - T_o\} \frac{1}{\left(\frac{mc}{hA}\right)s + 1} = \frac{\Delta}{s \left[ \left(\frac{mc}{hA}\right)s + 1 \right]} \quad (3.6)$$

แปลงลาปลาซกลับได้สมการเป็น

$$T - T_o = \Delta [1 - e^{-t/\tau}] \quad (3.7)$$

เมื่อ  $\tau = mc/hA$  ซึ่งเป็นค่าคงที่ทางเวลา (Time constant) ดังนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านอื่น ๆ  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



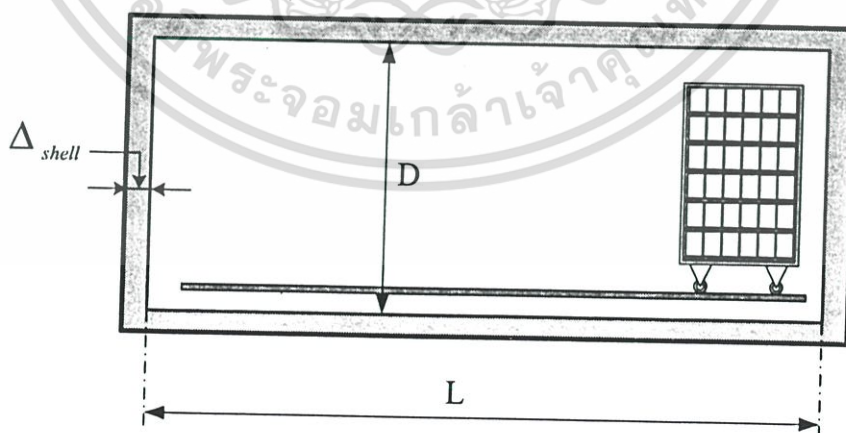
รูปที่ 3.27 การตอบสนองแบบขั้นบันได

### 3.4.2 การจำลองกระบวนการ (Simulation of Retort)

กระบวนการหม้อฆ่าเชื้อมีลักษณะเป็นระบบไดนามิกส์ ซึ่งการวิเคราะห์ระบบไดนามิกส์เป็นส่วนสำคัญอย่างยิ่งที่ทำให้สามารถทราบถึงการไหลของความร้อนทั้งหมดในกระบวนการ เพื่อนำไปสู่จุดที่เหมาะสมในการประหยัดพลังงาน

แบบจำลองหม้อฆ่าเชื้อนี้ได้ศึกษาจากการจำลองกระบวนการหม้อฆ่าเชื้อในอุตสาหกรรมอาหารกระป๋องจากบริษัท *Enconet (Thailand)* แสดงดังรูปที่ 3.28 โดยใช้ไอน้ำเป็นตัวกลางสำหรับการให้ความร้อน (Sterilization) กับอุปกรณ์ต่างๆ ได้แก่ กระป๋อง (Cans), ตะกร้ารถเข็น (Trolley), ตัวหม้อฆ่าเชื้อ (Shell) และอุปกรณ์อื่นๆ

ขั้นแรกพิจารณาจากกรณีที่เงื่อนไขของระบบที่มีความเสถียรภาพตลอดทั้งหมด การถ่ายเทความร้อนจากพื้นที่ผิวด้านนอกสู่บรรยากาศสามารถเขียนสมการอุณหภูมิจนในกระป๋อง, ตะกร้ารถเข็น, ตัวหม้อได้ดังนี้



รูปที่ 3.28 แบบจำลองกระบวนการหม้อฆ่าเชื้อ

ในกรณีนี้เราสามารถทำการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนเป็นแบบผกผันเนื่องจากเส้นผ่านศูนย์กลางของหม้อฆ่าเชื้อมีขนาดใหญ่ จากสมการที่ 3.8 จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- กระป๋อง (Cans)

$$T_c = T_{c,o} + (T_{st} - T_{c,o}) [1 - e^{-t/(mc/hA)_c}] \quad (3.9)$$

- ตัวหม้อฆ่าเชื้อ (Shell)

$$T_s = T_{s,o} + (T_{st} - T_{s,o}) [1 - e^{-t/(mc/hA)_s}] \quad (3.10)$$

- ตะกร้ารถเข็น (Trolleys)

$$T_t = T_{t,o} + (T_{st} - T_{t,o}) [1 - e^{-t/(mc/hA)_t}] \quad (3.11)$$

(τ) เป็นค่าคงที่ของเวลาสำหรับกระบวนการฆ่าเชื้อด้วยความร้อน ซึ่งเป็นตัวสำคัญในการจำลองแบบทางคณิตศาสตร์ สำหรับสมการที่กล่าวข้างต้นเป็นการสมมติฐานดังต่อไปนี้

- เป็นระบบแบบสถานะไม่คงที่ (Unsteady-State)
- ไม่คิดค่าความต้านทานเนื่องจากการนำความร้อน
- คุณสมบัติของวัสดุมีค่าคงที่
- สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีค่าคงที่และคำนวณ โดยการวัดและการคาดคะเน สถานการณ์จริงภายในกระบวนการ

ข้อมูลอินพุตสำหรับการคำนวณตัวหม้อ (Shell) เป็นดังนี้

D = เส้นผ่านศูนย์กลางของหม้อฆ่าเชื้อ (mm)

L = ความยาวของหม้อฆ่าเชื้อ (mm)

$\Delta_{shell}$  = ความหนาของวัสดุโครงสร้าง (mm)

$C_{ps}$  = ค่าความร้อนจำเพาะของวัสดุ (kJ/kg\*K)

$k_s$  = ค่าสภาพการนำความร้อนของวัสดุ (W/m\*K)

$h_s$  = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนวัสดุ (W/m<sup>2</sup>\*K)

$\rho_s$  = ค่าความหนาแน่นของวัสดุ (kg/cm<sup>3</sup>)

สามารถคำนวณค่าต่างๆ ได้ดังนี้

$A_{si}$  = พื้นที่ผิวด้านใน (m<sup>2</sup>)

$A_{so}$  = พื้นที่ผิวด้านนอก (m<sup>2</sup>)

$m_s$  = มวลของวัสดุ (kg)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$A_{si} = \left( \pi DL + 2\pi \frac{D^2}{4} \right) \times 10^{-6} \quad (3.12)$$

$$A_{so} = \left\{ \pi(D + 2\Delta_{shell})(L + 2\Delta_{shell}) + 2\pi \frac{(D + 2\Delta_{shell})^2}{4} \right\} \times 10^{-6} \quad (3.13)$$

$$m_s = \frac{\rho_s}{2} (A_{si} + A_{so}) (\Delta_{shell}) \times 10^{-3} \quad (3.14)$$

$$\left( \frac{mc}{hA} \right)_s = \frac{m_s C_{ps}}{h_s A_{si}} \times 10^3 \quad (3.15)$$

ข้อมูลอินพุตสำหรับการคำนวณตะกร้ารถเข็น (Trolley) เป็นดังนี้

$m_t$  = มวลของตะกร้ารถเข็น (kg)

number<sub>t</sub> = จำนวนตะกร้ารถเข็น

$C_{pt}$  = ค่าความร้อนจำเพาะของตะกร้ารถเข็น (kJ/kg\*K)

$A_t$  = พื้นที่ผิวของตะกร้ารถเข็น (m<sup>2</sup>)

$h_t$  = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนตะกร้ารถเข็น (W/m<sup>2</sup>\*K)

สามารถคำนวณค่าต่างๆ ได้ดังนี้

$m_{tt}$  = มวลรวมของตะกร้ารถเข็น (kg)

$$m_{tt} = \text{number}_t * m_t \quad (3.16)$$

$$\left( \frac{mc}{hA} \right)_t = 4 \frac{m_{tt} C_{pt}}{h_t A_t} \times 10^3 \quad (3.17)$$

ข้อมูลอินพุตสำหรับการคำนวณกระป๋อง (Can) เป็นดังนี้

number<sub>c</sub> = จำนวนกระป๋อง

$D_c$  = เส้นผ่านศูนย์กลางของกระป๋อง (mm)

$L_c$  = ความยาวของกระป๋อง (mm)

%Wcont = เปอร์เซ็นต์น้ำในกระป๋อง

$\rho_c$  = ค่าความหนาแน่นของกระป๋อง (kg/cm<sup>3</sup>)

$h_c$  = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนกระป๋อง (W/m<sup>2</sup>\*K)

สามารถคำนวณค่าต่างๆ ได้ดังนี้

$V_c$  = ปริมาตรของกระป๋อง (m<sup>3</sup>)

$V_{tc}$  = ปริมาตรรวมของกระป๋อง (m<sup>3</sup>)

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$A_c$  = พื้นที่ผิวของกระป๋อง ( $m^2$ )

$A_{ic}$  = พื้นที่ผิวรวมของกระป๋อง ( $m^2$ )

$C_{pc}$  = ค่าความร้อนจำเพาะของกระป๋อง ( $kJ/kg \cdot K$ )

$$V_c = \left( \frac{\pi D_c^2}{4} \right) (L_c) \times 10^{-9} \quad (3.18)$$

$$V_{ic} = V_c * number_c \quad (3.19)$$

$$m_{ic} = V_{ic} * \rho_c \quad (3.20)$$

$$A_c = \left( \pi D_c L_c + 2 \frac{\pi D_c^2}{4} \right) \times 10^{-6} \quad (3.21)$$

$$A_{ic} = A_c * number_c \quad (3.22)$$

$$\left( \frac{mc}{hA} \right)_c = \frac{m_{ic} C_{pc}}{h_c A_{ic}} \times 10^3 \quad (3.23)$$

เงื่อนไขกระบวนการ (Process Conditions)

$T_{c,o}$  = อุณหภูมิเริ่มต้นของกระป๋อง ( $^{\circ}C$ )

$T_{s,o}$  = อุณหภูมิเริ่มต้นของตัวหม้อ ( $^{\circ}C$ )

$T_{i,o}$  = อุณหภูมิเริ่มต้นของตะกร้ารถเข็น ( $^{\circ}C$ )

$P_{steam}$  = ความดันไอน้ำ (bar)

$h_{st}$  = ค่าเอนทาลปีของไอน้ำ

Heating = เวลาให้ความร้อน (min)

Increment = เวลาเพิ่มของการให้ความร้อน (min)

Time,m = เวลา (min)

Time,h = เวลา (hr)

$T_c$  = อุณหภูมิของกระป๋อง ( $^{\circ}C$ )

$T_s$  = อุณหภูมิของตัวหม้อฆ่าเชื้อ ( $^{\circ}C$ )

$T_i$  = อุณหภูมิของตะกร้ารถเข็น ( $^{\circ}C$ )

$T_{st}$  = อุณหภูมิไอน้ำด้านเข้า ( $^{\circ}C$ )

$T_{end}$  = อุณหภูมิที่ต้องการ ( $^{\circ}C$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สําคัญ ความร้อนของกระป๋อง (kW) ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- $Q_s$  = ความร้อนของตัวหม้อ (kW)  
 $Q_c$  = ความร้อนของตะกร้ารถเข็น (kW)  
 $Q_{trans}$  = ความร้อนโอนย้าย (kW)  
 Sum = ความร้อนรวม (kW)  
 M = อัตราการไหลแบบมวล (kg/h)

$$Heating = -\left(\frac{mc}{hA}\right)_{cm} \ln \left[ 1 - \frac{(T_{end} - T_{c,o})}{(T_{st} - T_{c,o})} \right] / 60 \quad (3.24)$$

$$Increment = \frac{Heating}{10} \quad (3.25)$$

นำสมการที่ 3.9, 3.10, 3.11 แทนในสมการที่ 3.1 จะได้

$$Q_c = h_c A_{ic} (T_{st} - T_c) \quad (3.26)$$

$$Q_s = h_s A_s (T_{st} - T_s) \quad (3.27)$$

$$Q_t = h_t A_{tt} (T_{st} - T_t) \quad (3.28)$$

สมการการถ่ายเทความร้อนจากภายนอกสู่ภายในเป็น

$$Q_{trans} = \frac{T_{in} - T_{out}}{\frac{1}{h_{in} A_{in}} + \frac{\delta_{steel}}{k_{steel} A_{steel}} + \frac{1}{h_{out} A_{out}}} \quad (3.29)$$

ดังนั้น

$$sum = Q_c + Q_s + Q_t + Q_{trans} \quad (3.30)$$

ตัวอย่างการจำลองกระบวนการหม้อฆ่าเชื้อ (Retort Simulation)

#### 1. ตัวหม้อฆ่าเชื้อ (Shell)

เส้นผ่านศูนย์กลาง ( $D_s$ )	= 1,200	mm.
ความยาว ( $L_s$ )	= 3,000	mm.
ความหนา ( $\Delta_{shell}$ )	= 8	mm.
ค่าความร้อนจำเพาะของกระป๋อง ( $C_{ps}$ )	= 0.5	kJ/kg*K

เอกสารนี้เป็นเอกสารนำความร้อน (k) เพื่อการคำนวณเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน } (h_s) = 50 \quad \text{W/m}^2 \cdot \text{K}$$

$$\text{ค่าความหนาแน่น } (\rho_s) = 7,850 \quad \text{kg/cm}^3$$

จากข้อมูลดังกล่าวนำไปคำนวณตามสมการที่ 3.12 - 3.15 ได้ดังนี้

$$\text{พื้นที่ผิวด้านใน } (A_{si}) = 13.56 \quad \text{m}^2$$

$$\text{พื้นที่ผิวด้านนอก } (A_{so}) = 13.84 \quad \text{m}^2$$

$$\text{มวลของวัสดุ } (m_s) = 860.43 \quad \text{kg}$$

$$\left( \frac{mc}{hA} \right)_s = 634.31$$

## 2. ตะกร้ารถเข็น (Trolley)

$$\text{มวลของวัสดุ } (m_t) = 20 \quad \text{kg}$$

$$\text{จำนวนตะกร้า (number}_t) = 4 \quad \text{ตะกร้า}$$

$$\text{ค่าความร้อนจำเพาะของกระป๋อง } (C_{pt}) = 0.5 \quad \text{kJ/kg} \cdot \text{K}$$

$$\text{พื้นที่ผิวของตะกร้า } (A_t) = 10 \quad \text{m}^2$$

$$\text{สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน } (h_t) = 50 \quad \text{W/m}^2 \cdot \text{K}$$

จากข้อมูลดังกล่าวนำไปคำนวณตามสมการที่ 3.16 - 3.17 ได้ดังนี้

$$\text{มวลของวัสดุ } (m_t) = 80 \quad \text{kg}$$

$$\left( \frac{mc}{hA} \right)_t = 320$$

## 3. กระป๋อง (Cans)

$$\text{จำนวนกระป๋อง (number}_c) = 9,240 \quad \text{กระป๋อง}$$

$$\text{เส้นผ่านศูนย์กลาง } (D_c) = 100 \quad \text{mm.}$$

$$\text{ความยาว } (L_c) = 30 \quad \text{mm.}$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์น้ำในกระป๋อง } (\%W_{cont}) = 78$$

$$\text{ค่าความหนาแน่น } (\rho_c) = 900 \quad \text{kg/cm}^3$$

$$\text{สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน } (h_c) = 25 \quad \text{W/m}^2 \cdot \text{K}$$

จากข้อมูลดังกล่าวนำไปคำนวณตามสมการที่ 3.18 - 3.23 ได้ดังนี้

$$\text{ปริมาตรของกระป๋อง } (V_c) = 0.0002355 \quad \text{m}^3$$

$$\text{ปริมาตรรวมของกระป๋อง } (V_{tc}) = 2.18 \quad \text{m}^3$$

$$\text{มวลรวมของกระป๋อง } (m_{tc}) = 1,962 \quad \text{kg}$$

$$\text{พื้นที่ผิวของกระป๋อง } (A_c) = 0.02512 \quad \text{m}^2$$

$$\text{พื้นที่ผิวรวมของกระป๋อง } (A_{tc}) = 232.1 \quad \text{m}^2$$

$$\left( \frac{mc}{hA} \right)_c = 1,221$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. เงื่อนไขของกระบวนการ (Process conditions)

อุณหภูมิเริ่มต้น	= 30	องศาเซลเซียส
ความดันไอน้ำ ( $P_{\text{steam}}$ )	= 7	kg/cm <sup>3</sup>
อุณหภูมิไอน้ำทางเข้า ( $T_{\text{st}}$ )	= 165	องศาเซลเซียส
อุณหภูมิที่ต้องการ ( $T_{\text{cmd}}$ )	= 102	องศาเซลเซียส

จากข้อมูลดังกล่าวนำไปคำนวณตามสมการที่ 3.24 - 3.25 ได้ดังนี้

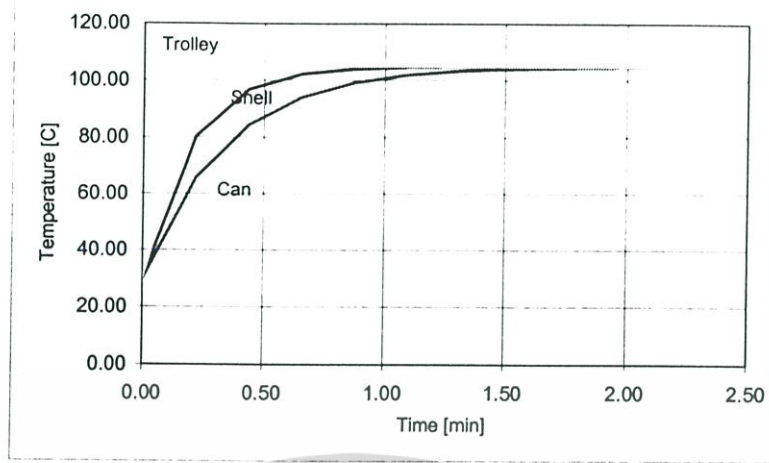
เวลาให้ความร้อน (Heating)	= 15.51	นาที
ช่วงเวลาที่อุณหภูมิเพิ่ม (Increment)	= 0.78	นาที

จากข้อมูลทั้งหมดนำไปทำการจำลองในโปรแกรม Microsoft excel ได้ดังต่อไปนี้

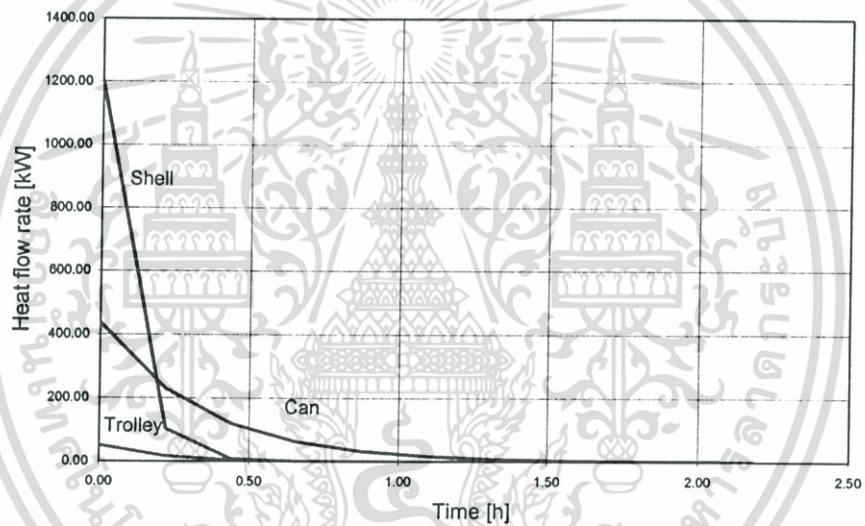


ตารางที่ 3.4 แสดงการจำลองการใช้พลังงานของกระบวนการหมักเนื้อ

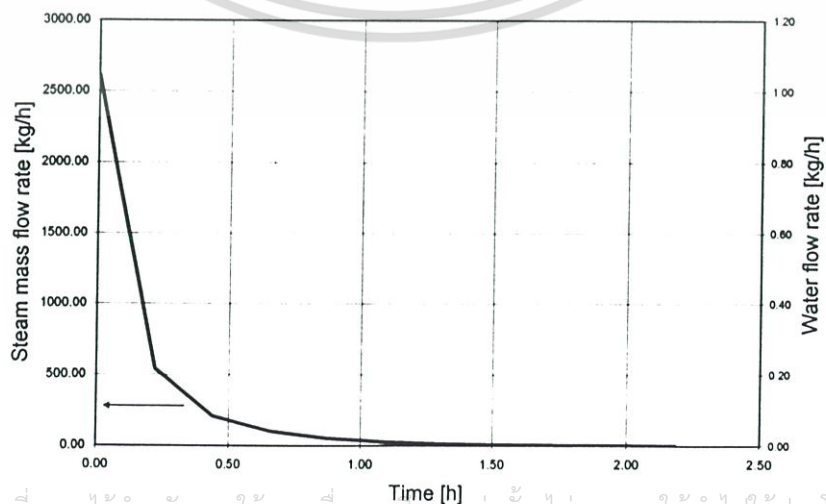
Time [min]	Time[h]	Tc[C]	Ts[C]	Tt[C]	Qc[kW]	Qs[kW]	Qt[kW]	Qtrans[kW]	sum Q[kW]	M[kg/h]
0.0000	0.00	30.00	30.00	30.00	783.37	91.56	2160.00	0.6029	3035.53	5276.09
0.7755	0.01	35.05	39.55	48.27	754.08	85.09	1867.70	0.6029	2707.46	4705.87
1.5510	0.03	39.91	48.42	64.07	725.88	79.07	1614.95	0.6029	2420.50	4207.10
2.3264	0.04	44.58	56.67	77.72	698.74	73.48	1396.40	0.6029	2169.22	3770.35
3.1019	0.05	49.09	64.33	89.54	672.62	68.28	1207.43	0.6029	1948.93	3387.45
3.8774	0.06	53.42	71.45	99.75	647.47	63.45	1044.04	0.6029	1755.55	3051.35
4.6529	0.08	57.59	78.07	108.58	623.26	58.96	902.75	0.6029	1585.57	2755.90
5.4284	0.09	61.61	84.21	116.21	599.95	54.79	780.58	0.6029	1435.93	2495.81
6.2039	0.10	65.47	89.93	122.82	577.52	50.92	674.95	0.6029	1303.99	2266.48
6.9793	0.12	69.20	95.24	128.52	555.93	47.32	583.61	0.6029	1187.46	2063.93
7.7548	0.13	72.78	100.17	133.46	535.14	43.97	504.63	0.6029	1084.35	1884.72
<b>Energy Consumption</b>										<b><u>834.54</u></b>



รูปที่ 3.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและอุณหภูมิ



รูปที่ 3.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและพลังงานที่ใช้ในแต่ละส่วน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 รูปที่ 3.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและการใช้พลังงานรวม

## บทที่ 4

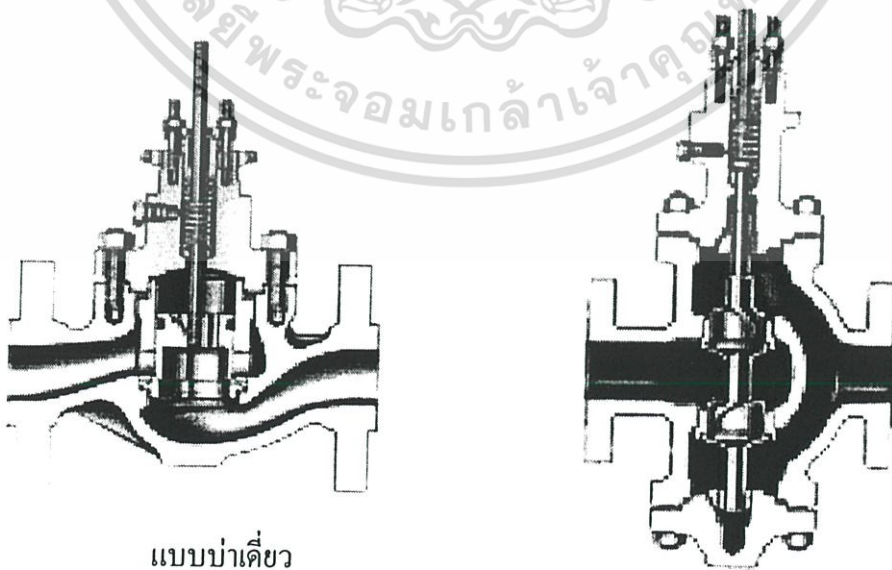
# เทคนิคการเปิดตาราง

เทคนิคการเปิดตาราง (Look-up Table) เป็นเทคนิคการควบคุมที่พัฒนาจากการควบคุมแบบป้อนล่วงหน้า (Feed Forward Control) โดยการคำนวณค่าของตัวแปรการจัดการ (Manipulate Variable) เพื่อรักษาค่าตัวแปรการควบคุม (Controlled Variable) ตามค่าเป้าหมาย (Set Point) โดยใช้กฎสมดุลพลังงาน (Energy Balance Law) ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์กับระบบควบคุมได้หลากหลาย เช่น การควบคุมระดับ, การควบคุมอัตราการไหล เป็นต้น

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการกล่าวถึงการใช้เทคนิคการเปิดตารางร่วมกับการควบคุมแบบพีไอดีในระบบควบคุมอุณหภูมิสำหรับกระบวนการหมักเอทานอล ซึ่งเป็นการควบคุมการเปิดตำแหน่งสูงสุดของวาล์วควบคุมในช่วงเริ่มต้นของการไล่อากาศในตำแหน่งที่เหมาะสม ซึ่งใช้การคำนวณสมดุลพลังงานจากการออกแบบระบบความร้อนดังที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 3. ดังนั้นในบทนี้จะกล่าวถึงวาล์วควบคุมซึ่งใช้เป็นตัวกระทำ (Action) ในกระบวนการเป็นส่วนสำคัญ

### 4.1 วาล์วควบคุม (Control Valve)

วาล์วควบคุมมีความสำคัญมากในการควบคุมกระบวนการผลิตให้เป็นไปตามที่ต้องการ ในทางปฏิบัติวาล์วควบคุมส่วนใหญ่จะติดตั้งสำหรับการควบคุมอัตโนมัติ โดยใช้วาล์วแบบโกล์บ วาล์วที่มีบ่าเดี่ยว (Single Seat) หรือบ่าคู่ (Double Seat) ดังรูปที่ 4.1



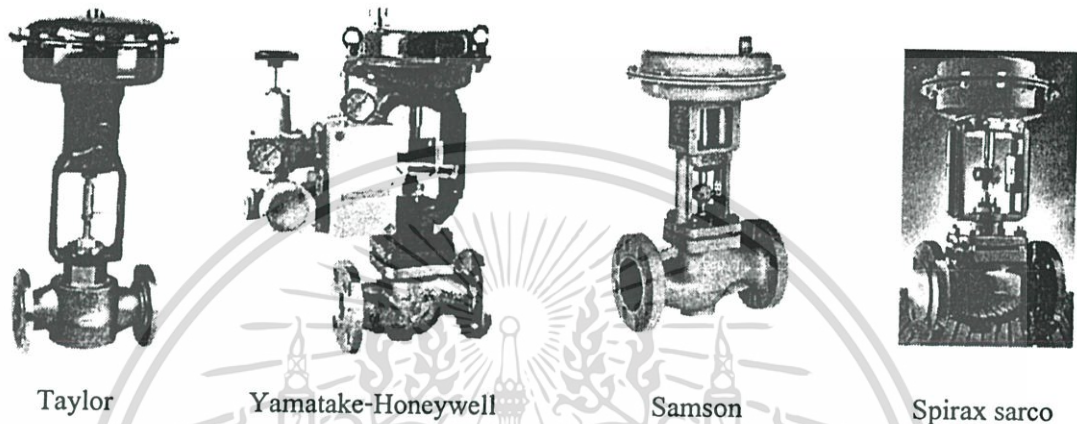
แบบบ่าเดี่ยว

รูปที่ 4.1 บ่าวาล์วที่ใช้กันโดยส่วนใหญ่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับข้อแตกต่างระหว่างวาล์วเดี่ยวและวาล์วคู่ ถ้าต้องการปิดให้สนิทแล้ววาล์วเดี่ยวจะปิดตัวได้สนิทดีกว่า แต่ถ้าต้องการให้กำลังขับของตัวขับเคลื่อนวาล์ว (Actuator) ต่ำ วาล์วคู่จะดีกว่า เนื่องจากแรงปฏิกิริยาที่มีผลมาจากความดันและการไหลน้อยกว่าจนแทบตัดทิ้งได้

