

การออกแบบโครงสร้างการควบคุมของข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร่อน



นางสาวจตุพร กุลละวณิชวิวัฒน์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-03-0752-3

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# HEAT EXCHANGER NETWORK CONTROL STRUCTURE DESIGN



Miss. Jatuporn Kunlawaniteewat

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering in Chemical Engineering

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2001

ISBN 974-03-0752-3

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบโครงสร้างการควบคุมของข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความ ร้อน
โดย	นางสาวจตุพร กุลละวณิชวิวัฒน์
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ ดร.มนตรี วงศ์ศรี

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(ศาสตราจารย์ ดร.ปิยะसार ประเสริฐธรรม)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(อาจารย์ ดร.มนตรี วงศ์ศรี)

..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล กิตติศุภกร)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธงไชย ศรีนพคุณ)

จตุพร กุลละวະนีนีวัฒน์ : การออกแบบโครงสร้างการควบคุมของข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยน  
 ความร้อน (HEAT EXCHANGER NETWORK CONTROL STRUCTURE DESIGN) อ. ที่  
 ปรีक्षा : ดร.มนตรี วงศ์ศรี, จำนวนหน้า 118 หน้า. ISBN 974-03-0752-3

การนำกลับมาใช้อีกครั้งของพลังงานโดยผ่านข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเป็น  
 ส่วนสำคัญส่วนหนึ่งในกระบวนการเคมี การแลกเปลี่ยนพลังงานภายในกระบวนการจะทำให้เกิดผล  
 กระทบซึ่งกันและกันภายในกระบวนการและยังมีความยุ่งยากต่อการควบคุมอีกด้วย ดังนั้นเพื่อให้  
 ข่ายงานบรรลุเป้าหมาย (อุณหภูมิเป้าหมาย และการนำกลับคืนพลังงานสูงสุด) การออกแบบ  
 โครงสร้างการควบคุมจึงเป็นสิ่งสำคัญ

งานวิจัยนี้เสนอกฎการออกแบบโครงสร้างการควบคุมข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยน  
 ความร้อน โดยอาศัยแนวทางฮิวริสติก ซึ่งได้แก่ กฎทั่ว ๆ ไปในการออกแบบ กฎที่เกี่ยวกับกระบวนการ  
 จับคู่ กฎการเลือกติดตั้งลู่วิควบคุม กฎการเลือกติดตั้งกระแสนายพาส และกฎการใช้สัดส่วนการแยก  
 ในการควบคุม และขั้นตอนการออกแบบโครงสร้างการควบคุม จากงานวิจัยนี้พบว่า วิธีการออกแบบที่  
 ได้เสนอนี้ ผู้ออกแบบสามารถทำความเข้าใจได้ง่าย สามารถติดตามเหตุผลของการตัดสินใจได้ทุก  
 ขั้นตอน จากงานวิจัยนี้ได้ออกแบบโครงสร้างการควบคุมทั้งหมด 6 โครงสร้างการควบคุมของ 3  
 ข่ายงาน ซึ่งพบว่า โครงสร้างการออกแบบตามวิธีการนี้ให้ค่าเวลาความคลาดเคลื่อนแบบสัมบูรณ์น้อย  
 ที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างที่พบจากงานวิจัยอื่น ๆ และยังสามารถดำเนินการได้โดยยังคง  
 วัตถุประสงค์ คือมีการนำกลับคืนพลังงานสูงสุดและคงอุณหภูมิเป้าหมายเมื่อเกิดความแปรปรวน  
 ข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนพร้อมด้วยโครงสร้างการควบคุมที่ได้ถูกนำไปจำลองบนคอมพิวเตอร์ด้วย  
 ภาษาแมทแล็บ เพื่อทดสอบสมรรถนะของโครงสร้างการควบคุม

สถาบันวิทยบริการ  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา	วิศวกรรมเคมี	ลายมือชื่อนิสิต .....
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....
ปีการศึกษา	2544	

## 4170247421 : MAJOR CHEMICAL ENGINEER

KEY WORD: HEAT EXCHANGER NETWORK / CONTROL STRUCTURE

JATUPORN KUNLAWANITEEWAT : HEAT EXCHANGER NETWORK  
CONTROL STRUCTURE DESIGN. THESIS ADVISOR : Dr. MONTRI  
WONGSRI : 118 pp. ISBN 974-03-0752-3

Energy recovery by heat exchanger network is the important stage in chemical process. The energy integration causes to the interactions and may make the process more difficult to control. Therefore, in order to achieve maximum energy recovery and keep target temperatures at their desirable value, the control structures of energy exchanger networks are important.

This research presents rules and procedure for design control structure of heat exchanger network using heuristic approach. The rules derived in this work are categorized as following: generals, match pattern, loop placement, bypass placement, and split fraction rules. The design procedure is very simple to understand and all the control structure design steps can be followed intuitively. In this research, 6 alternative control structures of 3 networks are designed. It's shown that the network with control structure designed using our procedure gives minimum the integral time absolute error, compared to the other network found in the literature while maintain maximum energy recovery and achieves outlet temperature target. The heat exchanger network with control structures are programmed using Matlab for control structure performance tests.



Department of Chemical Engineering

Student's signature .....

Field of Study of Chemical Engineering

Advisor's signature .....

Academic year            2001

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลงได้ต้องขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.มนตรี วงศ์ศรี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ สำหรับความช่วยเหลือทุกด้าน และคำแนะนำในการพัฒนางานวิจัยด้วยดีมาตลอดจนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.ปิยะसार ประเสริฐธรรม ประธานกรรมการ, รองศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล กิตติศุภกร และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธงไชย ศรีนพคุณ ที่กรุณา มาร่วมเป็นกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้ให้ข้อคิดที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้เป็นอย่างมาก

ขอบคุณเพื่อน ๆ รุ่นพี่ และน้อง ๆ สำหรับกำลังใจที่ให้มา และความช่วยเหลือหลาย ๆ ด้าน

ท้ายนี้ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบคุณพระคุณบิดามารดา และพี่น้องในครอบครัวทุกคนที่ให้การสนับสนุน และเป็นกำลังใจให้ตลอดมาจนสำเร็จการศึกษา

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญรูปภาพ.....	ฎ
สารบัญตาราง.....	ฅ
คำอธิบายสัญลักษณ์.....	ณ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 คำนำ.....	1
1.2 มूलเหตุจูงใจ.....	2
1.3 วัตถุประสงค์.....	4
1.4 ขอบเขตงานวิจัย.....	4
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	5
1.6 โครงสร้างวิทยานิพนธ์.....	6
บทที่ 2 งานวิจัยที่ผ่านมา.....	7
2.1 การออกแบบข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน.....	7
2.1.1 วิธีออปติไมเซชัน.....	7
2.1.2 วิธีฮิวริสติก.....	8
2.2 การออกแบบโครงสร้างการควบคุม.....	10
2.2.1 กระบวนการเคมีทั่วไป.....	10
2.2.2 ข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน.....	11
2.3 ออปติไมเซชัน.....	14
บทที่ 3 แบบจำลองและพฤติกรรมของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนและข่ายงาน.....	16
3.1 บทนำ.....	16

## สารบัญ (ต่อ)

3.2	ลัมพ์โมเดล.....	18
3.3	พารามิเตอร์ในแบบจำลอง.....	20
3.3.1	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม.....	20
3.3.2	จำนวนหน่วยที่แบ่งในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน.....	21
3.3.3	ผลต่างของอุณหภูมิ.....	21
3.3.4	ลักษณะของของไหล.....	23
3.3.5	ความต้านทานของผนัง.....	23
3.3.6	ลักษณะการไหลของของไหลภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน.....	23
3.4	พฤติกรรมของข่ายงานที่สภาวะคงตัว.....	25
3.4.1	อุณหภูมิขาเข้าเปลี่ยนแปลง.....	25
3.4.2	อัตราการไหลเปลี่ยนแปลง.....	27
3.5	พฤติกรรมเชิงพลวัต.....	29
3.5.1	อุณหภูมิเปลี่ยนแปลง.....	29
3.5.2	การเปลี่ยนแปลงอัตราการไหล.....	30
3.6	ผลของการปรับกระแสบายพาส.....	31
บทที่ 4	กฎการออกแบบการควบคุมข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน.....	34
4.1	บทนำ.....	34
4.2	นิยามและเทอมที่ใช้ในงานวิจัย.....	35
4.3	เป้าหมายของข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน.....	36
4.4	การส่งผ่านความแปรปรวน.....	38
4.4.1	เทคนิคการส่งผ่านความแปรปรวน.....	38
4.4.2	เส้นทางการส่งผ่านความแปรปรวน.....	40
4.5	กระบวนการจับคู่ของข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน.....	42
4.6	การติดตั้งกระแสบายพาส.....	47
4.6.1	เหตุผลในการติดตั้งกระแสบายพาส.....	47



**สารบัญ (ต่อ)**

4.6.2	จำนวนของกระแสนายพาสที่มีได้ในข่ายงาน.....	47
4.6.3	การติดตั้งกระแสนายพาสสำหรับการควบคุม.....	48
4.6.4	ตัวอย่าง.....	51
-	ตัวอย่าง 4.1 .....	51
-	ตัวอย่าง 4.2.....	53
-	ตัวอย่าง 4.3.....	55
4.7	ข่ายงานที่ประกอบด้วยกระแสที่แยก.....	56
4.8	กฎในการออกแบบการควบคุมข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน.....	58
5.	การออกแบบโครงสร้างการควบคุม.....	62
5.1	บทนำ.....	62
5.2	ปัญหาในการออกแบบโครงสร้างการควบคุม.....	63
5.2.1	วัตถุประสงค์ในการควบคุม.....	64
5.2.2	การเลือกตัวแปรควบคุม.....	64
5.2.3	การเลือกตัวแปรวัด.....	65
5.2.4	ตัวแปรปรับ.....	65
5.2.5	การออกแบบโครงสร้างการควบคุม.....	66
5.3	การออกแบบโครงสร้างการควบคุม.....	66
5.3.1	วิธีการออกแบบโครงสร้างการควบคุม.....	67
5.4	ตัวอย่าง.....	68
-	ตัวอย่าง 5.1.....	68
-	ตัวอย่าง 5.2 .....	79
-	ตัวอย่าง 5.3.....	88
6.	สรุปวิจารณ์ผลการวิจัย.....	93
6.1	กฎการออกแบบโครงสร้างการควบคุม.....	93
6.2	ขั้นตอนการออกแบบโครงสร้างการควบคุมข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน.....	95

สารบัญ (ต่อ)

6.3	สรุปการวิจัย.....	95
6.4	วิจารณ์ผลงานวิจัยและแนวทางการพัฒนาต่อ.....	96
	รายการอ้างอิง.....	97
	ภาคผนวก.....	106
	ภาคผนวก ก การหาเอนทัลปีเฟลคทีฟเน็ซและอัตราการขยายเชิงสถิติ.....	107
	ภาคผนวก ข การคำนวณ $C_p^*$ .....	109
	ภาคผนวก ค ข้อมูลสำหรับการจำลอง.....	111
	ค.1 ตัวอย่าง 5.1.....	111
	ค.2 ตัวอย่าง 5.2.....	112
	ค.3 ตัวอย่าง 5.3.....	113
	ภาคผนวก ง การควบคุมแบบป้อนกลับและการปรับค่าเครื่องควบคุม.....	115
	ง.1 การควบคุมแบบพีไอ.....	115
	ง.2 การปรับค่าเครื่องควบคุม.....	116
	ง.3 ตัวอย่างการปรับค่าเครื่องควบคุม.....	117
	ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	118

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูป 3.1 ลัมพีโมเดล.....	19
รูป 3.2 หน่วยโมเดล.....	19
รูป 3.3 การเปรียบเทียบโมเดลที่ใช้สมการ 3.17 (เส้นประ) และสมการ 3.16 (เส้นทึบ).....	22
รูป 3.4 ผลการเปรียบเทียบระหว่างการใช้ $C_p^*$ (เส้นประ) และ $C_p$ (เส้นทึบ).....	24
รูป 3.5 เปรียบเทียบผลการตอบสนองของอุณหภูมิระหว่างการไหล 1 เทียวใน 1 เซลล์ ..... (เส้นประ) และการไหล 2 เทียวใน 1 เซลล์ (เส้นทึบ)	25
รูป 3.6 ข่ายงานที่มีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนต่อแบบอนุกรม.....	26
รูป 3.7 ผลของอุณหภูมิของข่ายงานรูป 3.6 เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขาเข้าของกระแส..... H1 เพิ่มขึ้น	26
รูป 3.8 ผลของอุณหภูมิของข่ายงานรูป 3.6 เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของกระแส..... C1 เพิ่มขึ้น	28
รูป 3.9 ผลของอุณหภูมิของข่ายงานรูป 3.6 เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของกระแส..... H1 เพิ่มขึ้น	28
รูป 3.10 ผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขาเข้าต่ออุณหภูมิขาออกของกระแส C1..... ในข่ายงานรูป 3.6	29
รูป 3.11 ผลการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลต่ออุณหภูมิขาออกของกระแส C1..... ในข่ายงานรูป 3.6	30
รูป 3.12 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการบายพาส.....	31
รูป 3.13 ผลการตอบสนองของอุณหภูมิ T2 ต่อการบายพาสด้านร้อนและด้านเย็น.....	32
รูป 3.14 ผลการตอบสนองของอุณหภูมิ T4 ต่อการบายพาสด้านร้อนและด้านเย็น.....	32
รูป 4.1 การส่งผ่านความแปรปรวน .....	39
รูป 4.2 เส้นทางการส่งผ่านความแปรปรวนชนิดที่ 1 และชนิดที่ 2.....	41
รูป 4.3 กระบวนการจับคู่แบบคลาสเอ.....	43
รูป 4.4 กระบวนการจับคู่แบบคลาสบี.....	43

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูป 4.5	กระบวนการจับคู่แบบคลาสซี .....	43
รูป 4.6	กระบวนการจับคู่แบบคลาสดี .....	44
รูป 4.7	ทางเลือกในการใช้กระแสน้ำพาสสำหรับการควบคุมเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน.....	49
รูป 4.8	เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับตัวอย่าง 4.1.....	51
รูป 4.9	การใช้กระแสน้ำพาสในการควบคุมเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในตัวอย่าง 4.1 .....	52
	(ก) บายพาสกระแสน้ำร้อน (ข) บายพาสกระแสน้ำเย็น	
รูป 4.10	ผลการควบคุมอุณหภูมิของตัวอย่าง 4.1 เมื่ออุณหภูมิขาเข้าของกระแสน้ำร้อน.....	52
	ลดลง 5 <sup>0</sup> C และกระแสน้ำเย็นเพิ่ม 5 <sup>0</sup> C	
รูป 4.11	เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับตัวอย่าง 4.2.....	53
รูป 4.12	ผลการควบคุมอุณหภูมิของตัวอย่าง 4.2 เมื่ออุณหภูมิขาเข้าของกระแสน้ำร้อน.....	54
	เพิ่มขึ้น 5 <sup>0</sup> C และกระแสน้ำเย็นเพิ่ม 5 <sup>0</sup> C	
รูป 4.13	เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับตัวอย่าง 4.3.....	55
รูป 4.14	ผลการควบคุมอุณหภูมิของตัวอย่าง 4.3 เมื่ออุณหภูมิขาเข้าของกระแสน้ำร้อน.....	56
	ลดลง 5 <sup>0</sup> C และกระแสน้ำเย็นเพิ่ม 5 <sup>0</sup> C	
รูป 4.15	ช่างงานที่มีการแยกของกระแสน้ำ .....	57
รูป 4.16	การส่งผ่านความแปรปรวนของกระบวนการจับคู่.....	59
รูป 5.1	ช่างงานสำหรับตัวอย่าง 5.1 .....	70
รูป 5.2	ช่างงานย่อยด้านเย็นของตัวอย่าง 5.1.....	71
รูป 5.3	ช่างงานย่อยด้านร้อนของตัวอย่าง 5.1.....	71
รูป 5.4	โครงสร้างการควบคุมช่างงานย่อยด้านเย็นของตัวอย่าง 5.1.....	72
รูป 5.5	เส้นทางการส่งผ่านความแปรปรวนของโครงสร้างการควบคุมช่างงานย่อยด้านเย็น.....	72
	ในตัวอย่าง 5.1	
รูป 5.6	โครงสร้างการควบคุมช่างงานย่อยด้านร้อนของตัวอย่าง 5.1.....	73
รูป 5.7	เส้นทางการส่งผ่านความแปรปรวนของโครงสร้างการควบคุมช่างงานย่อยด้านร้อน.....	73
	ในตัวอย่าง 5.1	

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูป 5.8 โครงสร้างการควบคุมของข่ายงานตามตัวอย่าง 5.3 (โครงสร้างที่ 1).....	74
รูป 5.9 โครงสร้างการควบคุมข่ายงานของ Floudas และ Grossmann (1987) ..... (โครงสร้างที่ 2)	75
รูป 5.10 ผลการควบคุมอุณหภูมิของกระแสด H2 ในตัวอย่าง 5.1 เมื่อภาวะขาเข้า..... เปลี่ยนแปลงไปเป็นภาวะที่ 1	76
รูป 5.11 ผลการควบคุมอุณหภูมิของกระแสด H3 ในตัวอย่าง 5.1 เมื่อภาวะขาเข้า..... เปลี่ยนแปลงไปเป็นภาวะที่ 2	76
รูป 5.12 ผลการควบคุมอุณหภูมิของกระแสด H2 ในตัวอย่าง 5.1 เมื่อภาวะขาเข้า..... เปลี่ยนแปลงไปเป็นภาวะที่ 2	77
รูป 5.13 ผลการควบคุมอุณหภูมิของกระแสด H3 ในตัวอย่าง 5.1 เมื่อภาวะขาเข้า..... เปลี่ยนแปลงไปเป็นภาวะที่ 2	77
รูป 5.14 ข่ายงานสำหรับตัวอย่าง 5.2 .....	80
รูป 5.15 โครงสร้างการควบคุมของข่ายงานตามตัวอย่าง 5.2 (โครงสร้างที่ 1).....	81
รูป 5.16 เส้นทางการส่งผ่านความแปรปรวนของโครงสร้างการควบคุมข่ายงาน..... ในตัวอย่าง 5.2	81
รูป 5.17 โครงสร้างการควบคุมของข่ายงานตามตัวอย่าง 5.2 (โครงสร้างที่ 2).....	82
รูป 5.18 ผลการควบคุมอุณหภูมิของกระแสด H1 ในตัวอย่าง 5.2 เมื่อภาวะขาเข้า..... เปลี่ยนแปลงไปเป็นภาวะที่ 1	82
รูป 5.19 ผลการควบคุมอุณหภูมิของกระแสด H2 ในตัวอย่าง 5.2 เมื่อภาวะขาเข้า..... เปลี่ยนแปลงไปเป็นภาวะที่ 1	83
รูป 5.20 ผลการควบคุมอุณหภูมิของกระแสด H3 ในตัวอย่าง 5.2 เมื่อภาวะขาเข้า..... เปลี่ยนแปลงไปเป็นภาวะที่ 1	83
รูป 5.21 ผลการควบคุมอุณหภูมิของกระแสด C2 ในตัวอย่าง 5.2 เมื่อภาวะขาเข้า..... เปลี่ยนแปลงไปเป็นภาวะที่ 1	84

### สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูป 5.22 ผลการควบคุมคุณภาพของกระแสด H1 ในตัวอย่าง 5.2 เมื่อภาวะขาเข้า.....	84
เปลี่ยนแปลงไปเป็นภาวะที่ 2	
รูป 5.23 ผลการควบคุมคุณภาพของกระแสด H2 ในตัวอย่าง 5.2 เมื่อภาวะขาเข้า.....	85
เปลี่ยนแปลงไปเป็นภาวะที่ 2	
รูป 5.24 ผลการควบคุมคุณภาพของกระแสด H3 ในตัวอย่าง 5.2 เมื่อภาวะขาเข้า.....	85
เปลี่ยนแปลงไปเป็นภาวะที่ 2	
รูป 5.25 ผลการควบคุมคุณภาพของกระแสด C2 ในตัวอย่าง 5.2 เมื่อภาวะขาเข้า.....	86
เปลี่ยนแปลงไปเป็นภาวะที่ 2	
รูป 5.26 ข่ายงานสำหรับตัวอย่าง 5.3.....	89
รูป 5.27 โครงสร้างการควบคุมของข่ายงานตามตัวอย่าง 5.3 (โครงสร้างที่1).....	89
รูป 5.28 โครงสร้างการควบคุมของข่ายงานตามตัวอย่าง 5.3 (โครงสร้างที่2).....	90
รูป 5.29 ผลการควบคุมคุณภาพของกระแสด C1 ในตัวอย่าง 5.3 .....	90
รูป 5.30 ผลการควบคุมคุณภาพของกระแสด C2 ในตัวอย่าง 5.3 .....	91
รูป ง.1 ผลการตอบสนองที่เกิดการแกว่งด้วยความถี่และขนาดคงที่ เมื่อมีการ.....	117
เปลี่ยนค่าเป้าหมายการควบคุม	

## สารบัญตาราง

หน้า

ตาราง 3.1 จำนวนหน่วยที่แบ่งในลัมพ์โมเดล.....	21
ตาราง 4.1 ข้อมูลสำหรับการคำนวณอุณหภูมิพินช์.....	37
ตาราง 4.2 ตารางปัญหาของข้อมูลในตาราง 4.1.....	37
ตาราง 4.3 เปรียบเทียบค่าเวลาความคลาดเคลื่อนแบบสัมบูรณ์ของตัวอย่าง 4.1.....	53
ตาราง 4.4 เปรียบเทียบค่าเวลาความคลาดเคลื่อนแบบสัมบูรณ์ของตัวอย่าง 4.2.....	54
ตาราง 4.5 เปรียบเทียบค่าเวลาความคลาดเคลื่อนแบบสัมบูรณ์ของตัวอย่าง 4.3.....	55
ตาราง 5.1 ภาวะขาเข้าที่เปลี่ยนแปลงไปของตัวอย่าง 5.1.....	69
ตาราง 5.2 เปรียบเทียบค่าเวลาความคลาดเคลื่อนแบบสัมบูรณ์ของโครงสร้าง.....	78
การควบคุมที่ 1 และ 2 จากตัวอย่าง 5.1	
ตาราง 5.3 ภาวะขาเข้าที่เปลี่ยนแปลงไปของตัวอย่าง 5.2.....	79
ตาราง 5.4 เปรียบเทียบค่าเวลาความคลาดเคลื่อนแบบสัมบูรณ์ของโครงสร้าง.....	86
การควบคุมที่ 1 และ 2 จากตัวอย่าง 5.2	
ตาราง 5.5 เปรียบเทียบค่าเวลาความคลาดเคลื่อนแบบสัมบูรณ์ของโครงสร้าง.....	91
การควบคุมที่ 1 และ 2 จากตัวอย่าง 5.3	
ตาราง ค.1 ข้อมูลแสดงภาวะขาเข้าและขาออกของข่ายงานในตัวอย่าง 5.1.....	111
ตาราง ค.2 ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในตัวอย่าง 5.1.....	112
ตาราง ค.3 ข้อมูลแสดงภาวะขาเข้าและขาออกของข่ายงานในตัวอย่าง 5.2.....	112
ตาราง ค.4 ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในตัวอย่าง 5.2.....	113
ตาราง ค.5 ข้อมูลแสดงภาวะขาเข้าและขาออกของข่ายงานในตัวอย่าง 5.3.....	113
ตาราง ค.6 ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในตัวอย่าง 5.3.....	114

## คำอธิบายสัญลักษณ์

<i>A</i>	พื้นที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อน
<i>C</i>	กระแสน้ำในกระบวนการผลิต
<i>C<sub>p</sub></i>	ความจุความร้อนจำเพาะ
<i>D</i>	ความแปรปรวน
<i>E</i>	แทนเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน
<i>H</i>	กระแสน้ำร้อนในกระบวนการผลิต
<i>L</i>	ไหลของกระแสกระบวนการ
<i>N</i>	จำนวนหน่วยในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน
<i>N<sub>by</sub></i>	จำนวนเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในข่ายงานที่มีกระแสบายพาส
<i>N<sub>h</sub></i>	จำนวนเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในข่ายงาน
<i>N<sub>p</sub></i>	จำนวนกระแสที่ข้ามจุดพินช์
<i>N<sub>u</sub></i>	จำนวนหน่วยยูทิลิตี้ในข่ายงาน
<i>N<sub>y</sub></i>	จำนวนกระแสทั้งหมดในข่ายงาน
<i>Q</i>	ปริมาณความร้อนที่แลกเปลี่ยนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน
<i>T</i>	อุณหภูมิของกระแส



$\Delta T_{min}$  ความแตกต่างของอุณหภูมิน้อยที่สุดระหว่างการแลกเปลี่ยนความร้อนของกระแสบสว  
ทาง

$U$  สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม

$u$  อัตราส่วนการบายพาส

$V$  ปริมาตร

$w$  ผลคูณอัตราการใช้และความจุความร้อนจำเพาะ

$\varepsilon$  เอ็ฟเฟคทิฟเนส

$p$  ความหนาแน่น

$t$  ค่าคงที่ของการหน่วงเวลา

ตัวห้อย

$o$  ภาวะขาออก

$i$  ภาวะขาเข้า

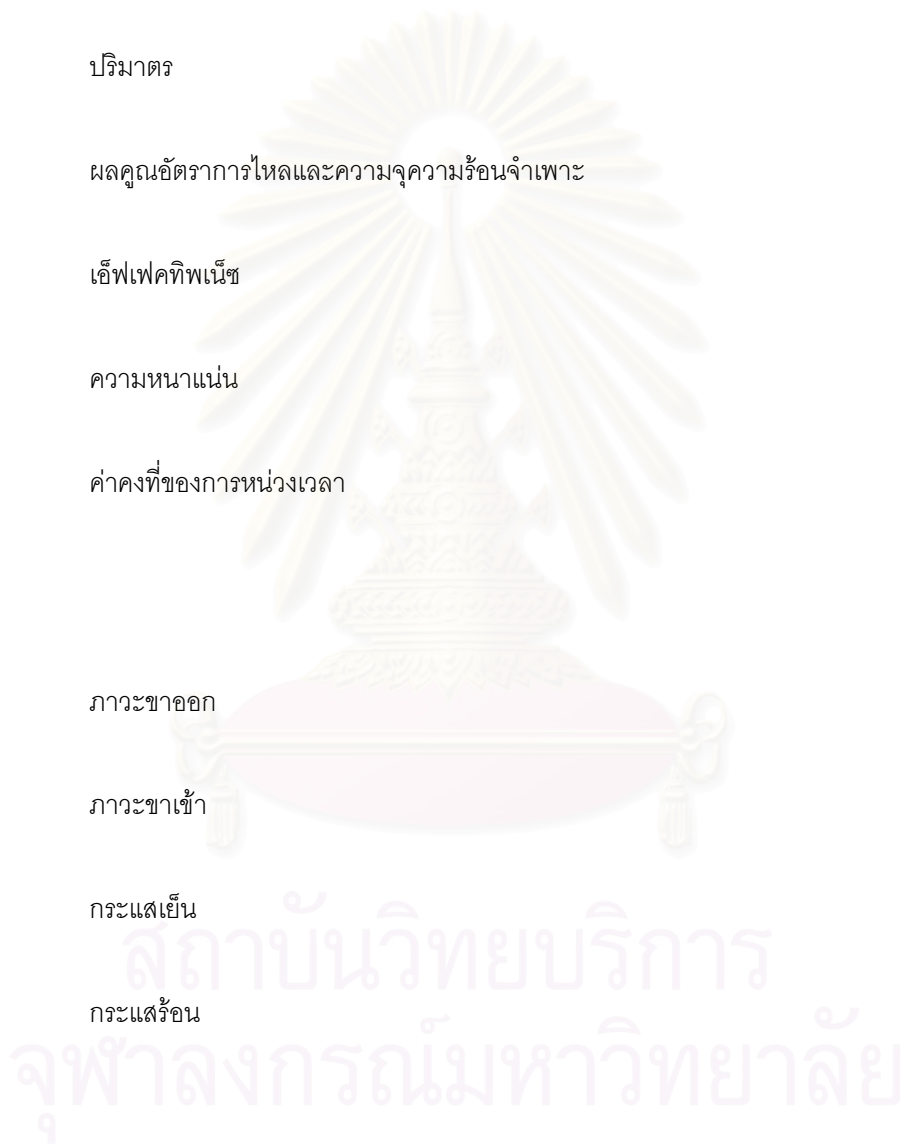
$c$  กระแสเย็น

$h$  กระแสร้อน

ตัวยก

$c$  กระแสเย็น

$h$  กระแสร้อน



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 คำนำ

อุตสาหกรรมกระบวนการทั่ว ๆ ไป อุตสาหกรรมเคมีนับเป็นอุตสาหกรรมที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งประกอบด้วยกระบวนการต่าง ๆ มากมาย ลักษณะเด่นที่สำคัญอย่างหนึ่งในกระบวนการทางเคมี คือการใช้และผลิตพลังงานในกระบวนการ เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความต้องการพลังงานในปัจจุบันนั้นเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว และราคาเชื้อเพลิงที่สูงขึ้นแต่มีปริมาณที่ลดลงทุกปี ประเด็นที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาระบบในการใช้พลังงานให้มีประสิทธิภาพ หรือการนำกลับมาใช้ของพลังงาน (Energy Recovery) เพื่อช่วยลดการใช้พลังงานและลดค่าใช้จ่ายในการปฏิบัติการจึงเป็นประเด็นที่น่าสนใจ

การนำกลับคืนพลังงานสูงสุดภายในอุตสาหกรรมสามารถทำได้โดยการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างกระแสภายในกระบวนการ ที่ต้องการรับความร้อนกับกระแสที่ต้องการลดความร้อน แทนการใช้กระแสยุงทิลิตี การเชื่อมโยงให้มีการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างกระแสกระบวนการด้วยกันทำให้เกิดการเชื่อมโยงของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนหลาย ๆ เครื่อง การเชื่อมโยงนี้จะเรียกว่าข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger Network, HEN)

การออกแบบข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนกลายเป็นหัวข้อวิจัยทางวิศวกรรมกระบวนการนับตั้งแต่กลางทศวรรษที่ 1970 เป็นต้นมา และได้ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่องมาตลอด ในช่วงทศวรรษที่ 1980 ในปี 1978 Linhoff และ Flower ได้ค้นพบจุดพินช์ (Pinch Point) เทคโนโลยีเกี่ยวกับจุดพินช์กลายเป็นหัวข้อวิจัยที่สำคัญของการออกแบบข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งหลักการพื้นฐานที่สำคัญคือจะไม่มีการถ่ายโอนพลังงานผ่านจุดพินช์โดยปราศจากการใช้พลังงานจากภายนอกที่เพิ่มขึ้น จากหลักการสามารถนำมาวิเคราะห์และสร้าง

ระบบยูนิตที่ดีภายในกระบวนการได้ วิธีการในการออกแบบข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนได้ ถูกพัฒนาขึ้นเรื่อย ๆ เพื่อที่จะให้ข่ายงานที่ออกแบบได้สามารถรองรับความแปรปรวนเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงภาวะขาเข้าของข่ายงานได้ Wongsri (1990) ได้เสนอวิธีการออกแบบข่ายงานโดยใช้ อิทธิพลของการวิเคราะห์ พัฒนามาเป็นกระบวนการจับคู่และใช้ร่วมกับเทคนิคการส่งผ่านความ แปรปรวน ส่งผลให้ได้ข่ายงานที่มีความยืดหยุ่นและยังคงรักษาอุณหภูมิเป้าหมายได้ แม้ว่า อุณหภูมิขาเข้าและอัตราการไหลจะมีความแปรปรวนออกไปจากค่าปกติก็ตาม แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นก็ ต้องมีโครงสร้างการควบคุมที่เหมาะสมด้วย

จากที่กล่าวมาจะเป็นปัญหาเกี่ยวกับการออกแบบแต่งงานที่เกี่ยวข้องกับไดนามิกส์และการ ควบคุมยังมีอยู่น้อยมาก แม้ว่าจะมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เพียงตัวเดียว (Alsop และ Edgar (1989); Malleswararao และ Chidambaram (1992); Rotea และ Marchetti (1997)) แต่ดูเหมือนว่าการควบคุมข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะไม่ได้ ได้รับความสนใจแต่อย่างใด เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงภาวะในการปฏิบัติงานไม่ว่าจะเป็นการ เปลี่ยนแปลงแค่ชั่วคราวหรือถาวรก็ตาม (การเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลและอุณหภูมิขาเข้า) จะ ส่งผลทำให้เกิดการรบกวนทางพลังงาน (Energy Disturbance) ภายในโรงงานอุตสาหกรรมจะ สามารถปฏิบัติการได้อย่างปลอดภัยและมีประสิทธิภาพ ถ้าคงอุณหภูมิฟีดสตรีมของถังปฏิกรณ์ และอุปกรณ์ในการแยกสารให้ตรงตามเป้าหมายที่กำหนด โดยส่วนมากฟีดสตรีมจะถูกให้หรือดึง พลังงานภายในข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ดังนั้นการควบคุมอุณหภูมิขาออกของ ข่ายงานให้ได้ตรงตามค่าเป้าหมายที่กำหนดจึงเป็นสิ่งที่สำคัญ และจำเป็นต่ออุตสาหกรรม

## 1.2 มูลเหตุจูงใจ

ลักษณะของกระบวนการทางเคมีมีดังนี้

1. ค่าใช้จ่ายทางด้านพลังงานเป็นส่วนหนึ่งของค่าใช้จ่ายในการปฏิบัติการในกระบวนการ เพราะกระบวนการทางเคมีเป็นกระบวนการที่ต้องการใช้พลังงานและลดพลังงาน

2. ในกระบวนการทางเคมีมักจะประกอบด้วยจำนวนเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมาก ๆ ดังนั้นเงินลงทุนในการสร้างขายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจึงเป็นส่วนหนึ่งของการลงทุนในโรงงาน
3. การควบคุมอุณหภูมิเป้าหมายของขายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีความสำคัญในการปฏิบัติการของโรงงาน เนื่องจากกระแสที่ออกจากขายงานมักจะเป็นฟีดสตรีมของดังปฏิกรณ์หรืออุปกรณ์การแยก ความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิจะมีผลต่อผลผลิต, การเสื่อมของตัวเร่งปฏิกิริยา และอื่น ๆ

เมื่อพิจารณาจากลักษณะของกระบวนการทางเคมีพบว่า การออกแบบขายงานและโครงสร้างการควบคุมที่เหมาะสมจะช่วยให้ประหยัดค่าใช้จ่ายในการปฏิบัติการด้านพลังงานและเงินลงทุน อีกทั้งทำให้การปฏิบัติการปลอดภัย และได้ผลผลิตตามที่ต้องการ จากที่กล่าวมางานวิจัยที่เกี่ยวกับการออกแบบขายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนได้มีการพัฒนามาตลอด และแม้ว่างานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบโครงสร้างการควบคุมทั้งโรงงาน (Plantwide Control Structure) จะมีการพัฒนามาตั้งแต่ปี 1980 (Morari และคณะ, 1980; Govind และ Power, 1982; Luyben และคณะ, 1998) แต่ว่างานวิจัยที่เกี่ยวกับการออกแบบโครงสร้างการควบคุมของขายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนยังมีจำนวนน้อยอยู่ ดังนั้นงานวิจัยที่เกี่ยวกับการออกแบบโครงสร้างการควบคุมของขายงานจึงเป็นงานวิจัยที่น่าสนใจ

งานวิจัยนี้จะเสนอกฎในการออกแบบโครงสร้างการควบคุม โดยอาศัยโครงสร้างของขายงานที่เป็นอยู่ร่วมกับเทคนิคการส่งผ่านความแปรปรวนของ Wongsri (1990) พัฒนาและสรุปเป็นขั้นตอนในการออกแบบโครงสร้างการควบคุมที่เหมาะสม โดยโครงสร้างที่ได้สามารถทำการควบคุมขายงาน เพื่อให้อุณหภูมิของกระแสกระบวนการตรงตามเป้าหมายที่ต้องการเมื่อได้รับการรบกวนทางพลังงานและยังคงรักษาการกลับคืนพลังงานสูงสุด เมื่อได้รับการรบกวนพลังงาน โครงสร้างการควบคุมที่ออกแบบนี้จะสามารถส่งผ่านการรบกวนทางพลังงานไปยังเครื่องยูลิติ (ฮีตเตอร์และคูลเลอร์) ได้ โดยไม่มีผลกระทบต่ออุณหภูมิเป้าหมายของขายงาน