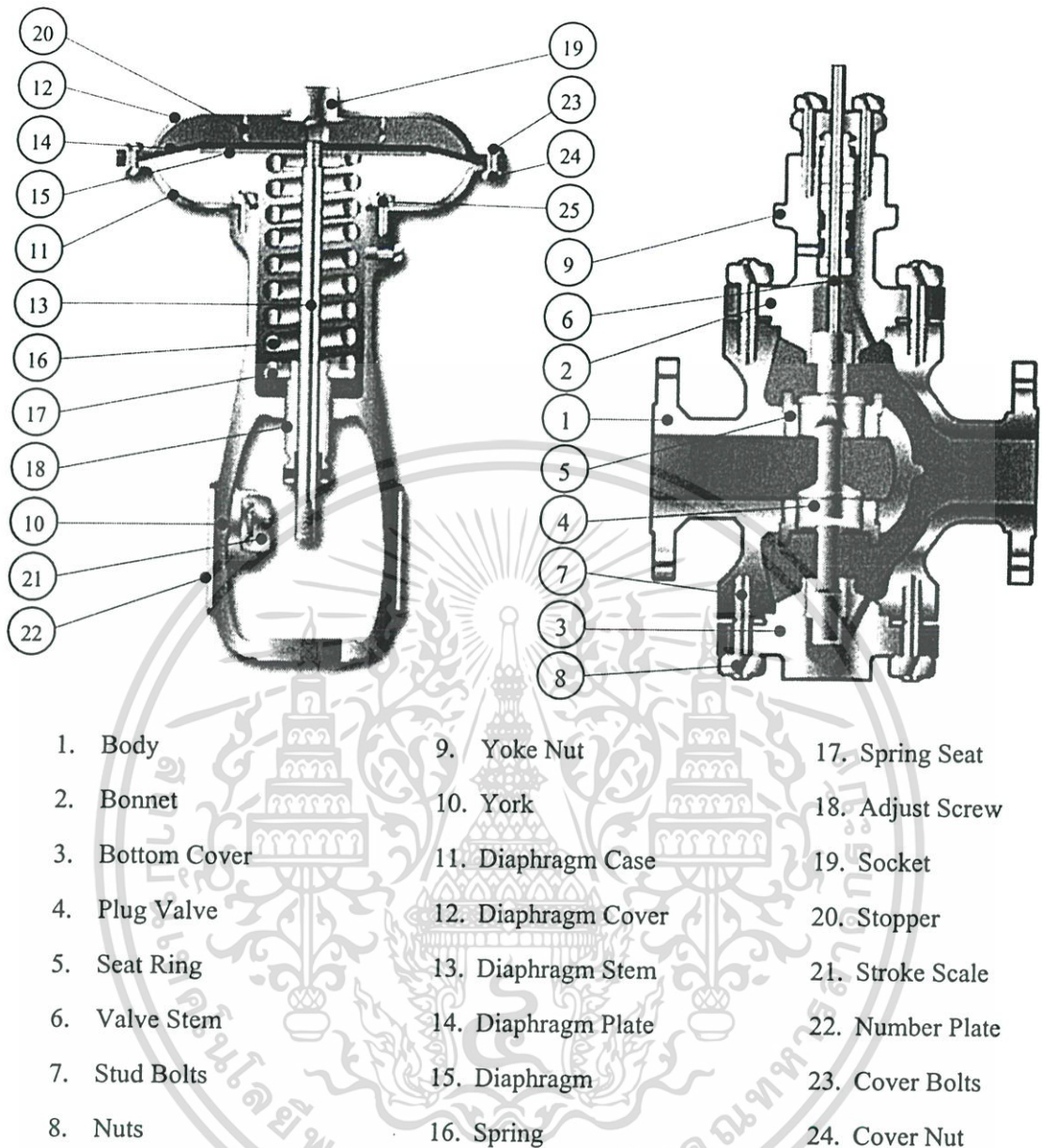
สำหรับบริษัทผู้ผลิตวาล์วควบคุมที่ใช้สำหรับกระบวนการอาหารกระป๋องที่พบในประเทศไทยส่วนใหญ่ แสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ตัวอย่างบริษัทผู้ผลิตวาล์วควบคุมสำหรับกระบวนการฆ่าเชื้ออาหารกระป๋อง

ลักษณะ โครงสร้างของวาล์วควบคุมโดยทั่วไปแสดงดังรูปที่ 4.3 สำหรับการพิจารณาการเลือกใช้งานวาล์วควบคุมในลักษณะโดยทั่วไป ขนาด และวัสดุของตัวเรือนวาล์ว และวัสดุทรมต้องคำนึงถึงสิ่งต่อไปนี้

- ความดันใช้งานสูงสุดของของไหล
- ธรรมชาติของของไหล ได้แก่ สภาวะก่กร้อน ความเป็นพิษ และคุณสมบัติการติดไฟ
- ความเป็นไปได้ของของแข็งแขวนลอยในของไหลและการสะสมตัวของของแข็งที่เหลืออยู่
- ความเป็นไปได้ของการเกิดฟองไอ (Cavitations) ในตัวกลางของไหลที่เป็นของเหลว
- ความเป็นไปได้ของการเกิดแฟลช (Flashing) ในตัวกลางของของไหลที่เป็นของเหลว
- ชนิดของการติดตั้ง
- คุณสมบัติของของไหล เช่น สถานะของของไหล ความหนาแน่น ความหนืด และความดันไอ
- ช่วงอัตราการไหลที่ต้องการควบคุม
- ความต้องการสมรรถนะเชิงพลวัต (Dynamic Performance)



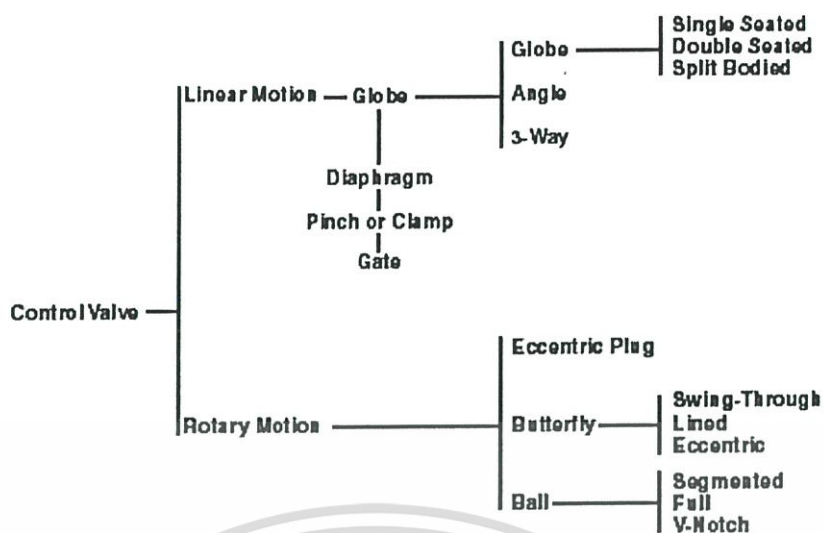
รูปที่ 4.3 โครงสร้างของวาล์วควบคุม

#### 4.1.1 ชนิดของวาล์วควบคุม (Valve types)

วาล์วควบคุมสามารถแบ่งตามการเคลื่อนที่ของการขับเคลื่อนวาล์ว สามารถแยกชนิดของวาล์วตามไดอะแกรมดังรูปที่ 4.4

- แบบเชิงเส้น (Linear Motion) เป็นการเคลื่อนที่ที่เป็นเส้นตรง (Rectilinear)
- แบบหมุน (Rotary) เป็นการเคลื่อนที่ที่เป็นแบบหมุน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 ไคอะแกรมแสดงชนิดของวาล์วควบคุม

#### 4.1.2 ตัวขับเคลื่อนวาล์วควบคุม (Valve actuator)

ความต้องการของตัวขับเคลื่อนวาล์วควบคุมขึ้นอยู่กับชนิดของวาล์วที่จะทำการควบคุม ยกตัวอย่าง โกล์บอลวาล์วจะต้องการการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง ขณะที่วาล์วปีกผีเสื้อจะต้องการการเคลื่อนที่แบบ หมุน เป็นต้น

##### 4.1.2.1 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องในการเลือกตัวขับเคลื่อนวาล์ว

ข้อพิจารณาต่อไปนี้อาจใช้เป็นแนวทางในการเลือกตัวขับเคลื่อนวาล์ว

- ต้องเข้ากับตัวควบคุมหรือตัวกำหนดตำแหน่งวาล์ว (Valve Positioner) ซึ่งขึ้นอยู่กับว่าจะเลือกแหล่งสัญญาณอะไร
- ต้องคำนวณแรงที่เพียงพอในการเอาชนะแรงปฏิกิริยาหรือแรงต้านที่กระทำโดยวาล์ว
- ต้องเหมาะสมกับสภาวะแวดล้อมของการทำงาน
- ช่วงชัก (Stroke) ของตัวขับเคลื่อนวาล์วต้องเข้ากันได้กับความต้องการของวาล์ว
- ต้องเป็นไปตามความเร็วที่ต้องการในการตอบสนอง
- ต้องปล่อยให้วาล์วอยู่ในสภาวะที่พึงประสงค์มากที่สุด หากแหล่งพลังงานที่จ่ายให้เกิดข้อขัดข้องในการจ่ายกำลัง

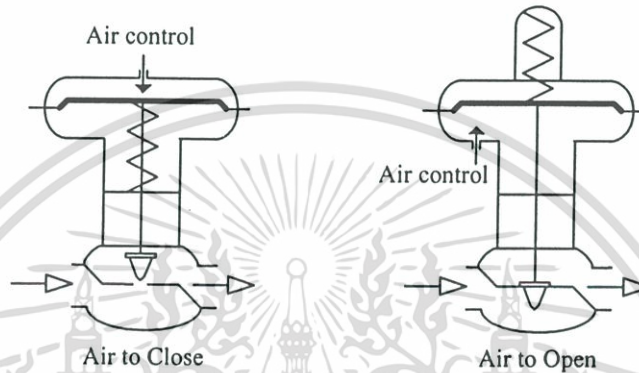
##### 4.1.2.2 แหล่งของแรงปฏิกิริยา

แรงปฏิกิริยาที่ตัวขับเคลื่อนวาล์วต้องเอาชนะในการขับเคลื่อนวาล์ว ได้แก่ แรงจากสิ่งต่อไปนี้

- น้ำหนักและความเฉื่อย (Weight and Inertia) คือน้ำหนักที่ไม่สมดุลและความเฉื่อยที่เสริมเข้ามาของชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่ทุกชิ้นของวาล์วและตัวขับเคลื่อนวาล์ว ยกเว้นวาล์วขนาดใหญ่ที่แรงเฉื่อยไม่ใช่ปัจจัยที่สำคัญมากนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ความเสียดทาน (Friction) คือแรงที่เนื่องมาจากการกระทำของฝาอัดปะเก็น เพื่อกันรั่วที่ก้านวาล์ว และบางครั้งของตัวขับวาล์วเองด้วย
- ความดันของไหล (Fluid Pressure) คือแรงความดันของของไหลต่อปลั๊กวาล์ว (ลิ้นวาล์ว) อย่างไรก็ตามแรงนี้สามารถปรับลดลงได้ด้วยการใช้รูปแบบบ่าวาล์วคู่
- สปริงไดอะแฟรม (Diaphragm Spring) คือแรงสปริงซึ่งใช้ในการดึงวาล์วให้กลับสู่ตำแหน่งใหม่ของวาล์วเมื่อสัญญาณการขับวาล์วลดลง ตัวขับส่วนใหญ่จะมีสปริงเป็นส่วนประกอบอยู่ด้วย



รูปที่ 4.5 การทำงานของวาล์วควบคุม

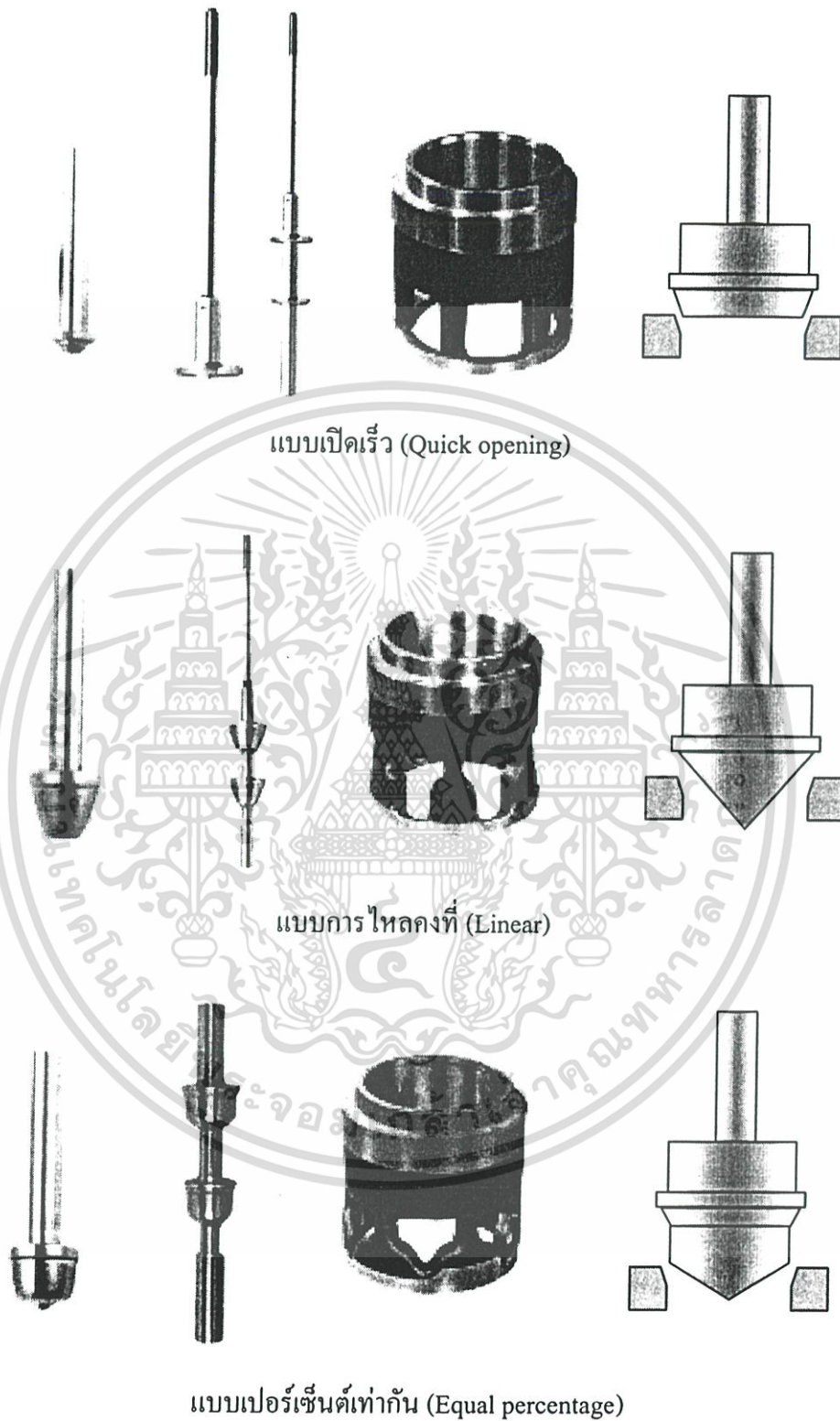
#### 4.1.2.3 ชนิดของตัวขับ

ตัวขับวาล์วควบคุมอาจจำแนกได้เป็นประเภทต่างๆ ดังนี้

- ชนิดไดอะแฟรมทำงานด้วยนิวแมติก
- ชนิดลูกสูบทำงานด้วยนิวแมติกหรือไฮดรอลิก
- ชนิดอิเล็กทรอนิกส์ไฮดรอลิก
- ชนิดเซอร์โวสมรรถนะสูง
- ชนิดเครื่องกลไฟฟ้า
- ชนิดล้อหมุนทำงานด้วยมือ

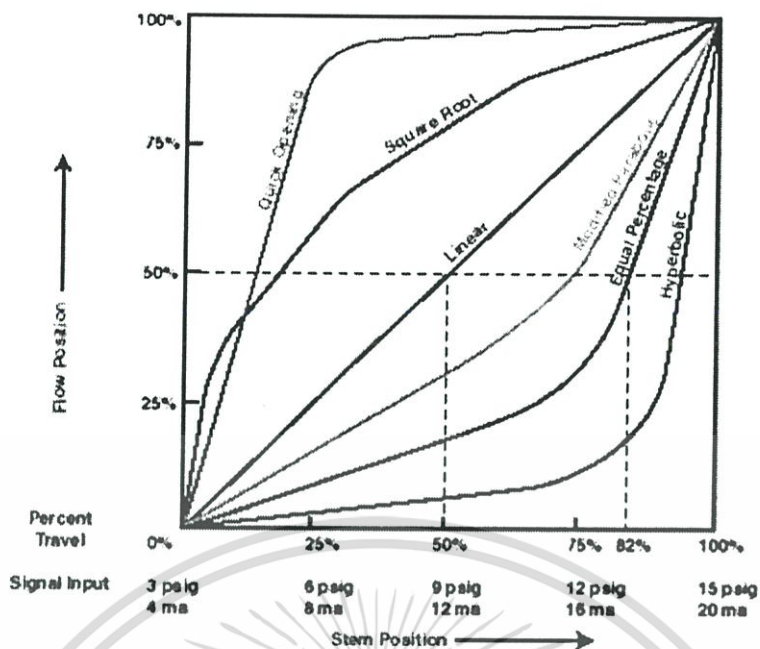
#### 4.1.3 คุณลักษณะภายในของวาล์ว (Inherent Characteristic)

คือความสัมพันธ์ระหว่างการไหล ( $Q$ ) ผ่านวาล์วและตำแหน่งของวาล์ว (ระยะทางการเคลื่อนที่ของปลั๊กวาล์วหรือลิ้นวาล์ว) โดยมีความดันตกคร่อมวาล์วคงที่ เนื่องจากความดันตกคร่อมวาล์วจะไม่คงที่เมื่อวาล์วอยู่ในระหว่างใช้งาน ดังนั้นคุณลักษณะภายในต้องทำการวัดภายใต้สภาวะที่ทดสอบเฉพาะ ส่วนรูปร่างของกราฟที่ได้ขึ้นอยู่กับรูปทรงของลิ้นวาล์ว ดังรูปที่ 4.6 คือตัวอย่างของลิ้นและบ่าวาล์วบางลักษณะที่มีใช้งานโดยทั่วไปในวาล์วควบคุม ส่วนรูปที่ 4.7 แสดงรูปแบบของลักษณะภายในซึ่งได้มาจากการทดสอบวาล์วแบบต่างๆ



รูปที่ 4.6 ตัวอย่างของปลั๊กวาล์วในการควบคุมการไหลแบบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการไหลผ่านวาล์วกับตำแหน่งของวาล์ว

คุณลักษณะการเปิดเร็ว (Quick Opening) ให้การเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลที่รวดเร็วมาก ขณะที่การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของลิ้นวาล์วเพียงเล็กน้อยในช่วงแรก ใช้สำหรับเป็นวาล์วเปิด/ปิดที่ต้องการการเปิดหรือปิดวาล์วที่รวดเร็ว

คุณลักษณะแบบเชิงเส้น (Linear) หรือการไหลแบบคงที่ ให้การเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลที่คงที่ขณะที่เปลี่ยนแปลงตำแหน่งของลิ้นวาล์ว ใช้ในระบบที่ต้องการให้ความดันลดของระบบส่วนมากตกคร่อมวาล์วเป็นหลัก

คุณลักษณะแบบเปอร์เซ็นต์เท่ากัน (Equal Percentage) เป็นลักษณะที่มีสัดส่วนการปรับเพิ่มหรือลดอัตราการไหลแบบเปอร์เซ็นต์คงที่ โดยทั่วไปใช้งานกับระบบที่ต้องการให้ความดันลดของระบบตกคร่อมวาล์วเพียงสัดส่วนน้อย

#### 4.1.4 การเลือกขนาดวาล์วควบคุม (Valve Sizing)

การกำหนดขนาดวาล์วควบคุม ถือเป็นขั้นตอนทางวิศวกรรมในการกำหนดขนาดที่ถูกต้องของตัววาล์ว โดยทั่วไปจะระบุออกมาเป็นค่าสัมประสิทธิ์การไหลของวาล์ว (Valve Flow Coefficient) ใช้สัญลักษณ์  $C_v$  อย่างไรก็ตามคำจำกัดความของ  $C_v$  อาจแปรเปลี่ยนไปในแต่ละบริษัทผู้ผลิต แต่โดยทั่วไปจะกำหนดขึ้นตามอัตราการไหลผ่านวาล์วเปิดเต็มที่ต่อความดันตกคร่อมวาล์ว ซึ่งสมการ  $C_v$  ขึ้นอยู่กับบริษัทผู้ผลิตวาล์ว โดยทั่วไปจะแบ่งตามตัวกลาง (Medium) ของของไหล

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้อ้างอิงสูตรที่ใช้หาค่า  $C_v$  ของ Nakakita ซึ่งเป็นสูตรที่ยอมรับกันโดยทั่วไปของสถาบันควบคุมของไหล (Fluid Control Institute : FCI) สามารถแบ่งสูตรในการคำนวณค่า  $C_v$  ได้ดังตารางที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 สูตรคำนวณค่า  $C_v$ 

Fluids	Pressure Condition	$C_v$ Formulas	Legend
Incompressible Fluids	-	$C_v = \frac{1.17\sqrt{G}}{\sqrt{\Delta p}}$	V : Max. Flow Rate (m <sup>3</sup> /h)
Air, Gas	Where $p_2 > 0.5p_1$ (or $\Delta p < 0.5p_1$ )	$C_v = \frac{Q}{289} \sqrt{\frac{G_1(t+273)}{\Delta p(p_1+p_2)}}$	[Incompressible Fluids]
	Where $p_2 \leq 0.5p_1$ (or $\Delta p \geq 0.5p_1$ )	$C_v = \frac{Q\sqrt{G_1(t+273)}}{250 * p_1}$	W : Max. Flow Rate (kg/h) [Steam, Vapours] Q : Max. Flow Rate (m <sup>3</sup> /h)
Steam	Where $p_2 > 0.5p_1$ (or $\Delta p < 0.5p_1$ )	$C_v = \frac{W}{13.5\sqrt{\Delta p(p_1+p_2)}} * K$	[Air, Gas] p <sub>1</sub> : Inlet Pressure (kgf/cm <sup>2</sup> abs)
	Where $p_2 \leq 0.5p_1$ (or $\Delta p \geq 0.5p_1$ )	$C_v = \frac{W}{11.7 * p_1} * K$	p <sub>2</sub> : Output Pressure (kgf/cm <sup>2</sup> abs) G : Specific Gravity t : Fluid Temperature (°C)
Vapours	Where $p_2 > 0.5p_1$ (or $\Delta p < 0.5p_1$ )	$C_v = \frac{W}{1210} \sqrt{\frac{V_1+V_2}{\Delta p}}$	K : Correction Coefficient to Superheat k = 1+0.0013 x °C of Superheat
	Where $p_2 \leq 0.5p_1$ (or $\Delta p \geq 0.5p_1$ )	$C_v = \frac{W}{856} \sqrt{\frac{V_1+V_3}{\Delta p}}$	V : Specific Volume (cm <sup>3</sup> /g)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 การออกแบบตัวควบคุม

พลังงานอาจอยู่ได้หลายรูป เช่น ความร้อน พลังงานจลน์ พลังงานเคมี พลังงานศักย์ แต่การแยกพลังงานแต่ละอย่างออกมาทำได้ไม่เด่นชัดนัก ในการแปรรูปอาหารพลังงานที่เกี่ยวข้องในการแปรรูปอาหาร ได้แก่ ความร้อนแฝง (Latent Heat) และความร้อนสัมผัส (Sensible Heat) ความร้อนแฝงเป็นปริมาณความร้อนที่ต้องการ ในการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลว ของเหลวเป็นก๊าซ หรือของแข็งเป็นก๊าซ ณ อุณหภูมิที่คงที่ ส่วนความร้อนสัมผัสเป็นปริมาณความร้อนที่เมื่อเพิ่มหรือเอาออกจากอาหารเหลวจะมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

ในทำนองเดียวกันกับสมดุลของมวล, สมดุลพลังงานในระบบที่ไม่มีการสร้างพลังงานและ ไม่มีการใช้พลังงานเลย จะได้สมการดังต่อไปนี้

$$(\text{พลังงานที่เข้าสู่ระบบ}) - (\text{พลังงานที่ออกจากระบบ}) = (\text{พลังงานที่สะสมในระบบ})$$

เทคนิคการเปิดตาราง (Look-up Table) เป็นเทคนิคการควบคุมที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ โดยประยุกต์ใช้กฎสมดุลพลังงานเพื่อนำมาตั้งการเปิดสูงสุดของวาล์วควบคุมในช่วงเริ่มต้นของการไล่อากาศอย่างเหมาะสม จากที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 3. ทำให้ทราบถึงการใช้พลังงานเบื้องต้นของกระบวนการได้ ดังนั้นเราจึงนำค่าพลังงานที่ได้นำไปเปรียบเทียบกับสูตรการคำนวณค่า  $C_v$  ของวาล์วควบคุม ซึ่งจะได้ตำแหน่งของการเปิดสูงสุดที่เหมาะสมแทนที่จะต้องเปิด 100% ซึ่งเป็นการสูญเสียพลังงานเกินความจำเป็น

จากสูตรการคำนวณค่า  $C_v$  ดังตารางที่ 4.1 สำหรับของไหลเป็นไอน้ำและค่าความดันทางออกน้อยกว่าครึ่งหนึ่งของความดันทางเข้าจะได้สมการดังนี้

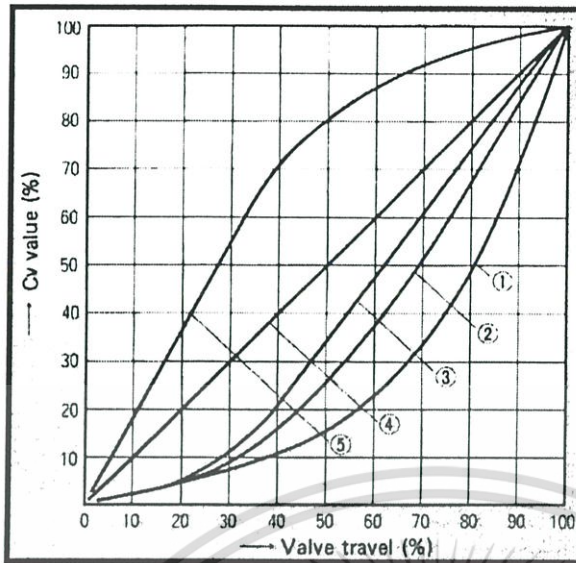
$$C_v = \frac{W}{11.7 * p_1} * K \quad (4.1)$$

- เมื่อ
- W : อัตราการไหลสูงสุดของไอน้ำ หน่วยเป็น กิโลกรัมต่อชั่วโมง
  - $P_1$  : ความดันของไอน้ำด้านเข้า หน่วยเป็น กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร
  - K : Correction Coefficient to Superheat (= 1+ 0.0013 x °C of Superheat)

เนื่องจากเศษทศนิยมของค่า K มีค่าน้อยมาก จึงประมาณเท่ากับ 1 และค่าความดันไอน้ำทางเข้ามีค่า 7 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ดังนั้นจากสมการที่ 4.1 จะได้

$$W \approx 81.9 * C_v \quad (4.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



- (1) Equal Percentage
- (2) Parabolic
- (3) Modified Parabolic
- (4) Linear
- (5) Quick Opening

รูปที่ 4.8 Inherent flow characteristics

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้สัญญาณมาตรฐานทั่วไปคือสัญญาณไฟฟ้าเป็น 4-20 mA. และสัญญาณลมเป็น 3-15 psi ซึ่งตาราง Look-up table นั้นได้จากความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $C_v$  และปริมาณไอน้ำที่ใช้ (W) แสดงดังสมการที่ 4.2 ดังนั้นจึงต้องทราบค่า  $C_v$  ของวาล์วที่ใช้ และค่า  $C_v$  นี้สามารถทราบได้จากบริษัทผู้ผลิตวาล์ว ซึ่งเราจะได้ปริมาณไอน้ำที่สัมพันธ์กับเปอร์เซ็นต์  $C_v$  ในตำแหน่งต่างๆ และในการทดลองวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้วาล์วควบคุมที่มีคุณลักษณะการไหลของวาล์วเป็นแบบ Equal percentage และมีค่า  $C_v$  ของวาล์วเท่ากับ 25 ขั้นตอนการสร้างตาราง Look-up table เป็นดังนี้

1. ทำการแบ่ง Set Point เป็นช่วงๆ และเนื่องจากเครื่องมือวัดพลังงานสะสม (Totalization) ที่ใช้ในการทดลองสามารถแบ่ง Scale point ได้สูงสุด 16 จุด ซึ่งสามารถอ่านรายละเอียดเพิ่มเติมได้จากภาคผนวกท้ายวิทยานิพนธ์ ดังนั้นเพื่อความสะดวกในการสร้างตารางจึงใช้ค่า Set point จำนวน 16 จุด
2. ทำการป้อนสัญญาณอินพุตจาก 4-20 mA. ซึ่งจะได้ค่าเปอร์เซ็นต์การเปิดของวาล์วตั้งแต่ 0-100% ที่เป็นสัดส่วนแบบเชิงเส้น เช่น ที่ 4 mA จะได้เปอร์เซ็นต์การเปิดเท่ากับ 0%, 12 mA จะได้เปอร์เซ็นต์การเปิดเท่ากับ 50%, และ 20 mA จะได้เปอร์เซ็นต์การเปิดเท่ากับ 100% เป็นต้น
3. เมื่อได้เปอร์เซ็นต์การเปิดของวาล์วในตำแหน่งต่างๆ แล้ว จากนั้นทำการไปเทียบใน Curve ของวาล์วที่ใช้ดังรูปที่ 4.8 จะได้เปอร์เซ็นต์  $C_v$  ที่ตำแหน่งของวาล์วต่างๆ
4. นำค่าเปอร์เซ็นต์  $C_v$  ที่ได้แทนในสูตรคำนวณค่า  $C_v$  (สมการที่ 4.2) จะได้ค่าปริมาณไอน้ำที่ใช้ของแต่ละ Set point ตาราง Look-up table แสดงดังตารางที่ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 Look-up table

No. Set point	Current (mA)	Valve travel (%)	Cv value (%)	Steam (kg/hr)
1	4.000	0	0.0	0.0
2	5.067	6	1.3	26.6
3	6.134	13	2.8	57.3
4	7.201	20	4.6	94.2
5	8.268	26	6.3	129.0
6	9.335	33	8.2	167.9
7	10.402	40	10.7	219.1
8	11.469	46	13.5	276.4
9	12.536	53	17.6	360.4
10	13.603	60	22.9	468.9
11	14.670	66	29.2	597.9
12	15.737	73	37.7	771.9
13	16.804	80	48.1	984.8
14	17.871	86	62.6	1281.7
15	18.938	93	79.3	1623.7
16	20.005	100	100.0	2047.5

หมายเหตุ : วาล์วที่ใช้เป็นแบบ Equal percentage

สมการพื้นฐานของเอาต์พุตจากตัวควบคุมแบบ PID ซึ่งเป็นตัวแปรการจัดการ (Manipulate variable) สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

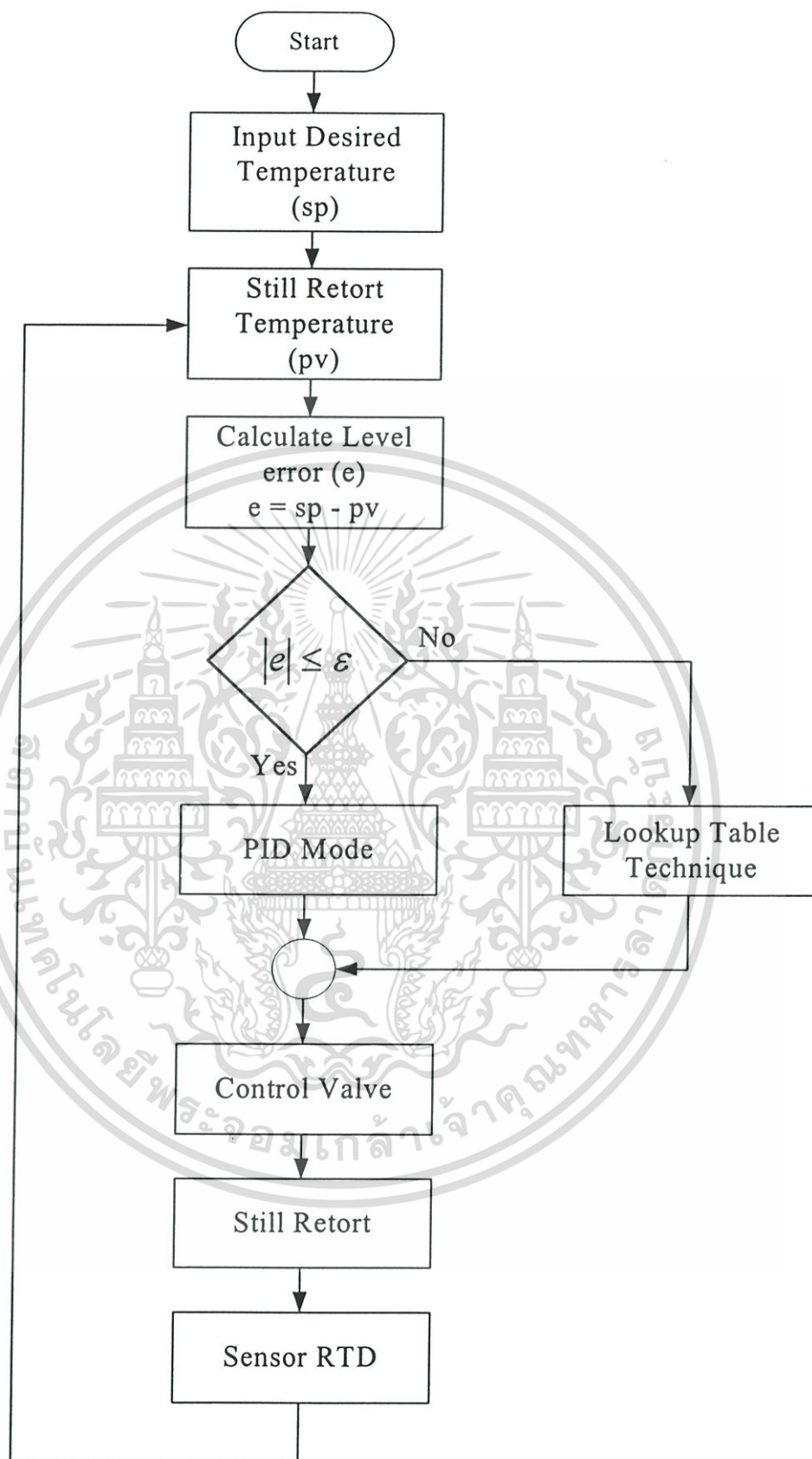
$$m(t) = \bar{m} + K_p \left[ e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_d \frac{d}{dt} e(t) \right] \quad (4.3)$$

เมื่อ  $e(t)$  และ  $\bar{m}$  เป็นค่าสัญญาณคลาดเคลื่อนและค่าไบอัสตามลำดับ,  $K_p$  เป็นค่าสัญญาณขยาย และ  $T_i$  และ  $T_d$  เป็นค่าเวลา integral และ derivative ตามลำดับ

หลังจากที่ได้ Look-up table มาแล้ว ขั้นตอนต่อไปเป็นนำตารางที่ได้เข้ามาใช้ร่วมกับการควบคุมแบบเดิมคือ PID โดยทำการกำหนดค่าอ้างอิง ( $E$ ) ขึ้นมาค่าหนึ่ง ค่าอ้างอิงนี้เป็นค่าคลาดเคลื่อน ( $e$ ) จริงในกระบวนการ ซึ่งอยู่ในช่วงที่ใกล้ถึงค่าเป้าหมาย ในการทดลองอยู่ที่ประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ของคลาดเคลื่อนจริง ถ้าขนาดของค่าคลาดเคลื่อนอ้างอิงมากกว่าค่าคลาดเคลื่อนจริง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การควบคุมจะเข้าสู่เทคนิคการเปิดตาราง แต่ถ้าขนาดของค่าคลาดเคลื่อนอ้างอิงน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าคลาดเคลื่อนจริง ดังนั้นการควบคุมจะเข้าสู่โหมด PID แบบปกติ โดยละเอียดของเทคนิคการควบคุมที่นำเสนอเป็นดังนี้

1. เริ่มจากกำหนดค่าอุณหภูมิเป้าหมายที่ต้องการเช่น อุณหภูมิในการไล่อากาศ 102°C
2. ตัวควบคุมอุณหภูมิรับอุณหภูมิจากอุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิ (RTD) ในหม้อฆ่าเชื้อ
3. ค่าคลาดเคลื่อน (e) ได้จากค่าผลต่างระหว่างค่าอุณหภูมิเป้าหมายกับค่าอุณหภูมิจริง
4. ทำการเปรียบเทียบค่าคลาดเคลื่อนจริง (e) กับค่าคลาดเคลื่อนอ้างอิง (E) ถ้าคลาดเคลื่อนอ้างอิงมีค่ามากกว่าคลาดเคลื่อนจริง ดังนั้นเข้าสู่เทคนิคการเปิดตาราง แต่ถ้าคลาดเคลื่อนอ้างอิงน้อยกว่าหรือเท่ากับคลาดเคลื่อนจริง จึงเข้าสู่โหมด PID เช่น อุณหภูมิในการไล่อากาศ 102°C ดังนั้นค่าคลาดเคลื่อนอ้างอิงคิดเป็น 5 เปอร์เซ็นต์ของค่าคลาดเคลื่อนจริงในช่วงใกล้ถึงค่าเป้าหมายคือตั้งแต่ 97°C เป็นต้นไป ดังนั้นในกรณีดังกล่าวช่วงเริ่มต้นตั้งแต่อุณหภูมิบรรยากาศ (Ambient temperature) ไปจนก่อนอุณหภูมิถึง 97°C จะเข้าสู่เทคนิคการเปิดตาราง ซึ่งในช่วงนี้เราจะใช้ข้อมูลจากตารางที่ 4.2 เข้ามาควบคุมการไหลของไอน้ำในตำแหน่งการเปิดสูงสุดของวาล์วควบคุมที่เหมาะสม ซึ่งของเดิมตำแหน่งการเปิดสูงสุดของวาล์วควบคุมจะเปิด 100% และหลังจากที่อุณหภูมิเข้าสู่ 97°C การควบคุมอุณหภูมิจึงเข้าสู่โหมด PID ดังเดิม
5. ตัวควบคุมอุณหภูมิส่งสัญญาณควบคุมเป็นสัญญาณไฟฟ้า 4-20 mA ไปให้กับตัวแปลงสัญญาณไฟฟ้าเป็นสัญญาณลม (I to P transducer) เพื่อส่งสัญญาณลมตั้งแต่ 3-15 psi ไปควบคุมการเปิดของวาล์วควบคุมไอน้ำเข้าหม้อฆ่าเชื้อ
6. ไอน้ำเข้าสู่หม้อฆ่าเชื้อในปริมาณที่เหมาะสมกับการไล่อากาศ
7. อุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิในหม้อฆ่าเชื้อ และส่งสัญญาณกลับมายังตัวควบคุมอุณหภูมิต่อไป



รูปที่ 4.9 แสดงผังขั้นตอนการทำงานของระบบควบคุมที่นำเสนอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### การทดลอง

เนื่องจากการทดลองสำหรับวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ต้องการนำไปใช้งานจริง ดังนั้นการวัดผลที่สมบูรณ์จะไม่ศึกษาเฉพาะการประหยัดพลังงานเท่านั้น แต่จะศึกษาถึงข้อกำหนดของกระบวนการควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ด้วย กระบวนการหม้อฆ่าเชื้ออาหารกระป๋องแบบใช้ไอน้ำได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 ซึ่งแบ่งเป็น 3 ขั้นตอนคือ การไล่อากาศ (Venting), การฆ่าเชื้อ (Sterilization) และการทำให้เย็น (Cooling) ช่วงการไล่อากาศจะมีการใช้พลังงานสูงที่สุด ส่วนช่วงการฆ่าเชื้อเป็นการรักษาอุณหภูมิให้คงที่ตามเวลาที่กำหนดของผลิตภัณฑ์ ดังนั้นการทดลองจะต้องยังรักษาข้อกำหนดของกระบวนการให้อยู่ในมาตรฐานเดิม ยกตัวอย่างการปฏิบัติงานของโรงงานผลิตอาหารกระป๋องแห่งหนึ่งเป็นดังนี้

1. เปิดท่อระบายอากาศ Bleeder และท่อ Vent ทั้งหมด
2. เปิดวาล์วไอน้ำเข้าเต็มที (โดยความดันไอน้ำต้องไม่ต่ำกว่า 90 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)
3. เริ่มจับเวลาตั้งแต่เปิดไอน้ำเข้า และคอยอ่านอุณหภูมิจากเทอร์โมมิเตอร์ ใช้ระยะเวลา 6 นาที ให้อุณหภูมิ  $104^{\circ}\text{C}$  เมื่อถึง  $104^{\circ}\text{C}$  แล้ว ให้ปิดท่อ Drain ถ้าหากอุณหภูมิถึง  $104^{\circ}\text{C}$  ก่อน 6 นาทีให้รอกจนครบ 6 นาที หรือครบ 6 นาทีแล้วอุณหภูมิยังไม่ถึง  $104^{\circ}\text{C}$  ให้ต่อเวลาออกไปจนกระทั่งได้  $104^{\circ}\text{C}$  จึงทำการปิดท่อ Drain (ท่อระบายน้ำทิ้ง)
4. จับเวลาตั้งแต่ปิดท่อ Drain และคอยอ่านอุณหภูมิจากเทอร์โมมิเตอร์ ใช้ระยะเวลา 2 นาที ให้อุณหภูมิ  $112^{\circ}\text{C}$  ถ้าถึง  $112^{\circ}\text{C}$  ก่อน 2 นาที ให้รอกจนครบเวลาก่อนหรือถ้าครบ 2 นาทีแล้วอุณหภูมิยังไม่ถึง  $112^{\circ}\text{C}$  ให้ต่อเวลาออกไปจนกระทั่งได้  $112^{\circ}\text{C}$  จึงทำการปิดท่อ Vent (ท่อไล่อากาศ)
5. หลังจากปิดท่อ Vent จับเวลาไปอีก 3 นาที เพื่อให้อุณหภูมิขึ้นถึง  $122^{\circ}\text{C}$  แล้วเริ่มจับเวลาการฆ่าเชื้อ
6. เมื่อครบเวลาการฆ่าเชื้อของแต่ละผลิตภัณฑ์ ให้ปิดวาล์วไอน้ำแล้วเปิดวาล์วลม ปล่อน้ำ Cooling เข้าหม้อฆ่าเชื้อ โดยรักษาความดันให้มากกว่าการฆ่าเชื้อประมาณ 2 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว
7. ค่อยๆ ลดอุณหภูมิลงมาที่  $50^{\circ}\text{C}$  ความดัน 0 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เปิดท่อ Drain ระบายน้ำออก แล้วจึงนำผลิตภัณฑ์ออกจากหม้อฆ่าเชื้อ

พฤติกรรมของวาล์วควบคุมในกระบวนการคือ ในช่วงการไล่อากาศวาล์วควบคุมจะเปิดอย่างเต็มที่ โดยทั่วไปจะเปิด 100% เนื่องจากต้องการปริมาณไอน้ำจำนวนมากเพื่อเข้าไปแทนที่ของอากาศภายในหม้อฆ่าเชื้อ ส่วนช่วงการฆ่าเชื้อวาล์วควบคุมจะลอยตัวขึ้น-ลงอยู่ในช่วงแคบๆ เนื่องจากต้องการปริมาณไอน้ำเพียงเล็กน้อยในการควบคุมอุณหภูมิในกระบวนการให้คงที่ และช่วงการทำให้เย็นวาล์วควบคุมจะปิดสนิทเนื่องจากไม่ต้องการใช้ไอน้ำแล้ว

จากข้อ 3 พบว่ามาตรฐานการไล่อากาศของโรงงานดังกล่าวอยู่ในช่วงเวลา 6 นาที ซึ่งกรณีที่อุณหภูมิถึง  $104^{\circ}\text{C}$  ก่อน 6 นาทีจะต้องรอไปจนกว่าจะครบ 6 นาที จะเห็นว่าถ้าเวลาที่อุณหภูมิถึงก่อน  $104^{\circ}\text{C}$  เร็วเท่าใด พลังงานส่วนที่เกินความจำเป็นก็มากขึ้นเท่านั้น ในจุดนี้ถ้าทำการออกแบบการควบคุมให้เหมาะสม ก็จะเป็นการใช้พลังงานในกระบวนการหม้อฆ่าเชื้อได้อย่างเหมาะสม (Optimum) ดังนั้นในช่วงเริ่มต้นของการไล่อากาศเราจะนำเทคนิคการเปิดตารางเข้ามาตั้งตำแหน่งการเปิดสูงสุดของวาล์วควบคุมให้มีความเหมาะสมกับกระบวนการ

## 5.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

### 1. วาล์วควบคุมไอน้ำ (Steam Control Valve)

ขนาด 1(1/2) นิ้ว, Input : 3-15 psi, Output : 0-100% ซึ่งใช้วาล์วควบคุมตัวนี้ในการทดลองตลอดทั้งวิทยานิพนธ์ โดยมีคุณลักษณะการไหลเป็นแบบ **Equal Percentage** และมีค่า C<sub>v</sub> เท่ากับ 25 ข้อมูลเหล่านี้ทราบได้จากบริษัทผู้ผลิต

### 2. ตัวควบคุมอุณหภูมิ (Temperature Controller)

ยี่ห้อ Nippo (Japan), Input : Universal, Output : 4-20 mA เป็นตัวควบคุมอุณหภูมิที่มีฟังก์ชันการใช้งานมาตรฐานทั่วไป เช่น Auto-tuning, Manual Control เป็นต้น

### 3. ตัวแปลงกระแสไฟฟ้าเป็นลม (Current to Pressure Transducer)

ยี่ห้อ Watson (U.K), Input : 4-20 mA, Output : 3-15 psi โดยรับสัญญาณ 4-20 mA. จากตัวควบคุมอุณหภูมิและส่งสัญญาณ 3-15 psi ไปขับเคลื่อนวาล์วควบคุมไอน้ำ

### 4. อุปกรณ์ตรวจจับอุณหภูมิ (RTD)

ใช้ Resistance Temperature Detector (RTD) แบบ PT-100 ohms แบบแยกเป็น 2 ชุดในตัวเดียวกัน (4 ขั้ว) โดยชุดแรกใช้กับตัวควบคุมอุณหภูมิ และชุดที่เหลือใช้กับเครื่องบันทึกอุณหภูมิ (Data Logger)

### 5. เครื่องตั้งเวลา (Timer Relay)

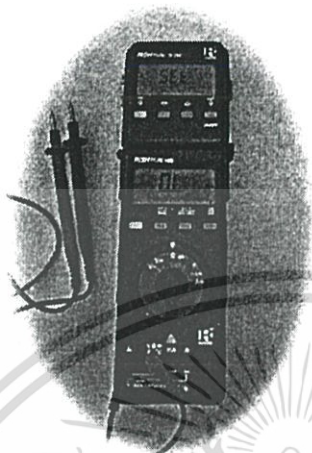
ทำหน้าที่จับเวลาในกระบวนการ

### 6. เครื่องบันทึกอุณหภูมิ (Data Logger)

จากบริษัท Rishabh Instruments (India), Model : Rishcom 100 แสดงดังรูปที่ 5.1

สามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วนคือ ส่วนบันทึกข้อมูล (Model : RishMulti SI 232) โดยภายในมีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งมอบเวลาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำมาใช้บนระบบออนไลน์การคำนวณต่างๆ ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน่วยความจำสำหรับบันทึกข้อมูล และส่วนการวัดข้อมูล (Model : RishMulti 15S) ทำหน้าที่วัดข้อมูลเช่นเดียวกับ Multi Meter ซึ่งการรับ-ส่งข้อมูลใช้คลื่น Infared และการอ่านข้อมูลที่ทำการบันทึกได้จากซอฟต์แวร์ของบริษัทคือ Measuring PC Software Version 4.11 [1999]



ส่วนบันทึกข้อมูล

(Model : RishMulti SI 232)

ส่วนการวัดข้อมูล

(Model : RishMulti 15S)

รูปที่ 5.1 เครื่องบันทึกข้อมูลหมุ่ที่ใช้ในการทดลอง

#### 7. เครื่องวัดพลังงานแบบสะสม (Totalization)

จากบริษัท Red lion, Model : PAXP แสดงดังรูปที่ 5.2 โดยสามารถรับสัญญาณอินพุตได้ 2 แบบคือแรงดันไฟฟ้า (0-10 volts) และกระแสไฟฟ้า (4-20 mA.) และแสดงผล (Display) เอาต์พุตที่หน้าจอเป็นค่าต่างๆ ได้ตามต้องการ ดังนั้นจึงต้องทำการสอบเทียบเครื่องมือวัดตัวนี้ให้เหมาะสมกับการใช้งาน โดยปุ่มที่หน้าจรมีจำนวน 5 ปุ่มทำหน้าที่ดังต่อไปนี้

- DSP สำหรับกดเลือกเพื่อให้เห็นค่าตัวเลขจริงที่สอบเทียบแล้ว หรือแสดงเป็นค่าตัวเลขสะสม (Totalize)
- PAR สำหรับการเข้าและออกจากการตั้งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ
- F1 สำหรับเลื่อนขึ้น
- F2 สำหรับเลื่อนลง
- RST สำหรับ Reset ข้อมูล

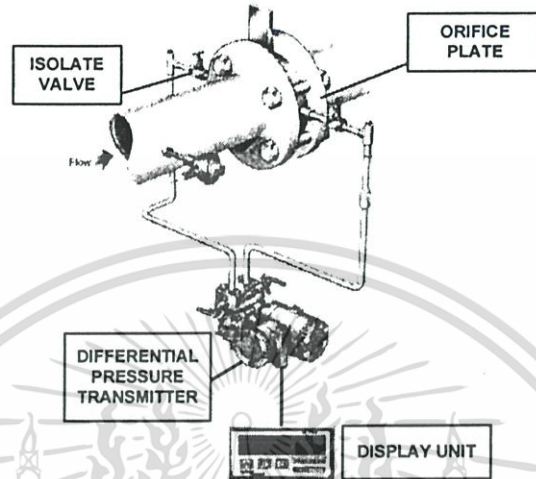


รูปที่ 5.2 เครื่องวัดพลังงานแบบสะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.1.1 การสอบเทียบอุปกรณ์เครื่องมือวัด

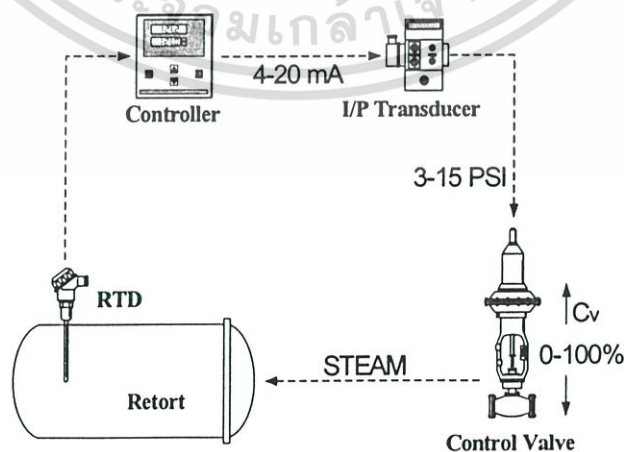
ในการวัดผลการประหยัคที่ถูกต้อง ควรวัดผลโดยชุดอุปกรณ์ เครื่องมือวัดอัตราการไหลของไอน้ำ ก่อนและหลังการปรับปรุงนำมาเปรียบเทียบกัน ดังแสดงในรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 การวัดอัตราการไหล

เนื่องจากความไม่สะดวกในการติดตั้งอุปกรณ์วัดอัตราการไหล โดยจะต้องทำการตัดต่อท่อไอน้ำเพื่อติดตั้ง Orifice Plate ซึ่งเป็นเรื่องยุ่งยากในทางปฏิบัติและมีราคาแพง ดังนั้นเพื่อความชัดเจนในการทดลองควรจะต้องหาวิธีทำการเปรียบเทียบผลก่อนและหลังการปรับปรุง

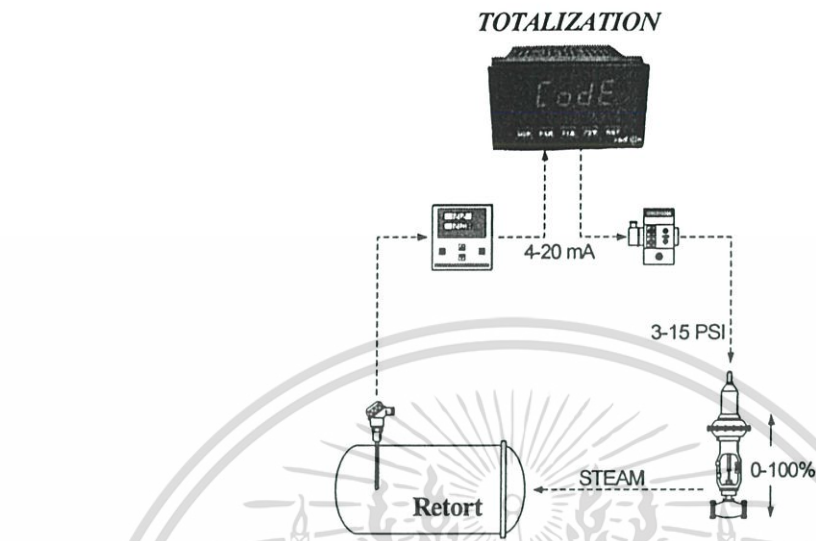
ถ้าวิเคราะห์ระบบการควบคุมของกระบวนการให้ละเอียดแล้ว พบว่าการไหลของไอน้ำจะขึ้นอยู่กับเปอร์เซ็นต์การเปิดและปิดของวาล์วควบคุมไอน้ำ ซึ่งก็คือค่า  $C_v$  นั้นเอง และค่า  $C_v$  นี้จะแปรเปลี่ยนไปตามสัญญาณเอาต์พุตจากตัวควบคุมอุณหภูมิคือ 4-20 mA. แสดงดังรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 หลักการควบคุมอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นเราจะนำเครื่องวัดพลังงานแบบสะสม (Totalizer) เข้ามาใช้ในการวัดและเปรียบเทียบผลการทดลองดังรูปที่ 5.5 รายละเอียดการใช้งานต่างๆ สามารถอ่านเพิ่มเติมได้จากภาคผนวกท้ายวิทยานิพนธ์ ซึ่งในการทดสอบเทียบจะกล่าวถึงเฉพาะฟังก์ชันที่ใช้งานเท่านั้น เป็นดังนี้