### 1.3 วัตถุประสงค์

เพื่อพัฒนาขั้นตอนการออกแบบโครงสร้างระบบควบคุมของข่างานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเบื้องต้น โดยโครงสร้างระบบควบคุมของข่างานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ได้นี้จะสามารถดำเนินการได้โดยยังคงวัตถุประสงค์ตามที่กำหนด (อุณหภูมิเป้าหมายและการนำกลับคืนพลังงานสูงสุด) เมื่อเกิดการรบกวนทางพลังงานขึ้น (การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขาเข้าและอัตราการไหลของกระแส) อีกทั้งส่งผลให้เกิดความปลอดภัยและเกิดความประหยัดในการปฏิบัติการในอุตสาหกรรม

### 1.4 ขอบเขตงานวิจัย

1. จำลองข่างานลงบนคอมพิวเตอร์โดยใช้ภาษาแมทแล็บเพื่อทำการซิมูเลชัน และทดสอบสมรรถนะของโครงสร้างการควบคุมแบบต่าง ๆ
2. การรบกวนทางพลังงานที่พิจารณาจะมีทั้งความแปรปรวนเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขาเข้าและอัตราการไหล โดยจะพิจารณาเพียงปัญหาแบบคลาส I (Saboo และ Morari (1984)) คือมีการเปลี่ยนแปลงของภาวะขาเข้าเพียงเล็กน้อย ซึ่งจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิพินซ์อย่างต่อเนื่อง
3. อุณหภูมิขาออกของกระแสกระบวนการมีค่าคงที่

โดยมีสมมติฐานดังนี้

1. กระแสกระบวนการไม่มีการเปลี่ยนแปลงสถานะ (Phase)
2. ความจุความร้อนจำเพาะของกระแสกระบวนการมีค่าคงที่
3. เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนภายในข่างานเป็น 1 ท่อใน 1 เซลล์

## 1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

ขั้นตอนและวิธีการออกแบบโครงสร้างการควบคุมข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่เหมาะสม ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้เมื่อเกิดความแปรปรวนที่มาจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขาเข้าและอัตราการไหลของกระแส เพื่อลดค่าใช้จ่ายทางด้านพลังงานและเพื่อให้เกิดความปลอดภัยในการปฏิบัติการ โดยผู้นำไปใช้จะสามารถออกแบบโครงสร้างการควบคุมที่เหมาะสมได้อย่างรวดเร็วและง่ายต่อการนำไปใช้

## 1.6 โครงสร้างวิทยานิพนธ์

เนื้อหาของงานวิจัยได้แบ่งออกเป็น 6 บทคือ

- บทที่ 1 กล่าวถึงคำนำ มูลเหตุจูงใจ วัตถุประสงค์ ขอบเขตงานวิจัย ประโยชน์ที่ได้รับ และโครงสร้างของวิทยานิพนธ์
- บทที่ 2 กล่าวถึงผลงานวิจัยที่ผ่านมาที่เกี่ยวข้องกับข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งแบ่งเป็นงานด้านการออกแบบ การควบคุม และการอปติไมเซชัน
- บทที่ 3 อธิบายถึงแบบจำลองของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน และพฤติกรรมเชิงสถิติและพลวัต ในงานวิจัยนี้จะใช้ลัมพีโมเดลในการจำลอง ศึกษาถึงตัวแปร, ค่าพารามิเตอร์ และลักษณะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนและของไหลที่สำคัญที่มีผลต่อแบบจำลอง โดยใช้ผลการซิमुเลชันในการพิจารณา และจำลองลงบนโปรแกรมคอมพิวเตอร์โดยใช้ภาษาแมทแล็บ
- บทที่ 4 เสนอกฎในการพิจารณาการออกแบบโครงสร้างการควบคุม กฎที่เสนอนี้ได้พัฒนามาจากโครงสร้างข่ายงานที่เป็นอยู่ ร่วมกับเทคนิคการส่งผ่านความแปรปรวน (Wongsri, 1990) โดยกฎที่ได้สามารถนำไปใช้พัฒนาเป็นขั้นตอนการออกแบบโครงสร้างการควบคุมที่เหมาะสมต่อได้ดังเสนอในบทที่ 5
- บทที่ 5 อธิบายถึงวัตถุประสงค์ในการควบคุม รวมทั้งการเลือกตัวแปรปรับและตัวแปรควบคุม โดยในการออกแบบโครงสร้างการควบคุมของข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในบทนี้ จะ

พิจารณาจากกฎการออกแบบการควบคุมในบทที่ 4 พัฒนาเป็นขั้นตอนในการออกแบบโครงสร้างการควบคุม โดยขั้นตอนการออกแบบที่ได้นี้สามารถประยุกต์ใช้กับข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทั่ว ๆ ไป เมื่อเกิดการรบกวนทางพลังงาน และเป็นปัญหาแบบคลาส I คือการเปลี่ยนแปลงภาวะขาเข้าที่ทำให้อุณหภูมิพินช์มีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง และสามารถดำเนินการได้โดยยังคงวัตถุประสงค์ตามที่กำหนด

- บทที่ 6 กล่าวถึงบทสรุปและวิจารณ์ผลการวิจัย พร้อมทั้งเสนอแนวทางการวิจัยที่ควรจะพัฒนาต่อไป
- ภาคผนวก ส่วนของภาคผนวกจะแบ่งออกเป็น 4 บทคือ
  - ภาคผนวก ก เสนอการหาเอฟเฟคทีฟเนส และแสดงอัตราขยายเชิงสถิติของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน
  - ภาคผนวก ข เสนอวิธีการหาค่าความจุความร้อนจำเพาะที่แสดงในงานวิจัย Correa และ Marchetti (1987)
  - ภาคผนวก ค แสดงข้อมูลที่ใช้เป็นตัวอย่างในบทที่ 5
  - ภาคผนวก ง แสดงตัวควบคุมแบบป้อนกลับ และการปรับค่าควบคุม

## บทที่ 2

### งานวิจัยที่ผ่านมา

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับขบวนการเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเริ่มมีมาตั้งแต่กลางทศวรรษที่ 1970 เพื่อตอบสนองความต้องการ โดยในช่วงแรกงานวิจัยที่ได้พัฒนาขึ้นเป็นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบ ซึ่งขบวนการที่ได้จะเป็นแบบไม่ยืดหยุ่น และได้ถูกพัฒนาต่อเนื่องมาจนได้ขบวนการแบบยืดหยุ่นที่สามารถรองรับความแปรปรวนได้ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบโครงสร้างการควบคุมทั้งโรงงานได้มีการพัฒนามาตั้งแต่ปี 1980 แต่งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบโครงสร้างการควบคุมของขบวนการเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนยังมีปริมาณน้อยอยู่ ในบทนี้จะกล่าวถึงผลงานวิจัยที่ผ่านมาที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบขบวนการเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ทั้งวิธีออปติไมเซชันและฮิวริสติก การออกแบบโครงสร้างการควบคุม และการออปติไมเซชัน

#### 2.1 การออกแบบขบวนการเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

จากงานวิจัยที่ผ่านมาขบวนการที่ออกแบบได้จะมีทั้งขบวนการที่ยืดหยุ่นและขบวนการที่ไม่ยืดหยุ่น ขบวนการแบบไม่ยืดหยุ่นคือขบวนการที่ไม่สามารถรักษาอุณหภูมิขาออกของกระแสต่าง ๆ ให้เท่ากับค่าเป้าหมายได้เมื่อมีความแปรปรวนเนื่องจากอุณหภูมิขาเข้าและอัตราการไหล ส่วนขบวนการแบบยืดหยุ่นจะสามารถรักษาอุณหภูมิเป้าหมายไว้ได้ การออกแบบขบวนการเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบ่งออกได้เป็น 2 วิธีคือ วิธีออปติไมเซชัน (Optimization Method) และวิธีฮิวริสติก (Heuristic Method)

##### 2.1.1 วิธีออปติไมเซชัน

วิธีนี้ข้อมูลและเงื่อนไขการออกแบบจะถูกเปลี่ยนไปในรูปของโมเดลทางคณิตศาสตร์ ซึ่งในบางปัญหาที่ซับซ้อนจะทำได้ยากหรืออาจทำไม่ได้เลย ตัวอย่างของวิธีนี้ได้แก่



- ปี 1983 Cerda และ Westerberg ได้พัฒนาวิธีนี้ขึ้นมาเพื่อนำมาใช้หาโครงสร้างข่ายงานอาศัยหลักการส่งความร้อนจากกระแสน้ำร้อนไปยังเป้าหมายคือกระแสเย็น โดยใช้เงื่อนไขเกี่ยวกับเทอร์โมไดนามิกส์ช่วยในการพิจารณา
- ปี 1986 Floudas และคณะ ได้เสนอวิธีการหาโครงสร้างข่ายงานได้อย่างอัตโนมัติ โดยรวมถึงการหาค่าพลังงานที่ใช้้น้อยที่สุดจากหน่วยยูนิติลิตี้ และจำนวนเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนน้อยที่สุดสำหรับข่ายงานด้วย โดยใช้โมเดลทรานส์ชิพเมนต์สำหรับการออกแบบ และจัดเตรียมข้อมูลการหาโครงสร้างข่ายงาน จากนั้นจึงใช้การโปรแกรมไม่เชิงเส้น (Nonlinear Programming) สำหรับหาโครงสร้างข่ายงานที่สมบูรณ์ พร้อมทั้งลดค่าใช้จ่ายสำหรับการสร้างและการทำงานของข่ายงานให้เหลือน้อยที่สุด
- ปี 2000 Zhang และ Zhu เสนอการรีโทรฟิตของข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงภาวะขาเข้า โดยใช้วิธีออปติไมเซชันร่วมกับไดอะแกรมอุณหภูมิและเอนทัลปี เพื่อใช้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร โดยแบบจำลองที่ใช้จะพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและอัตราการไหลด้วย

### 2.1.2 วิธีวิวิธติค

เนื่องจากยังไม่มีทฤษฎีที่สมบูรณ์ใด ๆ สำหรับหาโครงสร้างของข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน วิธีวิวิธติคจะใช้ความรู้ที่ได้มาจากประสบการณ์ในการออกแบบนำมาแก้ปัญหา จึงมีข้อดีที่ไม่จำเป็นต้องทราบแบบจำลอง หรือสร้างสมการในการออกแบบเหมือนวิธีออปติไมเซชัน จึงทำให้การค้นหาโครงสร้างของข่ายงานที่ประหยัดพลังงานเป็นไปได้อย่างรวดเร็ว และมีประสิทธิภาพ ตัวอย่างของวิธีวิวิธติคเช่น

- ปี 1978 Linnhoff และ Flower ได้เสนอวิธีการแบ่งข่ายงานออกเป็นข่ายงานย่อย (Subnetworks หรือ Temperature Intervals) หลาย ๆ ข่ายงาน ข่ายงานย่อยเหล่านี้แบ่งช่วงโดยใช้อุณหภูมิขาเข้าและขาออกของกระแส การแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างข่ายงานย่อย ๆ เหล่านี้สามารถทำได้ง่าย อย่างไรก็ตามการรวมข่ายงานย่อยเข้าด้วยกันจะทำได้ไม่ถนัดนัก

- ปี 1983 Linnhoff และ Hindmarsh ได้ออกแบบฮีวริสติกซึ่งพัฒนามาจากผลงานวิจัยของ Linnhoff และ Flower (1978) โดยการออกแบบจะตรวจสอบว่า ปัญหาสามารถแบ่งเป็น ปัญหาทางความร้อน (Heating Problem ใช้ฮีตเตอร์ในข่ายงาน) และปัญหาทางด้านความเย็น (Cooling Problem ใช้คูลเลอร์ในข่ายงาน) ด้วยคุณสมบัติพินช์ได้หรือไม่ และใช้ฮีวริสติกสำหรับการจับคู่กระแสเพื่อนำมาแลกเปลี่ยนความร้อน เช่น เริ่มจับคู่กระแสจากจุดพินช์ก่อน, ไม่ส่งผ่านความร้อนข้ามจุดพินช์ (Pinch Point) เป็นต้น
- ปี 1984 Saboo และ Morari ได้แบ่งปัญหาการออกแบบข่ายงานแบบยืดหยุ่นออกเป็นสองประเภท ตามลักษณะความแปรปรวนที่ส่งผลต่อตำแหน่งของอุณหภูมิพินช์ สำหรับกรณีที่มีความแปรปรวนของอุณหภูมิเข้าเพียงเล็กน้อย และทำให้การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของพินช์เปลี่ยนแปลงไปในลักษณะที่ต่อเนื่อง จะเรียกว่าข่ายงานนั้นว่าเป็นปัญหาแบบคลาส I (Class I) แต่ในกรณีที่มีความแปรปรวนของอุณหภูมิเข้า หรือความแปรปรวนเนื่องจากอัตราการไหลมาก อุณหภูมิพินช์จะเปลี่ยนแปลงไปอย่างไม่ต่อเนื่อง หรือความแปรปรวนเนื่องจากอัตราการไหลมาก อุณหภูมิพินช์จะเปลี่ยนแปลงไปอย่างไม่ต่อเนื่อง และจะเรียกกว่าเป็นปัญหาแบบคลาส II (Class II) และในปีเดียวกัน Linnhoff และ Kotjabasakis ได้ใช้เส้นทางดาวนส์สตรีมเพื่อเชื่อมระหว่างตัวแปรของความแปรปรวนกับตัวแปรควบคุม การออกแบบที่สภาวะการทำงานปกติใช้วิธีพินช์ จากนั้นตรวจสอบผลของความแปรปรวนต่อตัวแปรควบคุม ตัวแปรดังกล่าวจะถูกจำกัดออกไปโดยทำการเปลี่ยนแปลงตำแหน่ง หรือกำจัดเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ถ้าขั้นตอนนี้ยังไม่ได้ผลก็จะเพิ่มกระบวนการควบคุมเข้าไปในโครงสร้างด้วย
- ปี 1986 Calandranis และ Stephanopoulos ได้เสนอวิธีการวิเคราะห์วิธีการออกแบบโดยตรวจสอบนอมนคอนเวกซ์ซิตีของข่ายงาน (Nonconvexity) สำหรับกรณีพินช์ไม่ต่อเนื่อง และความแปรปรวนของอุณหภูมิเป็นต้น
- ปี 1986 Linnhoff และ Kotjabasakis ได้ใช้เทคนิคเกี่ยวกับเส้นทางดาวนส์สตรีม ซึ่งเป็นเส้นทางเชื่อมระหว่างตัวแปรของความแปรปรวนกับตัวแปรควบคุม การออกแบบที่สภาวะการทำงานปกติใช้วิธีพินช์ (Pinch Method) จากนั้นตรวจสอบผลของความแปรปรวนต่อตัวแปรควบคุม ตัวแปรดังกล่าวจะถูกกำจัดออกไปโดยทำการเปลี่ยนแปลงตำแหน่ง หรือกำจัดเครื่อง

แลกเปลี่ยนความร้อน ถ้าขั้นตอนนี้ยังไม่ได้ผลก็จะเพิ่มกระบวนการควบคุมเข้าไปในโครงสร้างด้วย

- ปี 1990 Wongsri ได้เสนอการออกแบบข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโดยใช้วิธีฮิวริสติก พัฒนาเป็นโปรแกรมโดยใช้หลักการของระบบฐานความรู้ หลักการสำคัญในการออกแบบข่ายงานตามวิธีของ Wongsri คือการใช้กระบวนการจับคู่และวิธีการส่งผ่านความแปรปรวน ซึ่งกระบวนการจับคู่ที่พัฒนาขึ้นจะสามารถส่งความแปรปรวนของกระแสหนึ่งไปให้อีกกระแสซึ่งมีความร้อนหลงเหลือได้ อัลกอริทึมที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถเลือกโครงสร้างของข่ายงานที่เหมาะสมได้ตั้งแต่แรก โดยไม่ต้องออกแบบหลาย ๆ โครงสร้าง และนำมาทดสอบเพื่อหาข่ายงานที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งข่ายงานที่ได้นี้จะเป็นข่ายงานที่ยืดหยุ่น

## 2.2 การออกแบบโครงสร้างการควบคุม

งานวิจัยที่ผ่านมาที่เกี่ยวกับการออกแบบโครงสร้างการควบคุมจะแบ่งได้ 2 ประเภทคือ งานวิจัยที่เกี่ยวกับกระบวนการเคมีทั่ว ๆ ไป และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งวิธีการที่ใช้ในการออกแบบจะมีทั้งแบบฮิวริสติก และแนวทางระบบ (การวิเคราะห์โดยใช้สมการแสดงความสัมพันธ์)

### 2.2.1 กระบวนการเคมีทั่ว ๆ ไป

- ปี 1980 Morari และคณะ ได้รวบรวมปัญหาในการวิเคราะห์โครงสร้างการควบคุมสำหรับกระบวนการทางเคมี โดยทำการแบ่งวัตถุประสงค์ของการควบคุมและแบ่งกระบวนการออกเป็นกระบวนการย่อย ๆ เพื่อสะดวกต่อการออกแบบการควบคุม โดยอาศัยเกณฑ์ทางคณิตศาสตร์เข้ามาช่วย ซึ่งจะสามารถสร้างทางเลือกต่าง ๆ ของโครงสร้างการควบคุมได้
- ปี 1980 Arkun และ Stephanopoulos เสนอการควบคุมที่ออปติ멈ของแต่ละยูนิตภายในโรงงาน โดยอาศัยโปรแกรมไม่เชิงเส้นในการแก้ปัญหา ทางเลือกต่าง ๆ ถูกพัฒนาขึ้นและใช้วิธีการมัลติเลฟเวลในการคัดเลือก ซึ่งจะทำให้ได้โครงสร้างการควบคุมที่เหมาะสม

- ปี 1982 Govind และ Powers ได้เสนอการออกแบบโครงสร้างการควบคุมโดยพิจารณาจากกราฟและเหตุผล (Cause and Effect Graph) โดยจะเขียนกระบวนการให้อยู่ในรูปกราฟแล้วพิจารณาโดยใช้วิธีสถิติในการเลือกโครงสร้างการควบคุมที่เหมาะสม
- ปี 1988 Fisher และคณะ ได้อธิบายวิธีการในการควบคุมกระบวนการในขั้นตอนของการออกแบบ ในการออกแบบกระบวนการที่สภาวะออปติมิั่มอาจจะไม่สามารถควบคุมระบบได้ เช่นมีตัวแปรปรับไม่เพียงพอสำหรับข้อจำกัดและการออปติไมซ์ การทำให้กระบวนการสามารถควบคุมได้สามารถทำได้โดย 1) ปรับปรุงโครงสร้างของกระบวนการเพื่อเพิ่มตัวแปรปรับ 2) อุปกรณ์บางชิ้นในกระบวนการอาจจะต้องมีการเพิ่มขนาด หรือ 3) ไม่ทำการออปติไมซ์ตัวแปรที่ไม่สำคัญ โดยจะเลือกทางเลือกที่มีเงินลงทุนน้อยที่สุด
- ปี 1992 Daoutidis และ Kravaris เสนอการหาโครงสร้างการควบคุมของกระบวนการโดยวิเคราะห์จากลำดับความสัมพันธ์ (Relative Order) สร้างเมทริกซ์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรเข้า (Input) และตัวแปรออก (Output) ศึกษาผลของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรในการออกแบบโครงสร้างการควบคุม
- ปี 1993 Downs และ Vogel ได้เสนอแบบจำลองของกระบวนการทางเคมี พัฒนา ศึกษา และหาเทคนิคในการควบคุมกระบวนการ ซึ่งกระบวนการที่ศึกษาจะประกอบด้วยถังปฏิกรณ์, หน่วยแยก และรีไซเคิล ซึ่งมีทั้งสถานะของเหลวและก๊าซ ซึ่งการออกแบบโครงสร้างการควบคุมจะอาศัยหลักการของแพนส์ไวต์ในการควบคุม

## 2.2.2 ข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

- ปี 1982 Marselle และคณะ ได้เสนอวิธีการออกแบบโครงสร้างการควบคุมโดยแบ่งตัวแปรปรับเป็นตัวแปรอิสระ, ตัวแปรไม่อิสระ และตัวแปรชิฟท์ (Shift Variable) โดยตัวแปรชิฟท์จะทำงานเมื่อตัวแปรไม่อิสระอิ่มตัวและอุณหภูมิไม่ได้ตามค่าเป้าหมาย โดยโครงสร้างการควบคุมที่ได้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทุกเครื่องภายในข่ายงานจะต้องมีการติดตั้งกระแส

บายพาส และหน่วยยูทิลิตี้ทุกหน่วยจะต้องมีวงควบคุม โดยโครงสร้างการควบคุมที่ได้จะคง คุณภูมิเป้าหมายของข่ายงาน และใช้พลังงานจากภายนอกน้อยที่สุด

- ปี 1988 Calandranis และ Stephanopoulos ได้เสนอแนวทางใหม่ในการออกแบบโครงสร้าง การควบคุมของข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าคุณภูมิ เป้าหมายและมีความแปรปรวนรอบวง โดยแนวทางใหม่นี้จะอาศัยลักษณะของโครงสร้างที่ เป็นอยู่ในการออกแบบ เพื่อแสดงเส้นทางการส่งผ่านความแปรปรวนไปยังเครื่องยูทิลิตี้ ซึ่งจะ แบ่งเส้นทางการส่งผ่านความแปรปรวนเป็น 2 ชนิด คือเส้นทางการส่งผ่านที่ขนานกับทิศทาง การไหล (ชนิดที่ 1) และเส้นทางการส่งผ่านที่มีอย่างน้อย 1 ช่วงมีการส่งผ่านสวนทางกับทิศทาง การไหล (ชนิดที่ 2) ซึ่งในการควบคุมเมื่อเกิดเส้นทางการส่งผ่านชนิดที่ 2 จะต้องมีการใช้เครื่องควบคุม แบบป้อนล่วงหน้าร่วมกับการควบคุมแบบป้อนกลับด้วย จุดประสงค์ในการควบคุมใน งานวิจัยนี้คือคุณภูมิขาออกของกระแส และคุณภูมิภายในข่ายงานที่เปลี่ยนไปเนื่องจากมี การรบกวนจากภายนอก โดยที่คุณภูมิภายในข่ายงานที่เปลี่ยนแปลงไปจะขึ้นอยู่กับเส้นทาง การส่งผ่านความแปรปรวนว่าเป็นชนิดใด
- ปี 1990 Georgiou และ Floudas ได้เสนอวิธีการใหม่สำหรับการลดการส่งผ่านความ แปรปรวนตั้งแต่ขั้นตอนการออกแบบข่ายงาน โดยใช้เทคนิคโปรแกรมทางคณิตศาสตร์ แสดง ในรูปโครงสร้างเมทริกซ์ (Structural Matrix) ซึ่งได้เมทริกซ์นี้มาจากสมการสมดุลพลังงาน และหาการวางกระแสบายพาสที่เหมาะสมโดยเช็คจาแรงค์ (Rank) ของเมทริกซ์
- ปี 1992 Mathisen และคณะ เสนอการติดตั้งบายพาสในข่ายงานโดยพิจารณาจาก คอนโทรลละบิลิตี้ (Controllability Measure) โดยจะเลือกควบคุมกระแสโดยใช้กระแสยูทิลิตี้ หรือกระแสบายพาสที่มีผลโดยตรงต่อตัวแปรควบคุม นั่นคือให้มีการติดตั้งบายพาสบนกระแส ที่ต้องการควบคุม บนเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเครื่องสุดท้ายบนกระแส พิจารณาการ ติดตั้งบายพาสคร่อมเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมากกว่า 1 ตัว ซึ่งจะช่วยให้ประหยัดเงิน ลงทุนในการติดตั้งวงควบคุม และหลีกเลี่ยงการบายพาสที่มีหลายเส้นทางดาวนีสทริม (Downstream Path) ไปยังเป้าหมาย

- ปี 1996 Yang และคณะ ได้เสนอโมเดลแบบง่ายในการหาการส่งผ่านความแปรปรวนภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โมเดลนี้จะแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเป้าหมายกับภาวะขาเข้าของกระแส แบบจำลองจะประกอบด้วยสมการเชิงเส้น สามารถใช้วิเคราะห์กระบวนการเมื่อมีความแปรปรวนเข้ามาในระบบ
- ปี 1997 Uzturk และ Akman ได้เสนอการรีโทรฟิตข่างานและเสนอผลเปรียบเทียบการควบคุมโดยใช้การควบคุมแบบป้อนกลับอย่างเดียวกับการควบคุมโดยใช้การควบคุมแบบป้อนล่วงหน้าร่วมด้วย ซึ่งการควบคุมที่มีการควบคุมแบบป้อนล่วงหน้าร่วมกับการควบคุมแบบป้อนกลับจะให้ผลการตอบสนองที่ดีกว่า การเลือกการติดตั้งกระแสนายพาสจะทำการติดตั้งกระแสนายพาส โดยทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของพื้นที่การแลกเปลี่ยนพลังงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่น้อยที่สุด โดยทางเลือกของโครงสร้างการติดตั้งบายพาสที่ได้จะถูกนำมาเปรียบเทียบและพิจารณาค่าของความยืดหยุ่น เมื่อพิจารณาค่าอัตราขยายสัมพันธ์ การบายพาสหน่วยสุดท้ายจะให้ผลการบายพาสที่ดีที่สุด
- ปี 1998 Aguilera และ Marchetti ได้เสนอขั้นตอนสำหรับทำออปติไมเซชันและพิจารณาระบบควบคุมเป็น 2 ระดับคือ ควบคุมอุณหภูมิเป้าหมายและทำการออปติไมเซชันการใช้พลังงานจากภายนอก การออกแบบโครงสร้างการควบคุมจะพิจารณาจากโปรแกรมทางคณิตศาสตร์ (โปรแกรมเชิงเส้นหรือไม่เชิงเส้น) โดยโครงสร้างการควบคุมที่ได้จะคงอุณหภูมิเป้าหมาย และมีการนำกลับคือพลังงานสูงสุด โดยจะติดตั้งกระแสนายพาสในด้านที่ต้องการควบคุมและใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวสุดท้ายในกระแสในการติดตั้งวงควบคุม
- ในปี 2001 Yan และคณะ ได้ออกแบบโครงสร้างการควบคุมโดยพิจารณาจากโมเดลการส่งผ่านความแปรปรวนและควบคุม (DP&C Model) โดยออกแบบโครงสร้างที่ลดการส่งผ่านความแปรปรวน พัฒนาเป็นขั้นตอนโดยใช้ DP&C โมเดลในการหาตำแหน่งที่ติดตั้งกระแสนายพาสที่เหมาะสม และค่าอัตราส่วนการบายพาสที่เหมาะสมในข่างานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เพื่อลดขนาดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนให้เล็กที่สุด และได้อุณหภูมิขาออกของกระแสตรงตามเป้าหมายที่กำหนด

## 2.3 ออปติไมเซชัน

เริ่มตั้งแต่ปี 1990 เป็นต้นมา งานวิจัยเกี่ยวกับการออปติไมเซชันการใช้พลังงานภายในข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน และพื้นที่แลกเปลี่ยนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ได้ถูกพัฒนามาเรื่อย ๆ เช่น

- ปี 1995 Konukman และคณะ ได้เสนองานวิจัยโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนที่น้อยที่สุด โดยการปรับอัตราส่วนการบายพาสที่ออปติไมซ์ของข่ายงานที่ถูกออกแบบไว้แล้ว โดยที่ยังคงอุณหภูมิเป้าหมายไว้ได้ในช่วงที่กำหนดเมื่อมีความแปรปรวนในปริมาณที่กำหนด ปัญหาจะเขียนอยู่ในรูปของสมการออปติไมเซชัน ซึ่งจะประกอบด้วยโมเดลของข่ายงาน และคอนสเตรนท์
- ปี 1996 Boyaci และคณะ ได้ศึกษาอัลกอริทึมของการควบคุมแบบวงเปิดและการควบคุมแบบวงปิด โดยการควบคุมวงเปิดคือการปรับอัตราส่วนการบายพาสไปที่ค่าออปติมอล โดยค่านี้คือค่าที่ทำให้อุณหภูมิเข้าใกล้ค่าเป้าหมายมากที่สุด ส่วนการควบคุมแบบวงปิดจะมีการคำนวณค่าอัตราส่วนการบายพาสที่ออปติมอล ตลอดเวลาโดยใช้อุณหภูมิขาออกมาพิจารณาร่วมด้วย
- ปี 1996 Glemmestad และคณะ ศึกษาขั้นตอนสำหรับการหาจุดปฏิบัติการของข่ายงานที่ออปติมอล โดยเสนอเป็นเมทริกซ์เครื่องหมาย (Sign Metrix) ซึ่งเมทริกซ์เครื่องหมายนี้หาได้จากเส้นทางดาวนส์สตรีม โดยจุดปฏิบัติการนี้จะต้องคงอุณหภูมิเป้าหมายและใช้พลังงานน้อยที่สุด
- 1999 Glemmestad และคณะ เสนอการพิจารณาการหาอุณหภูมิภายในข่ายงานที่ออปติมอลของข่ายงานที่ได้ออกแบบไว้แล้ว โดยสร้างเป็นปัญหาการออปติไมเซชัน โดยอุณหภูมิภายในข่ายงานนี้จะต้องใช้พลังงานจากภายนอกน้อยที่สุด

งานวิจัยของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ผ่านมา คือของประทีป อรุณวัฒน์มงคล (1992) ได้ใช้กระบวนการจับคู่ของ Wongsri (1990) เขียนเป็นโปรแกรมการออกแบบข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไม่ยืดหยุ่น โดยไม่ได้คำนึงถึงความแปรปรวนของอุณหภูมิขาเข้าและอัตราการไหลของกระแส

ณัฐพร ทรงศิริ (1995) ได้ใช้กระบวนการจับคู่ของ Wongsri (1990) เขียนเป็นโปรแกรมการออกแบบข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบยืดหยุ่น โดยพิจารณาความแปรปรวนของอัตราการไหลและอุณหภูมิขาเข้าของกระแส ที่ไม่ทำให้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิพินช์เกิดการกระโดด หรือเป็นปัญหาแบบคลาส I

งานวิจัยที่ผ่านมา จะเห็นได้ว่างานวิจัยที่เกี่ยวกับการออกแบบโครงสร้างการควบคุมที่เหมาะสม ที่สามารถดำเนินการได้โดยยังคงวัตถุประสงค์ คืออุณหภูมิเป้าหมายตรงตามกำหนด และมีการใช้พลังงานจากภายนอกน้อยที่สุด เมื่อเกิดการรบกวนทางพลังงาน ยังมีจำนวนน้อยอยู่ และในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยก็ยังไม่มียุทธศาสตร์ งานวิจัยนี้จะพัฒนาขั้นตอนการออกแบบโครงสร้างการควบคุมที่เหมาะสม และสะดวกต่อการนำไปใช้ โดยพัฒนามาจากกฎการออกแบบการควบคุม ที่พิจารณาจากโครงข่ายงานร่วมกับเทคนิคการส่งผ่านความแปรปรวนของ Wongsri (1990)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



### บทที่ 3

#### แบบจำลองและพฤติกรรมของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนและขำยงาน

งานวิจัยในบทนี้จะอธิบายถึงประเด็นของการสร้างแบบจำลองและพฤติกรรมของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน แบบจำลองและพฤติกรรมเชิงพลวัตมีความจำเป็นในการศึกษาการควบคุมแบบจำลองที่ง่ายแต่ต้องรวมตัวแปรและพารามิเตอร์ที่สำคัญของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนไว้ทั้งหมดเป็นสิ่งที่ต้องการ ซึ่งลัมพีโมเดลเป็นแบบจำลองที่ง่ายและสะดวกต่อการคำนวณ ในบทนี้จะแยกตัวแปร, พารามิเตอร์ และลักษณะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้และของไหล ที่สำคัญและไม่สำคัญที่ต้องแสดงในแบบจำลอง โดยใช้การเปรียบเทียบผลการซิมูเลชันเป็นสิ่งที่พิจารณา สำหรับการแลกเปลี่ยนของของเหลว สิ่งที่สำคัญคือจำนวนหน่วยที่แบ่งของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งจะมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม แบบจำลองที่ถูกต้องจะสามารถแสดงพฤติกรรมพลวัตของระบบได้อย่างดี ในบทนี้จะอธิบายถึงพฤติกรรมของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทั้งที่สภาวะคงตัวและพลวัต ผลการตอบสนองของอุณหภูมิขาออกของขำยงานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขาเข้าของกระแสเดียวกันจะเกิดเวลาหน่วงขึ้น ขณะที่ผลการตอบสนองจะไม่เกิดเวลาหน่วงเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลหรือเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขาเข้าของกระแสตรงขำม

#### 3.1 บทนำ

สมการสมดุลทางพลังงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่สภาวะคงตัวคือ

$$Q = W_h (T_i^h - T_o^h) = W_c (T_o^c - T_i^c) \quad (3.1)$$

$$= U_{lm} A \frac{(T_i^h - T_o^c) - (T_o^h - T_i^c)}{\ln \frac{(T_i^h - T_o^c)}{(T_o^h - T_i^c)}} \quad (3.2)$$

โดย  $T$  แทนอุณหภูมิของกระแสกระบวนการ,  $W$  แทนผลคูณอัตราการไหลกับความจุความร้อนจำเพาะ  $Q$  แทนปริมาณความร้อนที่แลกเปลี่ยนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน,  $U$  แทนสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม,  $A$  แทนพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน, ตัวห้อย  $i$  แทนภาวะขาเข้า และ  $o$  แทนภาวะขาออก และตัวยก  $h$  แทนกระแสร้อน และ  $c$  แทนกระแสเย็น สมการที่ 1 และ 2 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปเมทริกซ์ได้ดังสมการ 3.3 และ 3.4 โดยที่สมการ 3.3 ใช้แสดงกรณีที่กระแสเย็นมีอัตราการไหลน้อยกว่ากระแสร้อน และสมการ 3.4 ใช้แสดงกรณีที่กระแสร้อนมีอัตราการไหลมากกว่ากระแส (ความสัมพันธ์  $\varepsilon$  แสดงการคำนวณได้ในภาคผนวก ก)

$$\begin{bmatrix} T_o^h \\ T_o^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1-r\varepsilon & r\varepsilon \\ \varepsilon & 1-\varepsilon \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_i^h \\ T_i^c \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$\begin{bmatrix} T_o^h \\ T_o^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1-\varepsilon & \varepsilon \\ r\varepsilon & 1-r\varepsilon \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_i^h \\ T_i^c \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

โดย 
$$\varepsilon = \frac{1 - e^{-(1-r)N_{Tu}}}{1 - re^{-(1-r)N_{Tu}}} \quad (3.5)$$

$$r = \frac{W_{min}}{W_{max}} \quad (3.6)$$

$$N_{Tu} = \frac{U_{lm}A}{W_{min}} \quad (3.7)$$

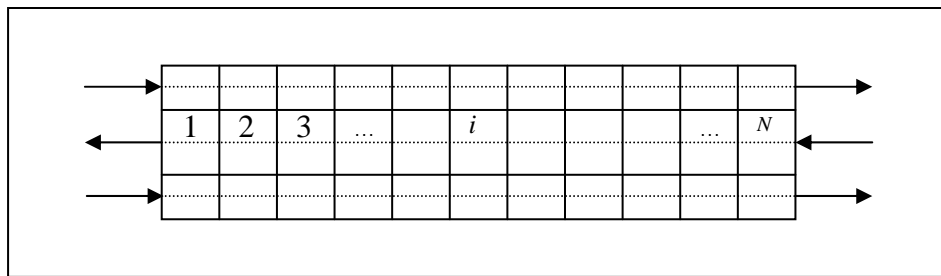
แบบจำลองเชิงพลวัตของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีความจำเป็นในการศึกษาการควบคุม แบบจำลองที่ง่ายแต่สามารถเลียนแบบพฤติกรรมเชิงพลวัตได้อย่างถูกต้องจึงเป็นสิ่งที่ต้องการ ตัวแปรที่สำคัญในแบบจำลองเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนคือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม, ผลต่างอุณหภูมิ, ความต้านทานของผนัง และลักษณะการไหลของของไหล ซึ่งสามารถใช้สัมพัโมเดล (ดังอธิบายในหัวข้อ 3.2) ในการจำลองพฤติกรรมของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนได้ และสามารถปรับปรุงสัมพัโมเดลได้โดยการใช้ผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยเชิงล็อกการิทึม (Logarithmic Mean Temperature Difference, LMTD)