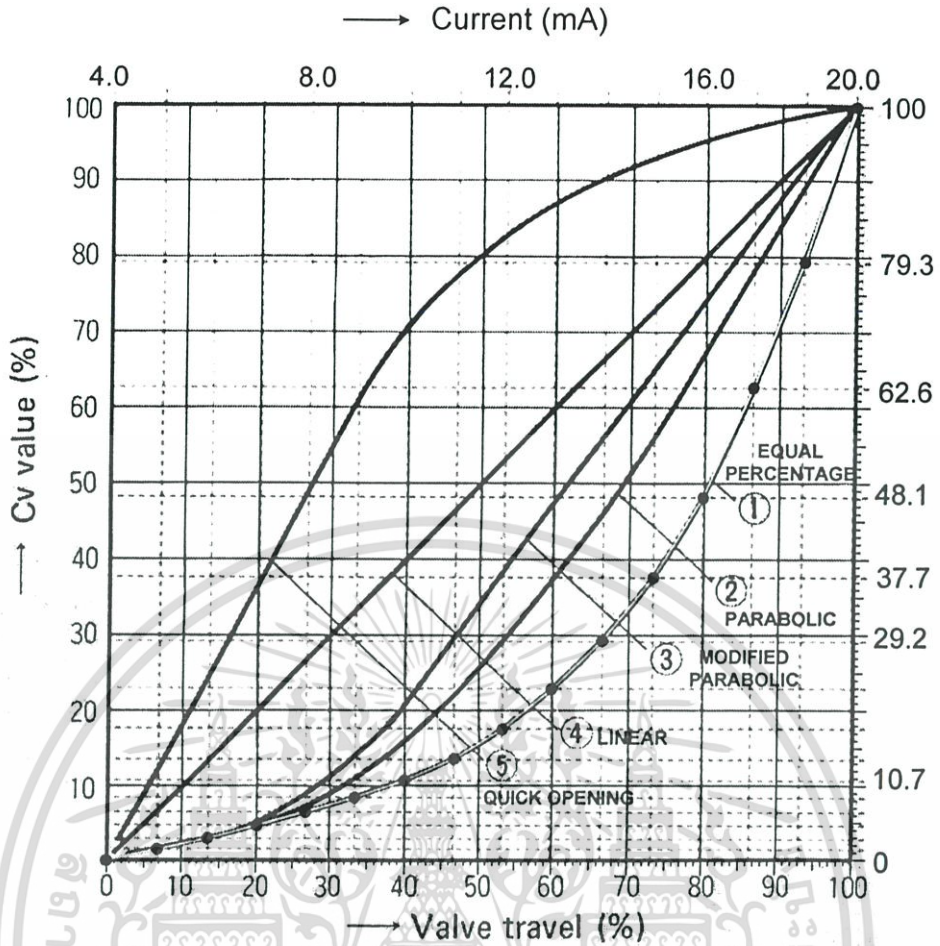
รูปที่ 5.5 แสดงวิธีการวัดผลการทดลองที่น่าเสนอ

1. เลือกสัญญาณอินพุต Current [Module 1]
2. เลือกจำนวนจุด (Scale point) ที่ต้องการใช้งานได้ตั้งแต่ 2-16 จุด ถ้าเลือก 2 จุดจะเป็นแบบ Linear แต่ถ้าเลือกมากกว่า 2 จุดจะเป็นแบบ Nonlinear [Module 1]
3. ป้อนสัญญาณภายนอกเข้าและ Set ค่าที่ต้องการให้แสดงผลเช่น กรณีใช้ 2 จุด โดยทำการป้อนสัญญาณ 4 mA. ปรับค่า Display เป็น 0 และป้อนสัญญาณ 20mA. ปรับค่า Display เป็น 100 ดังนั้นถ้าเครื่องได้รับสัญญาณ 12 mA. หน้าจอก็จะแสดงตัวเลข 50% หรือได้รับสัญญาณ 8 mA. หน้าจอก็จะแสดงตัวเลข 25% เป็นต้น [Module 1]
4. เลือกให้สามารถ Reset ค่าแบบสะสม หมายถึง ถ้ากดปุ่ม RST จะทำการเริ่มนับค่าใหม่ [Module 2]
5. เลือกการแสดงผลเป็นแบบ Totalizer [Module 3]
6. เลือกฐานเวลาของการวัดสะสม ได้แก่ วินาที, นาที, ชั่วโมงและวัน [Module 5]

การสอบเทียบสำหรับการทดลองทำเป็น 2 กรณีดังนี้

- กรณีที่ 1 รับสัญญาณอินพุตจาก 4-20 mA. แล้วแสดงผลเป็นเปอร์เซ็นต์การเปิดของวาล์วควบคุมตั้งแต่ 0-100% ดังที่กล่าวมาในข้อที่ 3.
- กรณีที่ 2 รับสัญญาณอินพุตจาก 4-20 mA. แล้วแสดงผลเป็นปริมาณไอน้ำ โดยในกรณีนี้วาล์วที่ใช้เป็นแบบ Equal percentage (Nonlinear) ดังนั้นจึงใช้ Scale point จำนวน 16 จุด เพื่อพล็อตลงใน Curve ของวาล์วที่ใช้ แสดงดังรูปที่ 5.6

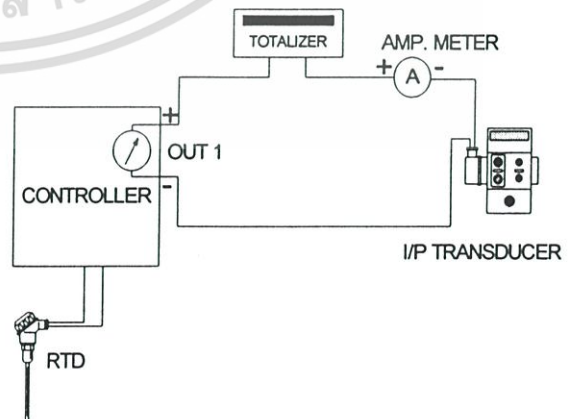
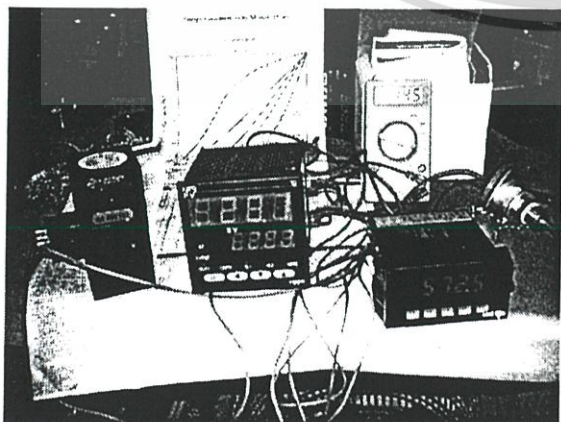
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.6 แสดงวิธีการสอบเทียบกรณีไม่เป็นเชิงเส้น

การสอบเทียบจะอ้างอิงข้อมูลจากตาราง Look-up Table ในบทที่ 4 คือป้อนสัญญาณตั้งแต่ 4-20 mA. ให้แสดงผลเป็นค่าปริมาณไอน้ำตั้งแต่จุดที่ 1 ถึง 16 เซนที่ 4 mA. ให้แสดงผลเป็น 0 kg/hr, ที่ 12 mA. ให้แสดงผลเป็น 360 kg/hr, ที่ 20 mA. ให้แสดงผลเป็น 2,047.5 kg/hr เป็นต้น

จากนั้นทำการทดลองต่อ Totalizer เข้าในวงจรเพื่อทำการทดสอบการวัดก่อนเข้าทดลองจริง แสดงดังรูปที่ 5.7

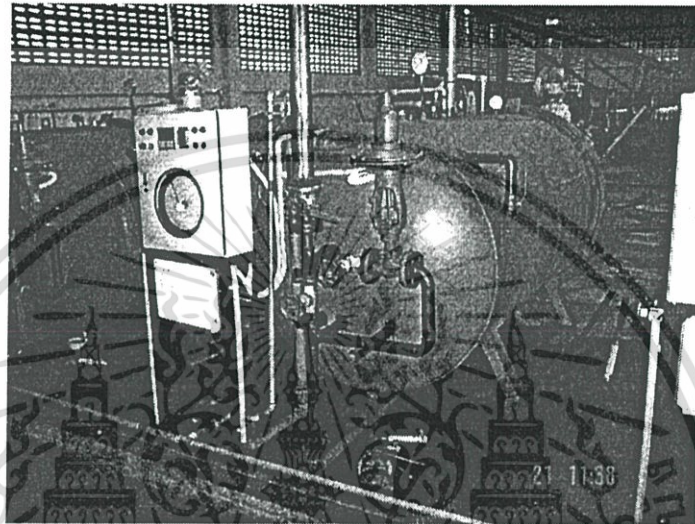


รูปที่ 5.7 แสดงผลการสอบเทียบเครื่องวัดแบบสะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

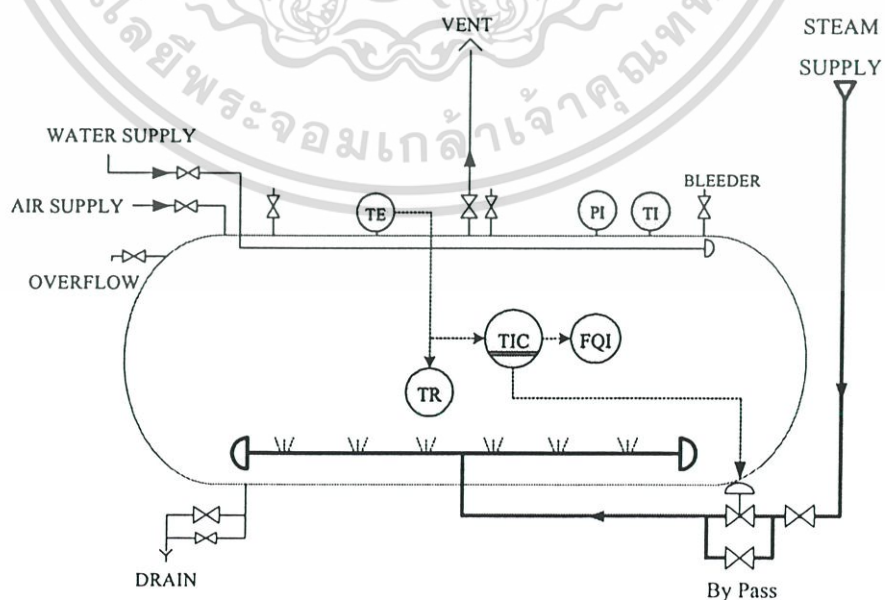
## 5.2 การทดลอง

โดยการใช้ข้อมูลจากการจำลองกระบวนการหม้อฆ่าเชื้อในบทที่ 3. ทำให้ทราบปริมาณไอน้ำที่ใช้ จากนั้นนำไปเปรียบเทียบในตาราง Look-up table เพื่อหาตำแหน่งการเปิดสูงสุดของวาล์วควบคุมไอน้ำที่เหมาะสม ซึ่งใช้ Totalizer สำหรับวัดผลรวมสะสมและ Data logger สำหรับบันทึกอุณหภูมิก่อนและหลังการปรับปรุง ภาพการทดลองแสดงดังรูปที่ 5.8 และสามารถเขียนเป็นไดอะแกรมของกระบวนการได้ดังรูปที่ 5.9



รูปที่ 5.8 ภาพการทดลอง

โดย TI เป็นเทอร์โมมิเตอร์, PI เป็นเกจวัดความดัน, TE เป็นอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ (RTD), TIC เป็นตัวควบคุมอุณหภูมิ, TR เป็นเครื่องบันทึกอุณหภูมิ (Data logger) และ FQI เป็นเครื่องวัดพลังงานแบบสะสม (Totalizer) สำหรับวัดปริมาณไอน้ำสะสม



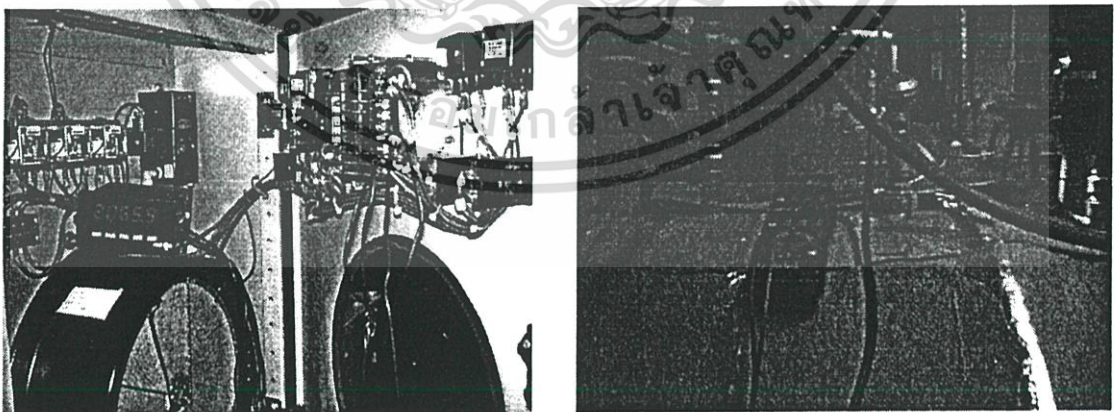
รูปที่ 5.9 ไดอะแกรมของกระบวนการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการประหยัคพลังงานนั้นจะเกิดขึ้นเฉพาะในช่วงการไล่อากาศเท่านั้น ในส่วนของกรฆ่าเชื้อและการทำให้เย็นยังคงใช้พลังงานอยู่ที่เท่าเดิม ซึ่งก่อนการปรับปรุงในกระบวนการ ในช่วงเริ่มต้นของการไล่อากาศวาล์วควบคุมจะเปิดสูงสุดที่ตำแหน่ง 100 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้การควบคุมแบบ PID หลังจากการปรับปรุงตำแหน่งการเปิดสูงสุดของวาล์วควบคุมจะลดลงมาในตำแหน่งที่เหมาะสมกับการไล่อากาศของหม้อฆ่าเชื้อตัวนั้น แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นในการทดลองจะต้องให้ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาอยู่ในข้อกำหนดของการไล่อากาศด้วย

รายละเอียดขั้นตอนการทดลองเป็นดังนี้

1. ทำการติดตั้งเครื่องวัดพลังงานสะสมและเครื่องบันทึกอุณหภูมิ
2. ตรวจสอบตำแหน่งของวาล์วต่างๆ ที่หม้อฆ่าเชื้อก่อนเริ่มปฏิบัติงาน เช่น วาล์วระบายอากาศ, วาล์วระบายน้ำ Condensate, วาล์วลม เป็นต้น
3. ตั้งอุณหภูมิไล่อากาศที่ตัวควบคุมอุณหภูมิและเวลาไล่อากาศจากเครื่องตั้งเวลา
4. เริ่มกระบวนการไล่อากาศ โดยกดปุ่ม Start ที่ตัวควบคุม, ปุ่มเริ่มบันทึกอุณหภูมิที่ Data Logger และปุ่ม Reset ที่ Totalizer จากนั้นจึงเปิดวาล์วเมนไอน้ำเข้า อุณหภูมิจะค่อยๆ เพิ่มขึ้น
5. ในช่วงนี้จะสังเกตได้ว่า วาล์วควบคุมไอน้ำจะเปิด 100% และ Totalizer จะวัดปริมาณไอน้ำสะสมไปเรื่อยๆ
6. เมื่อครบเวลาในการไล่อากาศแล้ว ปิดวาล์วเมนไอน้ำและกดปุ่ม Stop ที่ตัวควบคุมและเครื่องบันทึกอุณหภูมิเป็นการเสร็จสิ้นขั้นตอนการทดลองใน Batch ที่ 1. (ก่อนการปรับปรุง)
7. บันทึกภาพตัวเลขปริมาณไอน้ำสะสมที่ Totalizer ด้วยกล้องดิจิทัล
8. เปิดวาล์วน้ำเย็นเข้าเพื่อลดอุณหภูมิลงสู่อุณหภูมิบรรยากาศ



รูปที่ 5.10 ภาพการติดตั้ง Totalizer และ Data Logger

ลำดับต่อมาเป็นการทดลองหลังการปรับปรุง โดยใช้เทคนิคการเปิดตารางร่วมกับการควบคุมแบบ PID ซึ่งในการทดลองได้นำหลักการที่นำเสนอมาใช้ ดังนั้นเพื่อความสะดวกในการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทดลอง ตำแหน่งการเปิดสูงสุดของวาล์วควบคุมในช่วงเริ่มไล่อากาศจะตั้งจากโหมดการทำงานของตัวควบคุมอุณหภูมิเป็นแบบ **Manual Control** เพื่อให้สามารถเลือกเปอร์เซ็นต์เอาต์พุตได้ตามต้องการ รายละเอียดขั้นตอนการทดลองหลังการปรับปรุงเป็นดังนี้

9. เริ่มต้นเช่นเดียวกับข้อที่ 1 ถึง 3
10. ตั้งโหมดการทำงานของตัวควบคุมอุณหภูมิเป็นแบบ **Manual Control** จากนั้นเลือกเปอร์เซ็นต์เอาต์พุตที่เหมาะสม (จาก Look-up Table)
11. เริ่มกระบวนการไล่อากาศ โดยกดปุ่ม **Start** ที่ตัวควบคุม, ปุ่มเริ่มบันทึกอุณหภูมิที่ **Data Logger** และปุ่ม **Reset** ที่ **Totalizer** จากนั้นจึงเปิดวาล์วเมนไอน้ำเข้า อุณหภูมิจะค่อยๆ เพิ่มขึ้น
12. ในช่วงนี้จะสังเกตได้ว่า วาล์วควบคุมไอน้ำจะเปิดต่ำกว่า 100% หลังจากที่อุณหภูมิใกล้ถึงค่าเป้าหมายแล้ว (ประมาณ 5% ก่อนถึงค่าเป้าหมาย) จึงทำการออกจากโหมด **Manual Control** ซึ่งการควบคุมจะใช้ค่า **PID** เดิมในการควบคุมอุณหภูมิต่อไป
13. เมื่อครบเวลาในการไล่อากาศแล้ว ปิดวาล์วเมนไอน้ำและกดปุ่ม **Stop** ที่ตัวควบคุมและเครื่องบันทึกอุณหภูมิเป็นการเสร็จสิ้นขั้นตอนการทดลองใน **Batch** ที่ 2 (หลังการปรับปรุง)
14. บันทึกภาพตัวเลขปริมาณไอน้ำสะสมที่ **Totalizer** ด้วยกล้องดิจิทัลอีกครั้ง

หมายเหตุ : ค่า **PID** ที่ใช้ในการทดลองก่อนและหลังการปรับปรุงเป็นค่าเดียวกัน และได้ทำการปรับตั้งไว้เรียบร้อยแล้ว

### 5.3 การวัดและเปรียบเทียบผล

การวัดและเปรียบเทียบผลการปรับปรุงในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งเป็น 2 ส่วนคือ ทางทฤษฎีและทางปฏิบัติจากการวัดด้วย **Totalizer** และข้อมูลตัวเลขน้ำมันเตา โดยใช้ **Data Logger** ทำการบันทึกอุณหภูมิ เพื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาตามข้อกำหนดของการไล่อากาศ

#### 5.3.1 การวัดและเปรียบเทียบผลทางทฤษฎี

โดยการคำนวณผลการประหยัดจากเส้นคุณลักษณะการไหลของวาล์ว ซึ่งวาล์วที่ใช้เป็นแบบ **Equal percentage** โดยอ้างอิงจากสูตรการคำนวณค่า  $C_v$  จาก **Nakakita** ในบทที่ 4 .

จากสูตรการคำนวณค่า  $C_v$  โดยของไหลเป็นไอน้ำและความดันทางออกน้อยกว่าครึ่งหนึ่งของความดันทางเข้า จะได้สูตรการคำนวณดังนี้

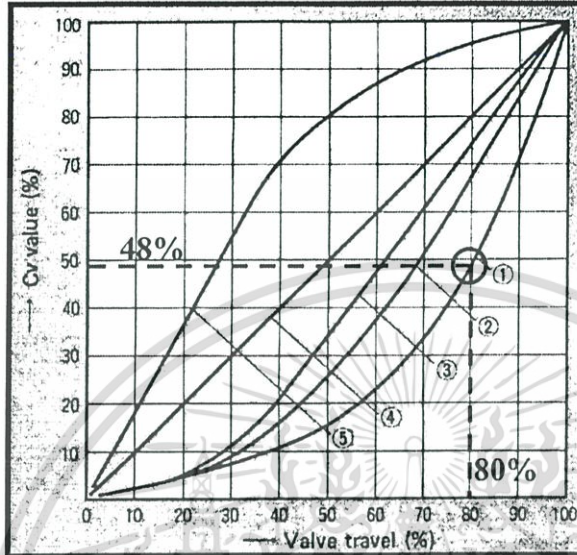
$$C_v = \frac{W}{11.7 * p_1} * k \quad (5.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $W$  : อัตราการไหลสูงสุด (kg/hr)

$p_1$  : ความดันไอน้ำทางเข้า (kgf/cm<sup>2</sup> abs)

$k$  : Correction Coefficient to Superheat (= 1+0.0013 x deg.C of Superheat)



- (1) Equal percentage
- (2) Parabolic
- (3) Modified parabolic
- (4) Linear
- (5) Quick opening

รูปที่ 5.11 คุณลักษณะการไหลของวาล์วตำแหน่งของวาล์วที่ 80%

ดังนั้น

$$k \approx 1$$

$$p_1 = 7 \text{ kg/cm}^2$$

$$W \approx 81.9 \times C_v$$

ค่า  $C_v$  ของวาล์วเท่ากับ 25 (ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิตวาล์ว) และจากกราฟคุณลักษณะการไหลของวาล์วแบบ Equal percentage ดังรูปที่ 5.11

ก่อนปรับปรุง วาล์วควบคุมไอน้ำเปิด (Valve travel) 100% ค่า  $C_v$  เป็น 100% ดังนั้น

$$C_v = (100/100) \times 25$$

$$= 25$$

หลังปรับปรุง วาล์วควบคุมไอน้ำเปิด (Valve travel) 80% ค่า  $C_v$  เป็น 48% ดังนั้น

$$C_v = (48/100) \times 25$$

$$= 12$$

ผลจากการใช้เทคนิคที่น่าเสนอ

$$\text{ค่า } C_v \text{ ที่ลดลง} = 25 - 12$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	=	13	
ปริมาณไอน้ำที่ประหยัดได้ (W)	=	81.9 x 13	
	=	1,064.7	kg/hr
ใน 1 รอบการทำงาน (Batch) ใช้เวลา 6 นาที			
ปริมาณไอน้ำที่ประหยัดได้	=	1,064.7 x (6/60)	
	=	<u>106.47</u>	kg/batch

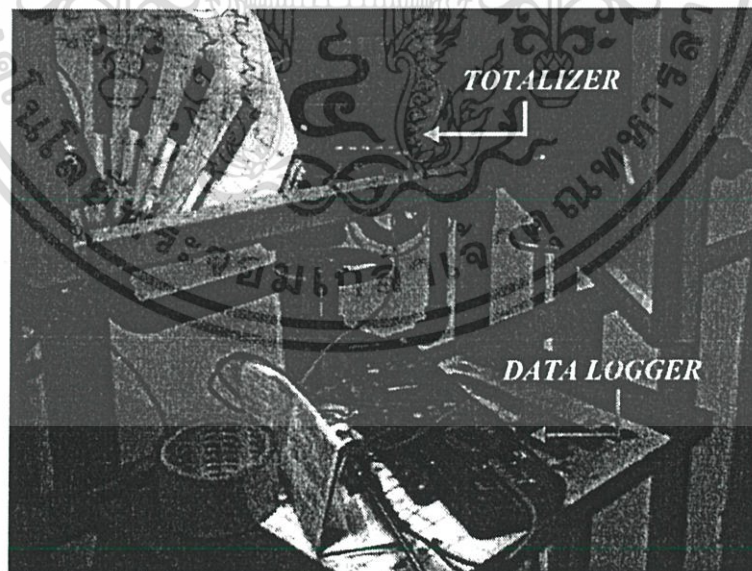
### 5.3.2 การวัดและเปรียบเทียบผลทางปฏิบัติ

ในส่วนแรกเป็นการวัดและเปรียบเทียบผลระหว่าง Batch ต่อ Batch จาก Totalizer ตามหลักการวัดที่นำเสนอและบันทึกข้อมูลจาก Data logger

ในส่วนที่สองเป็นการวัดและเปรียบเทียบผลจากตัวเลขน้ำมันเตา ซึ่งแสดงให้เห็นภาพรวมในเชิงเศรษฐศาสตร์ได้อย่างชัดเจน ซึ่งมีรายละเอียดต่างๆ ดังนี้

#### 5.3.2.1 การวัดและเปรียบเทียบผลการทดลองครั้งที่ 1

โรงงานที่ทำการทดลองนี้เป็นบริษัทผลิตอาหารกระป๋องตั้งอยู่ที่ อำเภอดอนตูม จังหวัดนครปฐม แสดงดังรูปที่ 5.12 โดยทำการทดลองหม้อฆ่าเชื้อตัวที่ 2 ซึ่งมาตรฐานและเวลาในการไล่อากาศอยู่ที่ 102°C ภายในเวลา 4 นาที ในการทดลองได้ทำการสอบเทียบ Totalizer ให้แสดงผลเป็นเปอร์เซ็นต์สะสมการเปิดของวาล์วควบคุมไอน้ำแสดงผลดังนี้

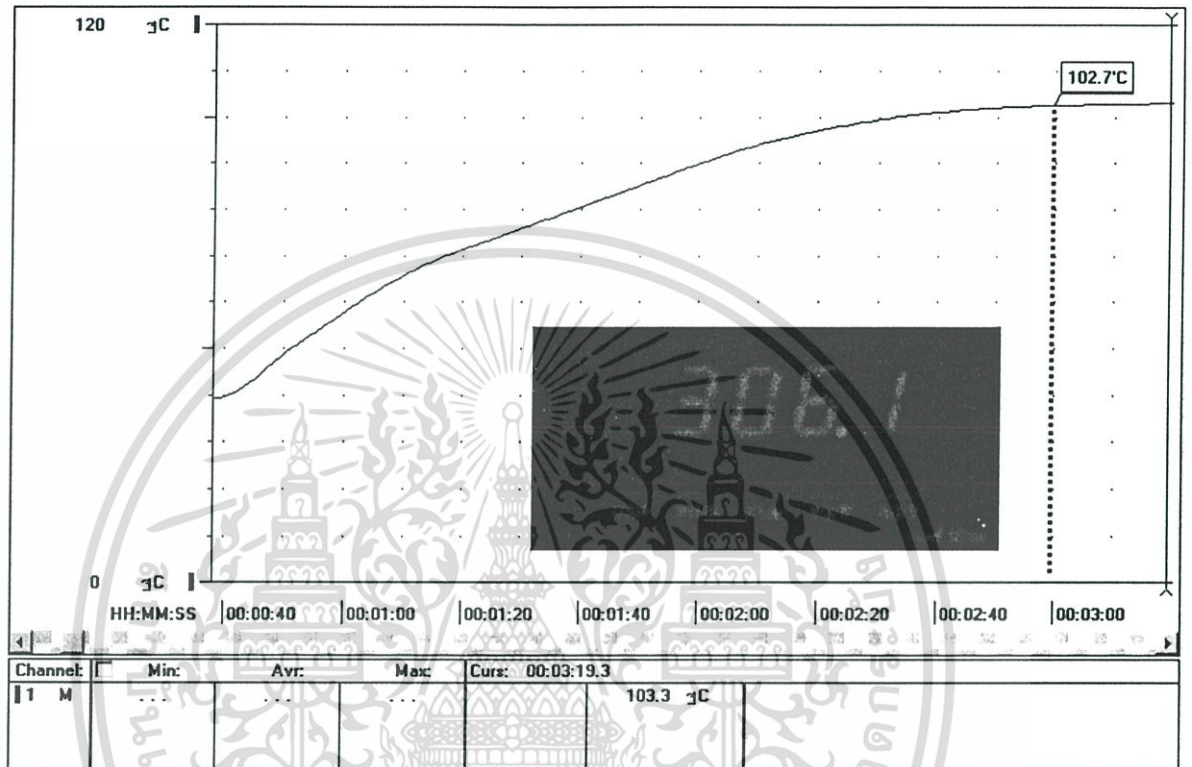


รูปที่ 5.12 แสดงภาพการวัดและบันทึกข้อมูลจากการทดลอง โรงงานที่ 1

**ก่อนการปรับปรุง** ตำแหน่งวาล์วควบคุมไอน้ำในการไล่อากาศเปิดสูงสุด 100% ซึ่งทำการวัดผลรวมสะสมของเปอร์เซ็นต์การเปิดของวาล์วภายในเวลา 4 นาทีและทำการบันทึกภาพคิดเป็น 306%

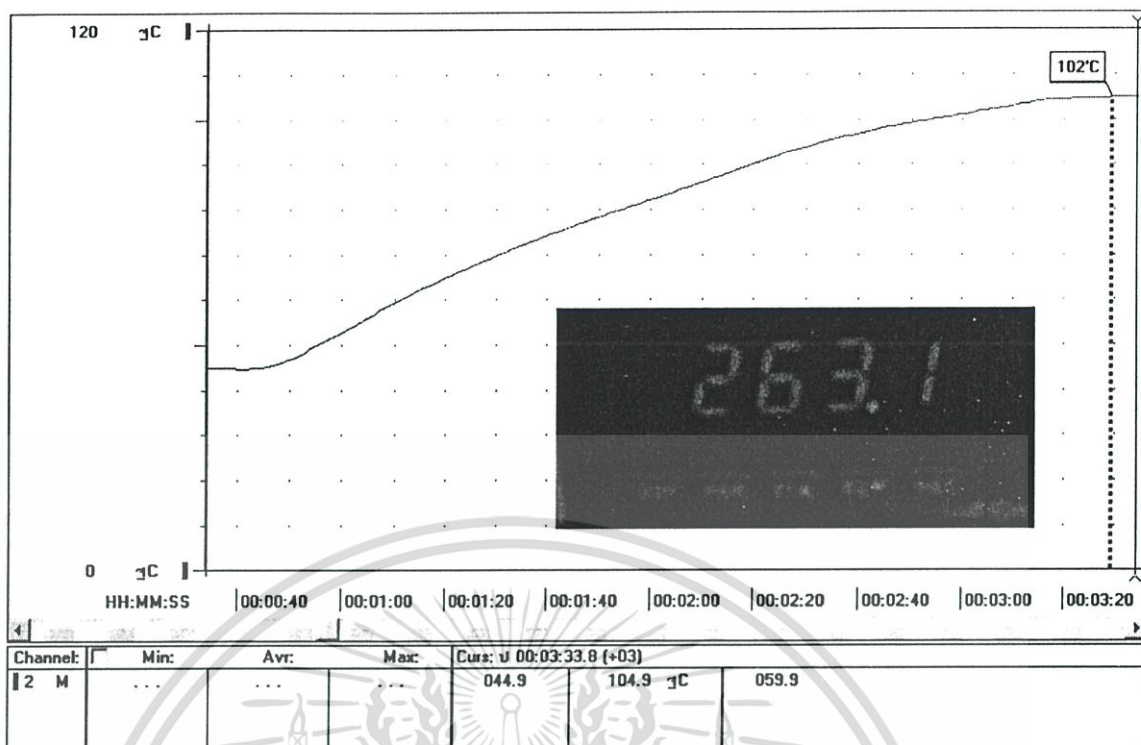
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยใช้ระยะเวลาตั้งแต่อุณหภูมิบรรยากาศไปจนถึงอุณหภูมิเป้าหมายภายในเวลา 3 นาที และรอจนกระทั่งครบ 4 นาทีตามข้อกำหนดของการไล่อากาศ แสดงผลการวัดและบันทึกอุณหภูมิจาก Totalizer และ Data Logger ดังรูปที่ 5.13 โดยแกนตั้งแสดงเป็นค่าอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) และแกนนอนแสดงเป็นค่าเวลา (นาที)



รูปที่ 5.13 แสดงการวัดผลก่อนปรับปรุงจาก Totalizer และ Data logger โรงงานที่ 1

หลังการปรับปรุง ตำแหน่งวาล์วควบคุมไอน้ำในการไล่อากาศเปิดสูงสุด 90% ซึ่งทำการวัดผลรวมสะสมของเปอร์เซ็นต์การเปิดของวาล์วภายในเวลา 4 นาทีและทำการบันทึกภาพคิดเป็น 263% โดยใช้ระยะเวลาตั้งแต่อุณหภูมิบรรยากาศไปจนถึงอุณหภูมิเป้าหมายภายในเวลา 3.5 นาที และรอจนกระทั่งครบ 4 นาทีตามข้อกำหนดของการไล่อากาศ แสดงผลการวัดและบันทึกอุณหภูมิจาก Totalizer และ Data logger ดังรูปที่ 5.14



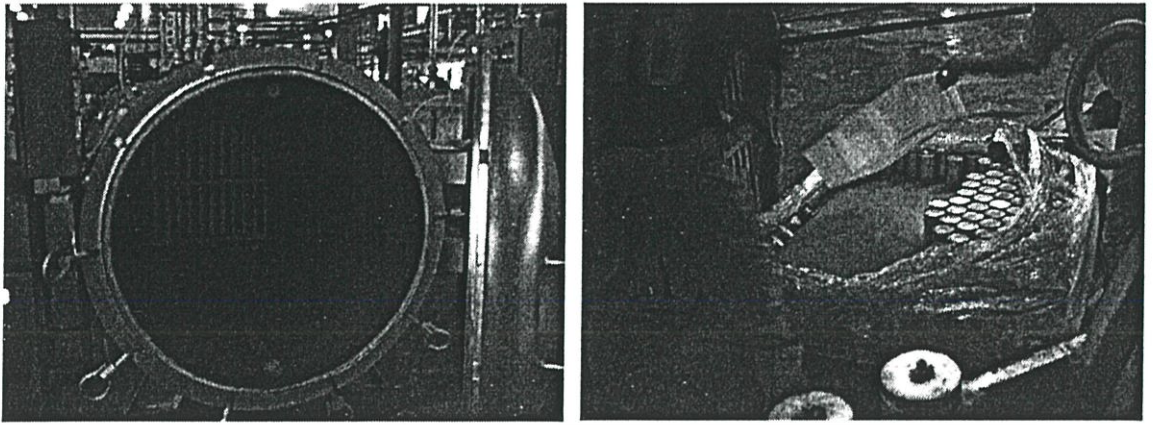
รูปที่ 5.14 แสดงการวัดผลหลังปรับปรุงโรงงานที่ 1

จากการวัดผลการทดลองของโรงงานแห่งนี้ ก่อนการปรับปรุงวาล์วควบคุมไอน้ำเปิดสูงสุดที่ตำแหน่ง 100% โดยเปอร์เซ็นต์สะสมการเปิดของวาล์วคิดเป็น 306% และหลังการปรับปรุง วาล์วควบคุมไอน้ำเปิดสูงสุดที่ตำแหน่ง 90% โดยเปอร์เซ็นต์สะสมการเปิดของวาล์วคิดเป็น 263% ดังนั้นคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ที่ลดลงเท่ากับ 14%

จากข้อมูลการบันทึกอุณหภูมิโดย Data Logger ดังรูปที่ 5.13 และ 5.14 จะเห็นได้ก่อนการปรับปรุงใช้เวลา 3 นาทีและหลังการปรับปรุงใช้เวลา 3.5 นาที ซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนดของการได้อากาศคือภายในเวลา 4 นาที

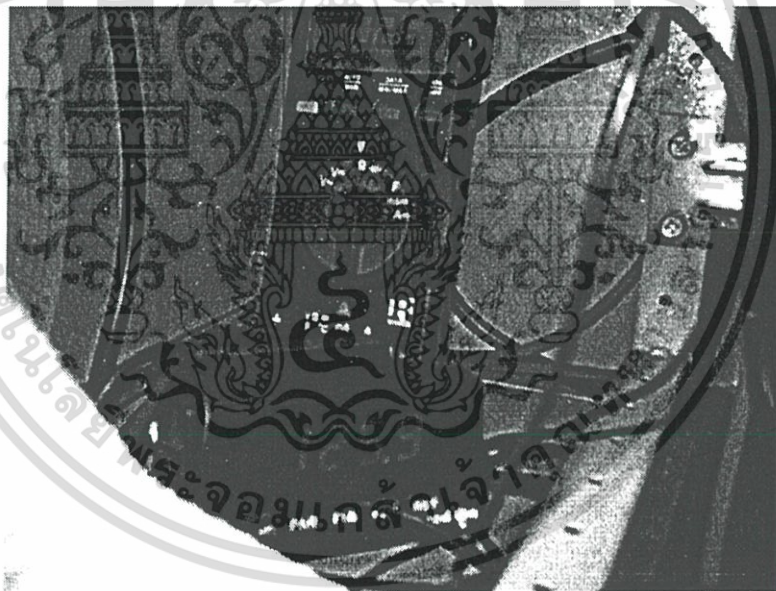
### 5.3.2.2 การวัดและเปรียบเทียบผลการทดลองครั้งที่ 2

โรงงานที่ทำการทดลองครั้งที่ 2 เป็นบริษัทผลิตข้าวโพดกระป๋องตั้งอยู่ที่ อำเภอสันป่าตอง จังหวัดเชียงใหม่ โดยทำการทดลองหม้อฆ่าเชื้อตัวที่ 5 ซึ่งมาตรฐานและเวลาในการไล่อากาศอยู่ที่ 102°C ภายในเวลา 9 นาที ในการทดลองได้ทำการบรรจุโหลคเป็นน้ำเปล่าและได้ทำการจำลองกระบวนการดังบทที่ 3 ได้ Energy Consumption ในการไล่อากาศประมาณ 900 kg/hr ดังนั้นเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับความสัมพันธ์กับตาราง Look-up table จะได้ตำแหน่งการเปิดสูงสุดของวาล์วควบคุมที่เหมาะสมประมาณ 80% และครั้งนี้ได้ทำการสอบเทียบ Totalizer ให้แสดงผลเป็นปริมาณไอน้ำแสดงผลดังนี้



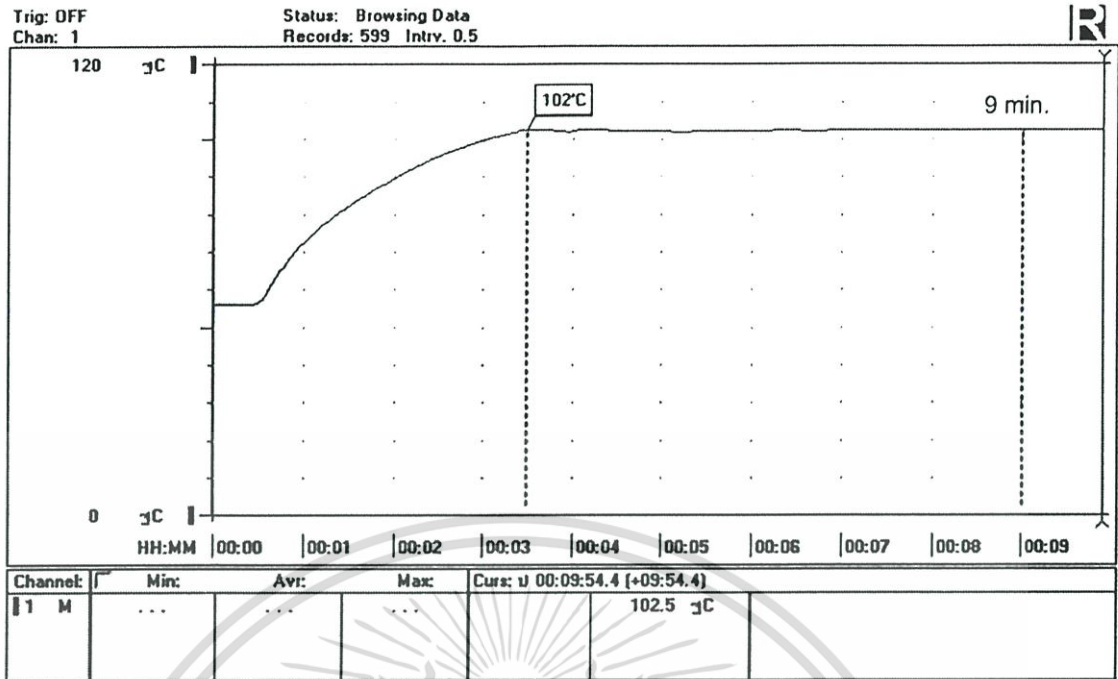
รูปที่ 5.15 หม้อฆ่าเชื้อที่ใช้ในการทดลองและการบรรจุกระป๋องลงในตะกร้ารถเข็น

**ก่อนการปรับปรุง** ตำแหน่งวาล์วควบคุมไอน้ำในการไล่อากาศเปิดสูงสุด 100% ซึ่งทำการวัดปริมาณไอน้ำสะสมจาก Totalizer ภายในเวลา 9 นาทีและทำการบันทึกภาพได้ปริมาณไอน้ำเท่ากับ 125.9 kg/hr แสดงผลการวัดและบันทึกอุณหภูมิจาก Totalizer และ Data logger แสดงดังรูปที่ 5.16 และ 5.17 ตามลำดับ



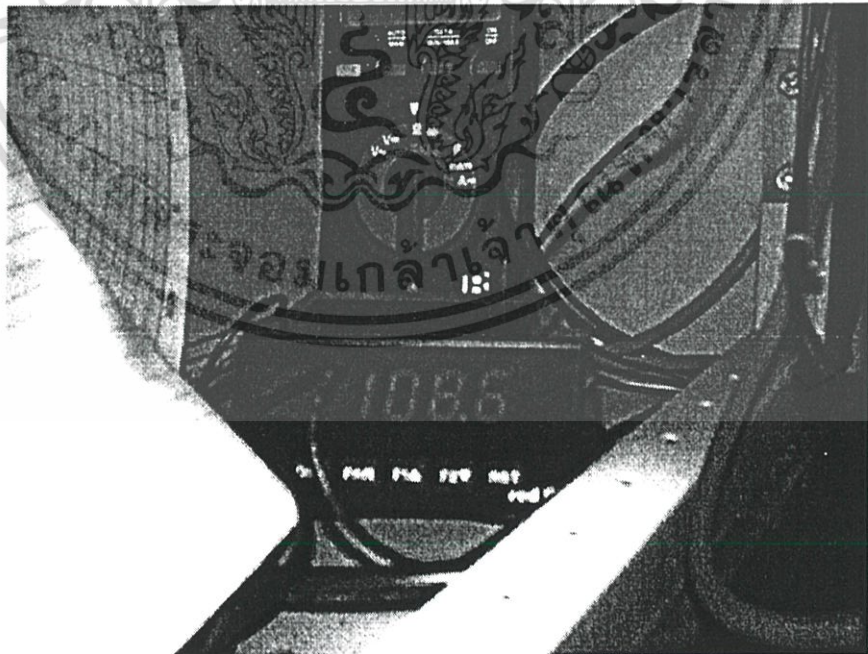
รูปที่ 5.16 แสดงภาพการวัดปริมาณไอน้ำสะสมก่อนการปรับปรุง โรงงานที่ 2

จากรูปที่ 5.17 จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าอุณหภูมิถึงค่าเป้าหมายตั้งแต่ 3.5 นาที แต่ก็ยังคงต้องรอนครบ 9 นาทีตามข้อกำหนดของการไล่อากาศ ดังนั้นช่วงเวลาตั้งแต่ 3.5 นาทีถึง 9 นาทีจึงเป็นการสูญเสียพลังงานเกินความจำเป็น



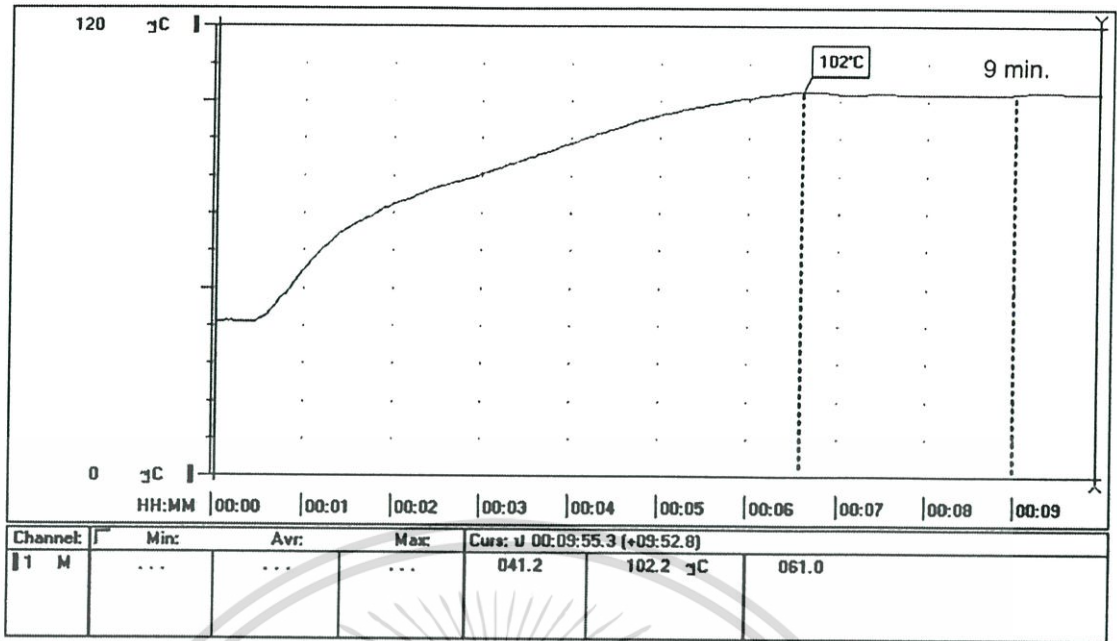
รูปที่ 5.17 แสดงภาพการบันทึกอุณหภูมิก่อนการปรับปรุงจาก Data logger โรงงานที่ 2

หลังการปรับปรุง ตำแหน่งวาล์วควบคุมไอน้ำในการไล่อากาศเปิดสูงสุด 80% ซึ่งทำการวัดปริมาณไอน้ำสะสมจาก Totalizer ภายในเวลา 9 นาทีและทำการบันทึกภาพได้ปริมาณไอน้ำเท่ากับ 108.6 kg/hr แสดงผลการวัดและบันทึกอุณหภูมิจาก Totalizer และ Data logger แสดงดังรูปที่ 5.18 และ 5.19 ตามลำดับ



รูปที่ 5.18 แสดงภาพการวัดปริมาณไอน้ำสะสมหลังการปรับปรุงโรงงานที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.19 แสดงภาพการบันทึกอุณหภูมิหลังการปรับปรุงจาก Data logger โรงงานที่ 2

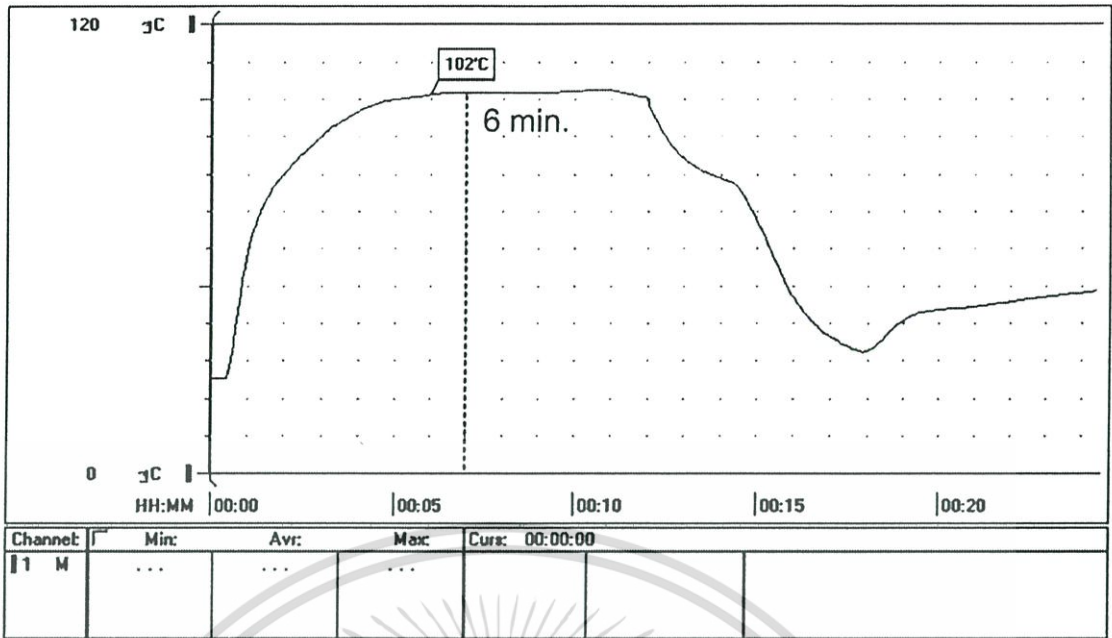
จากการวัดผลการทดลองของโรงงานแห่งนี้ ก่อนการปรับปรุงวาล์วควบคุมไอน้ำเปิดสูงสุดที่ตำแหน่ง 100% โดยปริมาณไอน้ำสะสมคิดเป็น 125.9 kg/hr และหลังการปรับปรุงวาล์วควบคุมไอน้ำเปิดสูงสุดที่ตำแหน่ง 80% โดยปริมาณไอน้ำสะสมคิดเป็น 108.6 kg/hr ดังนั้นคิดเป็นการประหยัดปริมาณไอน้ำที่ใช้ในช่วงการไล่อากาศเท่ากับ 17.3 kg/batch หรือคิดเป็นการใช้พลังงานลดลงได้เท่ากับ 13.74%

จากข้อมูลการบันทึกอุณหภูมิ จะเห็นได้ก่อนการปรับปรุงใช้เวลา 3.5 นาที ถึงอุณหภูมิเป้าหมายและหลังการปรับปรุงใช้เวลา 6.5 นาทีถึงอุณหภูมิเป้าหมาย ซึ่งยังคงเป็นไปตามข้อกำหนดของการไล่อากาศคือภายในเวลา 9 นาที

### 5.3.2.3 การวัดและเปรียบเทียบผลการทดลองครั้งที่ 3

โรงงานแห่งสุดท้ายที่ทำการทดลองคือ บริษัทสหปราจีนบุรีอุตสาหกรรมอาหาร ตั้งอยู่ที่อำเภอฝาง จังหวัดเชียงใหม่ โดยทำการทดลองหม้อฆ่าเชื้อตัวที่ 2 ซึ่งมาตรฐานและเวลาในการไล่อากาศอยู่ที่ 102°C ภายในเวลา 6 นาที

จากภาพการบันทึกอุณหภูมิดังรูปที่ 5.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาของการไล่อากาศของโรงงานแห่งนี้ พบว่าไม่สามารถลดตำแหน่งการเปิดสูงสุดของวาล์วควบคุมไอน้ำลงได้ เนื่องจากที่ตำแหน่งวาล์วควบคุมเปิด 100% แล้ว ระยะเวลาที่อุณหภูมิถึงค่าเป้าหมายใกล้เคียงระยะเวลาที่กำหนด ซึ่งถ้าลดตำแหน่งการเปิดสูงสุดลดลงมา จะทำให้การควบคุมไม่เป็นไปตามข้อกำหนดของการไล่อากาศได้



รูปที่ 5.20 แสดงภาพการบันทึกอุณหภูมิโรงงานที่ 3

จากการวิเคราะห์โครงสร้างของหม้อฆ่าเชื้อพบว่า ขนาดท่อกระจายไอน้ำ (Spreader) ของหม้อมีขนาดต่ำกว่ามาตรฐาน จึงทำให้การกระจายความร้อนภายใน ได้ช้า

5.3.2.4 การวัดและเปรียบเทียบผลจากน้ำมันเตา

ในส่วนนี้จะแสดงถึงผลการใช้น้ำมันเตาต่อกำลังการผลิต ซึ่งสามารถทำให้เห็นผลการประหยัดได้อย่างชัดเจน ข้อมูลที่นำเสนอได้จาก บริษัท บี.เอ็น .เอช แคนนิ่ง ตั้งอยู่ที่อำเภอโพธาราม จังหวัดราชบุรี โดยใช้น้ำมันเตาเกรด C เป็นเชื้อเพลิงให้กับหม้อไอน้ำ (Boiler) และโรงงานแห่งนี้ ได้เข้าร่วม โครงการประหยัดพลังงานกับสภาอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย ข้อมูลที่ได้รับจากทางโรงงานเป็นดังนี้

ในการวิเคราะห์ระบบไอน้ำที่ใช้ในการให้พลังงานความร้อนแก่หม้อฆ่าเชื้อ พบว่าในการได้อากาศมีการกำหนดอุณหภูมิในการปิด Drain ที่ 102°C นาน 8 นาที และปิดวาล์วระบายอากาศ 105°C เมื่อครบ 10 นาที ซึ่งปริมาณความร้อนที่เข้าจริงมีปริมาณความร้อนค่อนข้างสูง และใช้เวลาสั้นกว่าที่กำหนด จึงทำให้สูญเสียพลังงานโดยสูญเปล่า ดังนั้นจึงใช้วิธีการปรับลดการเปิดสูงสุดของวาล์วควบคุมในช่วงไต่อากาศลง 25% ซึ่งได้ข้อสรุปดังนี้

- ปริมาณน้ำมันเตาที่ใช้ก่อนการปรับปรุง = 30.38 กิโลกรัม-วัตต์คูบ/ลิตร
- ปริมาณน้ำมันเตาที่ใช้หลังการปรับปรุง = 33.99 กิโลกรัม-วัตต์คูบ/ลิตร
- ดังนั้น ปริมาณน้ำมันเตาที่ใช้จะสามารถผลิตได้เพิ่มขึ้น = 11.88 %
- ซึ่งหากมีการผลิตโดยใช้วัตต์คูบ 50,000 กิโลกรัม
- ก่อนการปรับปรุงใช้น้ำมันเตา = 1,646.92 ลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หลังการปรับปรุงใช้น้ำมันเตา	= 1,471.02	ลิตร
ดังนั้น	จะสามารถประหยัดน้ำมันเตา	= 175.9	ลิตร/วัน
	ถ้าราคาน้ำมันเตาเกรด C ราคาลิตรละ 7 บาท		
ดังนั้น	จะสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายได้	= 1,231.3	บาท/วัน
	รวมเงินที่ประหยัดได้	= 32,013.8	บาท/เดือน
		= 384,165.6	บาท/ปี