### 3.2 ลัมพ์โมเดล (Lump Model)

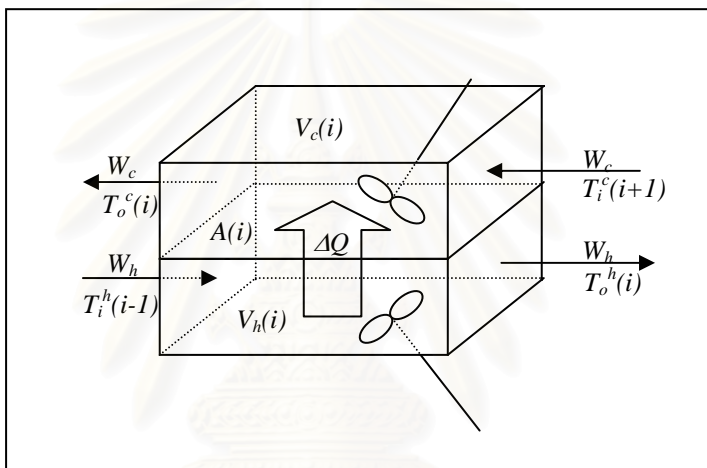
แบบจำลองของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่พบจากงานวิจัยที่ผ่านมาจะมีดิซทริบิวทโมเดล (Distributed Model) คือการใช้สมการพาหะลติฟเฟอเรนเชียล ในการอธิบายความสัมพันธ์ และลัมพ์โมเดล (Lump Model) ซึ่งจะใช้สมการอดิเนริติฟเฟอเรนเชียลในการอธิบายความสัมพันธ์ ดิซทริบิวทโมเดลจะมีความซับซ้อนยุ่งยากในการแก้ปัญหา แต่ลัมพ์โมเดลจะง่ายต่อการคำนวณและแก้ปัญหา จึงเหมาะที่จะนำมาใช้ในการแก้ปัญหามากกว่า (Correa และ Marchetti, 1987)

ลัมพ์โมเดลของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแสดงดังรูป 3.1 แต่ละหน่วย (Cell) จะมีการแลกเปลี่ยนพลังงานโดยมีสมมติฐานดังนี้

1. ในแต่ละหน่วยจะเปรียบเสมือนถึงผสมแลกเปลี่ยนความร้อน 2 ถึง ที่ถูกแยกด้วยพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน  $A(i)$
2. ของไหลภายในถึงผสมมีอุณหภูมิเท่ากันหมด
3. มีพื้นที่แลกเปลี่ยนพลังงานเท่ากับ  $A(i)$  เท่านั้น ไม่มีการสูญเสียพลังงานสู่ภายนอก
4. คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีคงที่ตลอดทุก ๆ หน่วย
5. ทุก ๆ หน่วยมีพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนเท่ากัน
6. ไม่มีการผสมกันของของไหลในแต่ละหน่วย
7. ของไหลที่พิจารณาเป็นของไหลดังนั้นกำหนดให้ไม่มีการเปลี่ยนแปลงความดัน



รูป 3.1 ลัมพีโมเดล



รูป 3.2 หน่วยโมเดล

8. คุณหมุขของผนังด้านทอภายในจะเท่ากับคุณหมุขเฉลี่ยระหว่างของไหลด้านทอในและของไหลด้านทอนอก และคุณหมุขของผนังด้านทอนอกจะเท่ากับคุณหมุขของของไหลที่ไหลอยู่ในทอนอก

รูป 3.2 แสดงแบบจำลองของหน่วยของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการไหลแบบสวนทาง สมดุลพลังงานของหน่วย  $i$  ในด้านกระแสน้ำร้อนจะแสดงได้ดังสมการ 3.8 และกระแสเย็นจะแสดงได้ดังสมการ 3.9 (Correa และ Marchetti, 1987)

$$\rho_h C_{ph}^*(i) V_h(i) \frac{dT_h(i)}{dt} = W_h T_h(i-1) - W_h T_h(i) + UA(i) \Delta T \quad (3.8)$$

$$\rho_c C_{pc}^*(i) V_c(i) \frac{dT_c(i)}{dt} = W_c T_c(i+1) - W_h T_h(i) - UA(i) \Delta T \quad (3.9)$$

โดย  $C_p^*(i) = C_p [1 + x(i)] \quad (3.10)$

โดย  $V(i)$  คือปริมาตรของหน่วย  $i$  ,  $\rho$  คือความหนาแน่น และ  $x(i)$  คือ พารามิเตอร์ที่อธิบายส่วนที่เป็นโลหะในแต่ละหน่วย (แสดงการคำนวณในภาคผนวก ข) จากสมการที่ 3.8 และ 3.9 จะคำนวณค่าคงที่ของการหน่วงเวลา ( $\tau$ ) ของแต่ละหน่วยได้ดังสมการที่ 3.11 และ 3.12

$$\tau_h(i) = \frac{\rho_h C_{ph}^* V_h(i)}{W_h + UA(i)} \quad (3.11)$$

$$\tau_c(i) = \frac{\rho_c C_{pc}^* V_c(i)}{W_c + UA(i)} \quad (3.12)$$

### 3.3 พารามิเตอร์ในแบบจำลอง

#### 3.3.1 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม

Mathisen และ Morari (1994) กล่าวว่า การที่จะให้ปริมาณความร้อนในการแลกเปลี่ยนเท่ากันระหว่างลัมพ์โมเดล และดิซทริบิวทโมเดล สัมประสิทธิ์การแลกเปลี่ยนความร้อนรวมของลัมพ์โมเดล ( $U$ ) จะต้องมีค่ามากกว่าสัมประสิทธิ์การแลกเปลี่ยนความร้อนรวมที่ใช้ในดิซทริบิวทโมเดล ( $U_{lm}$ ) (ความแตกต่างจะขึ้นกับจำนวนหน่วยที่แบ่งออก ( $N$ ) ถ้า  $N$  มีค่าน้อย  $U$  ก็จะมีค่ามากกว่าค่า  $U_{lm}$  มากกว่าที่  $N$  มากมาก สำหรับจำนวน  $N$  ที่แตกต่างกันจะต้องปรับ  $U$  เพื่อให้มีค่าอุณหภูมิต่ำกว่าคงตัวเท่ากัน ซึ่งจะสามารถคำนวณค่า  $U$  ได้จากสมการ 3.13

$$N = \frac{N_{Tu}}{1 - U_{lm}/U} \quad (3.13)$$

### 3.3.2 จำนวนหน่วยที่แบ่งในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

Mathisen และ Morari (1994) เสนอให้มีการแบ่งเครื่องแลกเปลี่ยนออกเป็นหน่วยย่อย โดยคำนวณจากจำนวนแผ่นกั้น (Baffles) ตามตาราง 3.1 จากสมการที่ 3.13 จะเห็นได้ว่าจำนวนหน่วยที่แบ่งในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะต้องมากกว่า  $N_{Tu}$

ตาราง 3.1 จำนวนหน่วยที่แบ่งในลัมพีโมเดล

	จำนวนน้อยที่สุดสำหรับแสดงสภาวะคงตัว	จำนวนน้อยที่สุดสำหรับแสดงพลวัต	จำนวนมากที่สุด
ลัมพีโมเดล	$N_{Tu}$	2	$(N_B+1)N_P$

โดยที่  $N_B$  คือจำนวนแผ่นกั้น และ  $N_P$  คือจำนวนเที่ยวการไหลในเซลล์

### 3.3.3 ผลต่างของอุณหภูมิ

Correa และ Marchetti (1987) ได้เสนอให้ใช้ผลต่างของอุณหภูมิ ( $\Delta T$ ) ในรูปผลต่างของอุณหภูมิขาออก ในสมการที่ 3.8 และ 3.9

$$\Delta T = T_o^h(i) - T_o^c(i) \quad (3.14)$$

Papastratos และ Depeyre (1993) ได้เสนอให้ใช้ผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยเชิงล็อกการริธึม (Logarithmic Mean Temperature Difference, LMTD) จะทำให้ได้ผลที่ถูกต้องและแม่นยำกว่าการใช้ผลต่างของอุณหภูมิขาออก

$$\Delta T = \frac{(T_i^h - T_o^c) - (T_o^h - T_i^c)}{\ln \frac{(T_i^h - T_o^c)}{(T_o^h - T_i^c)}} \quad (3.15)$$

การใช้ผลต่างอุณหภูมิจากสมการที่ 3.15 แทนในสมการ 3.8 และ 3.9 จะเห็นได้ว่าผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยเชิงล็อกการริธึมไม่สามารถคำนวณได้เมื่อมีผลต่างอุณหภูมิแต่ละด้านมีขนาด

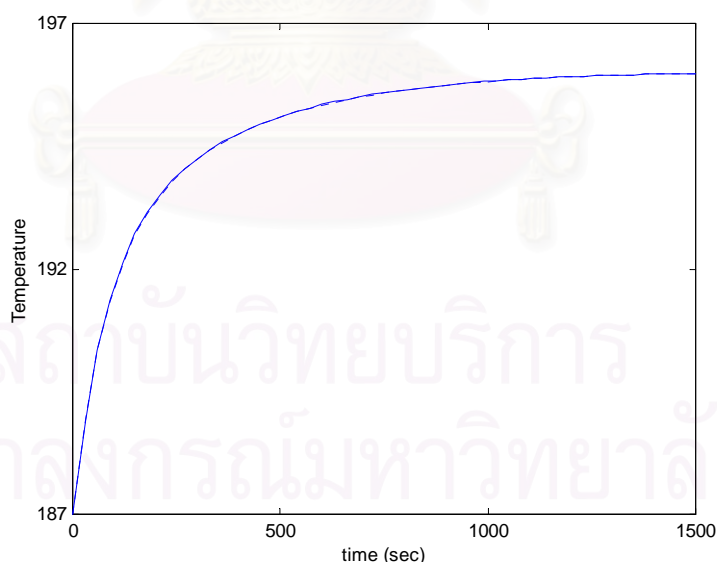
เท่ากัน ในปี 1987 Chen ได้เสนอความสัมพันธ์ที่ใช้เพื่อประมาณค่าผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยเชิงล็อกกา-ริธึมดังสมการที่ 3.16

$$\Delta T \approx \left[ \left( \frac{(T_i^h - T_o^c) + (T_o^h - T_i^c)}{2} \right) ((T_i^h - T_o^c)(T_o^h - T_i^c)) \right]^{\frac{1}{3}} \quad (3.16)$$

การใช้การประมาณค่าของ Chen ตามสมการที่ 3.16 จะใช้ได้เมื่อผลต่างของอุณหภูมิของแต่ละด้านของหน่วยมีค่าเป็นบวก แต่อย่างไรก็ตามอาจจะมีบางช่วงของการแลกเปลี่ยนที่เกิดผลต่างที่เป็นค่าลบเกิดขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้การคำนวณโดยใช้สมการที่ 3.16 ใช้ไม่ได้ผล ดังนั้นจึงใช้ผลต่างของอุณหภูมิที่เป็นค่าเฉลี่ยของผลต่างของแต่ละด้านของหน่วยแทน

$$\Delta T = \frac{(T_i^h - T_o^c) + (T_o^h - T_i^c)}{2} \quad (3.17)$$

เปรียบเทียบการใช้โมเดลตามสมการที่ 3.16 และ 3.17 แสดงได้ดังรูป 3.3 ซึ่งจะเห็นได้ว่าไดนามิกส์ของโมเดลทั้งสองแบบจะเหมือนกัน และอุณหภูมิที่สภาวะคงตัวก็มีค่าใกล้เคียงกันมาก



รูป 3.3 การเปรียบเทียบโมเดลที่ใช้สมการ 3.17 (เส้นประ) และสมการ 3.16 (เส้นทึบ)

### 3.3.4 ลักษณะของของไหล

พลวัตของการแลกเปลี่ยนของแก๊สและของเหลวจะแตกต่างกัน เหตุผลที่สำคัญเนื่องมาจากความหนาแน่น ความหนาแน่นของแก๊สจะมีค่าน้อยกว่าของไหล ซึ่งจะให้อัตราการไหลเชิงปริมาตรมากกว่าและมีเวลาที่อยู่ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนน้อยกว่า (Residence Times) การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขาเข้าของการแลกเปลี่ยนของแก๊สจะเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลไปด้วย ซึ่งจะมีผลอย่างรวดเร็วต่ออุณหภูมิขาเข้าของกระแสด้านเดียวกันมากกว่าของเหลว ดังนั้นจะทำให้ผลการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงในช่วงเริ่มต้นของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของแก๊สจะเร็วกว่าของไหล (Mathisen และ Morari, 1994) แต่ผลการตอบสนองในช่วงท้ายจะช้าลงเนื่องมาจากผลเชิงพลวัตของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเอง ซึ่งจะเห็นได้ว่าความแตกต่างกันระหว่างแก๊สและของเหลวจะมีผลอย่างมากต่อผลการตอบสนองของระบบ ในงานวิจัยนี้จะพิจารณาเพียงส่วนของของเหลวเท่านั้นไม่ได้พิจารณาแก๊ส

### 3.3.5 ความต้านทานของผนัง

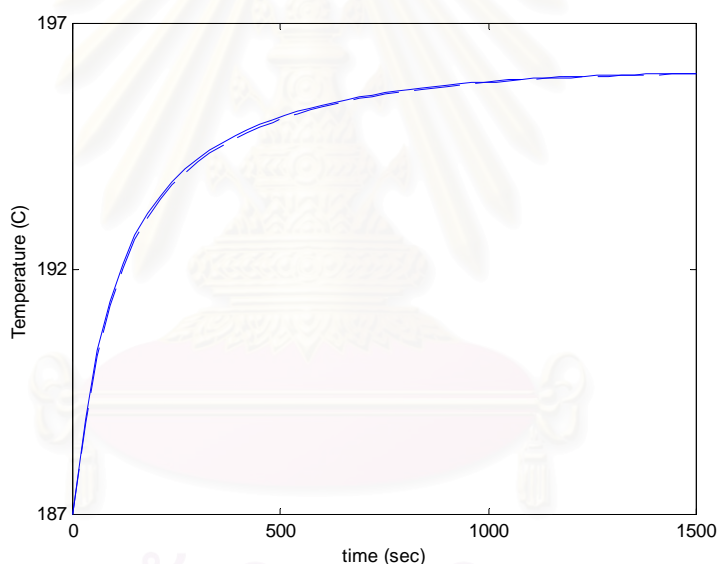
Correa และ Marchetti (1987) ได้เสนอแบบจำลองของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโดยพิจารณาความต้านทานในการแลกเปลี่ยนความร้อนของผนัง และคำนวณออกมาในรูป  $C_p^*$  Mathisen และ Morari (1994) กล่าวว่า สำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งสารภายในเครื่องเป็นของเหลว สามารถตัดความต้านทานในการถ่ายโอนพลังงานของผนังออกได้ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบผลการชิมูเลชันเมื่อใช้ค่า  $C_p^*$  และ  $C_p$  ในสมการ 3.8 และ 3.9 (แสดงผลดังรูป 3.4) พบว่าไม่มีความแตกต่างระหว่างการใช้  $C_p^*$  และ  $C_p$  ดังนั้นสรุปได้ว่าสำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของของเหลวสามารถตัดความต้านทานในการแลกเปลี่ยนความร้อนของผนังออกได้ ดังนั้นในสมการ 3.8 และ 3.9 จะใช้  $C_p$  แทน  $C_p^*$

### 3.3.6 ลักษณะการไหลของของไหลภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

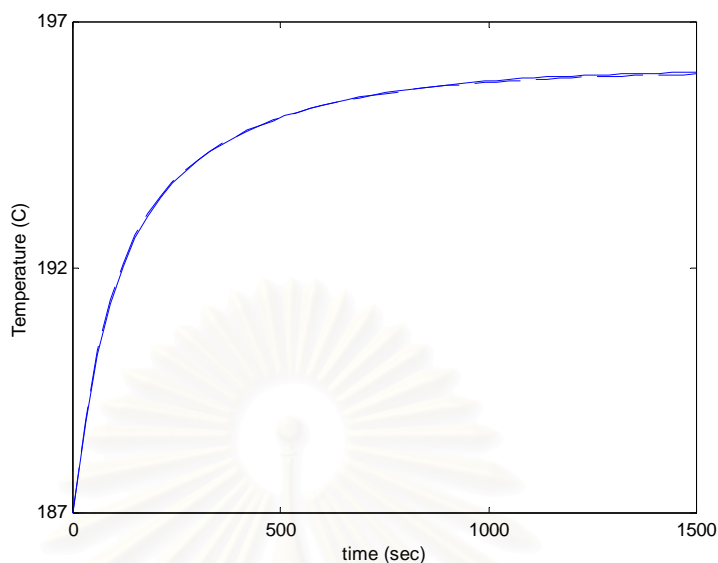
ศ.ดร.วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล (2536) กล่าวว่า อุตสาหกรรมส่วนมากจะนิยมเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่เป็นแบบเชลล์และทิวป์ (Shell and Tube Heat Exchanger) Mathisen



และ Morari (1994) กล่าวว่า ไม่มีความแตกต่างของพฤติกรรมเชิงพลวัตของเครื่องแลกเปลี่ยน ความร้อนระหว่างการไหล 1 เที้ยวในเซลล์ (1-1 Heat Exchanger) และ 2 เที้ยวในเซลล์ (1-2 Heat Exchanger) เมื่อเปรียบเทียบผลการซิมูเลชันจะพบว่าผลตอบสนองของอุณหภูมิระหว่างการไหล 1 เที้ยวในเซลล์ จะเหมือนกับการไหล 2 เที้ยวในเซลล์ ดังแสดงในรูป 3.5 ซึ่งจะเห็นได้ว่า ไม่มีความแตกต่างในการพิจารณาการควบคุมระหว่างการไหล 1 เที้ยวเซลล์ และ การไหล 2 เที้ยวในเซลล์ ในงานวิจัยนี้จะใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ 1 ท่อใน 1 เซลล์ เพื่อสะดวกต่อการเขียนโปรแกรมในการจำลองพฤติกรรม



รูป 3.4 ผลการเปรียบเทียบระหว่างการไหลใช้  $C_p^*$  (เดินประ) และ  $C_p$  (เดินทึบ)



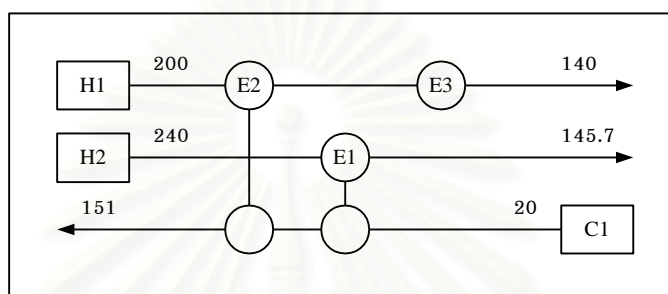
รูป 3.5 เปรียบเทียบผลการตอบสนองของอุณหภูมิระหว่างการไหล 1 เที้ยวเซลล์ (เส้นประ) และการไหล 2 เที้ยว 1 เซลล์ (เส้นทึบ)

### 3.4 พฤติกรรมของข่ายงานที่สภาวะคงตัว

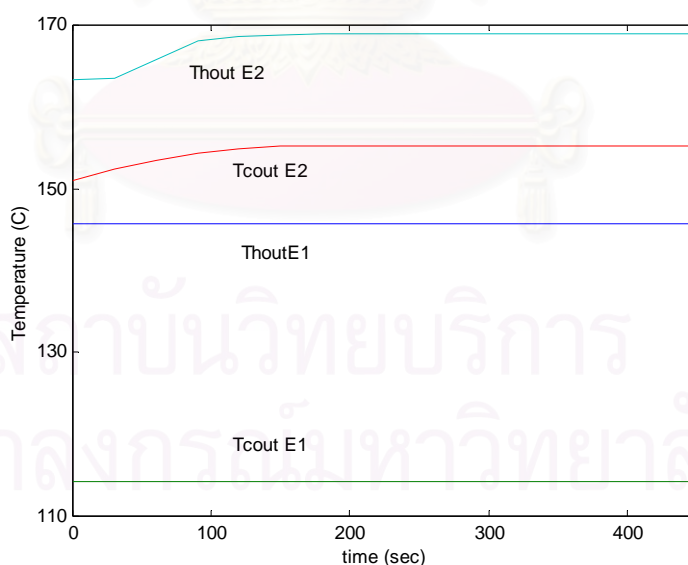
#### 3.4.1 อุณหภูมิขาเข้าเปลี่ยนแปลง

เมื่อพิจารณาสมการ 3.3 จะพบว่า  $\varepsilon$  ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขาเข้าจะเป็นการเปลี่ยนแปลงแบบเชิงเส้นต่ออุณหภูมิขาออกของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน จากสมการที่ 3.6 เมื่อพิจารณาจากค่าของ  $\varepsilon$  จะเห็นว่าค่าของ  $\varepsilon$  จะมีผลต่อค่าอุณหภูมิขาออกดังนี้ เมื่อ  $\varepsilon$  มีค่าประมาณ 0 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขาเข้าของกระแสด้านร้อนจะมีผลต่ออุณหภูมิขาออกด้านร้อนเพียงอย่างเดียว แต่ถ้า  $\varepsilon$  มีค่าประมาณ 1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขาเข้าของกระแสด้านร้อนจะมีผลต่ออุณหภูมิขาออกด้านเย็นเพียงอย่างเดียว ซึ่งจะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขาเข้าของกระแสนี้จะมีผลต่ออุณหภูมิขาออกทั้ง 2 กระแสหรืออาจจะมีเพียงแค่กระแสเดียว หรืออาจจะมีผลเลยก็เป็นได้

เมื่อพิจารณาสมการ 3.3 จะพบว่า ค่า  $\varepsilon$  จะมีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 1 ซึ่งจะไม่สามารถเปลี่ยนแปลงเครื่องหมายของสมการได้ ดังนั้นถ้าอุณหภูมิขาเข้าเพิ่มก็จะส่งผลทำให้อุณหภูมิขาออกเพิ่มไปด้วยหรือไม่ก็ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงใดๆ (ขึ้นอยู่กับค่าของ  $\varepsilon$ ) พิจารณารูป 3.6 เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขาเข้าของกระแสน้ำ H1 จะได้ค่าการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่สภาวะคงตัว ดังรูป 3.7



รูป 3.6 ข่ายงานที่มีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนต่อแบบอนุกรม



รูป 3.7 ผลของอุณหภูมิของข่ายงานรูป 3.6 เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขาเข้าของกระแสน้ำ H1 เพิ่มขึ้น

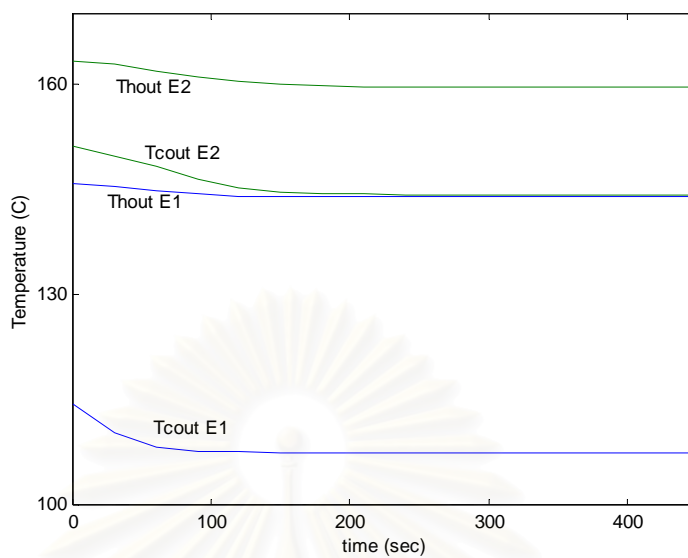
**ทฤษฎี 3.1** การเพิ่ม (ลด) อุณหภูมิขาเข้าภายในข่ายงานจะทำให้ทุก ๆ อุณหภูมิภายในข่ายงานมีค่าเพิ่มขึ้นหรือไม่มีการเปลี่ยนแปลง (ลดลงหรือไม่มีการเปลี่ยนแปลง) (Glemmestad และคณะ, 1996)

### 3.4.2 อัตราการไหลเปลี่ยนแปลง

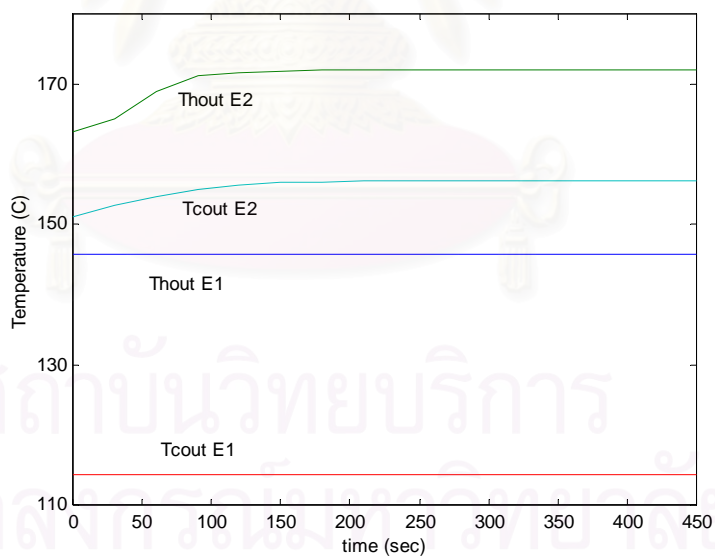
สมการที่ 3.3 จะเห็นได้ว่าค่า  $\varepsilon$  เป็นฟังก์ชันกับอัตราการไหล ดังนั้นเมื่ออัตราการไหลเปลี่ยนแปลงจะทำให้เกิดผลไม่เชิงเส้นต่ออุณหภูมิขาออก เมื่อพิจารณาข่ายงานที่มีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนต่ออนุกรมดังรูปที่ 3.6 เมื่อกระแส C1 มีการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลเพิ่มขึ้น การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขาออกของข่ายงานจะแสดงได้ดังรูป 3.8 และเมื่อกระแส H1 มีการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลเพิ่มขึ้น การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขาออกของข่ายงานจะแสดงได้ดังรูป 3.9 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของกระแสร้อนเพิ่มขึ้นจะทำให้อุณหภูมิภายในข่ายงานมีค่าเพิ่มขึ้นและบางค่าไม่มีการเปลี่ยนแปลง ส่วนการเพิ่มขึ้นของกระแสเย็นจะให้ผลที่ตรงกันข้าม

**ทฤษฎี 3.2** เมื่ออัตราการไหลของกระแสร้อน (เย็น) เพิ่มขึ้น จะทำให้อุณหภูมิทุกจุดในข่ายงานมีค่าเพิ่มขึ้นหรือไม่มีการเปลี่ยนแปลง (ลดลงหรือไม่มีการเปลี่ยนแปลง) (Glemmestad และคณะ, 1996)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูป 3.8 ผลของอุณหภูมิของข่ายงานรูป 3.6 เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของกระแสด C1 เพิ่มขึ้น



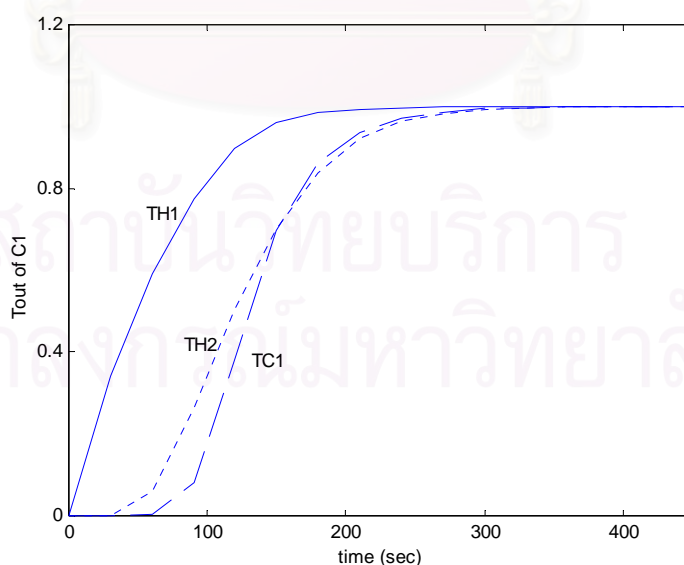
รูป 3.9 ผลของอุณหภูมิของข่ายงานรูป 3.6 เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของกระแสด H1 เพิ่มขึ้น

### 3.5 พฤติกรรมเชิงพลวัต

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ส่งผ่านพลังงานจากกระแสน้ำไปยังอีกกระแสน้ำ ซึ่งไม่มีการสร้างหรือใช้พลังงานแต่อย่างใด ดังนั้นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจึงเป็นอุปกรณ์ที่มีวงเปิดที่เสถียร (Open – loop Stable)

#### 3.5.1 อุณหภูมิเปลี่ยนแปลง

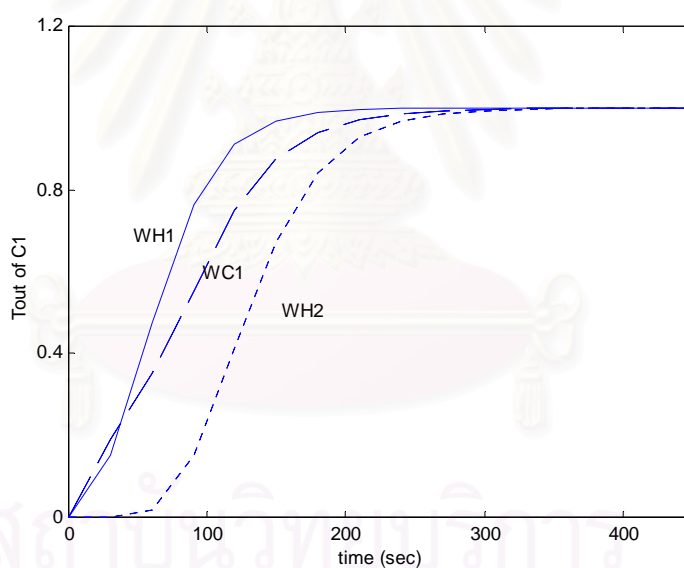
ปกติเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้ในอุตสาหกรรมจะเป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการไหลแบบสวนทางเพื่อให้เกิดการแลกเปลี่ยนพลังงานได้ดียิ่งขึ้น เมื่อถึงผลเชิงพลวัตของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขาเข้าต่ออุณหภูมิขาออกของกระแสน้ำเดียวกัน จากช่ายงานรูป 3.6 ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขาออกของกระแสน้ำ C1 ต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขาเข้าของกระแสน้ำ C1 และต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขาเข้า H1 แสดงได้ดังรูป 3.10 ซึ่งจะเห็นได้ว่าผลการตอบสนองของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขาเข้าของกระแสน้ำเดียวกันจะช้ากว่าผลของการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขาเข้าของกระแสน้ำคู่แลกเปลี่ยน (มีเวลาดีเลย์) สาเหตุเนื่องมาจากการสะสมของพลังงานและมวลสาร



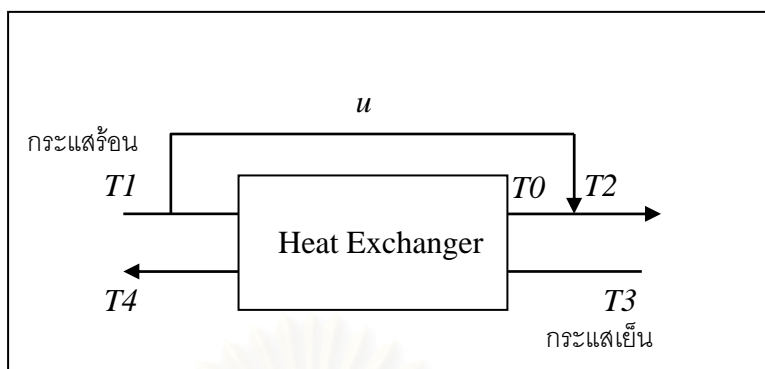
รูป 3.10 ผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขาเข้าต่ออุณหภูมิขาออกของกระแสน้ำ C1 ในช่ายงานรูป 3.6

### 3.5.2 อัตราการไหลเปลี่ยนแปลง

สำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ต่ออนุกรมกันการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขาออกต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหล จะเกิดการเปลี่ยนแปลงในทันทีทันใด และผลการตอบสนองจะค่อย ๆ ซ้ำลงในช่วงหลังเนื่องมาจากผลของการแลกเปลี่ยนพลังงานภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน จากซ้ายงานรูป 3.6 การเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของ C1 จะเกิดผลการตอบสนองต่ออุณหภูมิขาออกทันทีทันใด และผลการตอบสนองจะค่อย ๆ ซ้ำลง เมื่อเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิขาออกกับการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของ H2 จะเห็นได้ว่า ผลจากการเปลี่ยนแปลงของ H2 จะช้ากว่า แต่ผลจากการเปลี่ยนแปลง H1 จะช้ากว่าในช่วงแรกแต่จะเข้าสู่สภาวะคงตัวเร็วกว่าดังแสดงในรูป 3.11



รูป 3.11 ผลการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลต่ออุณหภูมิขาออกของกระแส C1 ในซ้ายงานรูป 3.6



รูป 3.12 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการบายพาส

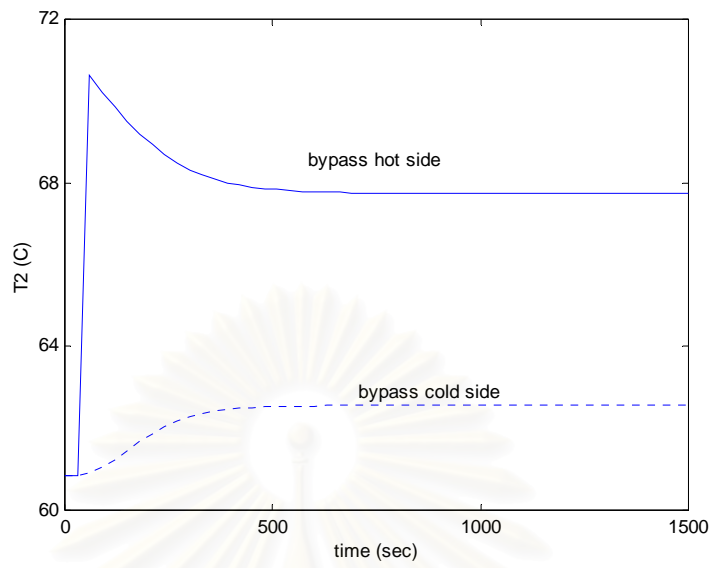
### 3.6 ผลของการปรับกระแสบายพาส

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการบายพาสแสดงในรูป 3.12 สมดุลพลังงานที่จุดที่รวมกระแสบายพาสกับกระแสที่ออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแสดงดังสมการ 3.18

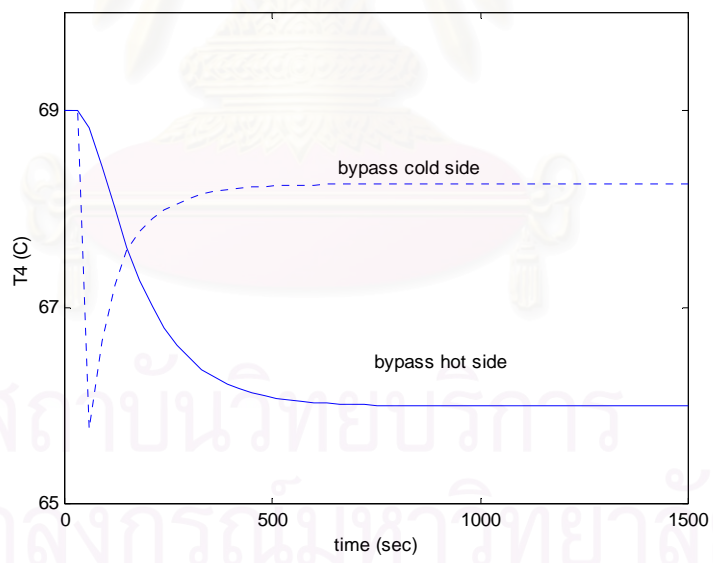
$$T2 = (1-u)T0 + uT1 \quad (3.18)$$

ผลกระทบเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนการบายพาส ( $u$ ) ต่ออุณหภูมิขาออกด้านที่มีการบายพาส ( $T2$ ) คือ 1) ผลเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอัตราไหล จากสมการ 3.18 จะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลง  $u$  จะส่งผลโดยตรงและเกิดผลต่ออุณหภูมิ  $T2$  ทันทีทันใด และ 2) ผลเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ( $T0$ ) ซึ่งผลอันนี้จะเกิดช้ากว่าผลในข้อ 1 เนื่องจากพลวัตของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ผลกระทบในข้อ 1) เป็นผลกระทบที่เกิดขึ้นทันทีทันใด จึงเป็นผลกระทบที่มีความสำคัญ ดังนั้นผลการตอบสนองจะเกิดโอเวอร์ชูทในช่วงต้น (เนื่องจากการเปลี่ยนแปลง  $u$ ) และจะค่อย ๆ เปลี่ยนแปลงไปจนเข้าสู่สภาวะคงตัว (เนื่องจากการเปลี่ยนแปลง  $T0$ ) ดังแสดงในรูป 3.13 (เส้นที่บ)