หมายเหตุ : ผลการประหยัดขึ้นอยู่กับกำลังการผลิต



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

เทคนิคที่นำเสนอเป็นการนำเทคนิคการเปิดตารางเข้ามาใช้ควบคุมร่วมกับการควบคุมแบบ PID ซึ่งในช่วงเริ่มต้นของการไล่อากาศจะใช้เทคนิคการเปิดตารางเข้ามาควบคุมการเปิดสูงสุดของ วาล์วควบคุมไอน้ำให้อยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสม โดยศึกษาการใช้พลังงานจากการจำลอง กระบวนการหม้อฆ่าเชื้อตามทฤษฎีการออกแบบระบบความร้อนแบบสถานะไม่คงที่ และเทคนิค การเปิดตารางได้จากความสัมพันธ์ระหว่างการไหลของไอน้ำกับการเปิดของวาล์วควบคุมตามสูตร การคำนวณค่า  $C_v$  ของวาล์วควบคุม

ในการทดลองได้ทำการเปรียบเทียบผลในทางทฤษฎีและทางปฏิบัติ โดยในทางทฤษฎีได้ อ้างอิงจากสูตรการคำนวณค่า  $C_v$  ของวาล์วควบคุมไอน้ำ และในทางปฏิบัติได้นำเสนอวิธีการวัดผล จากเครื่องวัดพลังงานแบบสะสมและจากตัวเลขน้ำมันเตาที่ใช้ในการผลิต โดยใช้เครื่องบันทึก อุณหภูมิในการศึกษาว่าผลการปรับปรุงจากเทคนิคที่นำเสนอยังอยู่ในข้อกำหนดของการไล่อากาศ วิธีการทดลองได้นำเสนอหลักการจากเทคนิคการเปิดตารางโดยใช้โหมด Manual Control ในตัว ควบคุมอุณหภูมิเพื่อควบคุมตำแหน่งการเปิดสูงสุดของวาล์วควบคุมไอน้ำในช่วงเริ่มต้นของการไล่อากาศ หลังจากที่อุณหภูมิจริงใกล้ถึงค่าเป้าหมายจึงออกจากโหมด Manual Control เพื่อให้การ ควบคุมอุณหภูมิเข้าสู่โหมด PID แบบปกติ จากการเปรียบเทียบผลก่อนและหลังการปรับปรุง พบว่า เทคนิคดังกล่าวสามารถนำไปใช้ในกระบวนการผลิตได้จริง โดยสามารถลดการใช้ไอน้ำในช่วงการ ไล่อากาศและยังคงสามารถรักษาข้อกำหนดของการไล่อากาศ แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นการควบคุมตำแหน่ง การเปิดสูงสุดของวาล์วควบคุมจากเทคนิคที่นำเสนอในแต่ละแห่งอาจแตกต่างกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับ ข้อกำหนดหลายด้าน เช่น โครงสร้างหม้อฆ่าเชื้อ, ขนาดท่อ, ความดันไอน้ำ เป็นต้น

ดังนั้นจะเห็นว่าถ้าต้องการให้การควบคุมเป็นแบบอัตโนมัติทั้งหมดควรจะใช้ตัวควบคุม อุณหภูมิที่มีฟังก์ชันการใช้งานสูงขึ้นเช่น แบบ Pattern program ซึ่งในทางปฏิบัติอาจจะทำได้ยาก เนื่องจากโรงงานอาหารกระป๋องในประเทศไทยส่วนใหญ่เป็น โรงงานอุตสาหกรรมขนาดกลางและ เล็ก (SMEs) โดยส่วนใหญ่เป็นธุรกิจแบบครอบครัว ซึ่งไม่ค่อยนิยมลงทุนเท่าใดนัก

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงเป็นการกล่าวถึงการควบคุมกระบวนการให้มีการใช้พลังงานอย่าง เหมาะสมในงานอุตสาหกรรม โดยสามารถนำเทคนิคดังกล่าวไปประยุกต์ใช้กับกระบวนการอื่นๆ ได้ ซึ่งในประเทศไทยยังมีอีกหลายกระบวนการที่ยังไม่ได้ทำการศึกษาการใช้พลังงานที่เหมาะสม ในการผลิต ดังนั้นถ้าทุกกระบวนการได้มีการศึกษาเพื่อทำการควบคุมกระบวนการให้มีความ เหมาะสมในการใช้พลังงานแล้ว ดังนั้นการประหยัดพลังงานจะเกิดขึ้นอย่างมหาศาล โดยเฉพาะ อย่างยิ่งประเทศที่ไม่มีทรัพยากรน้ำมันเป็นของตนเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2540.
- [2] อัจฉรา พุ่มฉัตร. จุลชีววิทยาของอาหารกระป๋องที่มีความเป็นกรดต่ำ. กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ กระทรวงสาธารณสุข. 2534.
- [3] รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต. วิศวกรรมแปรรูปอาหาร : การถนอมอาหาร. พิมพ์ครั้งที่ 1. 2535.
- [4] เกรียงศักดิ์ ลิ้มประจวบลาภ. "Retort Operation."
- [5] สมพงษ์ ชัยยังเขาว์, ปกรณ์ สัญญไพโรจน์. "การศึกษาการกระจายความร้อนภายในหม้อฆ่าเชื้ออาหารกระป๋อง." ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. 2534.
- [6] เอกสารประกอบการอบรม โครงการยกระดับมาตรฐานความปลอดภัยในอาหารกระป๋อง "หลักความปลอดภัยในการผลิตอาหารที่ฆ่าเชื้อด้วยความร้อน." กรุงเทพมหานคร : สถาบันอาหาร สภาอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย. 2546.
- [7] มนตรี พิรุณเกษตร. การถ่ายเทความร้อน ฉบับเตรียมสอบและเสริมประสบการณ์. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร : บริษัท วิทย์พิมพ์ จำกัด
- [8] กิตติ ตีรเศรษฐ. พื้นฐานวิศวกรรมระบบควบคุม. พิมพ์ครั้งที่ 4. 2535.
- [9] พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์. พลศาสตร์กระบวนการ : การควบคุมกระบวนการ. กรุงเทพมหานคร : วัฒนาการพิมพ์ จก. 2534.
- [10] ตระการ ก้าวกลีกรรม วิศวกรรมระบบท่ออุตสาหกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 1 กรุงเทพมหานคร : หจก. นำอักษรการพิมพ์. 2544
- [11] Stoecker W.F. **Design of Thermal Systems**. 3rd. ed. New York : McGraw-Hill. 1989.
- [12] Sangjeen N., Julsereewong P. "A Design of Two-mode Controller Using PC-based Lookup Table Technique and PID Control Algorithm." ICCAS 2002, Proceeding of the 2002 International Conference on Control, Automation and Systems, Korea, pp. 412-417
- [13] Taprap R., Phuttame K. "Energy and Exergy Analysis of Canned Food Plant." Proceeding of the ECOS'99 International Conference, June 1999.
- [14] Nakakita. "Valve Flow Coefficient (Cv) Calculation and Sizing."

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## MODEL PAX – 1/8 DIN ANALOG INPUT PANEL METERS


 UL Recognized Component,  
 File # E179259


- PROCESS, VOLTAGE, CURRENT, TEMPERATURE, AND STRAIN GAGE INPUTS
- 5-DIGIT 0.56" RED SUNLIGHT READABLE DISPLAY
- VARIABLE INTENSITY DISPLAY
- 16 POINT SCALING FOR NON-LINEAR PROCESSES
- PROGRAMMABLE FUNCTION KEYS/USER INPUTS
- 9 DIGIT TOTALIZER (INTEGRATOR) WITH BATCHING
- OPTIONAL CUSTOM UNITS OVERLAY W/BACKLIGHT
- FOUR SETPOINT ALARM OUTPUTS (W/OPTION CARD)
- COMMUNICATION AND BUS CAPABILITIES (W/OPTION CARD)
- RETRANSMITTED ANALOG OUTPUT (W/OPTION CARD)
- PC SOFTWARE AVAILABLE FOR METER CONFIGURATION
- NEMA 4X/IP65 SEALED FRONT BEZEL

### GENERAL DESCRIPTION

The PAX Analog Panel Meters offer many features and performance capabilities to suit a wide range of industrial applications. Available in five different models to handle various analog inputs, including DC Voltage/Current, AC Voltage/Current, Process, Temperature, and Strain Gage Inputs. Refer to pages 4 through 6 for the details on the specific models. The optional plug-in output cards allow the opportunity to configure the meter for present applications, while providing easy upgrades for future needs.

The meters employ a bright 0.56" LED display. The unit is available with a red sunlight readable or a standard green LED. The intensity of display can be adjusted from dark room applications up to sunlight readable, making it ideal for viewing in bright light applications.

The meters provide a MAX and MIN reading memory with programmable capture time. The capture time is used to prevent detection of false max or min readings which may occur during start-up or unusual process events.

The signal totalizer (integrator) can be used to compute a time-input product. This can be used to provide a readout of totalized flow, calculate service intervals of motors or pumps, etc. The totalizer can also accumulate batch weighing operations.

The meters have four setpoint outputs, implemented on Plug-in option cards. The Plug-in cards provide dual FORM-C relays (5A), quad FORM-A (3A), or either quad sinking or quad sourcing open collector logic outputs. The setpoint alarms can be configured to suit a variety of control and alarm requirements.

Communication and Bus Capabilities are also available as option cards. These include RS232, RS485, Modbus, DeviceNet, and Profibus-DP. Readout values and setpoint alarm values can be controlled through the bus. Additionally, the meters have a feature that allows a remote computer to directly control the outputs of the meter. With an RS232 or RS485 card installed, it is possible to configure the meter using a Windows<sup>®</sup> based program. The configuration data can be saved to a file for later recall.

A linear DC output signal is available as an optional Plug-in card. The card provides either 20 mA or 10 V signals. The output can be scaled independent of the input range and can track either the input, totalizer, max or min readings.

Once the meters have been initially configured, the parameter list may be locked out from further modification in its entirety or only the setpoint values can be made accessible.

The meters have been specifically designed for harsh industrial environments. With NEMA 4X/IP65 sealed bezel and extensive testing of noise effects to CE requirements, the meter provides a tough yet reliable application solution.

### SAFETY SUMMARY

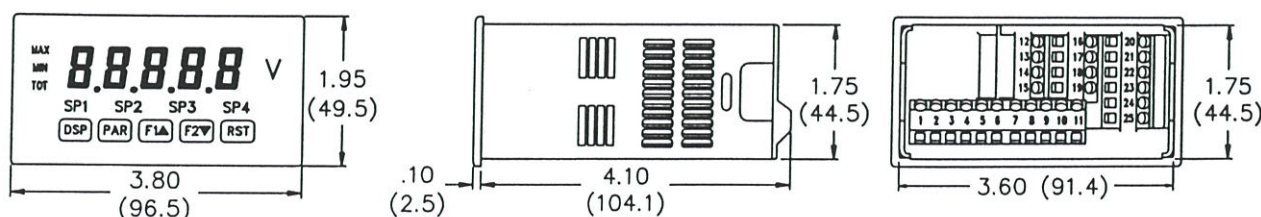
All safety related regulations, local codes and instructions that appear in this literature or on equipment must be observed to ensure personal safety and to prevent damage to either the instrument or equipment connected to it. If equipment is used in a manner not specified by the manufacturer, the protection provided by the equipment may be impaired.

Do not use this unit to directly command motors, valves, or other actuators not equipped with safeguards. To do so can be potentially harmful to persons or equipment in the event of a fault to the unit.


 CAUTION: Read complete  
 instructions prior to installation  
 and operation of the unit.


CAUTION: Risk of electric shock.

### DIMENSIONS In inches (mm)

 Note: Recommended minimum clearance (behind the panel) for mounting clip installation is  
 2.1" (53.4) H x 5.0" (127) W.


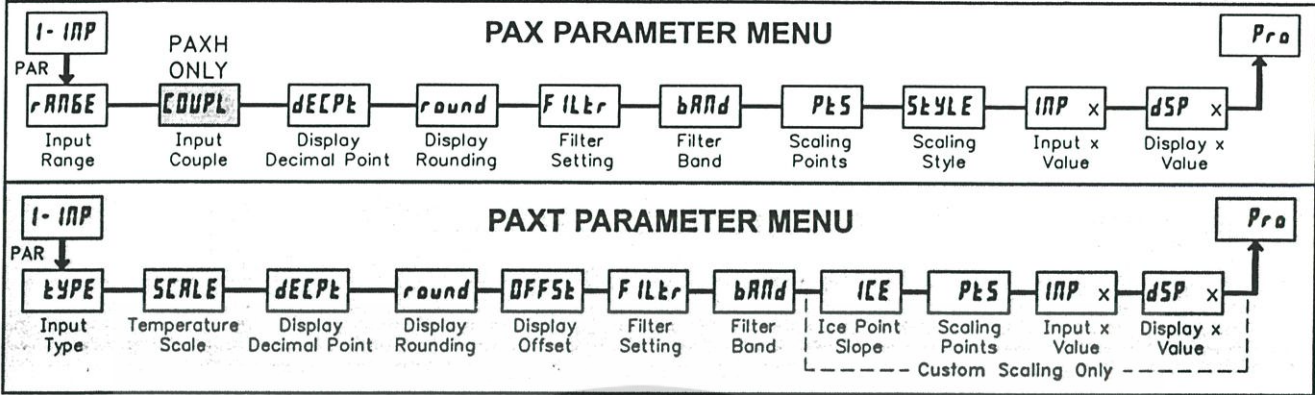
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# GENERAL METER SPECIFICATIONS

1. **DISPLAY:** 5 digit, 0.56" (14.2 mm) red sunlight readable or standard green LEDs, (-19999 to 99999)
2. **POWER:**  
AC Versions:  
AC Power: 85 to 250 VAC, 50/60 Hz, 15 VA  
Isolation: 2300 Vrms for 1 min. to all inputs and outputs.  
DC Versions (Not available on PAXH):  
DC Power: 11 to 36 VDC, 11 W  
(derate operating temperature to 40° C if operating <15 VDC and three plug-in option cards are installed)  
AC Power: 24 VAC,  $\pm 10\%$ , 50/60 Hz, 15 VA  
Isolation: 500 Vrms for 1 min. to all inputs and outputs (50 V working).
3. **ANNUNCIATORS:**  
MAX - maximum readout selected  
MIN - minimum readout selected  
TOT - totalizer readout selected, flashes when total overflows  
SP1 - setpoint alarm 1 is active  
SP2 - setpoint alarm 2 is active  
SP3 - setpoint alarm 3 is active  
SP4 - setpoint alarm 4 is active  
Units Label - optional units label backlight
4. **KEYPAD:** 3 programmable function keys, 5 keys total
5. **A/D CONVERTER:** 16 bit resolution
6. **UPDATE RATES:**  
A/D conversion rate: 20 readings/sec.  
Step response: 200 msec. max. to within 99% of final readout value (digital filter and internal zero correction disabled)  
700 msec. max. (digital filter disabled, internal zero correction enabled)  
PAXH Only: 1 sec max. to within 99% of final readout value (digital filter disabled)  
Display update rate: 1 to 20 updates/sec.  
Setpoint output on/off delay time: 0 to 3275 sec.  
Analog output update rate: 0 to 10 sec  
Max./Min. capture delay time: 0 to 3275 sec.
7. **DISPLAY MESSAGES:**  
"LOL" - Appears when measurement exceeds + signal range.  
"ULUL" - Appears when measurement exceeds - signal range  
PAXH: "SHrt" - Appears when shorted sensor is detected. (RTD only)  
PAXH: "OPEN" - Appears when open sensor is detected.  
"... " - Appears when display values exceed + display range.  
"... " - Appears when display values exceed - display range.
8. **INPUT CAPABILITIES:** See specific product specifications, pages 4-6
9. **EXCITATION POWER:** See specific product specifications, pages 4-6
10. **LOW FREQUENCY NOISE REJECTION:** (Does not apply to PAXH)  
Normal Mode: > 60 dB @ 50 or 60 Hz  $\pm 1\%$ , digital filter off  
Common Mode: > 100 dB, DC to 120 Hz
11. **USER INPUTS:** Three programmable user inputs  
Max. Continuous Input: 30 VDC  
Isolation To Sensor Input Common: Not isolated. (Not PAXH)  
PAXH: Isolation to Sensor Input Common: 1400 Vrms for 1 min.  
Working Voltage: 125 V  
Response Time: 50 msec. max.  
Logic State: Jumper selectable for sink/source logic
- | INPUT STATE | SINKING INPUTS<br>22 K $\Omega$ pull-up to +5 V | SOURCING INPUTS<br>22 K $\Omega$ pull-down |
|-------------|---|--|
| Active      | $V_{IN} < 0.9$ VDC                              | $V_{IN} > 3.6$ VDC                         |
| Inactive    | $V_{IN} > 3.6$ VDC                              | $V_{IN} < 0.9$ VDC                         |
12. **TOTALIZER:**  
Function:  
Time Base: second, minute, hour, or day  
Batch: Can accumulate (gate) input display from a user input  
Time Accuracy: 0.01% typical  
Decimal Point: 0 to 0.0000  
Scale Factor: 0.001 to 65,000  
Low Signal Cut-out: -19,999 to 99,999  
Total: 9 digits, display alternates between high order and low order readouts
13. **CUSTOM LINEARIZATION:**  
Data Point Pairs: Selectable from 2 to 16  
Display Range: -19,999 to 99,999  
Decimal Point: 0 to 0.0000  
PAXH: Ice Point Compensation: user value (0.00 to 650.00  $\mu$ V/°C)
14. **MEMORY:** Nonvolatile E<sup>2</sup>PROM retains all programmable parameters and display values.
15. **ENVIRONMENTAL CONDITIONS:**  
Operating Temperature Range: 0 to 50°C (0 to 45°C with all three plug-in cards installed)  
Storage Temperature Range: -40 to 60°C  
Operating and Storage Humidity: 0 to 85% max. RH non-condensing  
Altitude: Up to 2000 meters
16. **CERTIFICATIONS AND COMPLIANCES:**  
**SAFETY**  
UL Recognized Component, File #E179259, UL3101-1, CSA 22.2 No. 1010-1  
PAXH Only: File # E156876, UL873, CSA 22.2 No. 24  
Recognized to U.S. and Canadian requirements under the Component Recognition Program of Underwriters Laboratories, Inc.  
Type 4X Enclosure rating (Face only), UL50  
IECEE CB Scheme Test Certificate #UL/5854/UL  
CB Scheme Test Report #02ME04503-04122002  
Issued by Underwriters Laboratories, Inc.  
IEC 1010-1, EN 61010-1: Safety requirements for electrical equipment for measurement, control, and laboratory use, Part I  
IP65 Enclosure rating (Face only), IEC 529  
IP20 Enclosure rating (Rear of unit), IEC 529
- ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY**  
**Immunity to EN 50082-2**  
Electrostatic discharge EN 61000-4-2 Level 2; 4 Kv contact  
Level 3; 8 Kv air  
Electromagnetic RF fields EN 61000-4-3 Level 3; 10 V/m<sup>1</sup>  
80 MHz - 1 GHz  
Fast transients (burst) EN 61000-4-4 Level 4; 2 Kv I/O  
Level 3; 2 Kv power  
RF conducted interference EN 61000-4-6 Level 3; 10 V/rms  
150 KHz - 80 MHz  
Simulation of cordless telephones ENV 50204 Level 3; 10 V/m  
900 MHz  $\pm 5$  MHz  
200 Hz, 50% duty cycle
- Emissions to EN 50081-2**  
RF interference EN 55011 Enclosure class A  
Power mains class A
- Notes:**  
1. Self-recoverable loss of performance during EMI disturbance at 10 V/m: Measurement input and/or analog output signal may deviate during EMI disturbance.  
For operation without loss of performance: Unit is mounted in a metal enclosure (Buckeye SM7013-0 or equivalent) I/O and power cables are routed in metal conduit connected to earth ground.  
Refer to EMC Installation Guidelines section of the bulletin for additional information.
17. **CONNECTIONS:** High compression cage-clamp terminal block  
Wire Strip Length: 0.3" (7.5 mm)  
Wire Gauge Capacity: One 14 AWG (2.55 mm) solid, two 18 AWG (1.02 mm) or four 20 AWG (0.61 mm)
18. **CONSTRUCTION:** This unit is rated for NEMA 4X/IP65 indoor use. IP20 Touch safe. Installation Category II, Pollution Degree 2. One piece bezel/case. Flame resistant. Synthetic rubber keypad. Panel gasket and mounting clip included.
19. **WEIGHT:** 10.4 oz. (295 g)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# 5.1 MODULE 1 - SIGNAL INPUT PARAMETERS (1- INP)



Refer to the appropriate Input Range for the selected meter. Use only one Input Range, then proceed to Display Decimal Point.

### PAXX INPUT RANGE

SELECTION	RANGE	RESOLUTION
0.02u	±24 mV	
0.2u	±240 mV	

Select the input range that corresponds to the external signal. This selection should be high enough to avoid input signal overload but low enough for the desired input resolution. This selection and the position of the Input Range Jumper must match.

### PAXD INPUT RANGE

SELECTION	RANGE	RESOLUTION	SELECTION	RANGE	RESOLUTION
200uA	±200.00 uA		2u	±2.0000 V	
0.002A	±2.0000 mA		20u	±20.000 V	
0.02A	±20.000 mA		300u	±300.00 V	
0.2A	±200.00 mA		100o	100.00 ohm	
2A	±2.0000 A		1000o	1000.0 ohm	
0.2V	±200.00 mV		10K o	10000 ohm	

Select the input range that corresponds to the external signal. This selection should be high enough to avoid input signal overload but low enough for the desired input resolution. This selection and the position of the Input Range Jumper must match.

### PAXT INPUT TYPE

SELECTION	TYPE	SELECTION	TYPE
t-c-t	T TC	t-c-c	C TC
t-c-E	E TC	Pt385	RTD platinum 385
t-c-J	J TC	Pt392	RTD platinum 392
t-c-M	K TC	Ni672	RTD nickel 672
t-c-r	R TC	Cu427	RTD copper 10 u
t-c-S	S TC	C5-tc	Custom TC
t-c-b	B TC	C5-rH	Custom RTD High
t-c-n	N TC	C5-rL	Custom RTD Low

Select the input type that corresponds to the input sensor. For RTD types, check the RTD Input Jumper for matching selection. For custom types, the Temperature Scale parameter is not available, the Display Decimal Point is expanded, and Custom Sensor Scaling must be completed.

### PAXP INPUT RANGE

SELECTION	RANGE	RESOLUTION
0.02A	±20.000 mA	
10u	±10.000 V	

Select the input range that corresponds to the external signal.

### TEMPERATURE SCALE

SELECTION	TYPE
oF	°F
oC	°C

Select the temperature scale. This selection applies for Input, MAX, MIN, and TOT displays. This does not change the user installed Custom Units Overlay display. If changed, those parameters that relate to the temperature scale should be checked. This selection is not available for custom sensor types.

### PAXH INPUT RANGE

SELECTION	RANGE	RESOLUTION	SELECTION	RANGE	RESOLUTION
0.2u	200.00 mV		0.002A	2.0000 mA	
2u	2.0000 V		0.02A	20.000 mA	
20u	20.000 V		0.2A	200.00 mA	
300u	300.0 V		5A	5.000 A	
200uA	200.00 uA				

Select the input range that corresponds to the external signal. This selection should be high enough to avoid input signal overload but low enough for the desired input resolution. This selection and the position of the Input Range Jumper must match.

### DISPLAY DECIMAL POINT

dECEPt	0	00	000	0000	00000
0					

For the PAXT, these are only available with Custom Scaling.

### INPUT COUPLE

COUPL	AC	OR	DC
AC			

The input signal can be either AC coupled (rejecting the DC components of the signal) or DC coupled (measures both the AC and DC components of the signal). The coupling jumper and the setting of this parameter must match.

Select the decimal point location for the Input, MAX and MIN displays. (The TOT display decimal point is a separate parameter.) This selection also affects round, dSP 1 and dSP 2 parameters and setpoint values.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**DISPLAY ROUNDING\***



These bottom selections are not available for the PAXT.

Rounding selections other than one, cause the Input Display to 'round' to the nearest rounding increment selected (ie. rounding of '5' causes 122 to round to 120 and 123 to round to 125). Rounding starts at the least significant digit of the Input Display. Remaining parameter entries (scaling point values, setpoint values, etc.) are not automatically adjusted to this display rounding selection.

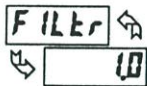
**PAXT: TEMPERATURE DISPLAY OFFSET\***



- 9999 to 9999

The temperature display can be corrected with an offset value. This can be used to compensate for probe errors, errors due to variances in probe placement or adjusting the readout to a reference thermometer. This value is automatically updated after a Zero Display to show how far the display is offset. A value of zero will remove the affects of offset.

**FILTER SETTING\***



0.0 to 25.0 seconds

The input filter setting is a time constant expressed in tenths of a second. The filter settles to 99% of the final display value within approximately 3 time constants. This is an Adaptive Digital Filter which is designed to steady the Input Display reading. A value of '0' disables filtering.

**FILTER BAND\***



0.0 to 25.0 display units

The digital filter will adapt to variations in the input signal. When the variation exceeds the input filter band value, the digital filter disengages. When the variation becomes less than the band value, the filter engages again. This allows for a stable readout, but permits the display to settle rapidly after a large process change. The value of the band is in display units, independent of the Display Decimal Point position. A band setting of '0' keeps the digital filter permanently engaged.

For the PAXT, the following parameters only apply to Custom Sensor Scaling.

**PAXT: ICE POINT SLOPE**



0 to 65000 µV/°C

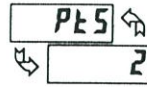
This parameter sets the slope value for ice point compensation for the Custom TC range (E5-E6) only. The fixed thermocouple ranges are automatically compensated by the meter and do not require this setting. To calculate this slope, use µV data obtained from thermocouple manufacturers' tables for two points between 0°C and 50°C. Place this corresponding µV and °C information into the equation:

$$\text{slope} = (\mu V_2 - \mu V_1) / (C_2 - C_1)$$

Due to the nonlinear output of thermocouples, the compensation may show a small offset error at room temperatures. This can be compensated by the offset parameter. A value of 0 disables internal compensation when the thermocouple is externally compensated.

\* Factory Setting can be used without affecting basic start-up.

**SCALING POINTS\***



2 to 16

**Linear - Scaling Points (2)**

For linear processes, only 2 scaling points are necessary. It is recommended that the 2 scaling points be at opposite ends of the input signal being applied. The points do not have to be the signal limits. Display scaling will be linear between and continue past the entered points up to the limits of the Input Signal Jumper position. Each scaling point has a coordinate-pair of Input Value ( *INP* ) and an associated desired Display Value ( *dSP* ).

**Nonlinear - Scaling Points (Greater than 2)**

For non-linear processes, up to 16 scaling points may be used to provide a piece-wise linear approximation. (The greater the number of scaling points used, the greater the conformity accuracy.) The Input Display will be linear between scaling points that are sequential in program order. Each scaling point has a coordinate-pair of Input Value ( *INP* ) and an associated desired Display Value ( *dSP* ). Data from tables or equations, or empirical data could be used to derive the required number of segments and data values for the coordinate pairs. In the SFPAX software, several linearization equations are available.

**SCALING STYLE**

This parameter does not apply for the PAXT. Scaling values for the PAXT must be keyed-in.



If Input Values and corresponding Display Values are known, the Key-in ( *KEY* ) scaling style can be used. This allows scaling without the presence or changing of the input signal. If Input Values have to be derived from the actual input signal source or simulator, the Apply ( *APPLY* ) scaling style must be used.