รูป 3.13 ผลการตอบสนองของอุณหภูมิ  $T_2$  ต่อการบายพาสด้านร้อนและด้านเย็น



รูป 3.14 ผลการตอบสนองของอุณหภูมิ  $T_4$  ต่อการบายพาสด้านร้อนและด้านเย็น

ผลกระทบเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนการบายพาส ( $u$ ) ต่ออุณหภูมิขาออกด้านตรงข้ามกับกระแสที่มีการบายพาส ( $T4$ ) จะเหมือนกับผลการตอบสนองเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของกระแสคู่แลกเปลี่ยน คือผลการตอบสนองจะเกิดขึ้นทันทีทันใด แต่จะไม่เกิดโอเวอร์ชูทและค้อย ๆ ปรับตัวจนเข้าสู่สภาวะคงตัว ดังแสดงในรูป 3.14 (เส้นที่บ)

การเพิ่มอัตราส่วนการบายพาสจะเป็นการลดอัตราการไหลผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งจะลดปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทภายในเครื่อง ดังนั้นจะทำให้อุณหภูมิขาออกของด้านกระแสร้อนเพิ่มขึ้นและอุณหภูมิขาออกของด้านกระแสน้ำลดลง ดังแสดงในรูป 3.13 และ 3.14 แต่ปริมาณการเปลี่ยนแปลงจะขึ้นอยู่กับว่าปริมาณอัตราการไหลก่อนมีการบายพาสเป็นอย่างไร จากรูป 3.12 ถ้าอัตราการไหลของกระแสน้ำมีปริมาณมากกว่ากระแสร้อน จากผลการชี้มูลขึ้นในรูป 3.13 และ 3.14 จะเห็นได้ว่าเกน (Gain) ของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนการบายพาสเมื่อบายพาสด้านกระแสที่มีอัตราการไหลน้อย (จากรูป 3.13 และ 3.14 คือเส้นที่บ) จะมากกว่าเกนของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนการบายพาสเมื่อบายพาสด้านกระแสที่มีอัตราการไหลมาก (จากรูป 3.13 และ 3.14 คือเส้นที่ป)

## บทที่ 4

### กฎการออกแบบการควบคุมข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

การควบคุมข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโดยปกติทั่วไป จะใช้เพียงเครื่องควบคุมแบบป้อนกลับ โครงสร้างการควบคุมที่เหมาะสมจะสำคัญต่อประสิทธิภาพของการควบคุม โดยปกติการควบคุมข่ายงานจะใช้กระแสบายพาสในการควบคุม ลักษณะโครงสร้างของข่ายงานบางชนิดจะต้องใช้หน่วยออสตรึมร่วมกับเครื่องควบคุมแบบป้อนล่วงหน้า ในการควบคุมการติดตั้งกระแสบายพาสที่เหมาะสมจะช่วยให้ผลการตอบสนองของระบบดีขึ้น แต่บางกรณีก็จะต้องมีการใช้เครื่องควบคุมแบบป้อนล่วงหน้าร่วมกับเครื่องควบคุมแบบป้อนกลับ ข่ายงานที่มีการแยกของกระแสสามารถใช้สัดส่วนการแยกในการควบคุมได้ เพื่อช่วยประหยัดเงินลงทุนและจะช่วยให้ผลการตอบสนองดีขึ้น งานวิจัยในบทนี้จะเสนอกฎในการพิจารณาการออกแบบโครงสร้างการควบคุมกฎที่เสนอนี้จะพิจารณาจากโครงสร้างข่ายงานที่เป็นอยู่ร่วมกับเทคนิคการส่งผ่านความแปรปรวนโดยกฎที่ได้สามารถนำไปใช้ในการออกแบบโครงสร้างการควบคุมที่เหมาะสมได้

#### 4.1 บทนำ

การควบคุมข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีจุดประสงค์เพื่อควบคุมอุณหภูมิเป้าหมายของข่ายงานและเพื่อให้ประหยัดการใช้พลังงานจากหน่วยยูลิติให้มากที่สุด จากงานวิจัยที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่างานที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนและ ฮีวริสติกต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมยังมีจำนวนน้อย และยังมีทางเลือกต่าง ๆ ให้พิจารณาอีกมากมาย Marselle และคณะ (1982), Calandranis และ Stephnopoulus (1988) และ Mathisen และคณะ (1992) เพิ่มเติมได้เสนอฮีวริสติกต่าง ๆ ในการพิจารณาการควบคุมข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน แต่จากงานวิจัยนี้ยังมีประเด็นที่น่าสนใจ เช่นการเลือกการติดตั้งกระแสบายพาส การใช้สัดส่วนการแยกในการควบคุมแทนการใช้กระแสบายพาส การใช้

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่เป็นอัสตริ่มในการควบคุม และการควบคุมเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีอุณหภูมิขาออกเป็นตัวแปรควบคุมทั้งคู่

งานวิจัยในบทนี้จะรวบรวมฮิวริสติกที่ได้เสนอมาจากการวิจัยที่ผ่านมา และเสนอฮิวริสติกใหม่ที่พัฒนามาจากกระบวนการจับคู่ภายในข่ายงานและเทคนิคการส่งผ่านความแปรปรวน (Wongsri, 1990) สรุปเป็นกฎในการพิจารณาการออกแบบ ในการทดสอบกฎต่าง ๆ จะใช้ลัมพ์โมเดลดังแสดงในบทที่ 3

#### 4.2 นิยามของเทอมที่ใช้ในงานวิจัย

การคำนวณความแปรปรวน และการออกแบบโครงสร้างการควบคุม จะมีการพารามิเตอร์ และนิยามดังต่อไปนี้

**นิยาม 4.1 ความแปรปรวนจากอุณหภูมิ (Temperature Disturbance,  $D^\theta$ )** เป็นค่าความแปรปรวนเนื่องจากอุณหภูมิขาเข้า

$$D^\theta = W(T_{supply,max} - T_{supply,min}) \quad (4.1)$$

**นิยาม 4.2 ความแปรปรวนจากอัตราการไหล (Flowrate Disturbance,  $D^\omega$ )** คือค่าความแปรปรวนของผลคูณของอัตราการไหลกับความจุความร้อนจำเพาะของกระแส

$$D^\omega = (W_{max} - W_{min})(T_{target} - T_{supply}) \quad (4.2)$$

**นิยาม 4.3 ความแปรปรวนบวก (Positive Disturbance,  $D^+$ )** คือความแปรปรวนที่ทำให้ความร้อนของกระแสน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น เช่น กรณีอุณหภูมิขาเข้าของกระแสร้อนถูกรบกวนโดยมีค่าสูงกว่าที่ภาวะปกติ หรือ อุณหภูมิขาเข้าของกระแสน้ำเย็นมีค่าที่เย็นต่ำกว่าค่าปกติ ปริมาณความร้อนที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากความแปรปรวนนี้ สามารถที่จะถูกกำจัดไปได้ โดยส่งไปที่กระแสซึ่งมีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจากเครื่องยูลิตีบบริการอยู่ (กระแสน้ำที่ติดตั้งฮีตเตอร์ หรือ คูลเลอร์) ถ้าเกิดความแปรปรวนบวกในกระแสร้อน จะทำให้เพิ่มปริมาณความร้อนที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนของคูลเลอร์ แต่จะลดปริมาณความร้อนที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนของฮีตเตอร์ ในขณะที่ความแปรปรวน

บวกของกระแสเย็นจะทำให้เพิ่มปริมาณความร้อนที่ใช้ของฮีตเตอร์ แต่จะลดปริมาณความร้อนของคูลเลอร์

**นิยาม 4.4 ความแปรปรวนลบ (Negative Disturbance,  $D^-$ )** คือความแปรปรวนที่ทำให้ความร้อนของกระแสมีค่าลดลงเช่น กรณีอุณหภูมิขาเข้าของกระแสร้อนถูกรบกวนโดยมีค่าต่ำกว่าที่ภาวะปกติ หรืออุณหภูมิขาเข้าของกระแสเย็นมีค่าที่เย็นสูงกว่าค่าปกติ ความแปรปรวนลบถ้าเกิดในกระแสร้อน จะทำให้ลดปริมาณความร้อนของคูลเลอร์ลง แต่จะเพิ่มปริมาณความร้อนของฮีตเตอร์ ในขณะที่ความแปรปรวนลบของกระแสเย็น จะทำให้ลดปริมาณความร้อนที่ใช้ของฮีตเตอร์ แต่จะเพิ่มปริมาณความร้อนของคูลเลอร์ให้สูงขึ้น

### 4.3 เป้าหมายของข่างานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

ข่างานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะประกอบไปด้วยชุดของกระแสร้อนที่ต้องการลดอุณหภูมิไปยังอุณหภูมิเป้าหมายและชุดของกระแสเย็นที่ต้องการเพิ่มอุณหภูมิไปยังค่าเป้าหมาย ซึ่งการนำมาแลกเปลี่ยนกันของกระแสร้อนและกระแสเย็นในข่างานจะมีจุดประสงค์เพื่อให้มีการนำกลับมาใช้อีกครั้งของพลังงาน โดยจะต้องมีค่าพลังงานกลับคืนมากที่สุด (MER) เพื่อช่วยประหยัดการใช้พลังงานจากหน่วยยูลิติดี

ค่าพลังงานกลับคืนมากที่สุด คือ พลังงานความร้อนมากที่สุดที่กระแสกระบวนการใช้แลกเปลี่ยนความร้อนกันเอง (ใช้พลังงานจากยูลิติดีน้อยที่สุด) โดยสามารถหาได้จากไดอะแกรมอุณหภูมิและเอนทัลปี (Linnhoff และ Chen) หรือวิธีตารางปัญหา ซึ่งนอกจากจะหาค่าพลังงานกลับคืนมากที่สุดได้แล้วยังสามารถหาอุณหภูมิพินช์ได้อีกด้วย อุณหภูมิพินช์มีความสำคัญที่จะแบ่งการแก้ปัญหาของข่างานออกเป็นข่างานย่อย คือข่างานย่อยด้านร้อนที่จะใช้หน่วยยูลิติดีให้ความร้อน (ฮีตเตอร์) เข้าไปในข่างาน และข่างานย่อยด้านเย็นที่จะใช้หน่วยยูลิติดีดึงความร้อน (คูลเลอร์) เข้าไปในข่างาน การแก้ปัญหาของข่างานย่อยทั้งสองจะเป็นอิสระต่อกันทั้งด้านการออกแบบ และการควบคุม ข่างานที่สมบูรณ์จะได้จากการนำข่างานย่อยทั้งสองมารวมกัน แต่ก็ไม่จำเป็นเสมอไปที่ทุกข่างานจะต้องมีอุณหภูมิพินช์ บางข่างานอาจจะเป็นเพียงข่างานย่อยด้านใดด้านหนึ่งก็ได้ จากวิธีของเส้นโค้งคอมโพสิต (Composite Curves) ซึ่งพล็อตระหว่างค่า

ของอุณหภูมิและเอลทาลปีนั้น จุดที่เส้นโค้งของส่วนประกอบรวมระหว่างกระแสร้อนและกระแสเย็น มีระยะห่างในแกนอุณหภูมิเท่ากับความแตกต่างของอุณหภูมิต่ำสุด ( $\Delta T_{min}$ ) ก็คือ จุดพินช์

ตาราง 4.1 ข้อมูลสำหรับการคำนวณอุณหภูมิพินช์ (Wongsri,1990)

กระแส	W (kW/C)	อุณหภูมิขาเข้า (C)	อุณหภูมิขาออก (C)
H1	2.0	180	20
H2	2.0	150	40
C1	3.0	60	210
C2	2.6	30	105

ตาราง 4.2 ตารางปัญหาของข้อมูลในตาราง 4.1

กระแส				อุณหภูมิ (C)		$\Delta T$ (C)	ผลรวม W (kW/C)	ปริมาณโหลด (kW)		
				ร้อน	เย็น			ได้รับ	ในช่วง	ส่งต่อ
C1				220	210					
				180	170	40	-3	187	-120	97
C1		H1		150	140	30	-1	67	-30	37
C1		H1	H2	115	105	35	1	37	35	72
C1	C2	H1	H2	70	60	45	-1.6	72	172	0
		H1	H2	40	30	30	1.4	0	42	42
		H1		20	10	20	2	42	40	82

สำหรับข้อมูลจากตาราง 4.1 และกำหนดให้ความแตกต่างของอุณหภูมิที่น้อยที่สุดเท่ากับ  $10^{\circ}\text{C}$  สามารถเขียนเป็นตารางปัญหาได้ดังตาราง 4.2 จากตาราง 4.2 คำนวณปริมาณยูทิลิตี้ที่ร้อนน้อยที่สุดที่ใช้ในการสร้างข่ายงานเท่ากับ 187 kW และยูทิลิตี้เย็นน้อยที่สุดที่ใช้เท่ากับ 82 kW และอุณหภูมิพินช์คือ  $70/60^{\circ}\text{C}$

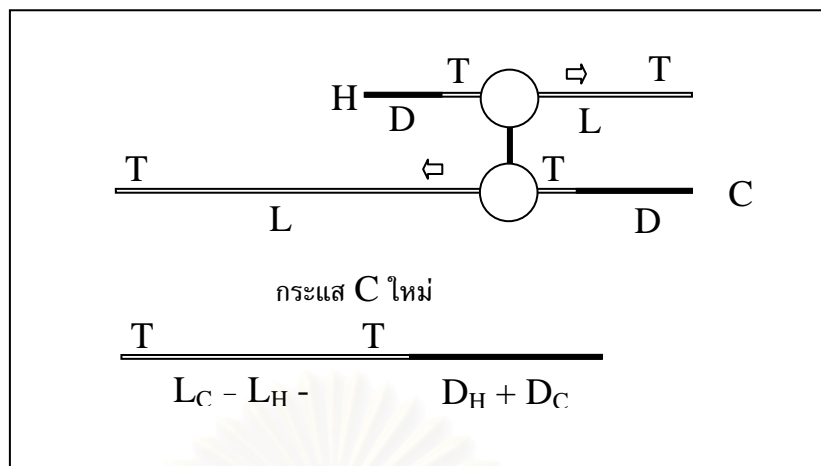
#### 4.4 การส่งผ่านความแปรปรวน

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและอัตราการไหลจะมองได้เหมือนเป็นกลุ่มของความแปรปรวนที่ข่ายงานไม่ต้องการ และต้องการกำจัดทิ้งไป โดยส่งไปยังแหล่งรับพลังงานของข่ายงาน ซึ่งมี 2 กรณีที่พิจารณา

- ส่งผ่านความแปรปรวนไปยังหน่วยยูทิลิตี้ภายในข่ายงานย่อยเดียวกัน (ข่ายงานย่อยด้านร้อนหรือเย็น) เพื่อที่จะคงค่าการกลับคืนพลังงานสูงสุด (MER) ความแปรปรวนที่ไม่ต้องการจะต้องส่งไปยังหน่วยยูทิลิตี้ภายในข่ายงานย่อยเดียวกับจุดที่เกิดความแปรปรวน
- ส่งผ่านความแปรปรวนไปยังหน่วยยูทิลิตี้ที่ไม่ได้อยู่ในข่ายงานย่อยเดียวกับที่เกิดความแปรปรวน (ข้ามข่ายงาน) การส่งผ่านความแปรปรวนกรณีนี้จะทำให้ไม่ได้ค่าการกลับคืนพลังงานสูงสุด ซึ่งจะพิจารณากรณีนี้เมื่อหน่วยยูทิลิตี้ภายในข่ายงานย่อยเดียวกับที่เกิดความแปรปรวนไม่สามารถจัดการกับความแปรปรวนได้

##### 4.4.1 เทคนิคการส่งผ่านความแปรปรวน (Wongsri, 1990)

Wongsri (1990) กล่าวว่า ความแปรปรวนของกระแสหนึ่งอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงภาวะ จะถูกส่งไปให้กับกระแสที่มีความร้อนหลงเหลือหลังจากการจับคู่ ซึ่งความแปรปรวนของกระแสที่มีความร้อนหลงเหลือนี้จะเท่ากับผลรวมความแปรปรวนของกระแสทั้งสอง แม้ว่าอีกกระแสหนึ่งจะไม่มี ความแปรปรวนแต่เมื่อถูกจับคู่กับอีกกระแสหนึ่งซึ่งมีความแปรปรวนแต่มีปริมาณความร้อนน้อยกว่าก็ตาม ผลสุดท้ายความแปรปรวนของกระแสที่สองก็จะถูกส่งไปให้กระแสแรก ดังแสดงในรูป 4.1



รูป 4.1 การส่งผ่านความแปรปรวน (Wongsri, 1990)

เมื่อพิจารณากระแสน้ำที่มีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพียงเครื่องเดียวภายในกระแสน้ำจะพบว่า กระแสน้ำนั้น ๆ ไม่มีความร้อนหลงเหลือแล้วหลังจากการแลกเปลี่ยน จากเทคนิคการส่งผ่านความแปรปรวนของ Wongsri (1990) เมื่อเกิดความแปรปรวนขึ้นในกระแสน้ำดังกล่าว ความแปรปรวนทั้งหมดจะต้องถูกส่งผ่านไปยังกระแสน้ำที่เป็นคู่แลกเปลี่ยน (กระแสน้ำที่ยังมีความร้อนหลงเหลือ) ทางเดียวในการที่จะส่งผ่านความแปรปรวนได้นั้น จะต้องทำการติดดูควบคุมที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีอยู่เพียงตัวเดียวในกระแสน้ำนั้น ๆ ดังนั้นในการออกแบบโครงสร้างการควบคุมควรเลือกที่จะพิจารณากระแสน้ำที่มีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวเดียวก่อน

**กฎข้อที่ 1** กระแสน้ำที่มีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพียงตัวเดียวจะถูกพิจารณาก่อนในการออกแบบการควบคุม

เนื่องจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ถ่ายเทพลังงานจากกระแสน้ำกระบวนการหนึ่งไปยังอีกกระแสน้ำที่นำมาแลกเปลี่ยน ซึ่งจะสามารถปรับได้เพียงโหลดของเครื่องเท่านั้น (โดยผ่านการปรับอัตราส่วนการบายพาส) ดังนั้นจึงสามารถควบคุมอุณหภูมิเป้าหมายขาออกของเครื่องได้เพียง 1 ค่าเท่านั้น

**กฎข้อที่ 2** ถ้ากระแสน้ำของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเครื่องหนึ่งได้ถูกใช้ปรับเพื่อควบคุมอุณหภูมิของกระแสน้ำหนึ่งแล้วนั้น จะไม่สามารถนำกระแสน้ำคู่แลกเปลี่ยนของกระแสน้ำนั้นมาปรับเพื่อควบคุมอุณหภูมิของกระแสน้ำอื่น ๆ ได้อีก



ตามหลักการของการส่งผ่านความแปรปรวนที่ว่า ความแปรปรวนทั้งหมดจะต้องถูกส่งไปยังเครื่องยูลิติ และภายในข่ายงานเครื่องยูลิติจะเป็นเครื่องสุดท้ายบนกระแส (อุณหภูมิของกระแสจะต้องได้ดังค่าเป้าหมาย) ดังนั้นสำหรับกระแสที่มีเครื่องยูลิติอยู่ด้วยจะใช้อัตราการไหลของยูลิติในการควบคุมกระแสนั้น ๆ และเพื่อให้แน่ใจว่าอุณหภูมิของกระแสได้ค่าตรงตามเป้าหมายที่กำหนด ดังนั้นควรจะต้องมีการติดตั้งบายพาสและลู่วควบคุมที่หน่วยสุดท้ายของกระแสเสมอ

**กฎข้อที่ 3 ต้องมีกระแสบายพาสและลู่วควบคุมที่หน่วยสุดท้ายของกระแสเสมอเพื่อคงอุณหภูมิเป้าหมาย**

**กฎข้อที่ 4 กระแสที่มีเครื่องยูลิติจะใช้อัตราการไหลของกระแสยูลิติ (ไอน้ำหรือน้ำหล่อเย็น) ในการปรับเพื่อควบคุมอุณหภูมิของกระแสนั้น ๆ**

#### 4.4.2 เส้นทางส่งผ่านความแปรปรวน (Disturbance Load Path)

Calandranis และ Stephanopolos (1988) กล่าวว่า ความแปรปรวนจะส่งผ่านไปในช่วงงานตามเส้นทางส่งผ่านความแปรปรวน โดยจะเริ่มต้นจากจุดที่เริ่มมีความแปรปรวนเข้ามาสู่ข่ายงานไปยังยูลิติ โดยเส้นทางส่งผ่านความแปรปรวนจะต้องมีจุดสิ้นสุดที่เครื่องยูลิติเท่านั้น เส้นทางส่งผ่านความแปรปรวนจะแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด

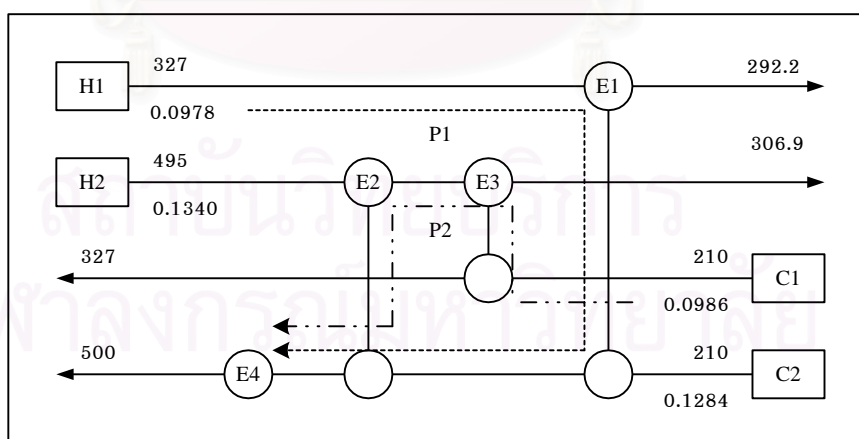
- เส้นทางส่งผ่านความแปรปรวนชนิดที่ 1 เส้นทางชนิดนี้ความแปรปรวนจะส่งผ่านไปภายในข่ายงานในลักษณะที่ขนานกับทิศทางการไหลของกระแสเพียงอย่างเดียว ซึ่งการส่งผ่านความแปรปรวนไปตามเส้นทางชนิดที่ 1 สามารถทำได้โดยใช้เพียงเครื่องควบคุมแบบป้อนกลับ

คำอธิบายที่ 1 จากข่ายงานรูป 4.2 เมื่ออุณหภูมิขาเข้าของกระแส H1 เปลี่ยนแปลงไปเป็น  $300^{\circ}\text{C}$  จะเกิดความแปรปรวนบวกขึ้น และเกิดเส้นทางส่งผ่านความแปรปรวนชนิดที่ 1 (P1) ในการส่งความแปรปรวนนี้ไปยังเครื่องยูลิติ การส่งความแปรปรวนจะปรับบายพาสรอบ E1 และ

E2 ด้วยเครื่องควบคุมแบบป้อนกลับเพื่อคงอุณหภูมิขาออกด้านกระแสน้ำร้อนของ E1 ที่  $292.2^{\circ}\text{C}$  และของ E2 ที่  $393.0^{\circ}\text{C}$

- เส้นทางการส่งผ่านความแปรปรวนชนิดที่ 2 เส้นทางชนิดนี้อาจจะมี 1 ช่วงที่มีการส่งผ่านของความแปรปรวนในลักษณะที่สวนทางกับทิศทางการไหลของกระแส ซึ่งการส่งผ่านความแปรปรวนไปตามเส้นทางชนิดที่ 2 จะต้องมีการใช้เครื่องควบคุมแบบป้อนล่วงหน้าร่วมกับเครื่องควบคุมแบบป้อนกลับ

คำอธิบายที่ 2 จากขำงานรูปที่ 4.2 เมื่ออุณหภูมิขาเข้าของกระแส C1 เปลี่ยนแปลงไปเป็น  $220^{\circ}\text{C}$  จะเกิดความแปรปรวนลบขึ้น ซึ่งจะเกิดเส้นทางการส่งความแปรปรวนทั้งชนิดที่ 1 และ 2 (P2) ในการส่งความแปรปรวนนี้ไปยังเครื่องยู่ทิลิตี ซึ่งจะเกิดเส้นทางชนิดที่ 2 นี้ในช่วงของ E2 และ E1 ในช่วงนี้จะมีการส่งผ่านความแปรปรวนสวนทางกับทิศทางการไหลของกระแส H2 ซึ่งการส่งความแปรปรวนจะปรับบายพาสรอบ E3 ด้วยเครื่องควบคุมแบบป้อนกลับ เพื่อคงอุณหภูมิขาออกด้านกระแสน้ำเย็นของ E3 ที่  $327.0^{\circ}\text{C}$  ใช้เครื่องควบคุมแบบป้อนล่วงหน้าในการคำนวณค่าอุณหภูมิขาออกด้านร้อนของ E2 และปรับบายพาสรอบ E2 ด้วยเครื่องควบคุมแบบป้อนกลับเพื่อคงอุณหภูมิให้ได้ตรงตามที่กำหนด



รูป 4.2 เส้นทางการส่งผ่านความแปรปรวนชนิดที่ 1 และชนิดที่ 2 (Calandranis และ Stephanopoulos, 1988)

#### 4.5 กระบวนการจับคู่ของช่างงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

กระบวนการจับคู่ (Wongsri, 1990) ถือเป็นหน่วย ๆ หนึ่ง หรือเป็นโครงสร้างย่อย ๆ ซึ่งประกอบไปด้วยเงื่อนไขสำหรับการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเครื่องหนึ่งระหว่างคู่ของ กระแสร้อนและกระแสเย็น ในช่างงานที่ออกแบบเสร็จสมบูรณ์จะมีโครงสร้างย่อย ๆ เหล่านี้ มากกว่าหรือเท่ากับหนึ่งโครงสร้างขึ้นไป

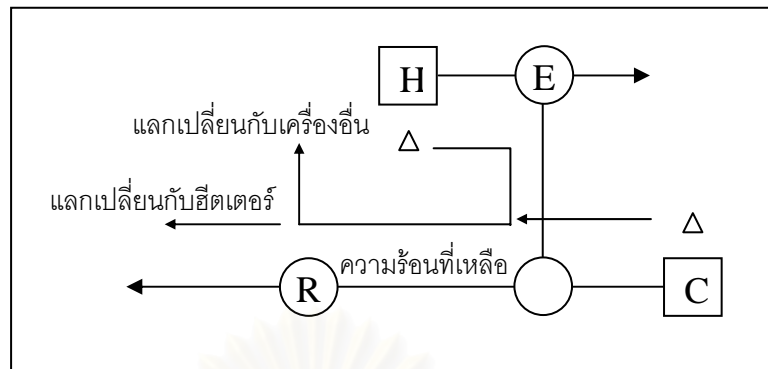
เนื่องจากการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างคู่กระแส มีโอกาสแลกเปลี่ยนกันได้ 4 แบบด้วยกัน จึงแบ่งกระบวนการจับคู่ออกเป็นคลาสต่าง ๆ ได้ 4 คลาสดังนี้

คลาสเอ (Class A) สำหรับปริมาณความร้อนของกระแสเย็นมีค่าสูงกว่าค่าของกระแสร้อน และการแลกเปลี่ยนความร้อนทำที่ปลายกระแสที่มีอุณหภูมิต่ำ โดยหลังการแลกเปลี่ยนความร้อนแล้วความร้อนของกระแสร้อนจะหมดไป สำหรับปัญหาด้านความร้อนจะเลือกใช้คลาสเอก่อนในการออกแบบ เนื่องจากทำให้กระแสเย็นมีความร้อนหลงเหลือที่ปลายด้านอุณหภูมิสูง ซึ่งจะมีโอกาสสร้างเป็นฮีตเตอร์ได้ต่อไป

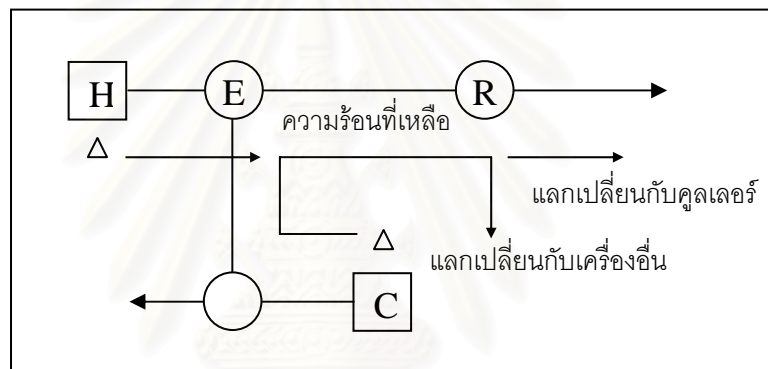
คลาสบี (Class B) สำหรับปริมาณความร้อนของกระแสเย็นมีค่าต่ำกว่าค่าของกระแสร้อน และการแลกเปลี่ยนความร้อนทำที่ปลายกระแสที่มีอุณหภูมิสูง โดยหลังการแลกเปลี่ยนความร้อนแล้วความร้อนของกระแสเย็นจะหมดไป สำหรับปัญหาด้านความเย็นจะเลือกใช้คลาสบีก่อนในการออกแบบช่างงาน เนื่องจากทำให้กระแสร้อนมีความร้อนหลงเหลือที่ปลายด้านอุณหภูมิต่ำ ซึ่งจะมีโอกาสสร้างเป็นคูลเลอร์ได้ต่อไป

คลาสซี (Class C) สำหรับปริมาณความร้อนของกระแสเย็นมีค่าต่ำกว่าค่าของกระแสร้อน และการแลกเปลี่ยนความร้อนจะทำที่ปลายกระแสที่มีอุณหภูมิต่ำ โดยหลังการแลกเปลี่ยนความร้อนแล้วความร้อนของกระแสเย็นจะหมดไป

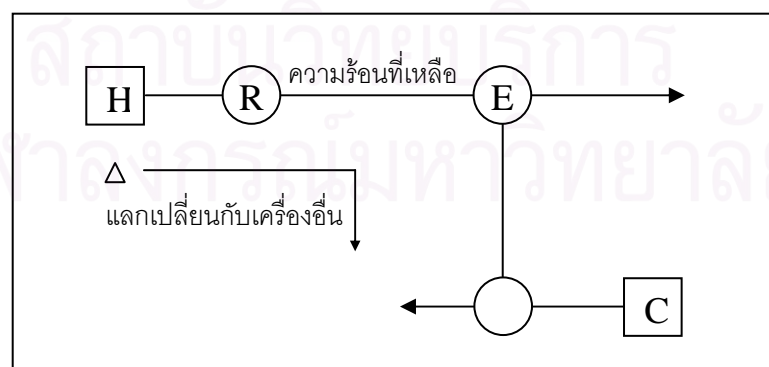
คลาสดี (Class D) สำหรับปริมาณความร้อนของกระแสเย็นมีค่าสูงกว่าค่าของกระแสร้อน และการแลกเปลี่ยนความร้อนจะทำที่ปลายกระแสที่มีอุณหภูมิสูง โดยหลังการแลกเปลี่ยนความร้อนแล้วความร้อนของกระแสร้อนจะหมดไป



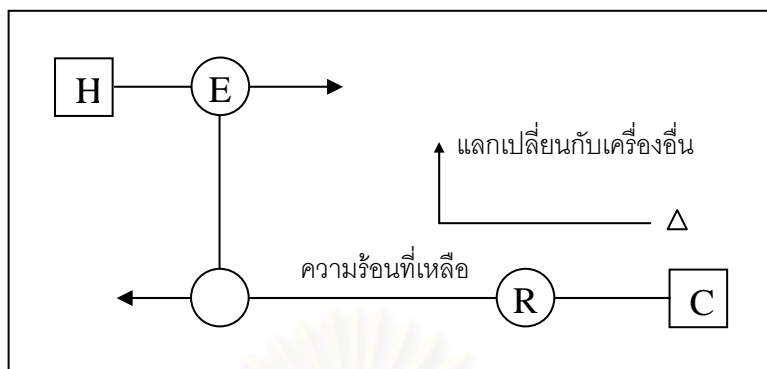
รูป 4.3 กระบวนการจับคู่แบบคลาสเอ



รูป 4.4 กระบวนการจับคู่แบบคลาสบี



รูป 4.5 กระบวนการจับคู่แบบคลาสซี



รูป 4.6 กระบวนการจับคู่แบบคลาสติ

สำหรับกระบวนการจับคู่คลาสเอและบี ความแปรปรวนของทั้งสองกระแสสามารถถูกส่งไปให้กระแสที่มีความร้อนหลงเหลือได้ ดังนั้น กระบวนการจับคู่ทั้งสองนี้ ถือว่าเป็นกระบวนการจับคู่แบบยืดหยุ่น ส่วนคลาสซี พบว่ามีเพียงความแปรปรวนของกระแสร้อนหรือสำหรับคลาสดี จะมีเพียงความแปรปรวนของกระแสเย็นที่สามารถถูกจัดการได้เท่านั้น กระบวนการจับคู่ทั้งสองนี้ ไม่สามารถจัดการกับความแปรปรวนที่เกิดขึ้นในสองกระแสพร้อม ๆ กันได้ ดังนั้น จึงถือว่า คลาสซีและคลาสดีเป็นกระบวนการจับคู่สำหรับการออกแบบข่ายงานที่ไม่คำนึงถึงความยืดหยุ่นเท่านั้น อย่างไรก็ตาม ถ้าต้องการใช้คลาสซีและดีในการออกแบบข่ายงานแบบไม่ยืดหยุ่นแล้ว จะต้องมีการควบคุมที่เหมาะสมด้วย

เมื่อพิจารณาการส่งผ่านความแปรปรวน พบว่าความแปรปรวนจะส่งผ่านจากกระแสไหนไปยังกระแสไหนจะขึ้นกับกระบวนการจับคู่ว่าเป็นคลาสใด และปริมาณของไหลของกระแสกระบวนการ กระบวนการจับคู่แบบคลาสเอและบีจะสามารถส่งผ่านความแปรปรวนของทั้งกระแสร้อนและเย็น โดยที่คลาสเอความแปรปรวนจะถูกส่งไปยังกระแสเย็น และคลาสบีความแปรปรวนจะถูกส่งไปยังกระแสร้อน ซึ่งจะเห็นได้ว่าคลาสเอและบีจะมีเส้นทางการส่งผ่านความแปรปรวนแบบชนิดที่ 1 สามารถใช้เครื่องควบคุมแบบป้อนกลับเพียงอย่างเดียวในการควบคุม

กฎข้อที่ 5 ข่ายงานที่ประกอบด้วยกระบวนการจับคู่แบบคลาสเอและบี ในการส่งผ่านความแปรปรวนใช้เพียงเครื่องควบคุมแบบป้อนกลับเพียงอย่างเดียวก็เพียงพอ

กระบวนการจับคู่แบบคลาสซีและดีเป็นคลาสที่มีอุณหภูมิขาออกของกระบวนการจับคู่เป็นอุณหภูมิที่ต้องการควบคุม (คือไม่มีความร้อนหลงเหลือในการแลกเปลี่ยนอีกต่อไป) จากกฎข้อที่ 2 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ถูกลำไปควบคุมอุณหภูมิของกระแสหนึ่งแล้วนั้นจะไม่สามารถนำมาใช้เพื่อควบคุมกระแสที่เป็นคู่แลกเปลี่ยนได้ ดังนั้นสำหรับขำยงานที่ประกอบด้วยกระบวนการจับคู่แบบคลาสซีและดี จะต้องใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่อยู่อัพสตรีมมาช่วยในการควบคุมเสมอ แต่เนื่องจากความแปรปรวนจะต้องถูกส่งไปยังหน่วยยูทิลิตี้ ดังนั้นหน่วยอัพสตรีมที่เลือกเพื่อที่จะมาช่วยในการส่งผ่านความแปรปรวน จะต้องสามารถส่งผ่านความแปรปรวนไปยังหน่วยยูทิลิตี้ได้

**กฎข้อที่ 6** สำหรับขำยงานที่ประกอบด้วยกระบวนการจับคู่แบบคลาสซีและดี จะต้องใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่อยู่อัพสตรีมมาช่วยในการควบคุม

**กฎข้อที่ 7** หน่วยอัพสตรีมที่ถูกใช้ในการรับความแปรปรวนหรือส่งผ่านความแปรปรวนจะต้องอยู่ในเส้นทางของการส่งผ่านความแปรปรวน

โดยอุณหภูมิภายในขำยงานเมื่อมีการส่งผ่านความแปรปรวนแบบชนิดที่ 2 จะเปลี่ยนไปตามความสัมพันธ์

$$T_s = T_s^0 \pm \frac{D^+}{W_s} \quad \begin{array}{l} \text{- เป็นบวกเมื่อเกิด } D^+ \text{ ที่กระแสเย็น} \\ \text{- เป็นลบเมื่อเกิด } D^+ \text{ ที่กระแสร้อน} \end{array} \quad (4.3)$$

$$T_s = T_s^0 \pm \frac{D^-}{W_s} \quad \begin{array}{l} \text{- เป็นบวกเมื่อเกิด } D^- \text{ ที่กระแสร้อน} \\ \text{- เป็นลบเมื่อเกิด } D^- \text{ ที่กระแสเย็น} \end{array}$$

(4.4)

เส้นทางของการส่งผ่านความแปรปรวนของขำยงานที่ประกอบด้วยกระบวนการจับคู่แบบคลาสซีและดีจะมีทั้งแบบชนิดที่ 1 และ 2 ซึ่งการส่งผ่านความแปรปรวนตามเส้นทางที่ 2 จะต้องใช้เครื่องควบคุมแบบป้อนกลับร่วมกับเครื่องควบคุมแบบป้อนล่วงหน้าในการควบคุม

**กฎข้อที่ 8** ข่ายงานที่ประกอบด้วยกระบวนการจับคู่แบบคลาสสิกและดี ในการส่งผ่านความแปรปรวนจะต้องใช้เครื่องควบคุมแบบป้อนล่วงหน้าร่วมกับเครื่องควบคุมแบบป้อนกลับ

สำหรับกรณีที่มีปริมาณความแปรปรวนที่เข้ามาในข่ายงานไม่สามารถรองรับได้โดยหน่วยยูทิลิตี้ที่อยู่บนเส้นทางการส่งผ่านความแปรปรวน ดังนั้นจะต้องมีการส่งผ่านไปยังหน่วยยูทิลิตี้อื่น ๆ ภายในข่ายงาน ซึ่งจะต้องมีการติดตั้งควบคุมและกระแสนายพาสเพิ่มเติมที่หน่วยแลกเปลี่ยนภายในข่ายงาน เพื่อช่วยในการส่งผ่านความแปรปรวน การเลือกหน่วยแลกเปลี่ยนในข่ายงานในการช่วยการส่งผ่านความแปรปรวนนั้นควรที่จะเลือกหน่วยที่มีปริมาณความร้อนที่แลกเปลี่ยนในหน่วยมาก จะช่วยให้รองรับความแปรปรวนได้ปริมาณมากกว่า โดยส่งผลกระทบต่อส่วนต่าง ๆ ภายในข่ายงานที่เหลือน้อยลง เช่น เมื่อเปรียบเทียบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 2 เครื่องที่มีปริมาณความร้อนที่แลกเปลี่ยนต่างกัน คือ หน่วยที่ 1 เป็น 30 kW และ หน่วยที่ 2 เป็น 600 kW เมื่อมีปริมาณความแปรปรวน 10 kW ส่งผ่านมายังเครื่องแลกเปลี่ยน หน่วยที่ 1 จะต้องรองรับความแปรปรวนเพิ่มเป็น 40 kW และหน่วยที่ 2 เป็น 610 kW ซึ่งจะเห็นได้ว่าปริมาณการเปลี่ยนแปลงไปสำหรับหน่วยที่ 2 เมื่อเทียบกับมีอยู่เดิมจะน้อยกว่าหน่วยที่ 1 จะส่งผลให้เกิดผลกระทบต่ออุณหภูมิขาออกน้อยกว่า

**กฎข้อที่ 9** ถ้าปริมาณความแปรปรวนที่เข้ามาในข่ายงานมากกว่าปริมาณยูทิลิตี้ที่รองรับบนหน่วยยูทิลิตี้ในเส้นทางการส่งผ่าน จะต้องมีการติดตั้งพาสและควบคุมเพิ่มเติมบนหน่วยแลกเปลี่ยนในข่ายงาน

**กฎข้อที่ 10** ถ้าจำเป็นต้องมีการใช้หน่วยอัดรีดในการควบคุม ควรเลือกหน่วยที่มีปริมาณความร้อนที่แลกเปลี่ยนมากในการติดตั้งกระแสนายพาสและควบคุม

Calandranis และ Stephanopoulos (1988) กล่าวว่า ในการเลือกเส้นทางการส่งผ่านความแปรปรวน ควรที่จะเลือกเส้นทางการส่งผ่านความแปรปรวนที่เกี่ยวข้องกับจำนวนเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนน้อยที่สุด นั่นคือมีเส้นทางที่สั้นที่สุด เพื่อที่จะไม่ให้ความแปรปรวนมีผลกระทบต่อภาวะต่าง ๆ ภายในข่ายงานมากนัก

## กฎข้อที่ 11 เลือกติดลูฟควบคุมเพื่อให้มีเส้นทางการส่งผ่านความแปรปรวนสั้นที่สุด (Calandranis และ Stephanopoulos ,1988)

### 4.6 การติดตั้งกระแสนายพาส

#### 4.6.1 เหตุผลในการติดตั้งกระแสนายพาส

กระแสนายพาสคือการแบ่งส่วนของกระแสใดกระแสหนึ่ง ก่อนการแลกเปลี่ยนพลังงานในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยส่วนของกระแสที่ถูกแบ่งออกไปจะไม่มีแลกเปลี่ยนพลังงาน เหตุผลในการติดตั้งกระแสนายพาสมี 2 ประการคือ (Mathisen และคณะ, 1992)

1. เพื่อลดพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน โดยทั่วไปเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะต้องมีพื้นที่มากพอที่จะสามารถปฏิบัติงานได้ทุกสภาวะ ดังนั้นในบางสภาวะพื้นที่แลกเปลี่ยนอาจจะมีความมากเกินไป ซึ่งในการลดพื้นที่ที่สามารถทำได้โดยปรับอัตราการไหลในกระแสนายพาสให้มากขึ้น
2. เพื่อเพิ่มองศาอิสระในการควบคุม เมื่อมีความแปรปรวนจากภายนอก โดยใช้เป็นตัวแปรปรับกระบวนการ

#### 4.6.2 จำนวนของกระแสนายพาสที่มีได้ในข่ายงาน

ถ้าจะพิจารณาจากแง่ของการลงทุนแล้วจะไม่ใช้การติดตั้งบายพาสในการปรับโหลดของเครื่องยูลิตี เพราะจะทำให้สิ้นเปลืองเช่นในกรณีที่ต้องการลดโหลดของฮีตเตอร์และคูลเลอร์ การบายพาสจะทำให้ต้องใช้ปริมาณของยูลิตีที่คงที่ ซึ่งถ้าปรับอัตราการไหลของยูลิตีจะทำให้ใช้ปริมาณยูลิตีที่ลดลง

Calandranis และ Stephanopoulos (1988) กล่าวว่า สำหรับข่ายงานที่ไม่มีจุดพินช์ (ข่ายงานย่อยด้านร้อนหรือด้านเย็น) จำนวนตัวแปรปรับน้อยที่สุดที่ต้องการจะเท่ากับจำนวนกระแสที่ต้องการควบคุมอุณหภูมิเป้าหมาย ดังนั้นถ้าข่ายงานที่พิจารณาเป็นข่ายงานย่อยคือเป็น



ช่างงานด้านร้อนหรือด้านเย็น และถ้ายุทธิตีทุกเครื่องในช่างงานสามารถปรับอัตราการใช้เพื่อควบคุมได้ จำนวนบายพาสที่ต้องการน้อยที่สุดจะเท่ากับ  $N_y - N_{UX}$  เพื่อการควบคุมค่าเป้าหมายของอุณหภูมิ  $N_y$  ค่า โดย  $N_{UX}$  คือจำนวนเครื่องยุทธิตี ดังนั้นจำนวนบายพาสจะอยู่ในช่วง

$$N_y - N_{UX} \leq N_{byp} \leq N_{HX} \quad (4.5)$$

โดย  $N_{byp}$  คือจำนวนกระแสบายพาส และ  $N_{HX}$  จำนวนเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในช่างงาน

Calandranis และ Stephanopoulos (1988) กล่าวว่า สำหรับช่างงานที่มีจุดพินช์ (ช่างงานที่มีทั้งช่างงานย่อยด้านเย็นและด้านร้อน) เพื่อคงให้เกิดการกลับคืนพลังงานสูงสุดจะต้องมีการควบคุมผลต่างของอุณหภูมิที่น้อยที่สุด ( $\Delta T_{min}$ ) ภายในช่างงาน ดังนั้นจะต้องมีจำนวนตัวแปรปรับเพิ่มจากกรณีที่ไม่มีจุดพินช์ โดยจำนวนที่เพิ่มขึ้นจะเท่ากับจำนวนกระแสที่ข้ามจุดพินช์ ดังนั้นจำนวนบายพาสที่ต้องการจะแสดงได้เป็น

$$N_y - N_{UX} + N_p \leq N_{byp} \leq N_{HX} \quad (4.6)$$

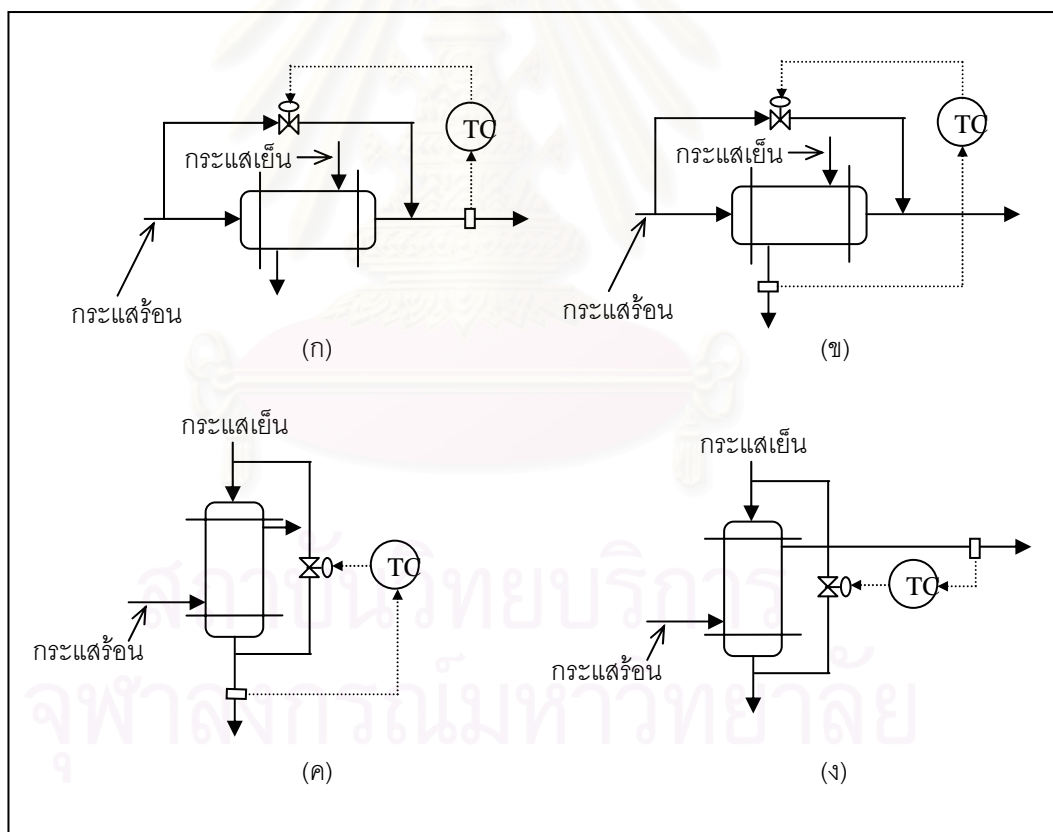
โดย  $N_p$  คือจำนวนกระแสที่ข้ามจุดพินช์

#### 4.6.3 การติดตั้งกระแสบายพาสสำหรับการควบคุม

การใช้กระแสบายพาสในการควบคุมจะมีทางเลือกมากมายในการติดตั้งกระแสบายพาส และตำแหน่งที่จะควบคุม ดังรูป 4.7 ซึ่งทางเลือกไหนจะดีที่สุดขึ้นอยู่กับว่าการติดตั้งมีจุดประสงค์เพื่ออะไรและพิจารณาถึงมุมมองไหน Lyben และคณะ (1998) กล่าวว่า เมื่อพิจารณาถึงส่วนของการออกแบบ จะติดตั้งกระแสบายพาสด้านกระแสเย็น เพราะการติดตั้งอุปกรณ์วัดและวาล์วควบคุมจะประหยัดกว่าในกระแสร้อน แต่ถ้าพิจารณาในส่วนของการควบคุมจะพิจารณาให้ติดตั้งกระแสบายพาสด้านกระแสที่ต้องการควบคุม โดยไม่คำนึงถึงว่าเป็นกระแสร้อนหรือเย็น เช่นรูป 4.7(ก) และ (ค) แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นก็จะต้องพิจารณาให้เกิดผลดีที่สุดต่อระบบควบคุม อย่างไรก็ตาม

ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับการติดตั้งกระแสนบายพาสของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนยังไม่เพียงพอ และยังต้องการการวิจัยอีกมากเกี่ยวกับการติดตั้งกระแสนบายพาสของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

Calandranis และ Stephanopoulos (1988) กล่าวว่า ผลของการบายพาสที่ภาวะคงตัว ไม่ว่าจะเป็นด้านกระแสนร้อนหรือเย็นจะให้ผลที่เหมือนกัน คือสามารถให้ปริมาณไหลที่เท่ากันได้ แต่ผลของไดนามิกจะแตกต่างกัน Marselle และคณะ. (1982), Calandranis และ Stephanopoulos (1988), Mathisen และคณะ (1992), Aguilier และ Marchetti (1998) ได้เสนอว่าควรจะต้องติดตั้งกระแสนบายพาสด้านที่ ต้องการควบคุมอุณหภูมิ เช่นถ้าต้องการควบคุมอุณหภูมิของกระแสนร้อนก็ติดตั้งกระแสนบายพาสในด้านกระแสนร้อน ซึ่งความเป็นจริงแล้วการเลือกในการพิจารณาว่าจะติดตั้งกระแสนบายพาสด้านใดอัตราการไหลจะมีผลอย่างมาก



รูป 4.7 ทางเลือกในการใช้กระแสนบายพาสสำหรับการควบคุมเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

พิจารณา 
$$\tau_h = \left[ \frac{\rho_h C_{ph} V_h(i)}{W_{ah} + UA(i)} \right] N \quad (4.7)$$

$$\tau_c = \left[ \frac{\rho_c C_{pc} V_c(i)}{W_{ac} + UA(i)} \right] N \quad (4.8)$$

โดยที่  $W_a$  คืออัตราการไหลจริงที่ไหลผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งด้านที่มีการติดตั้งบายพาส และ  $N$  คือจำนวนหน่วยที่แบ่งในแบบจำลอง (ดังอธิบายในบทที่ 3)

$$W_a = W(1-u) \quad (4.9)$$

พิจารณาสมการข้างต้นจะเห็นได้ว่าเมื่อมีการติดตั้งกระแสบายพาสจะส่งผลให้ค่าคงที่ของการหน่วงเวลา ( $\tau$ ) ของด้านที่ทำการติดตั้งกระแสบายพาสเปลี่ยนแปลงไปโดยจะมีค่ามากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่า  $\tau$  ของกรณีบายพาสและไม่บายพาสของกระแสที่มีอัตราการไหลน้อย และอัตราการไหลมาก จะเห็นว่าอัตราการไหลน้อยจะให้การเปลี่ยนแปลงที่น้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการไหลมาก การเปลี่ยนแปลงค่า  $\tau$  ที่น้อยจะส่งผลให้  $\tau$  โดยรวมของระบบน้อยกว่ากรณีที่มีการเปลี่ยนแปลง  $\tau$  ที่มาก ดังนั้นควรพิจารณาเลือกบายพาสด้านที่มีการเปลี่ยนแปลงค่า  $\tau$  น้อยจะดีกว่า จะส่งผลให้การตอบสนองเร็วขึ้น

### กฎข้อที่ 12 ควรเลือกติดตั้งกระแสบายพาสด้านที่มีอัตราการไหลน้อย

กรณีที่มีอัตราการไหลของสองกระแสเท่ากัน สามารถจะใช้หลักการที่ได้ถูกเสนอมานี้มาใช้ในการควบคุมได้ (Marselle และคณะ (1982), Calandranis และ Stephanopoulos (1988), Mathisen และคณะ (1992), Aguiler และ Marchetti (1998)) คือติดตั้งกระแสบายพาสในด้านที่ต้องการควบคุมเพื่อให้เกิดผลโดยตรงต่อค่าที่ต้องการควบคุม

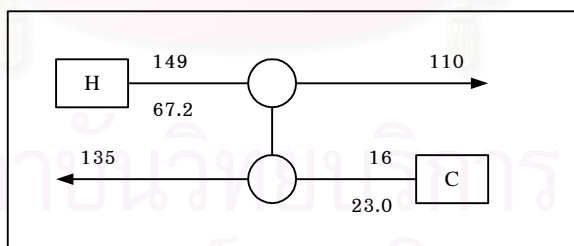
กฎข้อที่ 13 กรณีที่อัตราการไหลของกระแสที่แลกเปลี่ยนเท่ากันควรที่จะติดตั้งกระแสบายพาสด้านที่ต้องการควบคุมอุณหภูมิ (Mathisen และคณะ, 1992)

#### 4.6.4 ตัวอย่าง

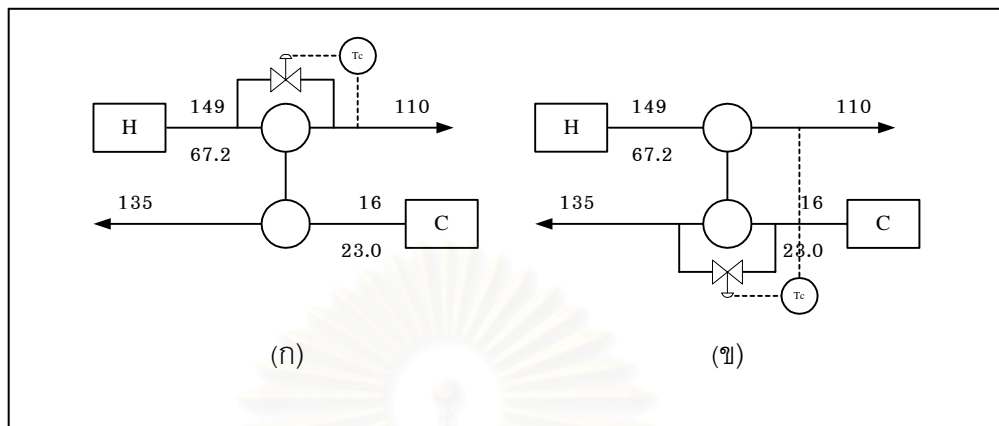
**ตัวอย่าง 4.1** การเลือกติดตั้งกระแสน้ำพาสเมื่อกระแสน้ำร้อนมีอัตราการไหลมากกว่ากระแสน้ำเย็น

พิจารณาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนดังรูป 4.8 ถ้าต้องการควบคุมอุณหภูมิขาออกของกระแสน้ำร้อน เมื่ออุณหภูมิขาเข้าของกระแสน้ำเย็นเพิ่มขึ้น  $5^{\circ}\text{C}$  และกระแสน้ำร้อนลดลง  $5^{\circ}\text{C}$  สามารถติดตั้งบายพาสและดูควบคุมตามรูป 4.9 จากกฎที่ 12 ควรจะเลือกติดตั้งบายพาสตามรูป 4.9 (ข) เพราะกระแสน้ำเย็นมีอัตราการไหลน้อยกว่ากระแสน้ำร้อน

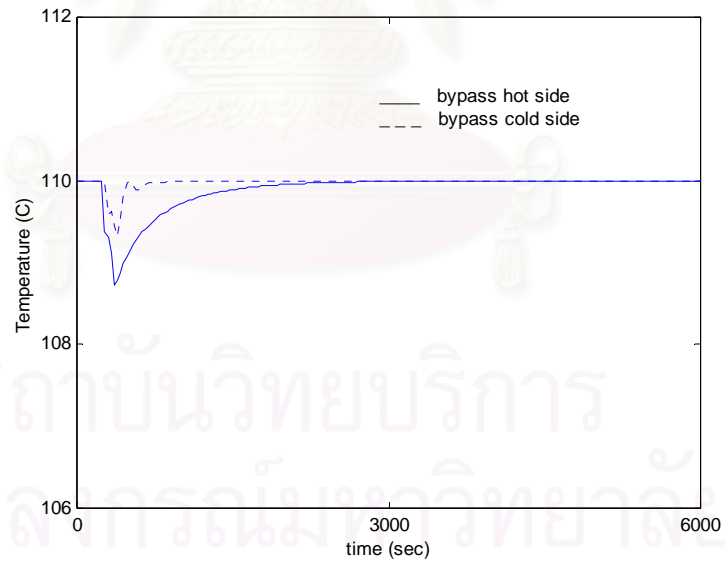
เมื่อพิจารณาสมการ 4.7, 4.8 และ 4.9 พบว่าเมื่อบายพาสด้านร้อนจะได้ค่า  $\tau_h = 2.8$  นาที  $\tau_c = 4$  นาที และเมื่อบายพาสด้านเย็น  $\tau_h = 1.4$  นาที  $\tau_c = 4.3$  นาที เมื่อเปรียบเทียบค่า  $\tau$  จากทั้ง 2 กรณี จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงการติดตั้งบายพาสมีผลกับ  $\tau_h$  มากกว่า  $\tau_c$  ดังนั้นควรเลือกติดตั้งกระแสน้ำพาสด้านกระแสน้ำเย็น และจากผลการควบคุมรูป 4.10 และตาราง 4.3 จะเห็นได้ว่าการติดตั้งกระแสน้ำพาสในด้านที่มีอัตราการไหลมาก (กระแสน้ำร้อน) จะให้ผลการตอบสนองช้ากว่าที่มีอัตราการไหลน้อย (กระแสน้ำเย็น) ซึ่งสอดคล้องกับค่า  $\tau$  ที่คำนวณได้และกฎข้อที่ 12



รูป 4.8 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับตัวอย่าง 4.1



รูป 4.9 การใช้กระแสนบายพาสในการควบคุมเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในตัวอย่าง 4.1  
(ก) บายพาสกระแสนร้อน (ข) บายพาสกระแสนเย็น



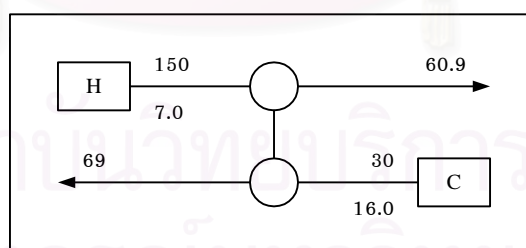
รูป 4.10 ผลการควบคุมอุณหภูมิของตัวอย่าง 4.1 เมื่ออุณหภูมิขาเข้าของกระแสนร้อนลดลง  $5^{\circ}\text{C}$   
และกระแสนเย็นเพิ่ม  $5^{\circ}\text{C}$

ตาราง 4.3 เปรียบเทียบค่าเวลาความคลาดเคลื่อนแบบสัมบูรณ์ของตัวอย่าง 4.1

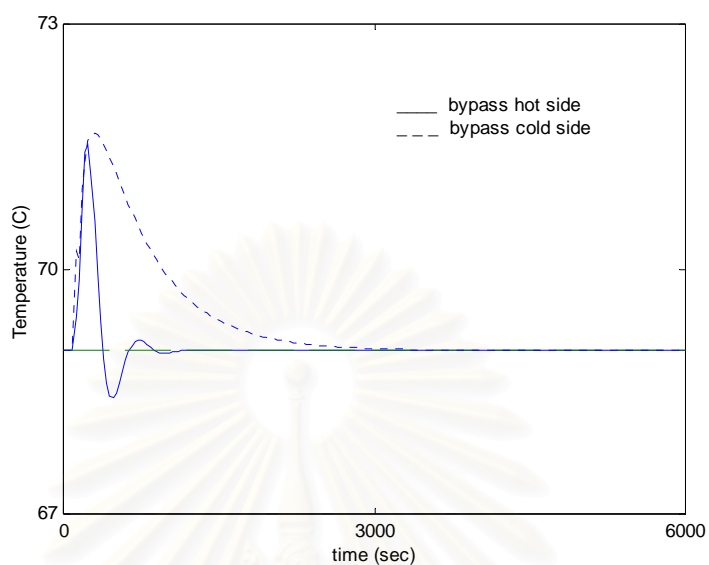
การติดตั้งการบายพาส	ค่าเวลาความคลาดเคลื่อนแบบสัมบูรณ์ (* $10^4$ )
บายพาสด้านร้อน	53.1870
บายพาสด้านเย็น	4.6467

ตัวอย่าง 4.2 การเลือกติดตั้งกระแสบายพาสเมื่อกระแสร้อนมีอัตราการใช้พลังงานน้อยกว่ากระแสนเย็น

พิจารณาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนดังรูป 4.11 ถ้าต้องการควบคุมอุณหภูมิขาออกของกระแสนเย็น เมื่ออุณหภูมิขาเข้าของกระแสนเย็นเพิ่มขึ้น  $5^{\circ}\text{C}$  และกระแสร้อนเพิ่มขึ้น  $5^{\circ}\text{C}$  จากกฎข้อที่ 12 ควรจะเลือกติดตั้งบายพาสด้านกระแสร้อน ผลการควบคุมแสดงได้ดังรูป 4.12 และตาราง 4.4 จากผลการควบคุมและค่าความคลาดเคลื่อนแบบสัมบูรณ์จะเห็นได้ว่าการบายพาสด้านกระแสร้อนจะให้ผลการตอบสนองที่เร็วกว่าและมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า



รูป 4.11 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับตัวอย่าง 4.2



รูป 4.12 ผลการควบคุมอุณหภูมิของตัวอย่าง 4.2 เมื่ออุณหภูมิขาเข้าของกระแสร้อนเพิ่มขึ้น  $5^{\circ}\text{C}$  และกระแสเย็นเพิ่ม  $5^{\circ}\text{C}$

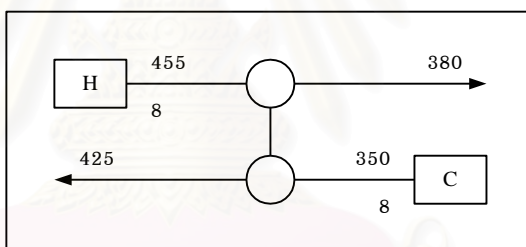
ตาราง 4.4 เปรียบเทียบค่าเวลาความคลาดเคลื่อนแบบสัมบูรณ์ของตัวอย่าง 4.2

การติดตั้งการบายพาส	ค่าเวลาความคลาดเคลื่อนแบบสัมบูรณ์ ( $\times 10^5$ )
บายพาสด้านร้อน	1.6878
บายพาสด้านเย็น	10.6827

**ตัวอย่าง 4.3** การเลือกติดตั้งกระแสนบายพาสเมื่อกระแสร้อนและเย็นมีอัตราการไหลเท่ากัน

พิจารณาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนดังรูป 4.13 ถ้าต้องการควบคุมอุณหภูมิขาออกของกระแสน้ำร้อน เมื่ออุณหภูมิขาเข้าของกระแสน้ำเย็นเพิ่มขึ้น  $5^{\circ}\text{C}$  และกระแสน้ำร้อนลดลง  $5^{\circ}\text{C}$  เนื่องจากกระแสน้ำทั้งสองมีอัตราการไหลเท่ากันตามกฎข้อที่ 2 ควรเลือกการติดตั้งกระแสน้ำบายพาสด้านกระแสน้ำร้อน

เมื่อพิจารณาผลการทดลองรูป 4.14 และตาราง 4.5 จะพบว่าเมื่อบายพาสด้านน้ำร้อนจะให้ค่าเวลาความคลาดเคลื่อนแบบสัมบูรณ์น้อยกว่าบายพาสด้านเย็น ดังนั้นในตัวอย่างนี้ควรจะบายพาสด้านน้ำร้อน ซึ่งเป็นด้านที่ต้องการควบคุมอุณหภูมิ ซึ่งผลสรุปจะเป็นไปตามกฎข้อที่ 2

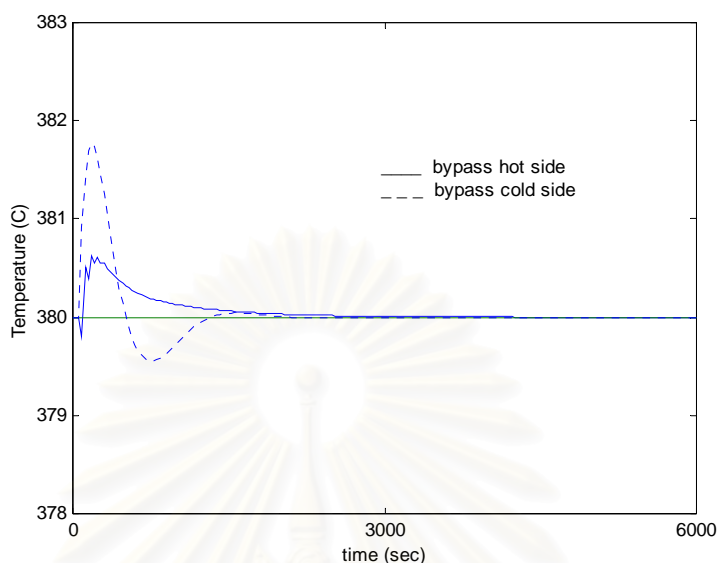


**รูป 4.13** เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับตัวอย่าง 4.3

**ตาราง 4.5** เปรียบเทียบค่าเวลาความคลาดเคลื่อนแบบสัมบูรณ์ของตัวอย่าง 4.3

การติดตั้งการบายพาส	ค่าเวลาความคลาดเคลื่อนแบบสัมบูรณ์ (* $10^3$ )
บายพาสด้านน้ำร้อน	9.9925
บายพาสด้านเย็น	11.3338





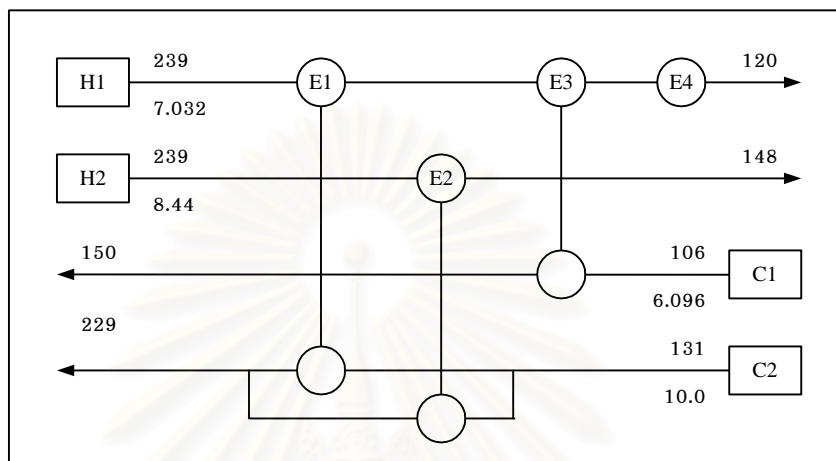
รูป 4.14 ผลการควบคุมอุณหภูมิของตัวอย่าง 4.3 เมื่ออุณหภูมิขาเข้าของกระแสร้อนลดลง  $5^{\circ}\text{C}$  และกระแสเย็นเพิ่ม  $5^{\circ}\text{C}$

#### 4.7 ข่ายงานที่ประกอบด้วยกระแสที่แยก

เมื่อพิจารณาข่ายงานตามรูป 4.15 พบว่า เมื่ออุณหภูมิขาเข้าของกระแส H2 เกิดการเปลี่ยนแปลง สามารถจะปรับสัดส่วนการแยกในการส่งผ่านความแปรปรวนไปยังหน่วยยูทิลิตี้ได้ เพื่อควบคุมอุณหภูมิขาออกของกระแส H2 โดยไม่ต้องมีการติดตั้งกระแสนบายพาสที่หน่วย E2 อีก ทำให้ประหยัดเงินลงทุนในส่วนของการติดตั้งกระแสนบายพาสและวาล์วอีกด้วย

ถ้าอุณหภูมิหลังจากนำกระแสที่แยกมารวมกันเป็นอุณหภูมิที่ต้องการควบคุม จากรูป 4.15 คืออุณหภูมิขาออกของกระแส C2 การควบคุมอุณหภูมิของ C2 ทำได้ 3 ทางคือ 1) บายพาสบน E1 2) บายพาสบน E2 หรือ 3) ปรับสัดส่วนการแยก และการควบคุมอุณหภูมิของ H2 ทำได้ 2 ทางคือ บายพาสบน E2 หรือ ปรับสัดส่วนการแยก จะเห็นได้ว่ามีเพียงการบายพาสบน E1 ที่ไม่มีผลต่ออุณหภูมิของ H2 Mathisen และคณะ (1992) ได้เสนอให้เลือกการติดตั้งบาย

พาสบนหน่วยที่มีผลต่อตัวแปรควบคุมเพียงอันเดียว ดังนั้นควรจะควบคุมกระแส C2 โดยการบายพาส E1 และควบคุมอุณหภูมิ H2 โดยใช้สัดส่วนในการแยกของกระแส



รูป 4.15 ข่ายงานที่มีการแยกของกระแส (Wongsri, 1990)

ข่ายงานที่มีการแยกของกระแสเกิดขึ้นจำนวนบายพาสน้อยที่สุดในกระแสจะแสดงได้ดังสมการ

$$N_y - N_{UX} + N_P - \sum_{i=1}^n (N_{s_i} - 1) \leq N_{bye} \leq N_{HX} \quad (4.12)$$

โดย  $n$  คือจำนวนกระแสที่มีการแยกภายในข่ายงาน  $N_{s_i}$  คือจำนวนกระแสที่ถูกแยกออกจากกระแสหลัก  $i$

กฎข้อที่ 14 ข่ายงานที่มีการแยกของกระแส สามารถใช้สัดส่วนการแยกของกระแสในการปรับแทนการติดตั้งกระแสบายพาสได้ และควรใช้สัดส่วนการแยกในการควบคุมอุณหภูมิของกระแสคู่แลกเปลี่ยน

กฎข้อที่ 15 ถ้าอุณหภูมิหลังจากนำกระแสที่แยกมารวมกันเป็นอุณหภูมิที่ต้องการควบคุม ควรจะใช้บายพาสบนเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนบนกระแสที่ถูกแยกในการควบคุม อุณหภูมินั้น ๆ

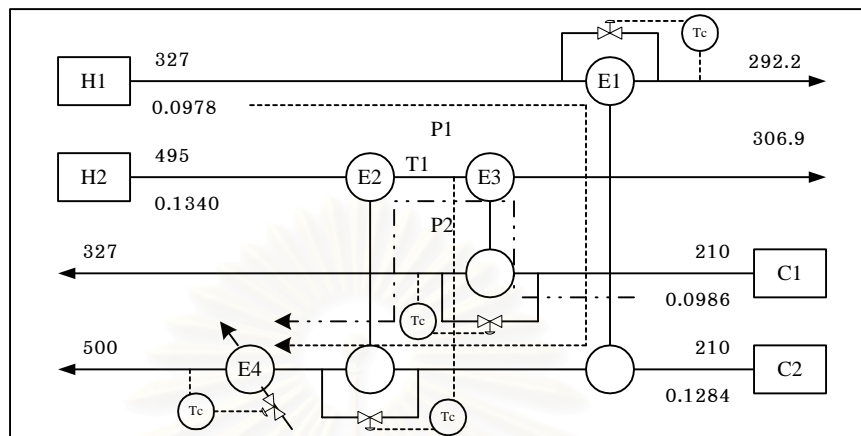
#### 4.8 กฎในการออกแบบการควบคุมข่างานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