**INPUT VALUE FOR SCALING POINT 1**



- 9999 to 9999

For Key-in ( *KEY* ), enter the known first Input Value by using the arrow keys. (The Input Range selection sets up the decimal location for the Input Value). For Apply ( *APPLY* ), apply the input signal to the meter, adjust the signal source externally until the desired Input Value appears. In either method, press the PAR key to enter the value being displayed. The DSP key can be pressed without changing the previously stored *INP 1* value in the *APPLY* style.

**DISPLAY VALUE FOR SCALING POINT 1**



- 9999 to 9999

Enter the first coordinating Display Value by using the arrow keys. This is the same for *KEY* and *APPLY* scaling styles. The decimal point follows the *DECLP* selection.

**INPUT VALUE FOR SCALING POINT 2**



- 9999 to 9999

For Key-in ( *KEY* ), enter the known second Input Value by using the arrow keys. For Apply ( *APPLY* ), adjust the signal source externally until the next desired Input Value appears. (Follow the same procedure if using more than 2 scaling points.)

DISPLAY VALUE FOR SCALING POINT 2



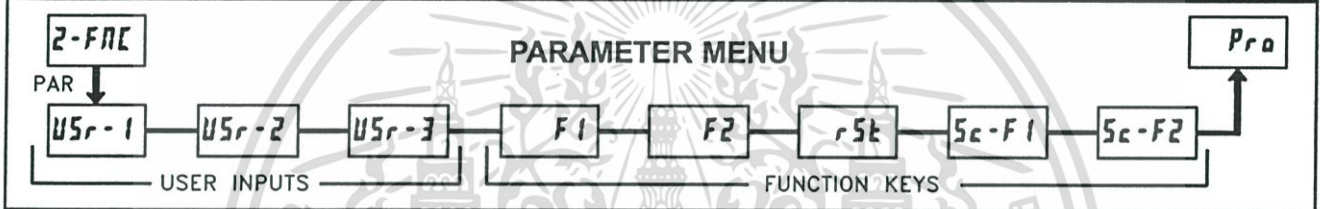
Enter the second coordinating Display Value by using the arrow keys. This is the same for *VEY* and *RPLY* scaling styles. (Follow the same procedure if using more than 2 scaling points.)

General Notes on Scaling

1. Input Values for scaling points should be confined to the limits of the Input Range Jumper position.
2. The same Input Value should not correspond to more than one Display Value. (Example: 20 mA can not equal 0 and 10.) This is referred to as read out jumps (vertical scaled segments).
3. The same Display Value can correspond to more than one Input Value. (Example: 0 mA and 20 mA can equal 10.) This is referred to as readout dead zones (horizontal scaled segments).

4. The maximum scaled Display Value spread between range maximum and minimum is limited to 65,535. For example using +20 mA range the maximum +20 mA can be scaled to is 32,767 with 0 mA being 0 and Display Rounding of 1. (Decimal points are ignored.) The other half of 65,535 is for the lower half of the range 0 to -20 mA even if it is not used. With Display Rounding of 2, +20 mA can be scaled for 65,535 (32,767 x 2) but with even Input Display values shown.
5. For input levels beyond the first programmed Input Value, the meter extends the Display Value by calculating the slope from the first two coordinate pairs ( $INP1 / dSP1$  &  $INP2 / dSP2$ ). If  $INP1 = 4$  mA and  $dSP1 = 0$ , then 0 mA would be some negative Display Value. This could be prevented by making  $INP1 = 0$  mA /  $dSP1 = 0$ ,  $INP2 = 4$  mA /  $dSP2 = 0$ , with  $INP3 = 20$  mA /  $dSP3 =$  the desired high Display Value. The calculations stop at the limits of the Input Range Jumper position.
6. For input levels beyond the last programmed Input Value, the meter extends the Display Value by calculating the slope from the last two sequential coordinate pairs. If three coordinate pair scaling points were entered, then the Display Value calculation would be between  $INP2 / dSP2$  &  $INP3 / dSP3$ . The calculations stop at the limits of the Input Range Jumper position.

## 5.2 MODULE 2 - USER INPUT AND FRONT PANEL FUNCTION KEY PARAMETERS (Z-FNC)



The three user inputs are individually programmable to perform specific meter control functions. While in the Display Mode or Program Mode, the function is executed the instant the user input transitions to the active state.

The front panel function keys are also individually programmable to perform specific meter control functions. While in the Display Mode, the primary function is executed the instant the key is pressed. Holding the function key for three seconds executes a secondary function. It is possible to program a secondary function without a primary function.

In most cases, if more than one user input and/or function key is programmed for the same function, the maintained (level trigger) actions will be performed while at least one of those user inputs or function keys are activated. The momentary (edge trigger) actions will be performed every time any of those user inputs or function keys transition to the active state.

*Note: In the following explanations, not all selections are available for both user inputs and front panel function keys. Alternating displays are shown with each selection. Those selections showing both displays are available for both. If a display is not shown, it is not available for that selection. USr-1 will represent all three user inputs. F1 will represent all five function keys.*

ZERO (TARE) DISPLAY



The Zero (Tare) Display provides a way to zero the Input Display value at various input levels, causing future Display readings to be offset. This function is useful in weighing applications where the container or material on the scale should not be included in the next measurement value. When activated (momentary action), *rESEt* flashes and the Display is set to zero. At the same time, the Display value (that was on the display before the Zero Display) is subtracted from the Display Offset Value and is automatically stored as the new Display Offset Value (*OFFSt*). If another Zero (tare) Display is performed, the display will again change to zero and the Display reading will shift accordingly.

RELATIVE/ABSOLUTE DISPLAY



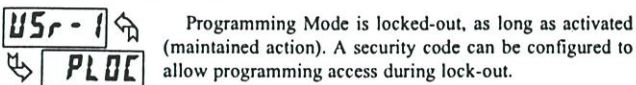
This function will switch the Input Display between Relative and Absolute. The Relative is a net value that includes the Display Offset Value. The Input Display will normally show the Relative unless switched by this function. Regardless of the display selected, all meter functions continue to operate based on relative values. The Absolute is a gross value (based on Module 1 DSP and INP entries) without the Display Offset Value. The Absolute display is selected as long as the user input is activated (maintained action) or at the transition of the function key (momentary action). When the user input is released, or the function key is pressed again, the input display switches back to Relative display. *RbS* (absolute) or *rEL* (relative) is momentarily displayed at transition to indicate which display is active.

NO FUNCTION



No function is performed if activated. This is the factory setting for all user inputs and function keys. No function can be selected without affecting basic start-up.

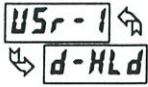
PROGRAMMING MODE LOCK-OUT



Programming Mode is locked-out, as long as activated (maintained action). A security code can be configured to allow programming access during lock-out.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**HOLD DISPLAY**



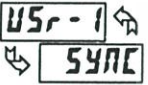
The shown display is held but all other meter functions continue as long as activated (maintained action).

**HOLD ALL FUNCTIONS**



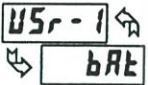
The meter disables processing the input, holds all display contents, and locks the state of all outputs as long as activated (maintained action). The serial port continues data transfer.

**SYNCHRONIZE METER READING**



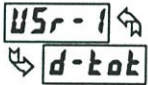
The meter suspends all functions as long as activated (maintained action). When the user input is released, the meter synchronizes the restart of the A/D with other processes or timing events.

**STORE BATCH READING IN TOTALIZER**



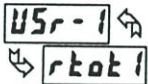
The Input Display value is one time added (batched) to the Totalizer at transition to activate (momentary action). The Totalizer retains a running sum of each batch operation until the Totalizer is reset. When this function is selected, the normal operation of the Totalizer is overridden.

**SELECT TOTALIZER DISPLAY**



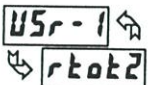
The Totalizer display is selected as long as activated (maintained action). When the user input is released, the Input Display is returned. The DSP key overrides the active user input. The Totalizer continues to function including associated outputs independent of being displayed.

**RESET TOTALIZER**



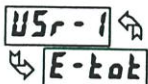
When activated (momentary action), rESEt flashes and the Totalizer resets to zero. The Totalizer then continues to operate as it is configured. This selection functions independent of the selected display.

**RESET AND ENABLE TOTALIZER**



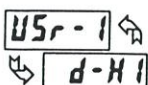
When activated (momentary action), rESEt flashes and the Totalizer resets to zero. The Totalizer continues to operate while active (maintained action). When the user input is released, the Totalizer stops and holds its value. This selection functions independent of the selected display.

**ENABLE TOTALIZER**



The Totalizer continues to operate as long as activated (maintained action). When the user input is released, the Totalizer stops and holds its value. This selection functions independent of the selected display.

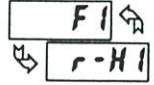
**SELECT MAXIMUM DISPLAY**



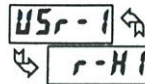
The Maximum display is selected as long as activated (maintained action). When the user input is released, the Input Display returns. The DSP key overrides the active user input. The Maximum continues to function independent of being displayed.

**RESET MAXIMUM**

When activated (momentary action), rESEt flashes and the Maximum resets to the present Input Display value. The Maximum function then continues from that value. This selection functions independent of the selected display.

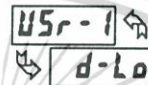


**RESET, SELECT, ENABLE MAXIMUM DISPLAY**



When activated (momentary action), the Maximum value is set to the present Input Display value. Maximum continues from that value while active (maintained action). When the user input is released, Maximum detection stops and holds its value. This selection functions independent of the selected display. The DSP key overrides the active user input display but not the Maximum function.

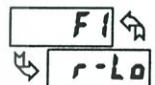
**SELECT MINIMUM DISPLAY**



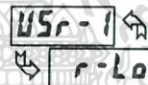
The Minimum display is selected as long as activated (maintained action). When the user input is released, the Input Display is returned. The DSP key overrides the active user input. The Minimum continues to function independent of being displayed.

**RESET MINIMUM**

When activated (momentary action), rESEt flashes and the Minimum reading is set to the present Input Display value. The Minimum function then continues from that value. This selection functions independent of the selected display.

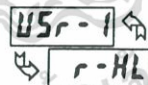


**RESET, SELECT, ENABLE MINIMUM DISPLAY**



When activated (momentary action), the Minimum value is set to the present Input Display value. Minimum continues from that value while active (maintained action). When the user input is released, Minimum detection stops and holds its value. This selection functions independent of the selected display. The DSP key overrides the active user input display but not the Minimum function.

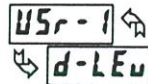
**RESET MAXIMUM AND MINIMUM**



When activated (momentary action), rESEt flashes and the Maximum and Minimum readings are set to the present Input Display value. The Maximum and Minimum function then continues from that value. This selection functions independent of the selected display.



**CHANGE DISPLAY INTENSITY LEVEL**



When activated (momentary action), the display intensity changes to the next intensity level (of 4). The four levels correspond to Display Intensity Level (d-LEu) settings of 0, 3, 8, and 15. The intensity level, when changed via the User Input/ Function Key, is not retained at power-down, unless Quick Programming or Full Programming mode is entered and exited. The meter will power-up at the last saved intensity level.



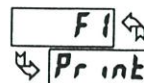
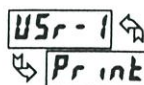
**SETPOINT SELECTIONS**

The following selections are accessible only with the Setpoint plug-in card installed. Refer to the Setpoint Card Bulletin shipped with the Setpoint plug-in card for an explanation of their operation.

**Setpoint Card Only**

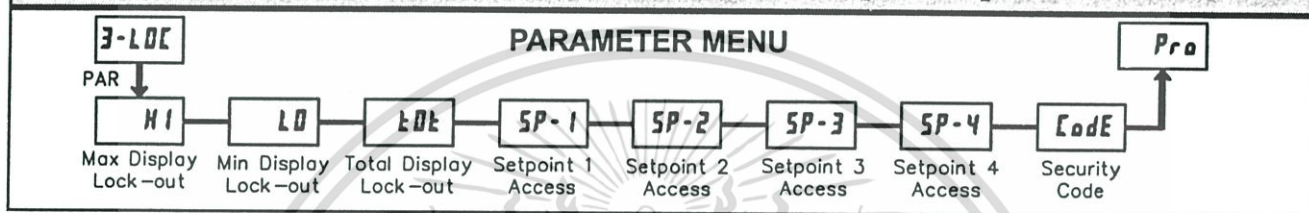
- L 15t - Select main or alternate setpoints
- r-1 - Reset Setpoint 1 (Alarm 1)
- r-2 - Reset Setpoint 2 (Alarm 2)
- r-3 - Reset Setpoint 3 (Alarm 3)
- r-4 - Reset Setpoint 4 (Alarm 4)
- r-34 - Reset Setpoint 3 & 4 (Alarm 3 & 4)
- r-234 - Reset Setpoint 2, 3 & 4 (Alarm 2, 3 & 4)
- r-RLl - Reset Setpoint All (Alarm All)

**PRINT REQUEST**



The meter issues a block print through the serial port when activated. The data transmitted during a print request is programmed in Module 7. If the user input is still active after the transmission is complete (about 100 msec), an additional transmission occurs. As long as the user input is held active, continuous transmissions occur.

## 5.3 MODULE 3 - DISPLAY AND PROGRAM LOCK-OUT PARAMETERS (3-LOC)



Module 3 is the programming for Display lock-out and "Full" and "Quick" Program lock-out.

When in the Display Mode, the available displays can be read consecutively by repeatedly pressing the DSP key. An annunciator indicates the display being shown. These displays can be locked from being visible. It is recommended that the display be set to LDC when the corresponding function is not used.

SELECTION	DESCRIPTION
rEd	Visible in Display Mode
LDC	Not visible in Display Mode

**MAXIMUM DISPLAY LOCK-OUT\*  
MINIMUM DISPLAY LOCK-OUT\*  
TOTALIZER DISPLAY LOCK-OUT\***



These displays can be programmed for LDC or rEd. When programmed for LDC, the display will not be shown when the DSP key is pressed regardless of Program Lock-out status. It is suggested to lock-out the display if it is not needed. The associated function will continue to operate even if its display is locked-out.

"Full" Programming Mode permits all parameters to be viewed and modified. This Programming Mode can be locked with a security code and/or user input. When locked and the PAR key is pressed, the meter enters a Quick Programming Mode. In this mode, the setpoint values can still be read and/or changed per the selections below. The Display Intensity Level (d-LEW) parameter also appears whenever Quick Programming Mode is enabled and the security code is greater than zero.

SELECTION	DESCRIPTION
rEd	Visible but not changeable in Quick Programming Mode
ENt	Visible and changeable in Quick Programming Mode
LDC	Not visible in Quick Programming Mode

**SP-1 SP-2 SP-3 SP-4 SETPOINT ACCESS\***



The setpoint displays can be programmed for LDC, rEd or ENt (See the following table). Accessible only with the Setpoint plug-in card installed.

**PROGRAM MODE SECURITY CODE\***



By entering any non-zero value, the prompt Code 0 will appear when trying to access the Program Mode. Access will only be allowed after entering a matching security code or universal code of 222. With this lock-out, a user input would not have to be configured for Program Lock-out. However, this lock-out is overridden by an inactive user input configured for Program Lock-out.

\* Factory Setting can be used without affecting basic start-up.

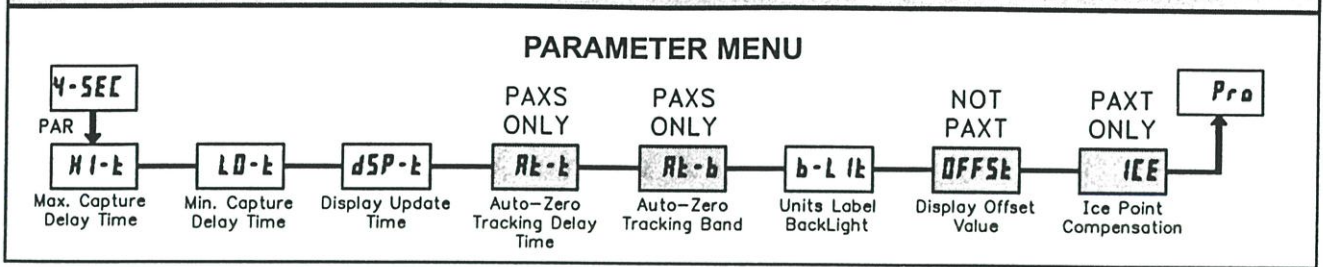
**PROGRAMMING MODE ACCESS**

SECURITY CODE	USER INPUT CONFIGURED	USER INPUT STATE	WHEN PAR KEY IS PRESSED	"FULL" PROGRAMMING MODE ACCESS
0	not PLDC	---	"Full" Programming	Immediate access.
>0	not PLDC	---	Quick Programming w/Display Intensity	After Quick Programming with correct code # at CdE prompt.
>0	PLDC	Active	Quick Programming w/Display Intensity	After Quick Programming with correct code # at CdE prompt.
>0	PLDC	Not Active	"Full" Programming	Immediate access.
0	PLDC	Active	Quick Programming	No access
0	PLDC	Not Active	"Full" Programming	Immediate access.

Throughout this document, Programming Mode (without Quick in front) always refers to "Full" Programming (all meter parameters are accessible).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.4 MODULE 4 - SECONDARY FUNCTION PARAMETERS (4-5EC)



### MAX CAPTURE DELAY TIME\*

**H1-t** ↕  
 ↙ **00**

00 to 32750 sec.

When the Input Display is above the present MAX value for the entered delay time, the meter will capture that display value as the new MAX reading. A delay time helps to avoid false captures of sudden short spikes.

### UNITS LABEL BACKLIGHT\*

**b-L It** ↕  
 ↙ **OFF**

ON OFF

The Units Label Kit Accessory contains a sheet of custom unit overlays which can be installed in to the meter's bezel display assembly. The backlight for these custom units is activated by this parameter.

### MIN CAPTURE DELAY TIME\*

**L0-t** ↕  
 ↙ **00**

00 to 32750 sec.

When the Input Display is below the present MIN value for the entered delay time, the meter will capture that display value as the new MIN reading. A delay time helps to avoid false captures of sudden short spikes.

### DISPLAY OFFSET VALUE\*

This parameter does not apply for the PAXT.

**OFFSt** ↕  
 ↙ **0.00**

- 19999 to 19999

Unless a Zero Display was performed or an offset from Module 1 scaling is desired, this parameter can be skipped. The Display Offset Value is the difference from the Absolute (gross) Display value to the Relative (net) Display value for the same input level. The meter will automatically update this Display Offset Value after each Zero Display. The Display Offset Value can be directly keyed-in to intentionally add or remove display offset. See Relative / Absolute Display and Zero Display explanations in Module 2.

### DISPLAY UPDATE RATE\*

**dSP-t** ↕  
 ↙ **2**

1 2 5 10 20 updates/sec.

This parameter determines the rate of display update. When set to 20 updates/second, the internal re-zero compensation is disabled, allowing for the fastest possible output response.

### PAXS: AUTO-ZERO TRACKING

**Rt-t** ↕  
 ↙ **0**

0 to 250 sec.

### PAXS: AUTO-ZERO BAND

**Rt-b** ↕  
 ↙ **0.02**

1 to 4095

The meter can be programmed to automatically compensate for zero drift. Drift may be caused by changes in the transducers or electronics, or accumulation of material on weight systems.

Auto-zero tracking operates when the readout remains within the tracking band for a period of time equal to the tracking delay time. When these conditions are met, the meter re-zeroes the readout. After the re-zero operation, the meter resets and continues to auto-zero track.

The auto-zero tracking band should be set large enough to track normal zero drift, but small enough to not interfere with small process inputs.

For filling operations, the fill rate must exceed the auto-zero tracking rate. This avoids false tracking at the start of the filling operation.

$$\text{Fill Rate} \geq \frac{\text{tracking band}}{\text{tracking time}}$$

Auto-zero tracking is disabled by setting the tracking band parameter = 0.

### PAXT: ICE POINT COMPENSATION\*

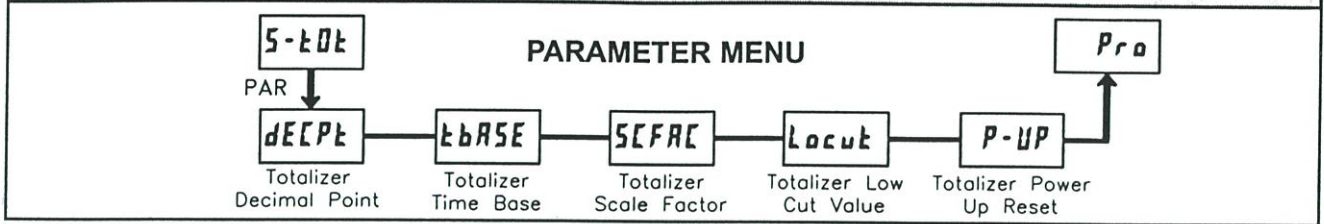
**ICE** ↕  
 ↙ **ON**

ON OFF

This parameter turns the internal ice point compensation on or off. Normally, the ice point compensation is on. If using external compensation, set this parameter to off. In this case, use copper leads from the external compensation point to the meter. If using Custom TC range, the ice point compensation can be adjusted by a value in Module 1 when this is yes.

\* Factory Setting can be used without affecting basic start-up.

# 5.5 MODULE 5 - TOTALIZER (INTEGRATOR) PARAMETERS (5-๕๐๕)



The totalizer accumulates (integrates) the Input Display value using one of two modes. The first is using a time base. This can be used to compute a time-temperature product. The second is through a user input or function key programmed for Batch (one time add on demand). This can be used to provide a readout of temperature integration, useful in curing and sterilization applications. If the Totalizer is not needed, its display can be locked-out and this module can be skipped during programming.

### TOTALIZER HIGH ORDER DISPLAY

When the total exceeds 5 digits, the front panel annunciator TOT flashes. In this case, the meter continues to totalize up to a 9 digit value. The high order 4 digits and the low order 5 digits of the total are displayed alternately. The letter "h" denotes the high order display.

### TOTALIZER BATCHING

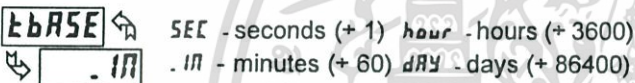
The Totalizer Time Base and scale factor are overridden when a user input or function key is programmed for store batch (bA). In this mode, when the user input or function key is activated, the Input Display reading is one time added to the Totalizer (batch). The Totalizer retains a running sum of each batch operation until the Totalizer is reset. This is useful in weighing operations, when the value to be added is not based on time but after a filling event.

### TOTALIZER DECIMAL POINT\*



For most applications, this matches the Input Display Decimal Point (dECPt). If a different location is desired, refer to Totalizer Scale Factor.

### TOTALIZER TIME BASE



This is the time base used in Totalizer accumulations. If the Totalizer is being accumulated through a user input programmed for Batch, then this parameter does not apply.

### TOTALIZER SCALE FACTOR\*



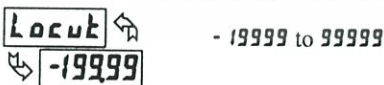
For most applications, the Totalizer reflects the same decimal point location and engineering units as the Input Display. In these cases, the Totalizer Scale Factor is 1.000. The Totalizer Scale Factor can be used to scale the Totalizer to a different value than the Input Display. Common possibilities are:

1. Changing decimal point location (example tenths to whole)
2. Average over a controlled time frame.

Details on calculating the scale factor are shown later.

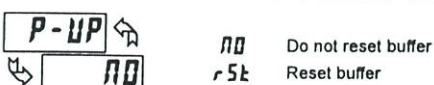
If the Totalizer is being accumulated through a user input programmed for Batch, then this parameter does not apply.

### TOTALIZER LOW CUT VALUE\*



A low cut value disables Totalizer when the Input Display value falls below the value programmed.

### TOTALIZER POWER UP RESET\*



The Totalizer can be reset to zero on each meter power-up by setting this parameter to reset.

\* Factory Setting can be used without affecting basic start-up.

### TOTALIZER USING TIME BASE

Totalizer accumulates as defined by:

$$\frac{\text{Input Display} \times \text{Totalizer Scale Factor}}{\text{Totalizer Time Base}}$$

Where:

- Input Display - the present input reading
- Totalizer Scale Factor - 0.001 to 65.000
- Totalizer Time Base - (the division factor of tBASE)

Example: The input reading is at an average of 10.0°C per hour. The Totalizer is used to verify this average reading in a controlled time frame of 4 hours. Because the Input Display and Totalizer are both in tenths of °C, the Totalizer Scale Factor is 1. However, the Totalizer Time Base is hours (3600) divided by the 4 hours in the controlled time frame to yield a Totalizer Scale Factor of 0.250. By placing these values in the equation, the Totalizer will accumulate every second as follows:

$$\frac{10.0 \times 0.250}{3600} = 0.00069 \text{ accumulates each second}$$

This results in:

- 0.04167 accumulates each minute
- 2.5 accumulates each hour
- 10.0 reached at the end of 4 hours

### TOTALIZER SCALE FACTOR CALCULATION EXAMPLES

1. When changing the Totalizer Decimal Point (dECPt) location from the Input Display Decimal Point (dECPt), the required Totalizer Scale Factor is multiplied by a power of ten.

Example: Input (dECPt) = 0.0

Input (dECPt) = 0.00

Totalizer dECPt	Scale Factor
0.00	10
0.0	1
0	.1
x10	.01
x100	.001

Totalizer dECPt	Scale Factor
0.000	10
0.00	1
0.0	.1
0	.01
x10	.001

(x - Totalizer display is round by tens or hundreds)

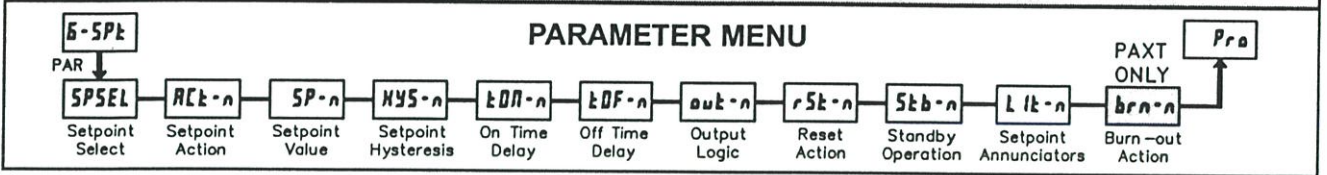
2. To obtain an average reading within a controlled time frame, the selected Totalizer Time Base is divided by the given time period expressed in the same timing units.

Example: Average temperature per hour in a 4 hour period, the scale factor would be 0.250. To achieve a controlled time frame, connect an external timer to a user input programmed for tA. The timer will control the start (reset) and the stopping (hold) of the totalizer.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Modules 6, 7, and 8 are accessible only with the appropriate plug-in cards installed. A quick overview of each Module is listed below. Refer to the corresponding plug-in card bulletin for a more detailed explanation of each parameter selection.

## 5.6 MODULE 6 - SETPOINT (ALARM) PARAMETERS (6-5P<sub>t</sub>)

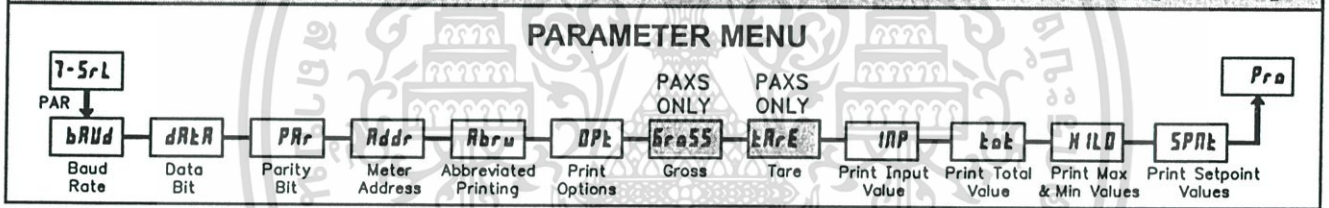


Repeat programming for each setpoint.