งานวิจัยในบทนี้ สามารถพัฒนาเป็นกฎการออกแบบโครงสร้างการควบคุมได้ทั้งหมด 15 กฎ ซึ่งกฎทั้งหมดนี้ได้พัฒนามาจากลักษณะของโครงสร้างของข่างาน ร่วมกับเทคนิคการส่งผ่าน ความแปรปรวน ซึ่งครอบคลุมประเด็นที่เกี่ยวข้องกับการเลือกกระแสที่จะบายพาส การใช้สัดส่วน การแยกในการปรับเพื่อควบคุม การใช้หน่วยแลกเปลี่ยนความร้อนที่เป็นหน่วยอัดสตรึมในการ ควบคุม และการควบคุมเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีอุณหภูมิขาออกเป็นตัวแปรควบคุมทั้งคู่ ซึ่งกฎที่ได้เสนอนี้สามารถนำไปเพื่อออกแบบโครงสร้างการควบคุมที่เหมาะสมได้ กฎที่เสนอนี้ได้ ถูกจัดเรียงลำดับความสำคัญและแยกเป็นกลุ่ม เพื่อให้เหมาะสมต่อการนำไปพิจารณาออกแบบ โครงสร้างการควบคุม แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นเนื่องจากกฎนี้ได้พัฒนามาจากหลักการของฮิวริสติก ดังนั้น การนำไปประยุกต์ใช้อาจจะมีการสลับกฎบางข้อได้ตามความเหมาะสม

##### กฎการออกแบบโครงสร้างการควบคุม

- กฎทั่ว ๆ ไปในการออกแบบ
1. กระแสที่มีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพียงตัวเดียวจะถูกพิจารณาก่อนในการออกแบบการ ควบคุม
  2. ถ้ากระแสของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเครื่องหนึ่งได้ถูกใช้ปรับเพื่อควบคุมอุณหภูมิของ กระแสหนึ่งแล้วนั้น จะไม่สามารถนำกระแสคู่แลกเปลี่ยนของกระแสนั้นมาปรับเพื่อควบคุม อุณหภูมิของกระแสอื่น ๆ ได้อีก
  3. ต้องมีกระแสบายพาสและถูกควบคุมที่หน่วยสุดท้ายของกระแสเสมอเพื่อคงอุณหภูมิ เป้าหมาย

4. กระแสที่มีเครื่องยูลิติดีจะใช้อัตราการไหลของกระแสยูลิติดี (ไอน้ำหรือน้ำหล่อเย็น) ในการปรับเพื่อควบคุมอุณหภูมิของกระแสนั้น ๆ



รูป 4.16 การส่งผ่านความแปรปรวนของกระสวนการจับคู่

- กฎที่เกี่ยวข้องกับกระสวนการจับคู่
5. ข่ายงานที่ประกอบด้วยกระสวนการจับคู่แบบคลาสเอและบี ในการส่งผ่านความแปรปรวนใช้เพียงเครื่องควบคุมแบบป้อนกลับเพียงอย่างเดียวก็เพียงพอ

กระสวนการจับคู่แบบคลาสเอและบี หลังจากแลกเปลี่ยนความร้อนแล้วนั้นปริมาณความร้อนของกระแสหนึ่งจะหมดไป ซึ่งความแปรปรวนของกระแสที่ไม่มีปริมาณความร้อนเหลือหลังจากแลกเปลี่ยนสามารถส่งผ่านไปยังกระแสที่มีความร้อนหลงเหลือได้ ซึ่งการส่งผ่านความแปรปรวนไปยังอีกกระแสสามารถทำได้โดยใช้เพียงเครื่องควบคุมแบบป้อนกลับ พิจารณาจากรูป 4.16 พบว่าหน่วย E1 จะเป็นกระสวนการจับคู่แบบคลาสเอ ซึ่งในการส่งผ่านความแปรปรวนจากกระแส H1 สามารถทำได้โดยใช้เส้นทาง P1 ซึ่งจะพบว่าที่หน่วย E1 สามารถควบคุมได้เพียงใช้เครื่องควบคุมแบบป้อนกลับเพียงอย่างเดียว

6. สำหรับข่ายงานที่ประกอบด้วยกระสวนการจับคู่แบบคลาสซีและดี จะต้องใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่อยู่อัพสตรีมมาช่วยในการควบคุม

กระบวนการจับคู่แบบคลาสซีและดี หลังจากแลกเปลี่ยนความร้อนแล้วนั้นปริมาณความร้อนของทั้งสองกระแสจะหมดไป ซึ่งความแปรปรวนของทั้งสองกระแสจะต้องถูกส่งไปยังกระแสที่มีหน่วยอัลสตรึมอยู่บนกระแส ดังนั้นในการควบคุมอุณหภูมิจะไม่สามารถทำได้โดยการติดลูฟควบคุมที่หน่วยสุดท้ายของกระแสเท่านั้น จะต้องมีการติดลูฟควบคุมที่หน่วยอัลสตรึมเพื่อช่วยส่งผ่านความแปรปรวนด้วย พิจารณาจากรูป 4.16 พบว่าหน่วย E3 มีกระบวนการจับคู่แบบคลาสซี ซึ่งความแปรปรวนของทั้งกระแส H2 และ C1 จะต้องถูกส่งผ่านไปยังกระแสที่มีหน่วยอัลสตรึม นั่นก็คือกระแส H2 นั่นเอง ดังเส้นทางการส่งผ่าน P2

7. หน่วยอัลสตรึมที่ถูกใช้ในการรับความแปรปรวนหรือส่งผ่านความแปรปรวนจะต้องอยู่ในเส้นทางการส่งผ่านความแปรปรวน เพื่อทำการส่งผ่านความแปรปรวนไปยังหน่วยยูทิลิตี้
8. หน่วยงานที่ประกอบด้วยกระบวนการจับคู่แบบคลาสซีและดี ในการส่งผ่านความแปรปรวนจะต้องใช้เครื่องควบคุมแบบป้อนล่วงหน้าร่วมกับเครื่องควบคุมแบบป้อนกลับ

สำหรับหน่วยงานที่มีกระบวนการจับคู่แบบคลาสซีและดี จะต้องใช้หน่วยอัลสตรึมมาช่วยในการส่งผ่านความแปรปรวนด้วย ซึ่งในการควบคุมของหน่วยอัลสตรึมจะต้องใช้ทั้งเครื่องควบคุมแบบป้อนล่วงหน้าและเครื่องควบคุมแบบป้อนกลับ โดยใช้เครื่องควบคุมแบบป้อนล่วงหน้าในการคำนวณค่าเป้าหมายที่ต้องควบคุมของหน่วยอัลสตรึม โดยค่าเป้าหมายจะเปลี่ยนไปตามปริมาณความแปรปรวนที่เข้ามาในระบบ เมื่อพิจารณาจากรูป 4.16 พบว่าการควบคุมของหน่วย E2 จะต้องใช้ทั้งเครื่องควบคุมแบบป้อนล่วงหน้าและแบบป้อนกลับ เพื่อช่วยส่งผ่านความแปรปรวนทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากกระแส C1 และ H2 ไปยังหน่วยยูทิลิตี้ โดยใช้เครื่องควบคุมแบบป้อนล่วงหน้าในการคำนวณหาค่าอุณหภูมิเป้าหมาย T1

- กฎการเลือกติดตั้งลูฟควบคุม
9. ถ้าปริมาณความแปรปรวนที่เข้ามาในหน่วยงานมากกว่าปริมาณยูทิลิตี้ที่รองรับบนหน่วยยูทิลิตี้ในเส้นทางการส่งผ่าน จะต้องมีการติดบายพาสและลูฟควบคุมเพิ่มเติมบนหน่วยแลกเปลี่ยนในหน่วยงาน

10. ถ้าจำเป็นต้องมีการใช้หน่วยแลกเปลี่ยนภายในหน่วยงานในการควบคุม ควรเลือกหน่วยที่มีปริมาณความร้อนที่แลกเปลี่ยนมากในการติดกระแสบายพาสและดูควบคุม
11. เลือกติดดูควบคุมเพื่อให้มีเส้นทางการส่งผ่านความแปรปรวนสั้นที่สุด เพื่อลดผลกระทบต่ออุณหภูมิภายในช่างาน
  - กฎการใช้สัดส่วนการแยกในการควบคุม
12. ควรเลือกติดตั้งกระแสบายพาสด้านที่มีอัตราการไหลน้อย
13. กรณีที่อัตราการไหลของกระแสที่แลกเปลี่ยนเท่ากันควรจะติดตั้งกระแสบายพาสด้านที่ต้องการควบคุมอุณหภูมิ
  - กฎการใช้สัดส่วนการแยกในการควบคุม
14. ช่างานที่มีการแยกของกระแส สามารถใช้สัดส่วนการแยกของกระแสในการปรับแทนการติดตั้งกระแสบายพาสได้ และควรใช้สัดส่วนการแยกในการควบคุมอุณหภูมิของกระแสคู่แลกเปลี่ยน
15. ถ้าอุณหภูมิหลังจากนำกระแสที่แยกมารวมกันเป็นอุณหภูมิที่ต้องการควบคุม ควรจะใช้บายพาสบนเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนบนกระแสที่ถูกแยกในการควบคุมอุณหภูมินั้น ๆ

## บทที่ 5

### การออกแบบโครงสร้างการควบคุม

โครงสร้างการควบคุมที่เหมาะสมจะมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพในการควบคุมงานวิจัยในบทนี้จะพิจารณาการออกแบบโครงสร้างการควบคุมข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน อธิบายถึงวัตถุประสงค์ในการควบคุม รวมทั้งการเลือกตัวแปรปรับและตัวแปรควบคุม ในการออกแบบโครงสร้างการควบคุมจะพิจารณาร่วมกับกฎในการออกแบบการควบคุม ดังที่ได้เสนอในบทที่ 4 สรุปเป็นขั้นตอนในการออกแบบโครงสร้างการควบคุม โดยขั้นตอนการออกแบบที่ได้นี้สามารถประยุกต์ใช้กับข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทั่ว ๆ ไปเมื่อเกิดการรบกวนทางพลังงาน และเป็นปัญหาแบบคลาส I (Saboo และ Morari, 1984) และสามารถดำเนินการได้โดยยังคงวัตถุประสงค์ตามที่กำหนด (คุณหมุมเป้าหมายและการนำกลับคืนพลังงานสูงสุด)

#### 5.1 บทนำ

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบโครงสร้างการควบคุมทั้งโรงงาน (Plantwide Control Structures) ได้มีการพัฒนามาตั้งแต่ปี 1980 (Morari และคณะ, 1980; Govind และ Powers, 1982; Luyben และคณะ, 1998) (แต่งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบโครงสร้างการควบคุมของข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยใช้หลักการการออกแบบทางแพลนท์ไวด์ยังมีจำนวนน้อย) ซึ่งในความเป็นจริงแล้วกระบวนการนำกลับมาใช้อีกครั้งของพลังงานภายในข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีความสำคัญมากในกระบวนการอุตสาหกรรมทางเคมี เพราะกระบวนการทางเคมีแทบจะทุกกระบวนการจะมีการใช้และผลิตพลังงานเสมอ โครงสร้างการควบคุมข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่เหมาะสมจะส่งผลให้กระบวนการทั้งหมดเกิดความปลอดภัย, ประหยัดพลังงาน และประหยัดเงินลงทุนในการติดตั้ง

Marselle และคณะ (1982), Calandranis และ Stephanopoulos (1988), Aguiler และ Marchetti (1998) ได้เสนอการออกแบบโครงสร้างการควบคุมข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโดยที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทุกเครื่องในข่ายงานจะต้องมีกระแสบายพาส และควบคุมกระแสนั้น ๆ ด้วยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวสุดท้ายในกระแสนั้น จากงานวิจัยนี้ยังขาดตัวอย่างที่ชัดเจน อีกทั้งยังมีประเด็นที่น่าสนใจในการพิจารณาเพิ่มเติมอีก เช่น (1) การเลือกการติดตั้งกระแสบายพาส (Bypass Placement) (2) การใช้อัตราส่วนในการแบ่งของกระแส (Split Fraction) เป็นตัวแปรปรับแทนการติดตั้งกระแสบายพาส (3) กรณีที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีอุณหภูมิขาออกเป็นตัวแปรควบคุมทั้งคู่ (กระสวนการจับคู่แบบคลาสซีและดี ดังแสดงในบทที่ 4) และ (4) การควบคุมเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนอัสตริ่มแทนการควบคุมเครื่องสุดท้ายของกระแส

งานวิจัยในบทนี้จะพิจารณาการออกแบบโครงสร้างการควบคุมของข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน อธิบายในส่วนของทางเลือกวัตถุประสงค์ในการควบคุม, ตัวแปรควบคุม, ตัวแปรปรับ และออกแบบโครงสร้างการควบคุม โดยพิจารณาจากกฎการออกแบบการควบคุมดังเสนอในบทที่ 4 สรุปเป็นขั้นตอนในการพิจารณาการออกแบบและเลือกโครงสร้างการควบคุม โดยขั้นตอนการออกแบบที่ได้นี้ครอบคลุมประเด็นที่ได้กล่าวมาข้างต้น ในการทดสอบผลการควบคุมสามารถทำได้โดยจำลองข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนลงบนคอมพิวเตอร์โดยใช้ภาษาแมทแล็บ ซึ่งแบบจำลองที่ใช้จะเป็นลัมพ์โมเดล (Lump Model) ดังเสนอในบทที่ 3

## 5.2 ปัญหาในการออกแบบโครงสร้างการควบคุม

การออกแบบโครงสร้างการควบคุมจะประกอบด้วยการศึกษาตามขั้นตอนต่อไปนี้ (Marselle และคณะ, 1982)

1. เลือกวัตถุประสงค์ในการควบคุม (Control Objectives)
2. เลือกตัวแปรควบคุม (Controlled outputs)
3. เลือกตัวแปรวัด (Measurements)



4. เลือกตัวแปรปรับ (Manipulated Variables)
5. การออกแบบโครงสร้างการควบคุม (Control Structure)

### 5.2.1 วัตถุประสงค์ในการควบคุม

วัตถุประสงค์เชิงสถิติในการควบคุมข่างานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะแบ่งเป็น 2 ข้อ คือ

1. วัตถุประสงค์หลัก : ควบคุมอุณหภูมิขาออกของข่างานให้ได้ตรงตามเป้าหมายที่กำหนด
2. วัตถุประสงค์รอง : การนำกลับคืนพลังงานสูงสุด คือการใช้ปริมาณยูทิลิตี้ให้น้อยที่สุด

วัตถุประสงค์เชิงพลวัตในการควบคุมข่างานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน คือ โครงสร้างการควบคุมที่ออกแบบได้จะต้องส่งผ่านความแปรปรวนได้เร็วที่สุดเพื่อลดผลกระทบต่อส่วนต่าง ๆ ภายในโรงงาน

ภายในโรงงานอุตสาหกรรมความปลอดภัย, ผลต่อสิ่งแวดล้อม และค่าใช้จ่ายในการปฏิบัติการส่วนใหญ่จะขึ้นกับส่วนของถังปฏิกรณ์ และระบบการแยก อุปกรณ์เหล่านี้จะปฏิบัติการได้อย่างมีประสิทธิภาพและปลอดภัย ถ้าคงอุณหภูมิของฟีดสตรีมในค่าที่กำหนด โดยส่วนมากฟีดสตรีมจะถูกให้หรือดึงพลังงานภายในข่างานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ดังนั้นการควบคุมอุณหภูมิขาออกของข่างานให้ได้ตรงตามเป้าหมายที่กำหนดจึงเป็นสิ่งที่สำคัญ แต่อย่างไรก็ตามการสร้างข่างานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนขึ้นมาก็เพื่อให้ประหยัดการใช้พลังงาน ดังนั้นวัตถุประสงค์รองในการควบคุมจึงต้องพิจารณาควบคู่ไปด้วย เพื่อให้ได้การนำกลับคืนพลังงานสูงสุด

### 5.2.2 การเลือกตัวแปรควบคุม

ตัวแปรควบคุมในข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนส่วนมากจะเป็นอุณหภูมิขาออกของ กระแสภายในข่ายงาน อย่างไรก็ตามเพื่อทำการส่งผ่านความแปรปรวนไปยังเครื่องยูทิลิตี้ (ฮีตเตอร์หรือคูลเลอร์) อาจจะต้องมีการควบคุมอุณหภูมิภายในข่ายงานบางจุด และในข่ายงานที่เป็นข่ายงานที่ประกอบด้วยข่ายงานย่อยทั้งด้านร้อนและด้านเย็น จะต้องมีการควบคุมอุณหภูมิ ภายในข่ายงานเพื่อคงค่าความแตกต่างของอุณหภูมิน้อยที่สุดภายในข่ายงาน ( $\Delta T_{\min}$ ) โดย เป้าหมายของตัวแปรควบคุมจะแบ่งเป็น

1. คงที่ที่ค่าใดค่าหนึ่ง
2. อยู่ในช่วงที่กำหนด
3. ไม่ต่ำ หรือสูงกว่าค่าที่กำหนด

### 5.2.3 การเลือกตัวแปรวัด

โดยทั่วไป ตัวแปรควบคุมของข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะเป็นอุณหภูมิ ซึ่ง จะสะดวกรวดเร็วและง่ายต่อการวัด ดังนั้นจึงสามารถใช้อุณหภูมิเป็นตัวแปรวัดได้เลย

### 5.2.4 ตัวแปรปรับ

ตัวแปรปรับในข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีดังต่อไปนี้

1. อัตราการไหลของยูทิลิตี้ (Utility Flowrate)
2. สัดส่วนการบายพาส (Bypass Fraction)
3. อัตราส่วนในการแบ่งของกระแส (Split Fraction)
4. อัตราการไหลของกระแส (Process Stream Flow)
5. พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน (Exchanger Area) เช่น คอนเดนเซอร์แบบท่วม (Flooded)

งานวิจัยนี้จะพิจารณาเพียงข้อ 1, 2 และ 3 การเลือกที่จะปรับอัตราการใช้ของกระแสจะทำให้ยากและไม่ปลอดภัย เพราะการปรับอัตราการใช้ของกระแสแลกเปลี่ยนจะไปกระทบกับหน่วยอัสตรัม ส่งผลให้เกิดอันตรายได้

### 5.2.5 การออกแบบโครงสร้างการควบคุม

ปัญหาในการออกแบบโครงสร้างการควบคุมคือ การเลือกที่จะติดตามควบคุมที่ตำแหน่งใด Aguilera และ Marchitti (1998) ได้พิจารณาการออกแบบโครงสร้างการควบคุมโดยอาศัยสมการคณิตศาสตร์เข้าช่วย (สมการเชิงเส้นและไม่เชิงเส้น) การเลือกที่จะติดตามควบคุม แต่การพิจารณาโดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์จะมีความยุ่งยากและซับซ้อนในการหาค่าและคำนวณ Calandranis และ Stephanopoulos (1988) ได้เสนอแนวทางในการพิจารณาการออกแบบโครงสร้างการควบคุม โดยพิจารณาจากโครงสร้างของข่ายงานที่เป็นอยู่ ซึ่งแนวทางในการออกแบบโดยพิจารณาจากโครงสร้างจะเหมาะสมและไม่ซับซ้อนในการพิจารณา และให้ผลการควบคุมที่ดี

งานวิจัยนี้จะพิจารณาจากคุณสมบัติของโครงสร้างของข่ายงานที่เป็นอยู่ ร่วมกับเทคนิคการส่งผ่านความแปรปรวนของ Wongsri (1990) การพิจารณาข้างต้นจะสามารถเสนอเป็นกฎการควบคุมได้ดังบทที่ 4 ซึ่งจากกฎการควบคุมที่ได้เสนอไปแล้วนั้นสามารถเสนอขั้นตอนในการออกแบบการควบคุมที่เหมาะสมได้ดังแสดงในหัวข้อ 5.3

### 5.3 การออกแบบโครงสร้างการควบคุม

หัวข้อนี้เสนอขั้นตอนการออกแบบโครงสร้างการควบคุมที่เหมาะสมโดยใช้กฎการออกแบบดังที่เสนอในบทที่ 4 ในการพิจารณา งานวิจัยนี้มีสมมุติฐานดังต่อไปนี้

1. ไม่พิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่าเป้าหมายที่ต้องการควบคุม จะพิจารณาแค่การเปลี่ยนแปลงของภาวะที่เข้าของข่ายงาน
2. มียุทธวิธีเพียงพอในการจัดการกับความแปรปรวนที่เหลือ

3. อุณหภูมิของทุกกระแสภายในข่ายงานถูกควบคุมให้อยู่ในค่าเป้าหมายที่กำหนด
4. ช่วงความแปรปรวนที่พิจารณาคือช่วงที่ไม่ทำให้การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิพินช์เกิดการกระโดด หรือเป็นปัญหาแบบคลาส I

### 5.3.1 วิธีการออกแบบโครงสร้างการควบคุม

งานวิจัยนี้เสนอขั้นตอนในการออกแบบโครงสร้างการควบคุมได้ดังต่อไปนี้

1. กำหนดจำนวนบายพาสที่น้อยที่สุดที่ต้องติดตั้งภายในข่ายงาน โดยแบ่งเป็น
  - 1.1 ข่ายงานที่ประกอบด้วยข่ายงานย่อยด้านร้อนและด้านเย็น จำนวนบายพาสน้อยที่สุดที่ต้องการคือ  $N_y + N_p - N_{UX}$
  - 1.2 ข่ายงานที่มีเพียงข่ายงานย่อยด้านใดด้านหนึ่ง จำนวนบายพาสน้อยที่สุดที่ต้องการคือ  $N_y - N_{UX}$
  - 1.3 ถ้าข่ายงานมีการแยกของกระแสเกิดขึ้น จำนวนบายพาสน้อยที่สุดที่ต้องการจะเท่ากับ 
$$N_y + N_p - N_{UX} - \sum_{i=1}^n (N_{s_i} - 1)$$
2. แบ่งการออกแบบโครงสร้างการควบคุมเป็นโครงสร้างการควบคุมข่ายงานด้านร้อน และด้านเย็น เพื่อไม่ให้เกิดการส่งผ่านความแปรปรวนข้ามจุดพินช์ ทำให้เกิดการนำกลับคืนพลังงานสูงสุด
3. ออกแบบโครงสร้างการควบคุมโดยพิจารณาจากกฎข้อที่ 1 ถึงข้อที่ 15 (ดังแสดงในบทที่ 4) ตามลำดับ โดยอาจจะมีการสลับกฎบางข้อได้ตามความเหมาะสม
4. รวมข่ายงานย่อยทั้ง 2 เข้าด้วยกัน

## 5.4 ตัวอย่าง

### ตัวอย่าง 5.1 ข่ายงานที่ประกอบด้วยข่ายงานด้านร้อนและด้านเย็น

เมื่อพิจารณาข่ายงานของ Floudas และ Grossmann (1987) (แสดงได้ดังรูป 5.1) และภาวะขาเข้าที่เปลี่ยนแปลงไปตามตาราง 5.1 จากขั้นตอนที่เสนอในหัวข้อ 5.3 สามารถแสดงขั้นตอนการออกแบบโครงสร้างการควบคุมดังต่อไปนี้

ขั้นที่ 1 เนื่องจากข่ายงานจากรูป 5.1 ประกอบด้วยข่ายงานย่อยด้านเย็นและด้านร้อน มีคูเลเลอร์ 4 เครื่อง มีฮีตเตอร์ 1 เครื่อง มี 2 กระแสที่ข้ามจุดพินช์ กระแส C1 แยกออกเป็น 4 กระแส ดังนั้นจำนวนบายพาสที่ต้องการในการควบคุมคือ  $7-5+2-(4-1)$  เท่ากับ 1

ขั้นที่ 2 แบ่งข่ายงานออกเป็นข่ายงานย่อยด้านร้อนและด้านเย็น

### ข่ายงานย่อยด้านเย็น ดังรูป 5.2

ขั้นที่ 3 พิจารณาติดตามควบคุมที่หน่วยสุดท้ายของกระแสโดยจะติดตามกระแสบายพาสและควบคุมที่หน่วย E6 และติดตามควบคุมที่คูเลเลอร์ E5, E7, E9 และ E10 ซึ่งจะได้โครงสร้างการควบคุมดังรูป 5.4 เมื่อพิจารณารูป 5.4 จะพบว่า ความแปรปรวนทั้งหมดสามารถถูกส่งไปยังหน่วยยูทิลิตี้ได้ ตามเส้นทางการส่งผ่านความแปรปรวนดังรูป 5.5 และหน่วยยูทิลิตี้ก็สามารถรองรับความแปรปรวนตามภาวะขาเข้าที่เปลี่ยนแปลงไปดังที่แสดงในตาราง 5.1 ได้ ดังนั้นไม่จำเป็นต้องติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมและกระแสบายพาสเพิ่มเติม

### ข่ายงานย่อยด้านร้อน ดังรูป 5.3

ขั้นที่ 3 เนื่องจากข่ายงานร้อนจากตัวอย่างนี้มีการแยกของกระแสเกิดขึ้น นั่นคือกระแส C1 ดังนั้นจึงใช้สัดส่วนการแยกในการควบคุมอุณหภูมิของกระแส H1, H2 และ H3 แทนการติดตั้งกระแสบายพาส ดังแสดงโครงสร้างการควบคุมตามรูป 5.6 เมื่อพิจารณารูป 5.6 จะพบว่า ความแปรปรวนทั้งหมดสามารถถูกส่งไปยังหน่วยยูทิลิตี้ได้ ตามเส้นทางการส่งผ่านความแปรปรวนดังรูป

5.7

ชั้นที่ 4 รวมช่างงานเข้าด้วยกัน

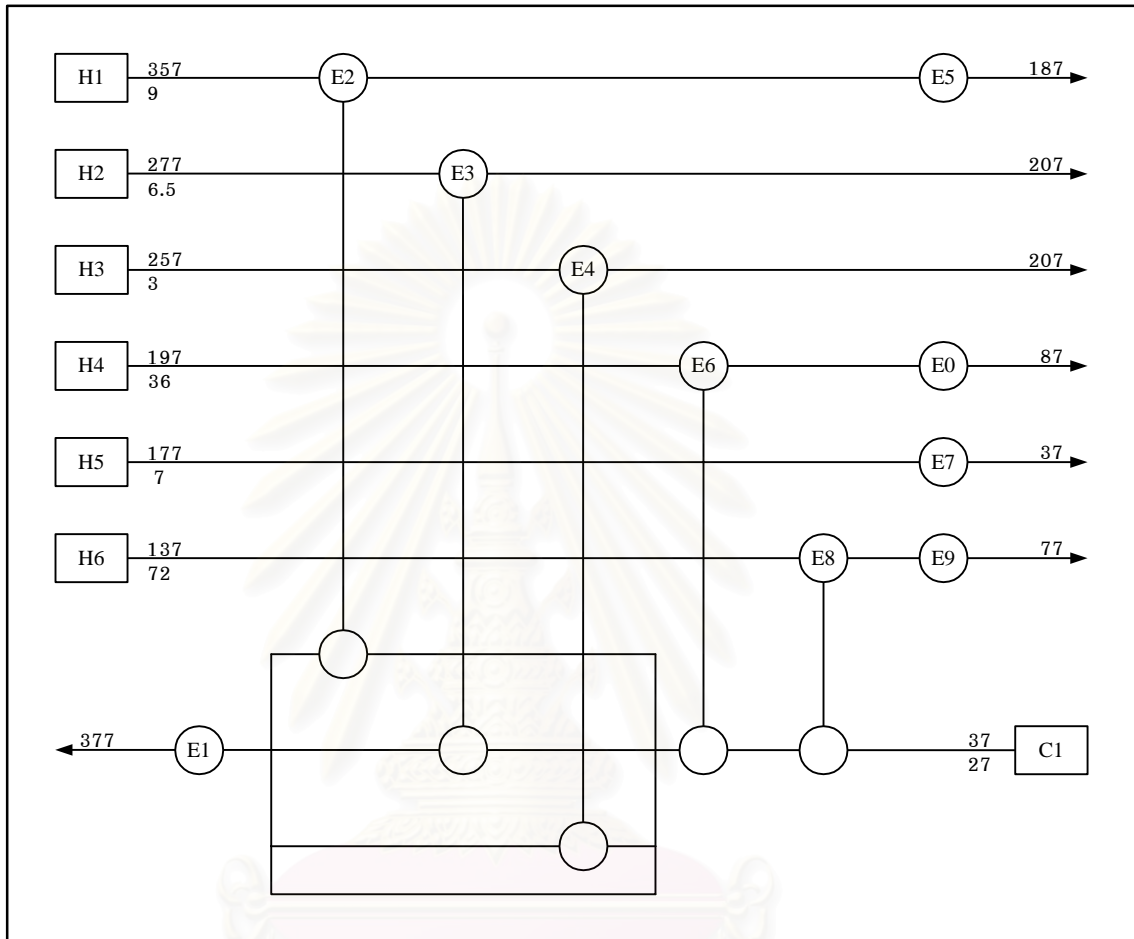
ชั้นตอนทั้งหมดจะได้โครงสร้างการควบคุมช่างงานย่อยด้านเย็นดังรูป 5.4 และด้านร้อนดังรูป 5.6 และโครงสร้างการควบคุมช่างงานรวมทั้งหมดดังรูป 5.8 (โครงสร้างที่ 1)

Floudas และ Grossmann (1987) ได้เสนอให้ทำการติดตั้งบายพาสบนทุก ๆ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ยกเว้น E2 และ E6 และหน่วยยู่ทิลิตีทั้งหมด และควบคุมอัตราส่วนการแยกของกระแสทั้งหมด แสดงได้ดังรูป 5.9 (โครงสร้างที่ 2)

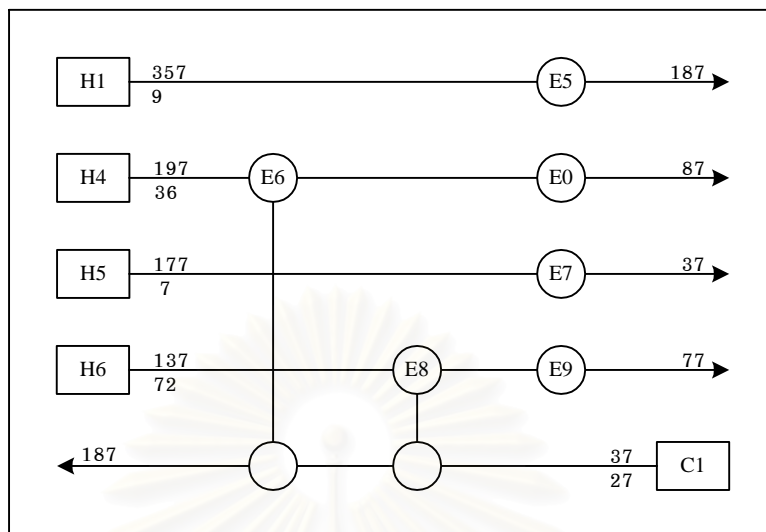
ตาราง 5.1 ภาวะขาเข้าที่เปลี่ยนแปลงไปของตัวอย่าง 5.1

กระแส	ภาวะที่ 1			ภาวะที่ 2		
	W	Tin	Tout	W	Tin	Tout
H1	9.9	367	187	8.1	347	187
H2	7.15	287	207	5.85	267	207
H3	3.3	267	207	2.7	247	207
H4	39.6	207	127	32.4	187	127
H5	7.7	187	37	6.3	167	37
H6	79.2	147	77	64.8	127	77
C1	29.7	27	377	24.3	27	377

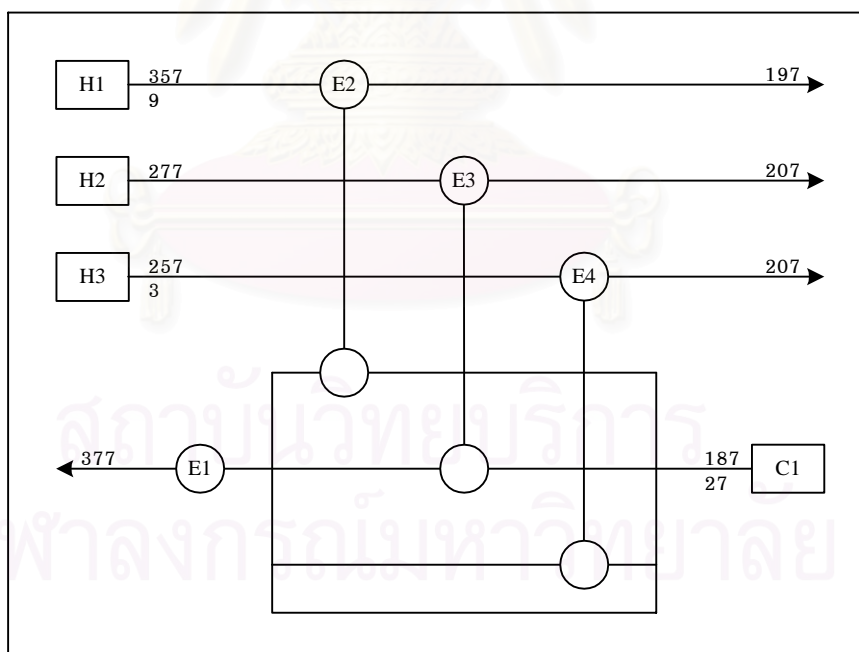
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูป 5.1 ข่ายงานสำหรับตัวอย่าง 5.1 (Floudas และ Grossmann, 1987)

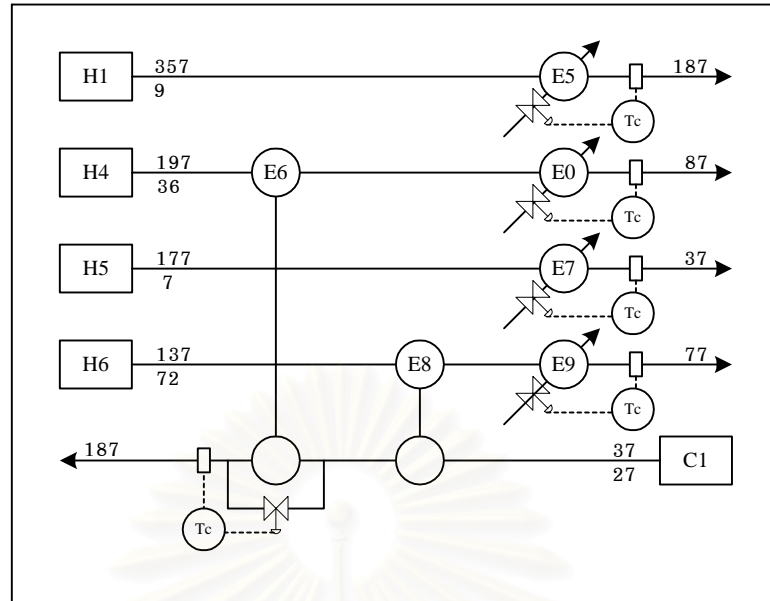


รูป 5.2 ข่ายงานย่อยด้านเย็นของตัวอย่าง 5.1

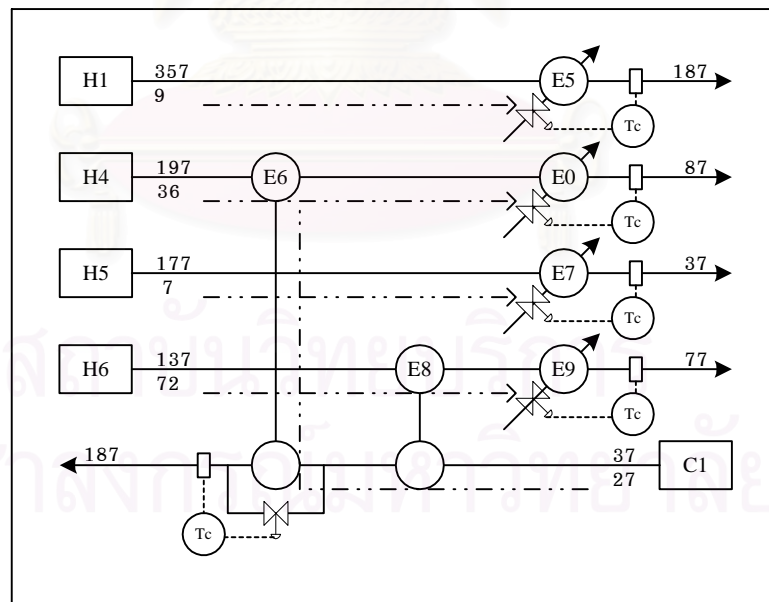


รูป 5.3 ข่ายงานย่อยด้านร้อนของตัวอย่าง 5.1

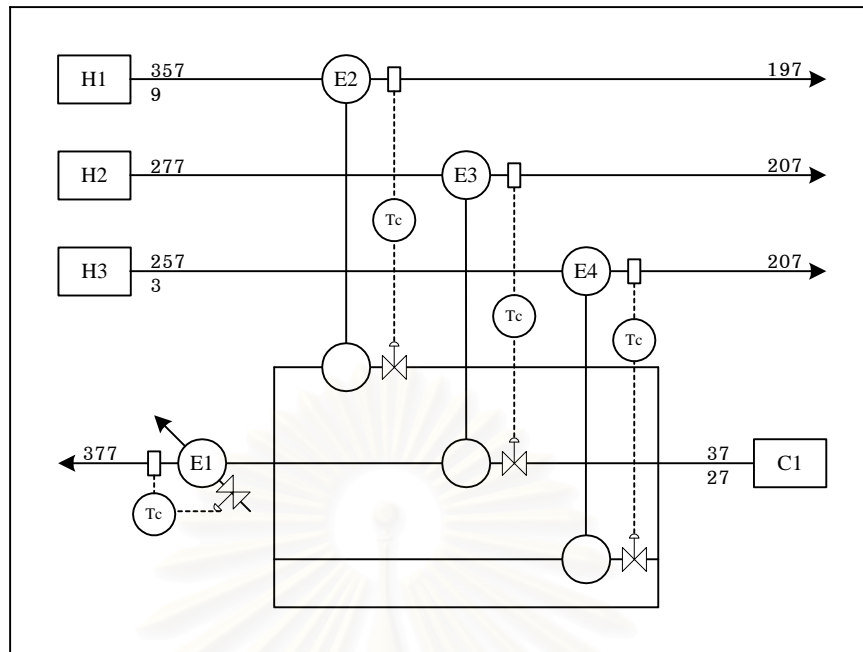




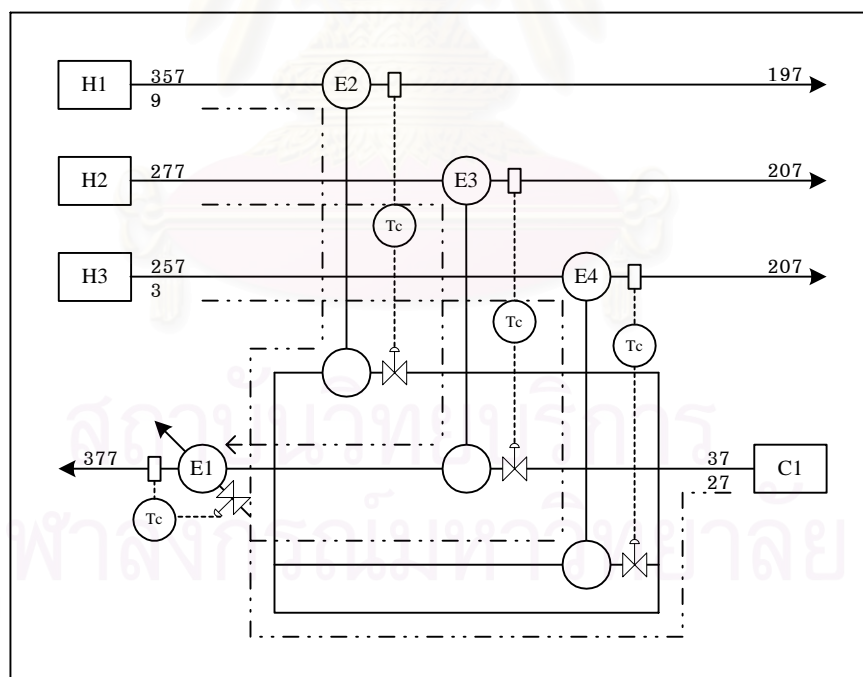
รูป 5.4 โครงสร้างการควบคุมข่ายงานย่อยด้านเย็นของตัวอย่าง 5.1