<b>SPSEL - SELECT SETPOINT</b>	NO	SP-1	SP-3
		SP-2	SP-4
<b>RCt-n - SETPOINT ACTION</b>	OFF	dE-HI	
		Rb-HI	dE-LO
		Rb-LO	bRNd
		RU-HI	totLo
		RU-LO	totHI
<b>SP-n - SETPOINT VALUE</b>	- 19999 to 99999		
<b>HYS-n - SETPOINT HYSTERESIS</b>	1 to 65000		

<b>tON-n - ON TIME DELAY</b>	00 to 32750 sec	
<b>tOFF-n - OFF TIME DELAY</b>	00 to 32750 sec	
<b>out-n - OUTPUT LOGIC</b>	nor	rEu
<b>rSt-n - RESET ACTION</b>	RUto	LRtC2
	LRtC1	
<b>Stb-n - STANDBY OPERATION</b>	NO	YES
<b>LIt-n - SETPOINT ANNUNCIATORS</b>	OFF	rEu
	nor	FLASH
<b>brn-n - PROBE BURN-OUT ACTION</b>	ON	OFF
<b>PAX ONLY</b>		

## 5.7 MODULE 7 - SERIAL COMMUNICATIONS PARAMETERS (7-5r<sub>L</sub>)



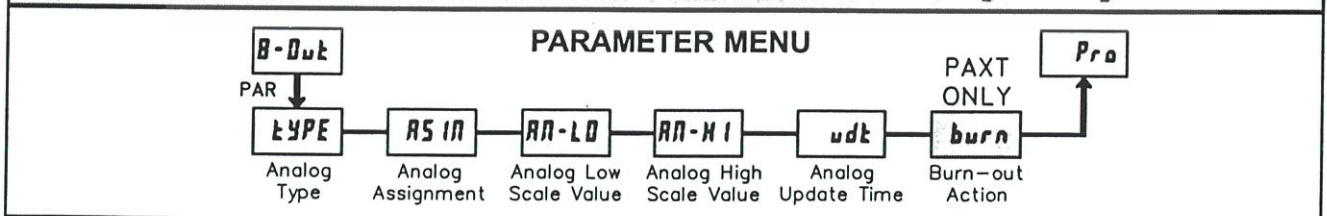
This module is for RS232 and RS485.

<b>bRud - BAUD RATE</b>	300	4800
	600	9600
	1200	19200
	2400	
<b>dRtR - DATA BITS</b>	7	8
<b>PRr - PARITY BIT</b>	Odd	NO
	EVEN	

<b>Addr - METER ADDRESS</b>	0 to 99	
<b>Rbrv - ABBREVIATED PRINTING</b>	NO	YES
<b>OPt - PRINT OPTIONS</b>	NO	
	YES	GraSS
		tArE
		INP
		HILO
		tot
		SPt

These two options are for the PAXS ONLY.

## 5.8 MODULE 8 - ANALOG OUTPUT PARAMETERS (8-0ut)

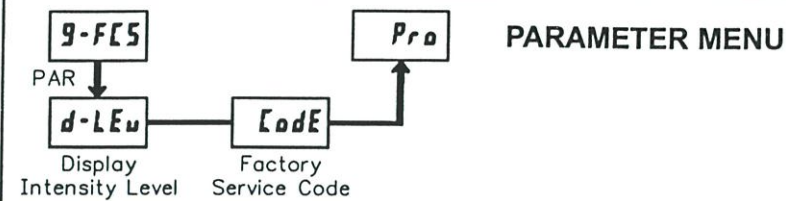


<b>tYPE - ANALOG TYPE</b>	0-20	0-10
	4-20	
<b>AS IN - ANALOG ASSIGNMENT</b>	INP	LO
	HI	tot

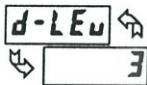
<b>AN-LO - ANALOG LOW SCALE VALUE</b>	- 19999 to 99999
<b>AN-HI - ANALOG HIGH SCALE VALUE</b>	- 19999 to 99999
<b>utt - ANALOG UPDATE TIME</b>	00 to 100 sec.
<b>burn - PROBE BURN-OUT ACTION</b>	HI
<b>PAX ONLY</b>	LO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.9 MODULE 9 - FACTORY SERVICE OPERATIONS (9-FL5)

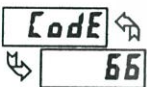


### DISPLAY INTENSITY LEVEL



Enter the desired Display Intensity Level (0-15) by using the arrow keys. The display will actively dim or brighten as the levels are changed. This parameter also appears in Quick Programming Mode when enabled.

### RESTORE FACTORY DEFAULTS



Use the arrow keys to display **CodE 55** and press **PAR**. The meter will display **rESEt** and then return to **CodE 50**. Press **DSP** key to return to Display Mode. This will overwrite all user settings with the factory settings.

### CALIBRATION



The meter has been fully calibrated at the factory. Scaling to convert the input signal to a desired display value is performed in Module 1. If the meter appears to be indicating incorrectly or inaccurately, refer to Troubleshooting before attempting to calibrate the meter.

When recalibration is required (generally every 2 years), it should only be performed by qualified technicians using appropriate equipment. Calibration does not change any user programmed parameters. However, it may affect the accuracy of the input signal values previously stored using the Apply (APPLY) Scaling Style.

Calibration may be aborted by disconnecting power to the meter before exiting Module 9. In this case, the existing calibration settings remain in effect.

### PAXP - Input Calibration



**WARNING:** Calibration of this meter requires a signal source with an accuracy of 0.01% or better and an external meter with an accuracy of 0.005% or better.

Before starting, verify that the precision signal source is connected to the correct terminals and ready. Allow a 30 minute warm-up period before calibrating the meter. **no** and **PAR** can be chosen to exit the calibration mode without any changes taking place.

Then perform the following procedure:

1. Use the arrow keys to display **CodE 48** and press **PAR**.
2. Choose the range to be calibrated by using the arrow keys and press **PAR**. (**no** and **PAR** can be chosen to exit the calibration mode without any changes taking place.)
3. When the zero range limit appears on the display, apply the appropriate:
  - Voltage range: dead short applied
  - Current range: open circuit
4. Press **PAR** and **----** will appear on the display for about 10 seconds.
5. When the top range limit appears on the display, apply the appropriate:
  - Voltage range: 10 VDC
  - Current range: 20 mADC
6. Press **PAR** and **----** will appear on the display for about 10 seconds.
7. When **no** appears, press **PAR** twice.
8. If the meter is not field scaled, then the input display should match the value of the input signal.
9. Repeat the above procedure for each input range to be calibrated.

### PAXD - Input Calibration



**WARNING:** Calibration of this meter requires a signal source with an accuracy of 0.01% or better and an external meter with an accuracy of 0.005% or better. Resistance inputs require a resistance substitution device with an accuracy of 0.01% or better.

Before starting, verify that the Input Ranger Jumper is set for the range to be calibrated. Also verify that the precision signal source is connected and ready. Allow a 30 minute warm-up period before calibrating the meter. **no** and **PAR** can be chosen to exit the calibration mode without any changes taking place.

Then perform the following procedure:

1. Use the arrow keys to display **CodE 48** and press **PAR**.
2. Choose the range to be calibrated by using the arrow keys and press **PAR**.
3. When the zero range limit appears on the display, apply the appropriate:
  - Voltage ranges: dead short applied
  - Current ranges: open circuit
  - Resistance ranges: dead short with current source connected
4. Press **PAR** and **----** will appear on the display for about 10 seconds.
5. When the top range limit appears on the display, apply the appropriate:
  - Voltage ranges: top range value applied (The 300 V range is the exception. It is calibrated with a 100 V signal.)
  - Current ranges: top range value
  - Resistance ranges: top range value (The ohms calibration requires connection of the internal current source through a resistance substitution device and the proper voltage range selection.)
6. Press **PAR** and **----** will appear on the display for about 10 seconds.
7. When **no** appears, press **PAR** twice.
8. If the meter is not field scaled, then the input display should match the value of the input signal.
9. Repeat the above procedure for each input range to be calibrated.

### PAXH - Input Calibration



**WARNING:** In the PAXH, DC signals are used to calibrate the AC ranges. Calibration of the PAXH requires a DC voltmeter with an accuracy of 0.025% and a precision DC signal source capable of:

1. +1% of full scale, DC
2. -1% of full scale, DC
3. +100% of full scale, DC; (300 V range = +100 V calibration)
4. -100% of full scale, DC; (300 V range = -100 V calibration)

Before starting, verify the Input Range and Signal Jumpers are set for the range to be calibrated and the Couple jumper is installed for DC. Also verify the DC signal source is connected and ready. Allow a 30 minute warm-up period before calibrating the meter. **no** and **PAR** can be chosen to exit the calibration mode without any changes taking place.

Then perform the following procedure:

1. Press the arrow keys to display **CodE 48** and press **PAR**.
2. The meter displays **RL**. Use the arrow keys to select the range that matches the Signal Jumper setting. Press **PAR**.
3. Apply the signal matching the meter prompt.
4. Press **PAR** and **----** will appear on the display, wait for next prompt.
5. Repeat steps 3 and 4 for the remaining three prompts.
6. When **no** appears, press **PAR** twice.
7. If the meter is scaled to show input signal, the Input Display should match the value of the input signal in the Display Mode.
8. Repeat the above procedure for each range to be calibrated or to recalibrate the same range. It is only necessary to calibrate the input ranges being used.
9. When all desired calibrations are completed, remove the external signal source and restore original configuration and jumper settings. If AC is being measured, continue with AC Couple Offset Calibration.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ข.  
ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ICCAS 2003 International Conference on Control, Automation and Systems

October, 22 ~ 25, 2003

Gyeongju TEMF Hotel, Gyeongju, Korea



## Optimal Energy Costs based on Improving Retort Process In Food Canning Manufacturing

Supawut Saredchapan, Amphawan Chaikla, Ruedee Masuchun,  
Thanit Trisuwannawat, and Prasit Julsereewong

Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Ladkrabang, Bangkok, Thailand  
(Tel: +66-2-739-2406-7; E-mail: kjprasit@kmitl.ac.th)

**Abstract:** This paper presents the minimization of the energy costs based on energy saving for industrial retort process of canned food. The approved proposed method is related the optimal steam or hot water flow control to achieve desired temperature of retort process. The smooth response and zero steady state error can be also achieved. The performances of the proposed control technique were observed using a small tuna canned food plant in Thailand as an illustrative example. The experimental results are given to support the saving in energy costs and some benefits of the proposed technique.

**Keywords:** energy costs minimization, retort process, temperature control, pressure control

### 1. INTRODUCTION

The food processing industry is the consequence of Thailand's extensive agriculture. Canned food processing is responsible for most of the past growth in the agro-industry. Products include fruits and vegetables, tunas, pineapples and seafood. The combined export value for these four items in 1998 was Bt 89.6 billions (23% of all prepared food exported) [1]. After the calamitous financial crash during 1997, Thailand's existing food processing industries have been in a period of consolidation and industrial upgrading. There are several characterization, such as

- Greater recognition and need to confirm to global standards and practices
- Using new methods of preservation
- New packaging materials and techniques
- Process technology upgrading
- Automation of production processes for improved throughput and reduced contamination

to become more competitive in the international market.

The energy cost minimization is one of the most important problems to be solved [2]. Accordingly, there has been much effort to reduce the dissipated energy of industrial process [3-5]. The purpose of this paper is to present a technique to minimize of the energy costs based on energy saving for industrial retort process of canned foods.

Usually, industrial sterilization retorts work at a constant temperature during a certain time and then cans are cooled using water. The relation time-temperature of this procedure can be optimal with state constrains [6-7]. However, the aim of the retort process of canned food is to reach the sterilization with respect to the most unyielding microorganisms damaged. Therefore, it is important to secure the food sterilization without detriment of the quality. In this paper, an approved method for optimal steam or hot water flow control is presented to achieve target temperature of retort process. The proposed control technique is based on the look-up table in combination with the PID control to set the appropriate opening position of steam control valve. In addition, the smoothness of response and zero steady state error can be also achieved.

The small tuna canned food plant, Keat Chareon Foods Co., LTD, Thailand, was studied as an illustrative example. The experimental results demonstrating the optimal energy costs based on energy saving for industrial retort process and some benefits of the proposed technique are obtained.

### 2. RETORT PROCESS

#### 2.1 Basic concept of retort process

In batch retort process (in-can sterilization) [8], foods to be sterilized is first filled and hermetically sealed in rigid, flexible, or semi-rigid containers such as metal cans, glass jars, retort pouches, or plastic bowls. It is then placed within steam retort, large industrial-sized pressure vessel or cooker, as shown in Fig.1. The horizontal still retort is widely accepted type for small and medium food canning manufacturing in Thailand.



Fig. 1 Horizontal still retort

The relation time-temperature of the retort process is shown in Fig.2. During venting period, the retort is filled with containers to be sterilized, the retort door is closed tightly and the air is then replaced by the hot steam under pressure to achieve temperatures above the atmospheric boiling point of water. Next during cooking period, the canned foods are then heated under steam pressure at the temperatures of 116-121°C (240-250°F). The amount of time needed for processing is different for each food, depending on the food's acidity, density and ability to transfer heat. After the containers have been exposed to the sterilizing temperature for sufficient time to achieve the desired level of sterilization, the steam control valve is shut off and the cooling water is then brought in to cool the containers and reduce the pressure, thus ending the process in cooling period.

Once the retort pressure has brought back to atmosphere, the door can be opened, and the processed containers are removed for labeling, case packing, and warehousing to await distribution to the market place.

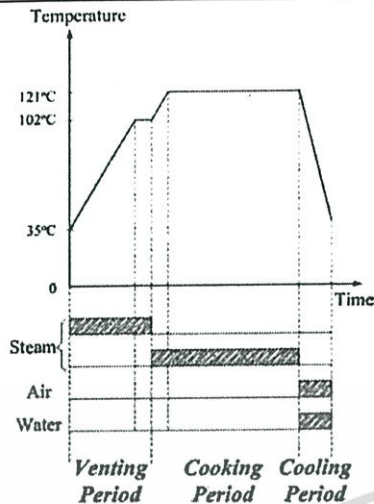


Fig. 2 The relation time-temperature of retort process

Processing conditions are chosen to minimum needed to ensure that foods are commercially sterile, yet retain the greatest flavor and nutrition. All processes must be approved by the Food and Drug Administration (FDA). In addition, most processed foods are closely monitored, using a system called Hazard Analysis and Critical Control Point, or HACCP. A HACCP system identifies areas of potential contamination within the food process and builds check points to ensure that highest possible safety standards are maintained at all times.

2.2 Principle of temperature control of retort process

Temperature control is important because the objective of the sterilization process is to produce a condition called “commercial sterility” [9]. The recommended sterilization processes are not designed to kill all microorganisms in canned foods. The still retort sketched in Fig.3 is used to sterilize canned food. The objective is to maintain the sterilization temperature at its desired value or set point in the presence of variations of the steam fluid flow. The still retort is heated by steam spraying through a pipe. A proportional-integral-derivative (PID) controller is used to control the temperature in the still retort by manipulating the steam valve position.

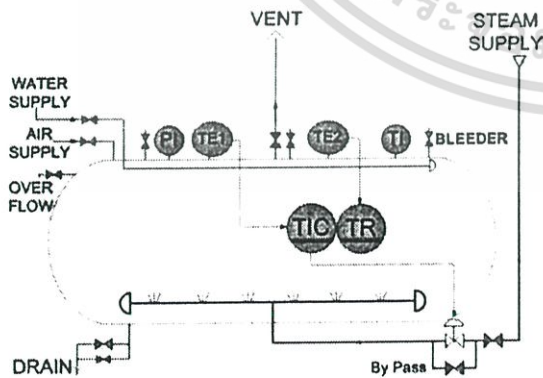


Fig. 3 Temperature control loop of still retort

The temperature control scheme works as follows: the temperature and pressure of still retort are monitored with a thermometer (TI) and pressure gauge (PI), respectively. The still retort temperature or controlled variable is measured with a sensor RTD (TE1). The temperature-proportional measured signal is sent to the controller (TIC) where it is compared to the set point. The function of the controller is generated an output signal or manipulated variable, on the basis of the error or difference between the measurement and the set point. The controller output signal is then connected to the actuator of the steam control valve through a current-to-pressure transducer (I/P). The function of the valve actuator is to position the valve in proportional to the controller output signal. Thus the steam flow is a function of the valve position.

2.3 The proposed technique

This paper proposes the optimal steam flow rate control during venting and cooking periods by technique called “look-up table” in combination with PID controller. Look-up table technique develops feed forward control within the calculation of the required value of the manipulated variable to maintain the controlled variable at its set point. If the calculation is performed correctly, the controlled variable should remain undisturbed [10]. The proposed technique as shown in Fig.4 can be explained as follow.

From the temperature control loop in Fig. 3, the still retort temperature measured signal (pv) is sent to the controller (TIC) where it is compared to the set point (sp). The manipulated variable (mv) is generated by the controller, which is based on the magnitude of error (e) or difference between the measurement and the set point. If the magnitude of calculated error is greater than the preset value ( $\epsilon = \pm 10\%$ ), the lookup table technique is applied to control. Otherwise the temperature control will be operated by PID mode.

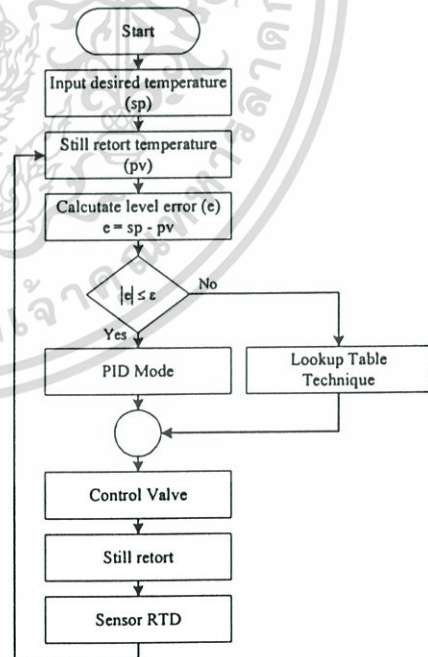


Fig. 4 Proposed system operation flowchart

At the beginning of venting period, the position of steam valve is 80% opening for energy saving, when the retort temperature (pv) reaches the desired temperature or set point (sp), the lookup table technique is applied to set the appropriate percent open of steam control valve. After that the retort temperature during cooking period is controlled using the PID control mode.

**3. EXPERIMENTAL RESULTS**

The performances of the proposed control technique for retort process were observed using the small tuna canned food plant, Keat Chareon Foods Co., LTD, Thailand, as an illustrative example. The experimental still retort is shown in Fig. 5, which uses the steam control valve as equal percentage type. The comparison result in circular chart between temperature controlled using the proposed technique and using only PID control, is shown in Fig. 6. It is clearly seen that the proposed control technique provides the better performances.

The basic inherent flow characteristics of various control valves are shown in Fig. 7, which are determined by the valve plug configurations or cage port configurations. The inherent-flow characteristic defined as the relationship between the percentage of valve flow coefficient value (%Cv) and the percentage of valve position or valve travel, where the maximum value of Cv is about 25. From experimenting, the 80% opening position of steam valve is the appropriate value for energy saving without product quality detriment.

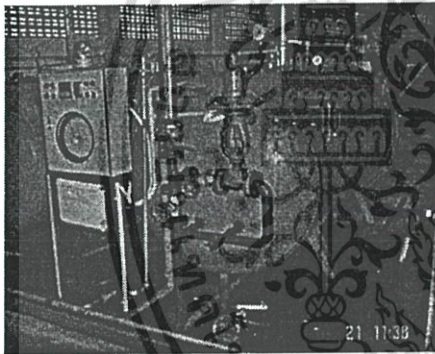
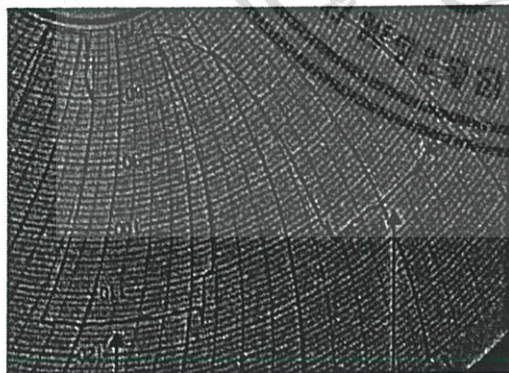


Fig. 5 Experimental still retort



Using Proposed Technique      Using Only PID Control

Fig. 6 Temperature responses of retort process

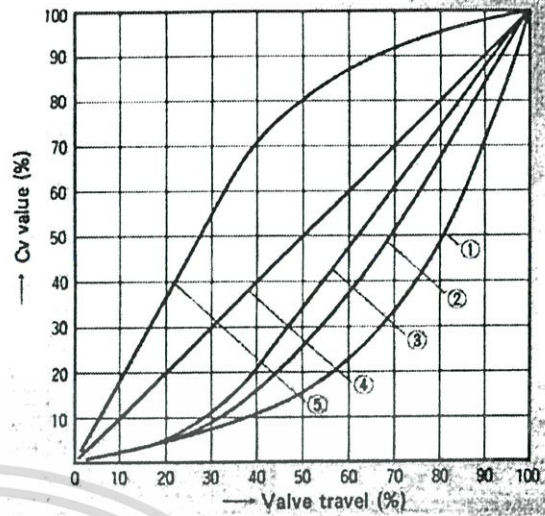


Fig. 7 Inherent flow characteristics

- (1) Equal percentage
- (2) Parabolic
- (3) Modified parabolic
- (4) Linear
- (5) Quick opening

**4. OPTIMIZATION RESULTS**

In order to calculate the energy saving, Nakakita's Cv formula for steam fluid [11], which is based on the widely accepted formula of Fluid Control Institute (FCI), is applied as

$$Cv = \frac{W}{11.7 \times p_1} \times k \tag{1}$$

where W is the maximum flow rate (kg/hr)  
 p<sub>1</sub> is the inlet pressure (kgf/cm<sup>2</sup> abs)  
 k is the correction coefficient to superheat

In this paper, the assumed correction coefficient k is approximately 1 and the maximum inlet pressure of the experimental still retort is approximately 7 kgf/cm<sup>2</sup> abs. Based on Eq. (1), the maximum flow rate of steam W can be stated as

$$W \approx 81.9 \times Cv \tag{2}$$

Considering the equal percentage flow characteristic in Fig. 7, the minimization of the energy costs based on energy saving can be discussed as follow:

**Before the improving:** the position of steam valve or the valve travel is 100%, the Cv value is 100% of the maximum Cv value, then Cv value = (100/100) \* 25 = 25

**After the improving:** the position of steam valve or the valve travel is 80%, the Cv value is 48% of the maximum Cv value, then Cv value = (48/100) \* 25 = 12

**The result from the proposed technique:**  
 The decreasing of the Cv value = 25 - 12 = 13

The decreasing of the maximum flow rate of steam or the saving in steam =  $81.9 * 13 = 1064.7$  kg/hr = 1.0647 tons/hr

It is clearly seen that the saving in energy can be performed using the proposed technique.

The true energy costs saving based on the amount of fuel for six batches retort process (928.7 tonnage) occurred in April 2002, can be calculated as

**Before the improving:**

The amount of fuel  $\approx 55.46$  liter/tonnage

**After the improving:**

The amount of fuel  $\approx 50.657$  liter/tonnage

**The result from the proposed technique:**

Saving in energy costs  $\approx (55.46 - 50.657) * 928.7$   
 $\approx 4460.55$  liter/month

The fuel costs  $\approx 7.75$  Bt/liter

**Total saving in energy costs**

$\approx 4460.55 * 7.75 \approx 34569.26$  Bt/month  
 $\approx 34569.26 * 12 \approx 414831$  Bt/yr

The optimization results show that the energy costs drops to 8.66% and annual energy cost savings is about Bt 415,000.

## 5. CONCLUSION

This paper has described the saving energy costs of retort process in food canning manufacturing. In order to save the energy, the optimal steam flow is applied to control the target temperature. The proposed technique is based on the look-up table in combination with PID control to set the appropriate position of steam control valve. The experimental results show that the proposed technique can reduce the amount of steam during retort venting period. In addition, the smoothness of response and zero steady state error can be also achieved.

## REFERENCES

- [1] [http://www.agrofoodasia.com/Thai\\_agrifood/thai\\_agri\\_food.html](http://www.agrofoodasia.com/Thai_agrifood/thai_agri_food.html)
- [2] Xinggao Liu, Yongmao Xu, Jie Zhang and Jixin Qian, "Optimal Energy Cost in Ideal Internal Thermally Coupled Distillation Columns", *Proceedings of the American Control Conference Anchorage, AK*, pp. 1502-1507, 2002
- [3] S. Dunning, T. Ward, "Energy and waste saving measures for the paper and wood products industry", *Conference Record of Pulp and Paper Industry Technical Conference 1998*, pp.80-86, Jun 1998
- [4] N. Hayajawam, Y. Wakazono, T. Kato, Y. Suzuoki, and Y. Kaya, "Minimizing energy consumption in industries by cascade use of waste energy", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 14, No. 3, pp. 795-801, Sep 1999
- [5] A. Canova, F. Profumo, M. Tartaglia, "LCC design criteria in electrical plants oriented to energy saving", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 39, No. 1, pp. 53-58, Jan/Feb 2003
- [6] A. Bermudez, C. Rodriguez and A. Martinez Verela, "Two Applied Optimal Control Problems with State

- Constraints", *Proceedings of the 30<sup>th</sup> Conference on Decision and Control*, England, pp. 1985-1990, 1991
- [7] D. Kseibat, O.A. Basir, and G.S. Mittal, "An Artificial Neural Network For Optimizing Safety and Quality in Thermal Food Processing", *Proceeding of the 1999 IEEE International Symposium on Intelligent Control/Intelligent Systems and Semiotics*, Cambridge, MA, pp. 393-398, 1999
- [8] <http://www.succeed.ufl.edu/content/abe2062/modules/Sterilization/sterilization.htm>
- [9] A Complete Course In Canning And Related Processes, Book III, *Processing Procedures For Canned Food Products*, 13<sup>th</sup> Edition, CTI Publications, Baltimore, MD. 1996
- [10] N. Sangjeen and P. Julsereewong, "A Design of Two-mode Controller Using PC-based Lookup Table Technique and PID Control Algorithm" *ICCAS2002, Proceeding of the 2002 International Conference on Control, Automation and Systems*, Korea, pp. 412-417, 2002
- [11] Nakakita Seisakusho co., Ltd, "Nakakita Control Valve", Catalog. No. 310-4E, 1997

## ประวัติผู้เขียน

นายศุภวุฒิ สารเชษพันธ์ เกิดเมื่อวันที่ 22 มิถุนายน 2521 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาเทคโนโลยีการวัดคุมทางอุตสาหกรรม จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังในปีการศึกษา 2544 และประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง สาขาเทคโนโลยีเครื่องมือวัดและระบบควบคุม จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือในปีการศึกษา 2541 มีผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์จากประเทศเกาหลี

ปี พ.ศ. 2544 เข้าทำงานโครงการอนุรักษ์พลังงานและโครงการชุมชนชีวิตธุรกิจไทยด้วยเทคนิคการจัดการ VE (Value Engineering) ของสภาอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย และปี พ.ศ. 2545 เข้าทำงานโครงการอนุรักษ์พลังงานด้วยเทคนิคการจัดการ VE ของสถาบันวิจัยพลังงานจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปัจจุบันทำงานตำแหน่งวิศวกร ห้างหุ้นส่วนจำกัด ดิจิตอล อินสตรูเมนต์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้