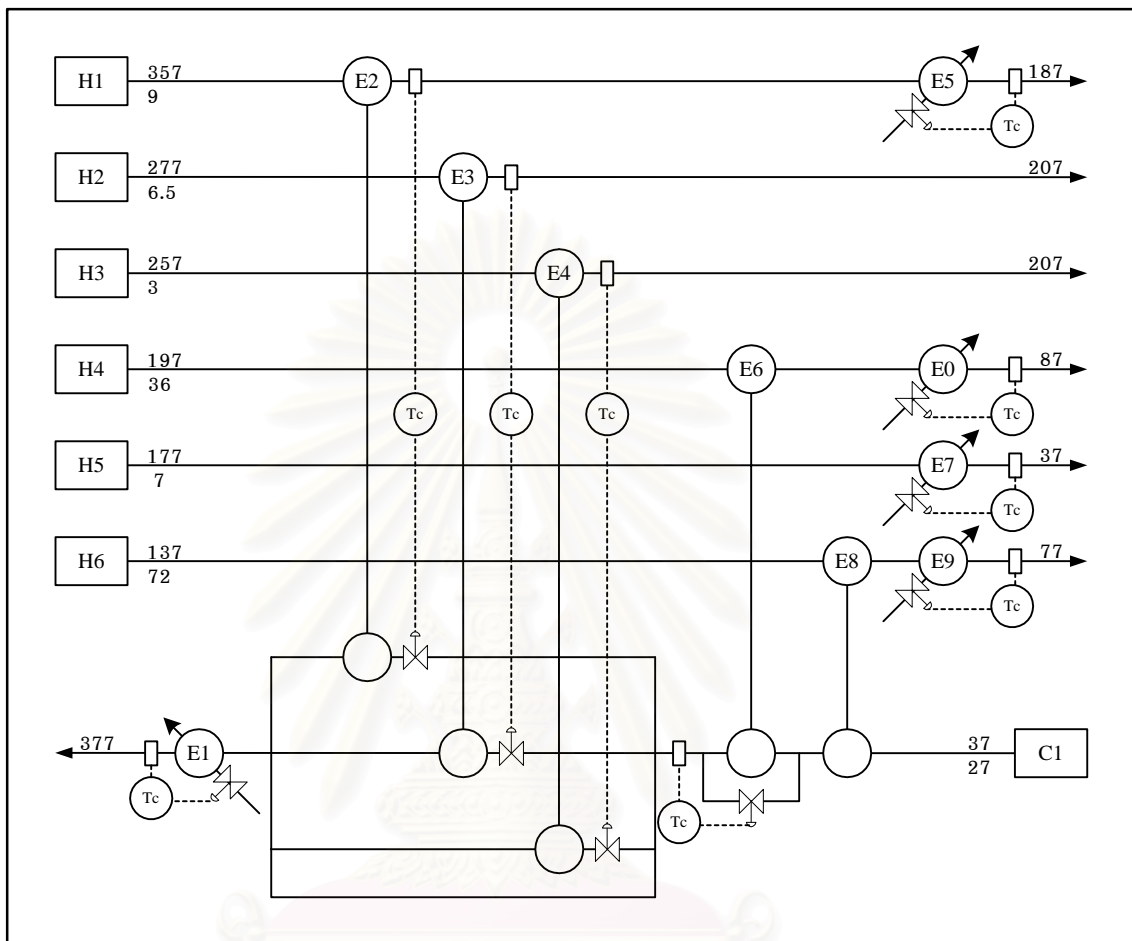
รูป 5.5 เส้นทาง การส่งผ่านความแปรปรวนของโครงสร้างการควบคุมข่ายงานย่อยด้านเย็นใน ตัวอย่าง 5.1



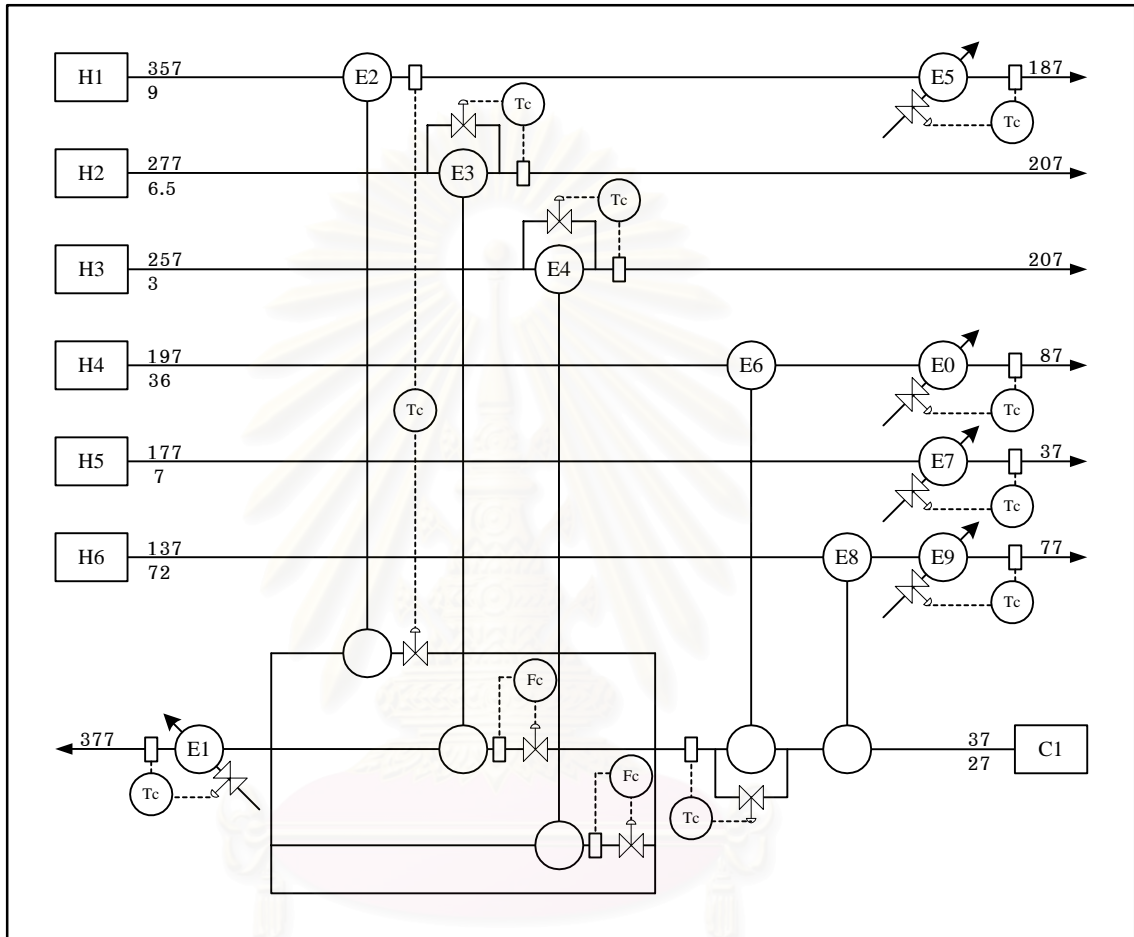
รูป 5.6 โครงสร้างการควบคุมข่ายงานย่อยด้านร้อนของตัวอย่าง 5.1



รูป 5.7 เส้นทางการส่งผ่านความแปรปรวนของโครงสร้างการควบคุมข่ายงานย่อยด้านร้อนในตัวอย่าง 5.1

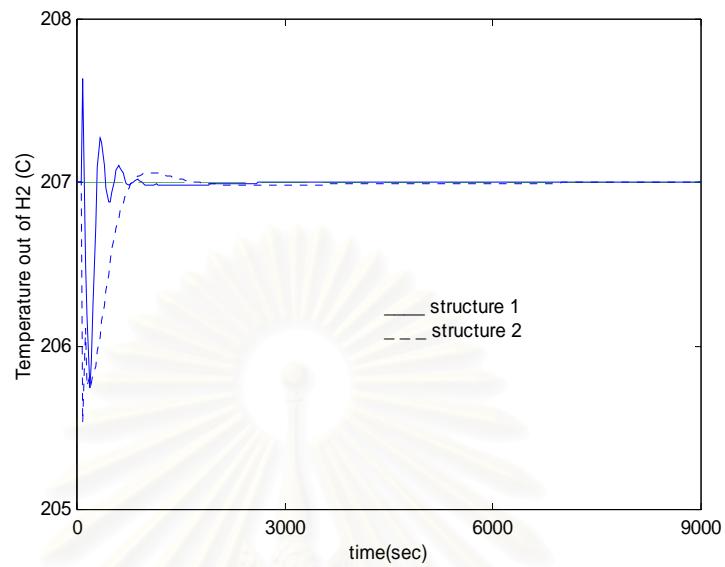


สถาบันวิทยบริการ  
 รูป 5.8 โครงสร้างการควบคุมของเขายางนตามตัวอย่าง 5.1 (โครงสร้างที่ 1)  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

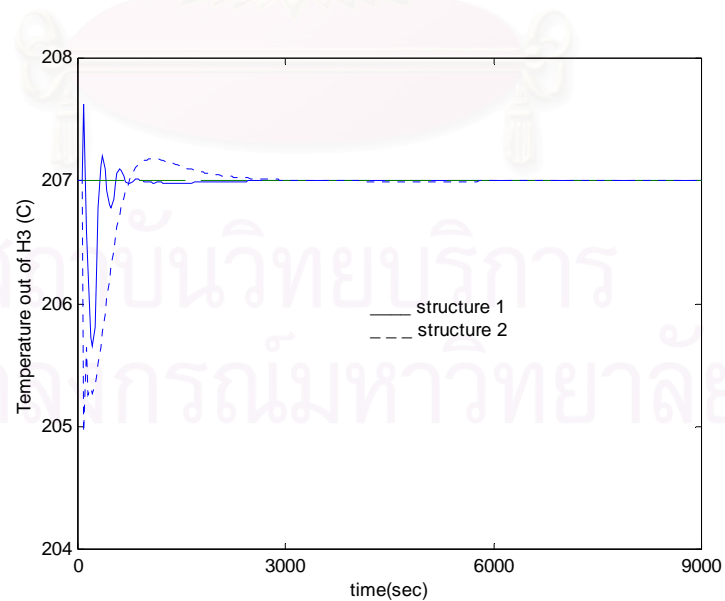


รูป 5.9 โครงสร้างการควบคุมข่ายงานของ Floudas และ Grossmann (1987) (โครงสร้างที่ 2)

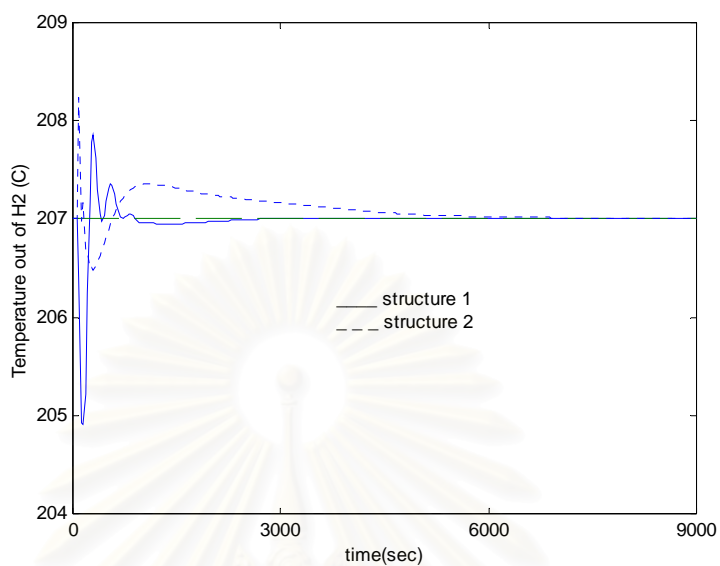
เมื่อภาวะขาเข้าเปลี่ยนแปลงไปตามตาราง 5.1 สามารถใช้ชุดเลขชั้นได้ผลการควบคุมของโครงสร้างการควบคุมทั้ง 2 โครงสร้างจะแสดงดังรูปที่ 5.10 ถึง 5.27 และตาราง 5.2



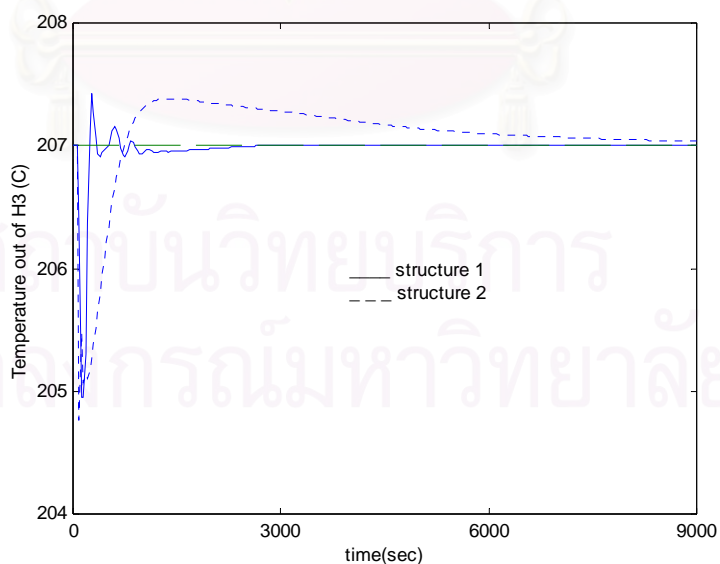
รูป 5.10 ผลการควบคุมอุณหภูมิของกระแส H2 ในตัวอย่าง 5.1 เมื่อภาวะขาเข้าเปลี่ยนแปลงไป เป็นภาวะที่ 1



รูป 5.11 ผลการควบคุมอุณหภูมิของกระแส H3 ในตัวอย่าง 5.1 เมื่อภาวะขาเข้าเปลี่ยนแปลงไป เป็นภาวะที่ 2



รูป 5.12 ผลการควบคุมอุณหภูมิของกระแสด H2 ในตัวอย่าง 5.1 เมื่อภาวะขาเข้าเปลี่ยนแปลงไป เป็นภาวะที่ 2



รูป 5.13 ผลการควบคุมอุณหภูมิของกระแสด H3 ในตัวอย่าง 5.1 เมื่อภาวะขาเข้าเปลี่ยนแปลงไป เป็นภาวะที่ 2

ตาราง 5.2 เปรียบเทียบค่าเวลาความคลาดเคลื่อนแบบสัมบูรณ์ของโครงสร้างการควบคุมที่ 1 และ 2 จากตัวอย่าง 5.1 ( $\times 10^4$ )

กระแส	ภาวะที่ 1		ภาวะที่ 2	
	โครงสร้างที่ 1	โครงสร้างที่ 2	โครงสร้างที่ 1	โครงสร้างที่ 2
H2	9.7539	29.5287	23.4780	94.359
H3	10.9164	42.2760	19.0443	128.529

เมื่อพิจารณาผลการตอบสนองของข่ายงานตามรูป 5.10, 5.11, 5.12 และ 5.13 และ ตาราง 5.2 พบว่า การปรับสัดส่วนการแยกของกระแสในการควบคุมกระแสคู่แลกเปลี่ยนกับ กระแสที่มีการแยก (โครงสร้างที่ 1) จะให้ผลการตอบสนองที่ดีกว่าการใช้การบายพาสบนเครื่อง แลกเปลี่ยนความร้อนในการควบคุม (โครงสร้างที่ 2) เนื่องจากโครงสร้างการควบคุมที่ 2 ในการ ควบคุมอุณหภูมิจะใช้การปรับกระแสบายพาส ซึ่งการควบคุมโดยการปรับกระแสบายพาสจะมีผล ต่ออุณหภูมิช้ากว่าการปรับอัตราการไหลโดยตรง นอกจากนี้ยังจะเป็นการสิ้นเปลืองการติดตั้ง วาล์วควบคุมอีกด้วย เพราะโครงสร้างที่ 2 จะต้องมีการปรับสัดส่วนแยกด้วย เพราะถ้าไม่มีการ ควบคุมสัดส่วนการแยก อาจจะไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิให้เข้าสู่ค่าเป้าหมายได้ เนื่องจาก หน่วยแลกเปลี่ยนความร้อนไม่สามารถรองรับความแปรปรวนที่เข้ามาในข่ายงานได้

เมื่อพิจารณาผลการหาค่าเวลาความคลาดเคลื่อนแบบสัมบูรณ์ของโครงสร้าง การควบคุมที่ออกแบบโดยใช้ขั้นตอนในหัวข้อ 5.3 และโครงสร้างที่ออกแบบโดย Floudas และ Grossmann (1987) ผลการเปรียบเทียบจะเห็นได้ว่าโครงสร้างที่ออกแบบโดยขั้นตอนที่ได้เสนอใน งานวิจัยนี้ จะให้ผลการตอบสนองที่ดีกว่า คือมีการตอบสนองที่เร็วกว่าและมีค่าเวลาความ คลาดเคลื่อนสัมบูรณ์น้อยกว่า โดยมีการติดตั้งอุปกรณ์น้อยกว่า และติดตั้งการบายพาสน้อย กว่า โดยที่ทั้ง 2 โครงสร้างจะมีการใช้พลังงานจากหน่วยยูนิตที่น้อยที่สุด โดยที่ภาวะที่ 1 จะใช้ ยูทิ

ลิฮีรอน 2992 kW และยูทิลิตี้เย็น 6456 kW และภาวะที่ 2 ใช้ยูทิลิตี้ฮีรอน 3105 kW และยูทิลิตี้เย็น 2978 kW โดยภาวะที่ 1 อุณหภูมิพินช์คือ  $207/197^{\circ}\text{C}$  และภาวะที่ 2 คือ  $187/177^{\circ}\text{C}$  (คำนวณจากวิธีตารางปัญหา)

**ตัวอย่าง 5.2** ข่ายงานที่มีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมากกว่า 1 ตัวในกระแส

เมื่อพิจารณาจากข่ายงานของ Calandranis และ Stephanopoulos (1986) แสดงได้ดังรูป 5.14 และภาวะที่เปลี่ยนแปลงไปตามตาราง 5.3 จากขั้นตอนที่เสนอในหัวข้อ 5.3 สามารถแสดงขั้นตอนการออกแบบโครงสร้างการควบคุมดังต่อไปนี้

ขั้นที่ 1 เนื่องจากข่ายงานจากรูป 5.14 เป็นข่ายงานย่อยด้านร้อน มีฮีตเตอร์ 2 เครื่อง ดังนั้นจำนวนบายพาสที่ต้องการในการควบคุมคือ  $6-2 = 4$

ขั้นที่ 2 เนื่องจากข่ายงานเป็นข่ายงานย่อยจึงไม่ต้องมีการแบ่งข่ายงาน

ขั้นที่ 3 พิจารณาติดลูฟควบคุมที่หน่วยสุดท้ายของกระแสโดยจะติดกระแสบายพาสและลูฟควบคุมที่หน่วย E2, E3, E4 และ E6 และติดลูฟควบคุมที่ฮีตเตอร์ E7 และ E8 ซึ่งจะได้โครงสร้างการควบคุมดังรูป 5.15

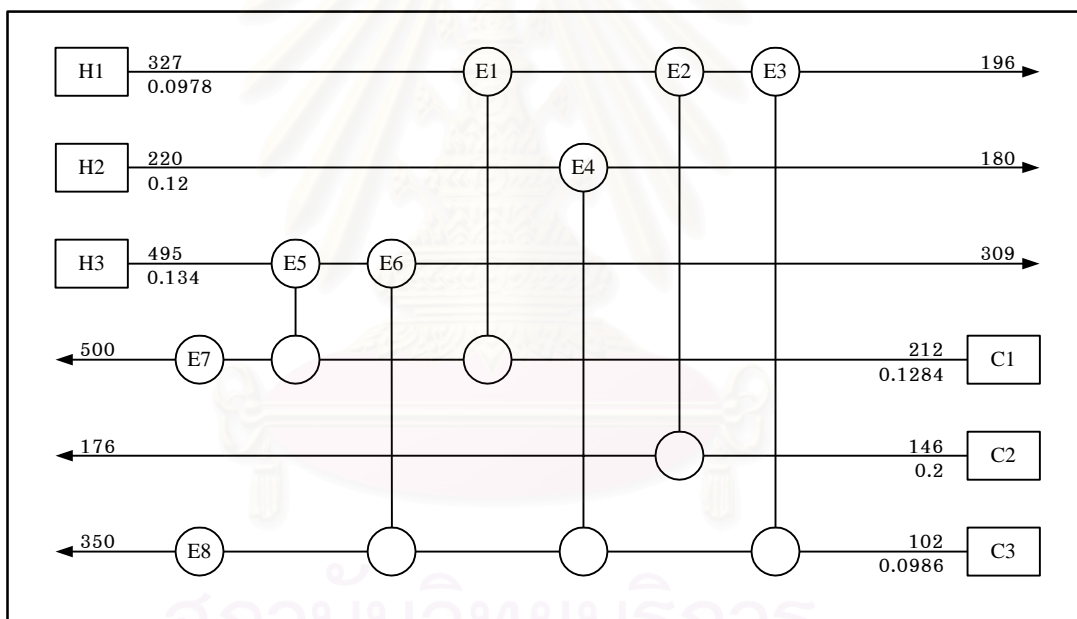
**ตาราง 5.3** ภาวะขาเข้าที่เปลี่ยนแปลงไปของตัวอย่าง 5.2

กระแส	ภาวะที่ 1			ภาวะที่ 2		
	W	T <sub>in</sub>	T <sub>out</sub>	W	T <sub>in</sub>	T <sub>out</sub>
H1	0.0978	337	196	0.0929	317	196
H2	0.1200	230	180	0.0114	225	180
H3	0.1340	490	309	0.1273	490	309
C1	0.1284	205	500	0.1220	202	500
C2	0.200	144	176	0.1960	148	176
C3	0.0986	92	327	0.0937	108	327

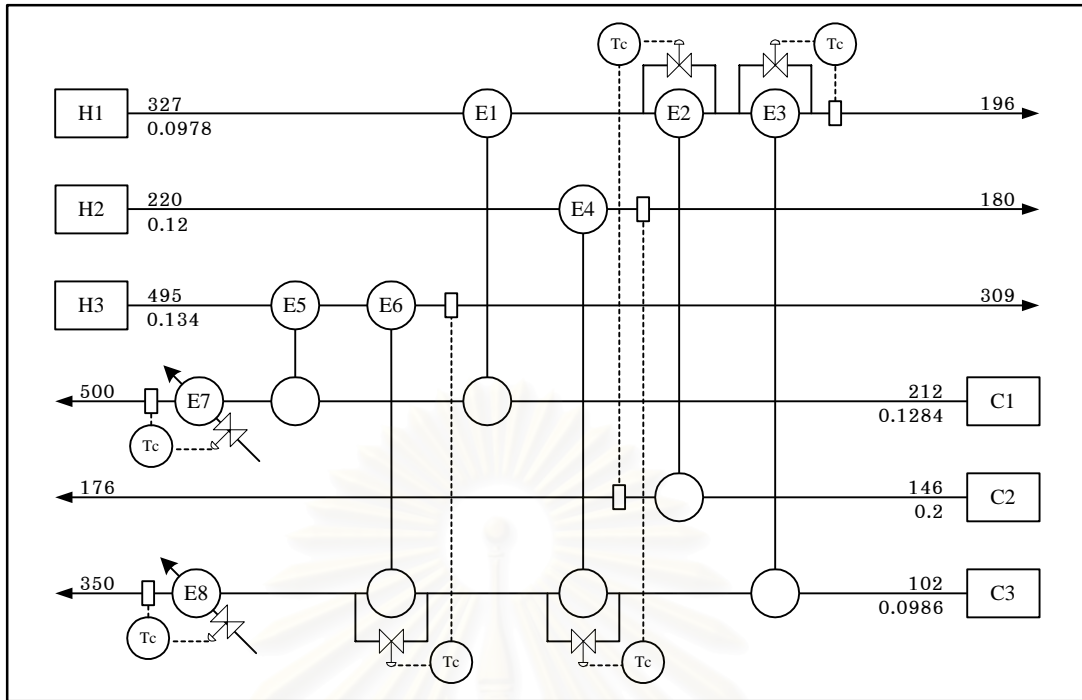


เมื่อพิจารณารูป 5.15 จะพบว่า ความแปรปรวนทั้งหมดสามารถถูกส่งไปยังหน่วยยุติคดีได้ ตามเส้นทางการส่งผ่านความแปรปรวนดังรูป 5.16 และหน่วยยุติคดีก็สามารถรองรับความแปรปรวนตามภาวะขาเข้าที่เปลี่ยนแปลงไปดังที่แสดงในตาราง 5.3 ได้ ดังนั้นไม่จำเป็นต้องติดตั้งลู่วิศวกรรมและกระแสนายพาสเพิ่มเติม

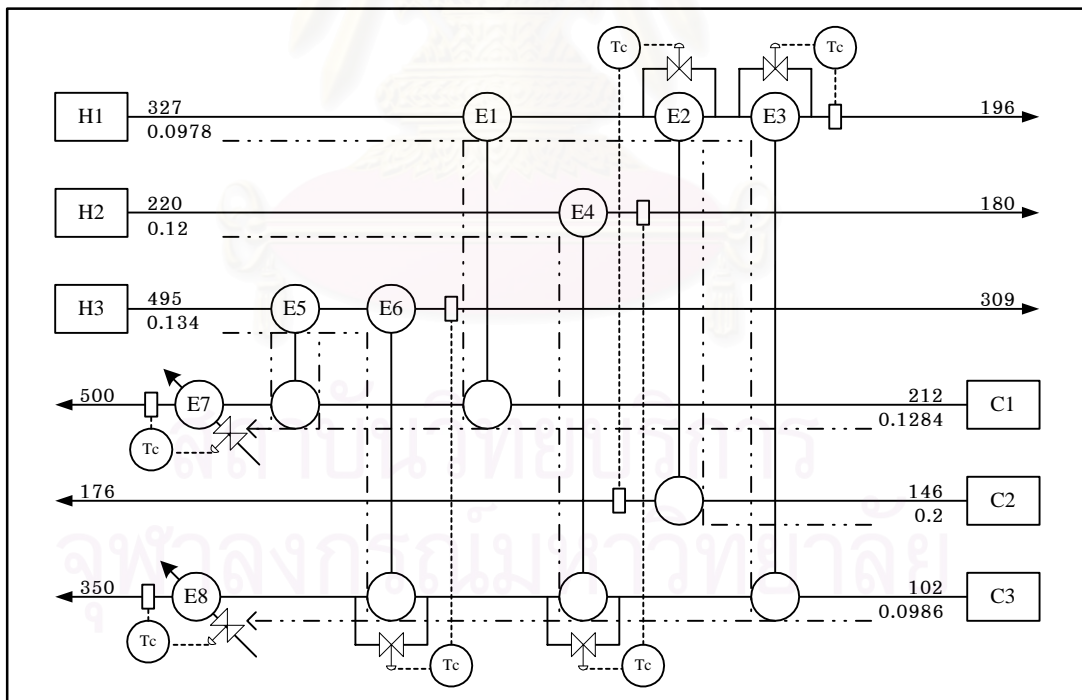
ขั้นตอนทั้งหมดจะได้โครงสร้างการควบคุมดังรูป 5.15 (โครงสร้างที่ 1) เมื่อพิจารณาติดกระแสนายพาสบนด้านที่ต้องการควบคุมอุณหภูมิโดยไม่พิจารณาถึงอัตราการใช้จากตัวอย่าง 5.2 จะแสดงโครงสร้างการควบคุมได้ดังรูป 5.17 (โครงสร้างที่ 2) เมื่อภาวะขาเข้าของข่ายงานเปลี่ยนแปลงไปดังตาราง 5.3 จะแสดงผลการควบคุมได้ดังรูป 5.18 ถึง รูป 5.25 และตาราง 5.4



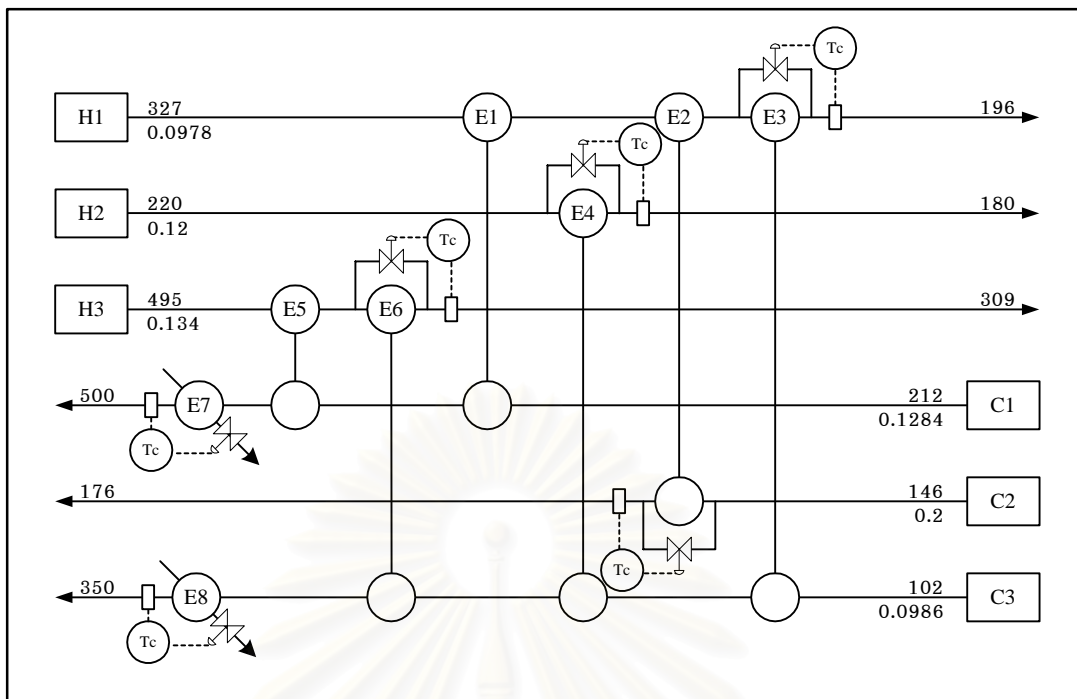
รูป 5.14 ข่ายงานสำหรับตัวอย่าง 5.2 (Calandranis และ Stephanopoulos, 1986)



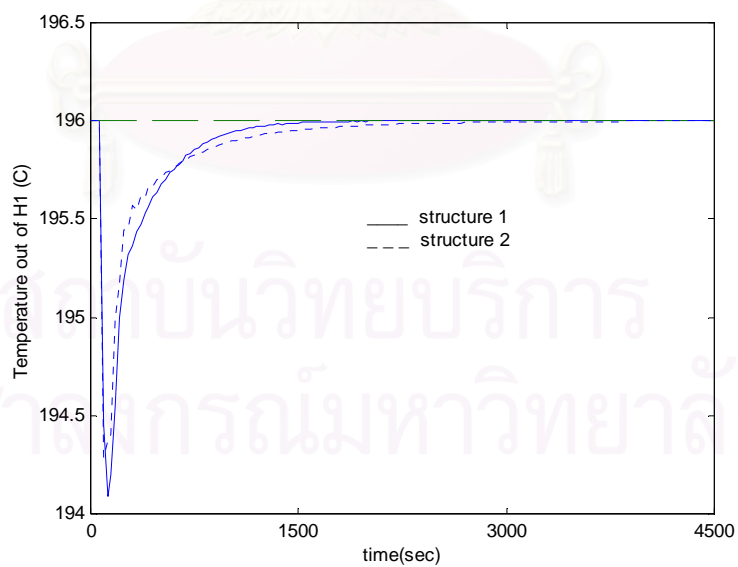
รูป 5.15 โครงสร้างการควบคุมของข่ายงานตามตัวอย่าง 5.2 (โครงสร้างที่ 1)



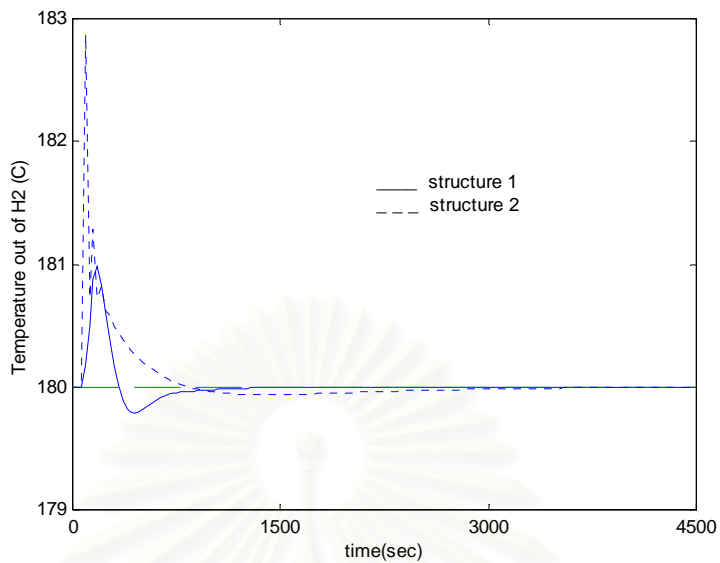
รูป 5.16 เส้นทางที่ส่งผ่านความแปรปรวนของโครงสร้างการควบคุมของข่ายงานตามตัวอย่าง 5.2 (โครงสร้างที่ 1)



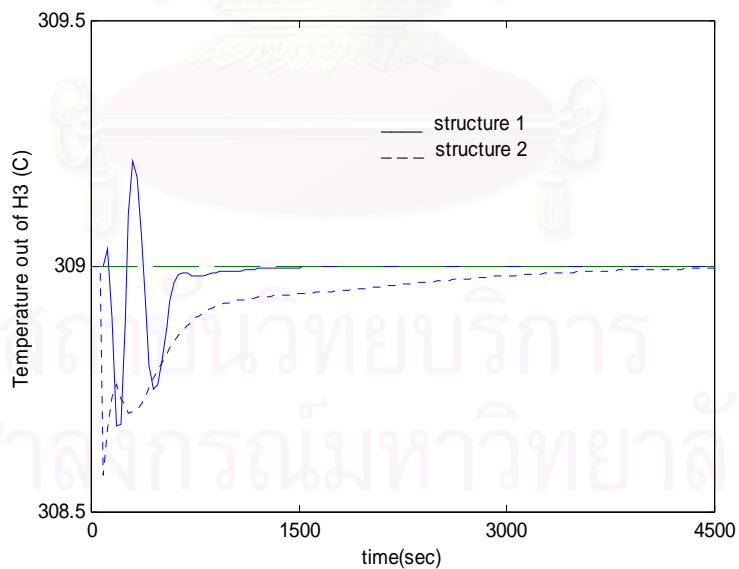
รูป 5.17 โครงสร้างการควบคุมของข่ายงานตามตัวอย่าง 5.2 (โครงสร้างที่ 2)



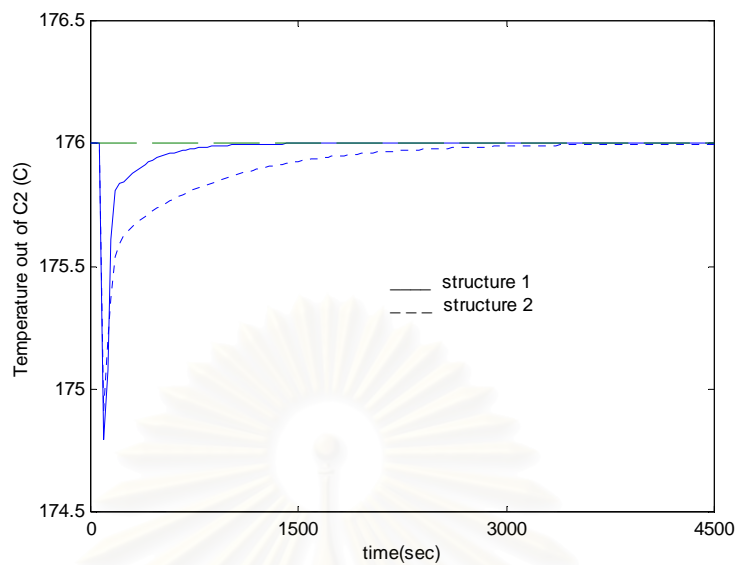
รูป 5.18 ผลการควบคุมอุณหภูมิของกระแสด H1 ในตัวอย่าง 5.2 เมื่อภาวะขาเข้าเปลี่ยนแปลงไป เป็นภาวะที่ 1



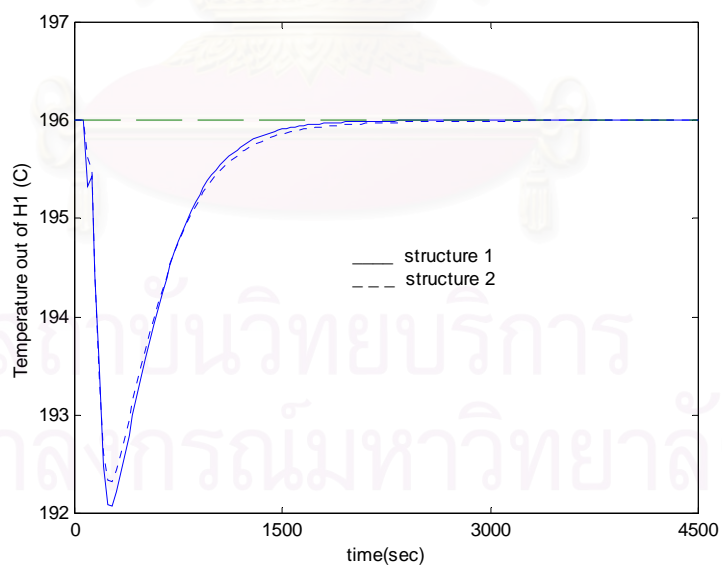
รูป 5.19 ผลการควบคุมอุณหภูมิของกระแสด H2 ในตัวอย่าง 5.2 เมื่อภาวะขาเข้าเปลี่ยนแปลงไป เป็นภาวะที่ 1



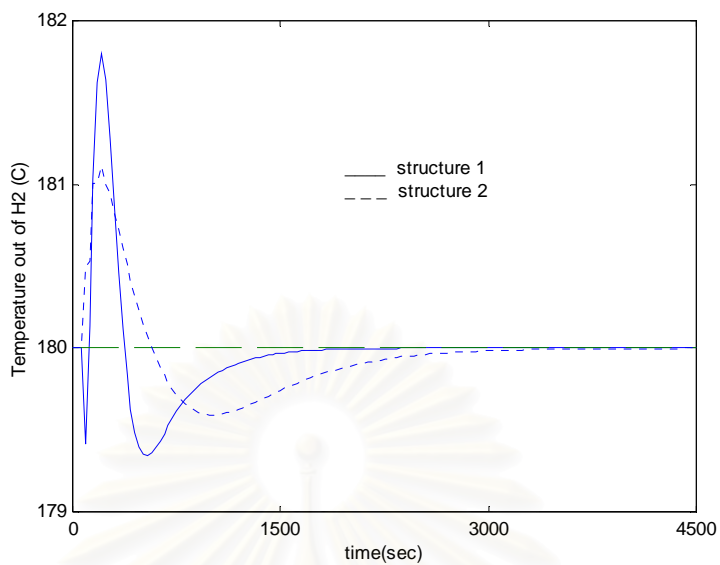
รูป 5.20 ผลการควบคุมอุณหภูมิของกระแสด H3 ในตัวอย่าง 5.2 เมื่อภาวะขาเข้าเปลี่ยนแปลงไป เป็นภาวะที่ 1



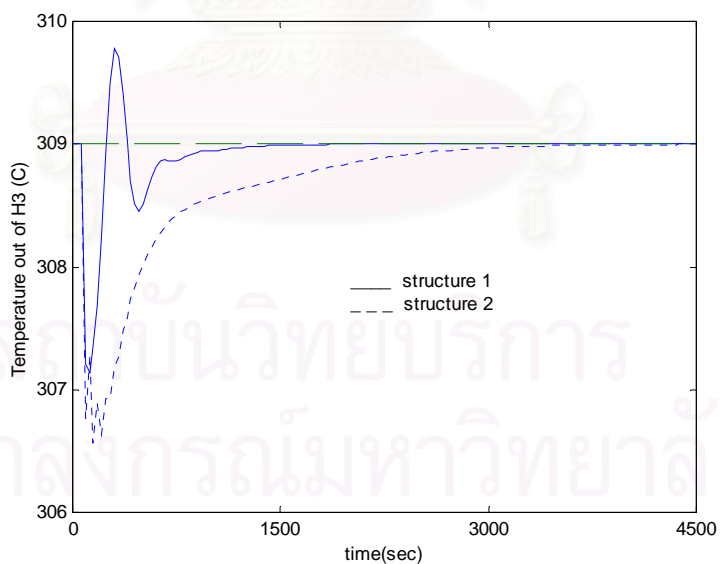
รูป 5.21 ผลการควบคุมอุณหภูมิของกระแสด C2 ในตัวอย่าง 5.2 เมื่อภาวะขาเข้าเปลี่ยนแปลงไป เป็นภาวะที่ 1



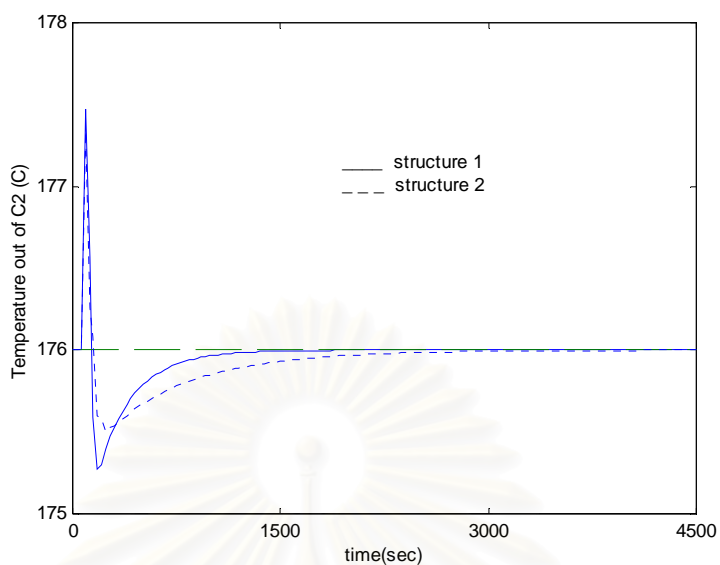
รูป 5.22 ผลการควบคุมอุณหภูมิของกระแสด H1 ในตัวอย่าง 5.2 เมื่อภาวะขาเข้าเปลี่ยนแปลงไป เป็นภาวะที่ 2



รูป 5.23 ผลการควบคุมอุณหภูมิของกระแส H2 ในตัวอย่าง 5.2 เมื่อภาวะขาเข้าเปลี่ยนแปลงไป เป็นภาวะที่ 2



รูป 5.24 ผลการควบคุมอุณหภูมิของกระแส H3 ในตัวอย่าง 5.2 เมื่อภาวะขาเข้าเปลี่ยนแปลงไป เป็นภาวะที่ 2



รูป 5.25 ผลการควบคุมอุณหภูมิของกระแสด C2 ในตัวอย่าง 5.2 เมื่อภาวะขาเข้าเปลี่ยนแปลงไป เป็นภาวะที่ 2

ตาราง 5.4 เปรียบเทียบค่าเวลาความคลาดเคลื่อนแบบสัมบูรณ์ของโครงสร้างการควบคุมที่ 1 และ 2 จากตัวอย่าง 5.2 ( $\times 10^4$ )

กระแสด	ภาวะที่ 1		ภาวะที่ 2	
	โครงสร้างที่ 1	โครงสร้างที่ 2	โครงสร้างที่ 1	โครงสร้างที่ 2
H1	17.7390	21.3420	108.3150	117.4477
H2	7.3920	22.0410	31.2900	71.079
H3	3.8400	25.7880	15.8790	112.0620
C2	3.3840	9.2700	10.6650	30.3900

เมื่อพิจารณารูป 5.18 และ 5.25 จะพบว่า การควบคุมอุณหภูมิขาออกของกระแสตามโครงสร้างการควบคุมที่ 1 จะให้ผลการควบคุมที่ดีกว่า เนื่องจากโครงสร้างการควบคุมที่ 1 จะพิจารณาติดตั้งกระแสบายพาสโดยดูจากอัตราการไหลของกระแส การติดตั้งกระแสบายพาสบนด้านที่มีอัตราการไหลน้อย จะส่งผลให้ค่าคงที่ของการหน่วงเวลาของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีค่าน้อยกว่าการติดตั้งกระแสบายพาสด้านอัตราการไหลมาก ซึ่งการควบคุมกระแส H2, H3 และ C2 จะเห็นได้อย่างชัดเจน แต่ในการควบคุมกระแส H1 อาจจะไม่พบความแตกต่างที่ชัดเจน เนื่องจากโครงสร้างที่ 1 และ 2 มีการติดตั้งกระแสบายพาสด้านเดียวกัน แต่ในการควบคุมโครงสร้างที่ 1 จะให้ผลการควบคุมที่ดีกว่า เนื่องจากผลการควบคุมในหน่วย E2

เมื่อพิจารณารูป 5.16 พบว่าความแปรปรวนส่วนใหญ่จะต้องถูกส่งผ่านไปยังหน่วย E8 ซึ่งเมื่อพิจารณาถึงโหลดของหน่วย E7 และ E8 พบว่า หน่วย E8 จะสามารถรองรับความแปรปรวนได้น้อยกว่า เนื่องจากในตัวแบบนี้ปริมาณความแปรปรวนที่พิจารณามีปริมาณน้อย ซึ่งหน่วย E8 สามารถรองรับได้ทั้งหมด แต่ถ้ากรณีที่มีปริมาณความแปรปรวนจำนวนมาก ๆ ซึ่งหน่วย E8 ไม่สามารถรองรับได้ (ทำให้โหลดของ E8 เป็น 0) ดังนั้นจะต้องมีการติดตั้งควบคุมและกระแสบายพาสเพิ่มเติม เมื่อพิจารณาจากข่างานสามารถติดตั้งบายพาสได้ 2 ทางเลือกคือ ที่ E1 และ E5 ซึ่งเมื่อพิจารณาจากการติดตั้งที่หน่วย E1 จะพบว่ายังคงมีเส้นทางส่งผ่านความแปรปรวนไปยังหน่วย E8 อยู่ดี แต่ถ้าติดตั้งที่หน่วย E5 จะสามารถส่งผ่านความแปรปรวนไปยังหน่วย E7 ได้ตามต้องการ ดังนั้นควรจะเลือกติดตั้งกระแสบายพาสและควบคุมเพิ่มที่หน่วย E5 และเนื่องจากหน่วยนี้มีปริมาณโหลดที่มากกว่าหน่วย E1 จึงสามารถรองรับความแปรปรวนได้มากกว่าโดยส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงภาวะในข่างานน้อยกว่า

เมื่อพิจารณาจากผลการควบคุมทั้งหมดและค่าเวลาความคลาดเคลื่อนแบบสัมบูรณ์ ดังแสดงในตาราง 5.4 พบว่า โครงสร้างการควบคุมที่ 1 ที่ได้จากการออกแบบในงานวิจัยนี้ จะให้ผลการควบคุมที่ดีกว่าโครงสร้างที่ 2 เนื่องจากมีการจัดการส่งผ่านความแปรปรวนได้เร็วที่สุด ทำให้ผลการตอบสนองเข้าสู่ค่าเป้าหมายได้เร็วกว่า และทั้ง 2 โครงสร้างการควบคุมจะใช้ปริมาณยูนิตีที่ดีจากภายนอกน้อยที่สุด นั่นคือ เมื่อภาวะเปลี่ยนแปลงไปเป็นภาวะที่ 1 (ตามตาราง 5.5) จะใช้



ยูทิลิตี้เย็นเท่ากับ 25.7 kW และเมื่อภาวะเปลี่ยนแปลงไปเป็นภาวะที่ 2 (ตามตาราง 5.5) จะใช้ ยูทิลิตี้เย็นเท่ากับ 25.2 kW (คำนวณจากวิธีตารางปัญหา)

### ตัวอย่าง 5.3 ข่ายงานย่อยด้านเย็น

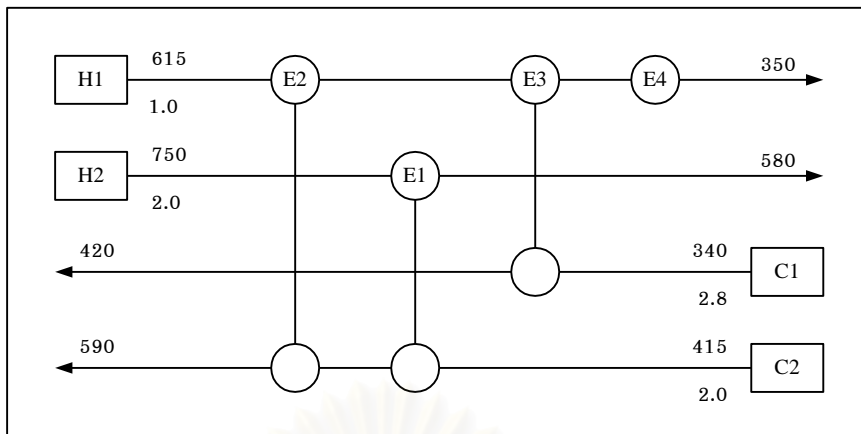
เมื่อพิจารณาจากข่ายงานของ Wongsri (1990) แสดงได้ดังรูป 5.26 เมื่ออุณหภูมิขาเข้าของกระแสด H1 เปลี่ยนแปลงไปเป็น 610 C และอัตราการไหลของมวลความร้อนจำเพาะของกระแสด H1 และ C1 เปลี่ยนแปลงไปเป็น 1.85 และ 3.0 kW/C ตามลำดับ จากขั้นตอนที่เสนอในหัวข้อ 5.3 สามารถแสดงขั้นตอนการออกแบบโครงสร้างการควบคุมดังต่อไปนี้

ขั้นที่ 1 เนื่องจากข่ายงานจากรูป 5.14 เป็นข่ายงานย่อยด้านเย็น มีคูเลออร์ 1 เครื่อง ดังนั้นจำนวนบายพาสที่ต้องการในการควบคุมคือ  $4-1 = 3$

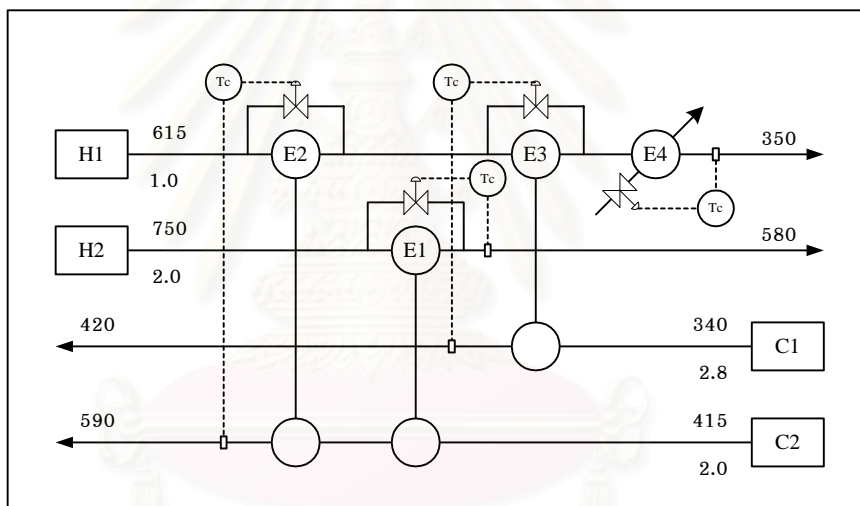
ขั้นที่ 2 เนื่องจากข่ายงานเป็นข่ายงานย่อยจึงไม่ต้องการแบ่งข่ายงาน

ขั้นที่ 3 พิจารณาติดตามควบคุมที่หน่วยสุดท้ายของกระแสดโดยจะติดกระแสดบายพาสและดูฟควบคุมที่หน่วย E1, E2 และ E3 และติดตามควบคุมที่คูเลออร์ E4

ขั้นตอนทั้งหมดจะได้โครงสร้างการควบคุมดังรูป 5.27 (โครงสร้างที่ 1) เมื่อพิจารณาติดกระแสดบายพาสบนด้านที่ต้องการควบคุมอุณหภูมิโดยไม่พิจารณาถึงอัตราการไหลจากตัวอย่าง 5.3 จะแสดงโครงสร้างการควบคุมได้ดังรูป 5.28 (โครงสร้างที่ 2) เมื่อภาวะขาเข้าของข่ายงานเปลี่ยนแปลงไป จะแสดงผลการควบคุมได้ดังรูป 5.29 และรูป 5.30 และตาราง 5.5

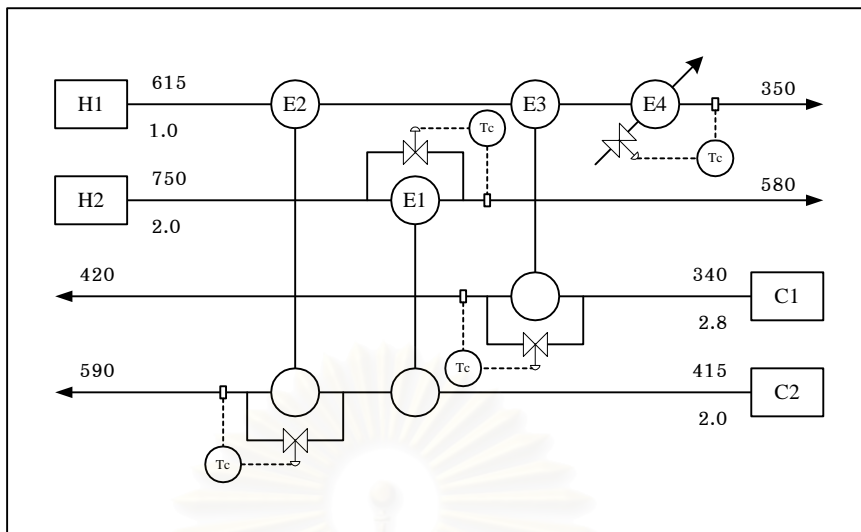


รูป 5.26 ข่ายงานสำหรับตัวอย่าง 5.3 (Wongsri, 1990)

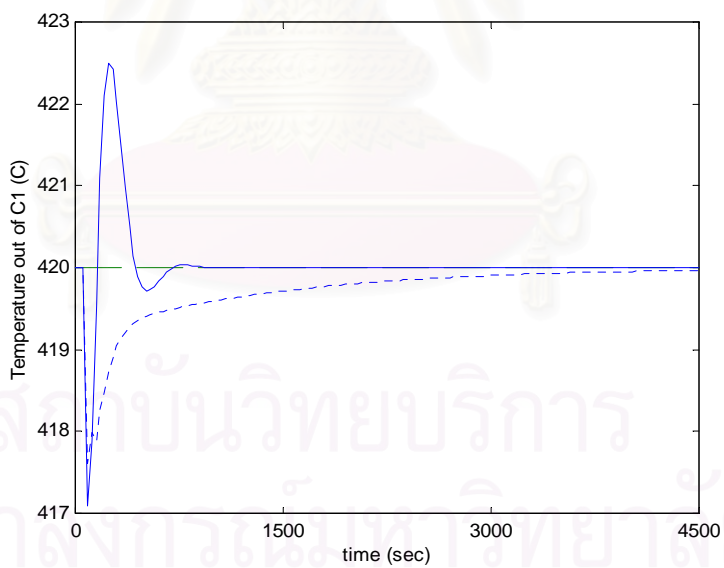


รูป 5.27 โครงสร้างการควบคุมของข่ายงานตามตัวอย่าง 5.3 (โครงสร้างที่ 1)

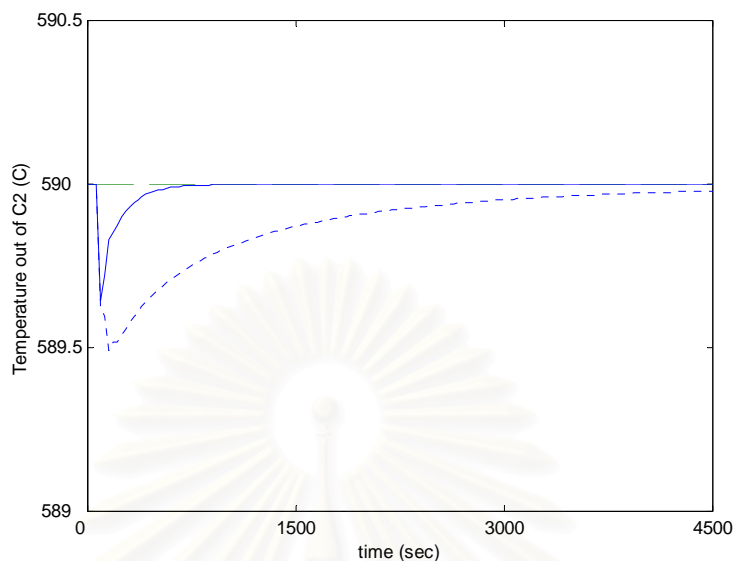
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูป 5.28 โครงสร้างการควบคุมของข่ายงานตามตัวอย่าง 5.3 (โครงสร้างที่ 2)



รูป 5.29 ผลการควบคุมอุณหภูมิของกระแส C1 ในตัวอย่าง 5.3



รูป 5.30 ผลการควบคุมอุณหภูมิของกระแส C2 ในตัวอย่าง 5.3

ตาราง 5.5 เปรียบเทียบค่าเวลาความคลาดเคลื่อนแบบสัมบูรณ์ของโครงสร้างการควบคุมที่ 1 และ 2 จากตัวอย่าง 5.3 ( $\times 10^4$ )

กระแส	โครงสร้างที่ 1	โครงสร้างที่ 2
C1	5.74	47.104
C2	0.421	22.84

เมื่อพิจารณาจากผลการควบคุมและค่าเวลาความคลาดเคลื่อนแบบสัมบูรณ์ ดังแสดงในรูป 5.29 รูป 5.30 และตาราง 5.5 พบว่า โครงสร้างการควบคุมที่ 1 ที่ได้จากการออกแบบในงานวิจัยนี้จะให้ผลการควบคุมที่ดีกว่าโครงสร้างที่ 2 เนื่องจากจากการติดตั้งกระแสบายพาสด้านอัตราการไหลน้อยจะส่งผลให้ผลการตอบสนองของระบบเร็วกว่าการติดตั้งกระแสบายพาสด้านอัตราการไหลมาก ซึ่งโครงสร้างการควบคุมที่ 2 จะติดตั้งกระแสบายพาสตามฮิวริสติกเก่า ๆ ที่ผ่าน

มานั้นคือติดตั้งกระแสนายพาสด้านที่ต้องการควบคุมอุณหภูมิ ซึ่งในความเป็นจริงแล้วในการติดตั้งกระแสนายพาสเพื่อทำการควบคุมควรจะต้องเลือกติดตั้งด้านที่มีอัตราการไหลน้อย เพื่อช่วยให้ผลการตอบสนองเร็วขึ้น เพื่อลดผลกระทบต่ออุณหภูมิเป้าหมายให้น้อยที่สุด



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 6

### สรุปและวิจารณ์ผลการวิจัย

งานวิจัยได้พัฒนาขั้นตอนการออกแบบระบบโครงสร้างการควบคุมข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยพิจารณาจากกฎการออกแบบการควบคุม ซึ่งกฎการออกแบบนี้จะพิจารณาจากโครงสร้างของข่ายงาน และเทคนิคการส่งผ่านความแปรปรวน ซึ่งสิ่งที่สำคัญที่พิจารณาในการเสนอกฎการออกแบบการควบคุมคือ การวางบายพาส การควบคุมโดยใช้สัดส่วน การแยกของกระแส การใช้หน่วยอ็อปติมิในการควบคุม และการใช้เครื่องควบคุมแบบป้อนกลับ ร่วมกับเครื่องควบคุมแบบป้อนล่วงหน้า

#### 6.1 กฎการออกแบบโครงสร้างการควบคุม

การพิจารณาการออกแบบโครงสร้างการควบคุมโดยการพิจารณาจากโครงสร้างข่ายงานที่เป็นอยู่ ซึ่งในที่นี้พิจารณาจากกระบวนการจับคู่ของ Wongsri (1990) และการส่งผ่านความแปรปรวนสามารถพัฒนาเป็นกฎการออกแบบได้ดังนี้

1. กระแสที่มีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพียงตัวเดียวจะถูกพิจารณาก่อนในการออกแบบการควบคุม
2. เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ถูกนำไปควบคุมอุณหภูมิของกระแสหนึ่งแล้วนั้นจะไม่สามารถนำมาใช้เพื่อควบคุมกระแสที่เป็นคู่แลกเปลี่ยนได้
3. จะต้องมีการติดตั้งกระแสนบายพาสและลู่วควบคุมที่หน่วยสุดท้ายของกระแสเสมอเพื่อคงอุณหภูมิเป้าหมาย

4. กระแสที่มีเครื่องยู่ทิลิตีจะใช้้อัตราการไหลของกระแสยู่ทิลิตีในการควบคุมอุณหภูมิของกระแส นั้น ๆ
5. ข่ายงานที่ประกอบด้วยกระสวนการจับคู่แบบคลาสเอและบี ในการส่งผ่านความแปรปรวนใช้เพียงเครื่องควบคุมแบบป้อนกลับเพียงอย่างเดียวก็เพียงพอ
6. สำหรับข่ายงานที่ประกอบด้วยกระสวนการจับคู่แบบคลาสซีและดี จะต้องใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่อยู่้อัพสทริมมาช่วยในการควบคุม
7. หน่วย้อัพสทริมที่เลือกเพื่อมาช่วยในการส่งผ่านความแปรปรวนจะต้องมีเส้นทางการส่งผ่านความแปรปรวนไปยังหน่วยยู่ทิลิตี
8. ข่ายงานที่ประกอบด้วยกระสวนการจับคู่แบบคลาสซีและดี ในการส่งผ่านความแปรปรวน จะต้องใช้เครื่องควบคุมแบบป้อนกลับล่วงหน้าร่วมกับเครื่องควบคุมแบบป้อนกลับ
9. ถ้าปริมาณความแปรปรวนที่เข้ามาในข่ายงานมากกว่าปริมาณยู่ทิลิตีที่รองรับบนหน่วยยู่ทิลิตี ในเส้นทางการส่งผ่าน จะต้องมีการติดบายพาสและลูปควบคุมเพิ่มเติมบนหน่วยแลกเปลี่ยนในข่ายงาน
10. ถ้าจำเป็นจะต้องมีการใช้หน่วยแลกเปลี่ยนภายในข่ายงานในการควบคุม ควรเลือกหน่วยที่มีปริมาณความร้อนที่แลกเปลี่ยนมากในการติดกระแสนบายพาสและลูปควบคุม
11. เลือกติดลูปควบคุมเพื่อให้มีเส้นทางการส่งผ่านความแปรปรวนสั้นที่สุด
12. ควรเลือกติดตั้งกระแสนบายพาสด้านที่มี้อัตราการไหลน้อย
13. กรณีที่้อัตราการไหลของกระแสที่แลกเปลี่ยนเท่ากันควรจะติดตั้งกระแสนบายพาสด้านที่ ต้องการควบคุมอุณหภูมิ

14. หน่วยงานที่มีการแยกของกระแส สามารถใช้สัดส่วนการแยกของกระแสในการปรับแทนการติดตั้งกระแสขายพาสได้ และควรใช้สัดส่วนการแยกในการควบคุมอุณหภูมิของกระแสคู่แลกเปลี่ยน
15. ถ้าอุณหภูมิหลังจากนำกระแสที่แยกมารวมกันเป็นอุณหภูมิที่ต้องการควบคุม ควรจะใช้ขายพาสบนเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนบนกระแสที่ถูกแยกในการควบคุมอุณหภูมินั้น ๆ

## 6.2 ขั้นตอนการออกแบบโครงสร้างการควบคุมข่างานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

กฎการออกแบบโครงสร้างการควบคุมที่ได้สามารถพัฒนาและเสนอเป็นขั้นตอนการออกแบบโครงสร้างการควบคุมข่างานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนได้ดังต่อไปนี้

1. คำนวณจำนวนขายพาสที่น้อยที่สุดที่ต้องติดตั้งภายในข่างาน
2. แบ่งการออกแบบโครงสร้างการควบคุมเป็นโครงสร้างการควบคุมข่างานด้านร้อน และด้านเย็น เพื่อไม่ให้มีการส่งผ่านความแปรปรวนข้ามจุดพินช์ ทำให้เกิดการนำกลับคืนพลังงานสูงสุด
3. ออกแบบโครงสร้างการควบคุมโดยพิจารณาจากกฎข้อที่ 1 ถึงข้อที่ 15 (ดังแสดงในบทที่ 4) ตามลำดับ โดยอาจจะมีการสลับกฎบางข้อได้ตามความเหมาะสม
4. รวมข่างานย่อยทั้ง 2 เข้าด้วยกัน

## 6.3 สรุปการวิจัย

ขั้นตอนการออกแบบโครงสร้างการควบคุมที่ได้จากงานวิจัยนี้ สามารถประยุกต์ใช้กับข่างานทั่ว ๆ ไป เมื่อเกิดความแปรปรวนเนื่องมาจากอัตราการใช้และอุณหภูมิขาเข้าเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยได้ (กรณีพินช์ไม่กระโดด) เนื่องจากจากขั้นตอนนี้ได้พิจารณาจากโครงสร้างที่เป็นไปได้ของข่างานทั้งหมดที่เป็นอยู่ อีกทั้งขั้นตอนนี้สามารถออกแบบโครงสร้างการควบคุมที่เหมาะสมได้อย่างสะดวกรวดเร็ว และง่ายต่อการประยุกต์ใช้เนื่องจากสรุปเป็นขั้นตอนที่ชัดเจน



โครงสร้างระบบควบคุมของช่างงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ได้จากการประยุกต์ขั้นตอนในงานวิจัยนี้ จะสามารถดำเนินการได้โดยยังคงวัตถุประสงค์ตามที่กำหนด นั่นคืออุณหภูมิเป้าหมายและการนำกลับคืนพลังงานสูงสุด (ใช้ยูนิตลิตี่น้อยที่สุด) เมื่อเกิดการรบกวนทางพลังงานขึ้น อีกรังส่งผลให้เกิดความปลอดภัยในการปฏิบัติการของโรงงานด้วย เนื่องมาจากกระแสที่นำมาแลกเปลี่ยนภายในช่างงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน มักจะเป็นพีคสตรีมของถังปฏิกรณ์หรือหน่วยแยก ซึ่งการควบคุมอุณหภูมิของช่างงานให้เข้าสู่ค่าเป้าหมายที่เร็ว จะส่งผลกระทบต่อหน่วยต่าง ๆ น้อยลง ซึ่งโครงสร้างการควบคุมที่เหมาะสมจะทำให้ผลการตอบสนองของระบบมีการเข้าสู่ค่าเป้าหมายได้เร็ว และมีความคลาดเคลื่อนน้อย อีกรังส่งผลให้ประหยัดค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมและวาล์ว

#### 6.4 วิจัยผลงานวิจัยและแนวทางการพัฒนาต่อ

ขั้นตอนในการออกแบบโครงสร้างการควบคุมของช่างงานที่ได้เสนอนี้ ให้ความสะดวกแก่ผู้นำไปใช้ในการออกแบบระบบควบคุมช่างงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เนื่องจากขั้นตอนนี้ได้พัฒนามาจากกฎในการควบคุม ซึ่งกฎนี้ได้ครอบคลุมประเด็นต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างของช่างงานและการส่งผ่านความแปรปรวน ทำให้สามารถหาโครงสร้างการควบคุมสำหรับช่างงานต่าง ๆ ที่เหมาะสมได้อย่างรวดเร็วและง่ายต่อการประยุกต์ใช้

อย่างไรก็ตาม ขั้นตอนนี้จะสามารถประยุกต์ใช้กับปัญหาช่างงานที่มีความแปรปรวนเพียงเล็กน้อย นั่นคือ การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิพินช์มีค่าต่อเนื่อง (เรียกว่าปัญหาแบบคลาส I) สำหรับกรณีที่มีปริมาณความแปรปรวนที่มาก หรือทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิพินช์แบบกระโดด ขั้นตอนที่ได้เสนอในงานวิจัยนี้อาจจะไม่สามารถออกแบบโครงสร้างการควบคุมที่เหมาะสมได้ ดังนั้นจึงควรปรับปรุงขั้นตอนนี้ให้สามารถแก้ปัญหาในกรณีที่กระแสมีความแปรปรวนมาก ๆ ได้ (เรียกว่าปัญหาแบบคลาส II) และพิจารณาเพิ่มเติมเงื่อนไขการคำนวณในกรณีสารที่นำมาแลกเปลี่ยนมีการเปลี่ยนแปลงสถานะ เพราะการแลกเปลี่ยนของแก๊สจะส่งผลให้โมเดลที่ใช้ในการจำลองมีการเปลี่ยนแปลงไป อาจจะทำให้พฤติกรรมของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเปลี่ยนแปลงไปได้

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

ณัฐพร ทรงศิริ. โปรแกรมแนววัตถุสำหรับการออกแบบข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ

ยี่ดหยุ่น : กรณีบริเวณพื้นที่ต่อเนื่อง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรม  
เคมี บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538.

วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนในอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2536.

สุเชียร เกียรติสุนทร. พื้นฐานวิศวกรรมระบบควบคุมในกระบวนการอุตสาหกรรม.

กรุงเทพมหานคร : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2536.

### ภาษาอังกฤษ

Aguilera, N. and Marchitti, J. L. Optimizing and Controlling the Operation of Heat-  
Exchanger Networks. AICHE J. 44, 5 (1998) : 1090-1104.

Alsop, A. W. and Edgar, T. F. Nonlinear Heat Exchanger Control Through the Use of  
Partially Linearized control Variables. Chem. Eng. Comm. 75 (1989) : 155-  
170.

Arkun, Y. and Stephanopoulos, G. Studies in the Synthesis of Control Structures for  
Chemical Process : Part IV. Design of Steady-State Optimizing Control  
Sturctures for Chemical Process Units. AICHE J. 26, 6 (1980) : 975-991.

- Arunwatanamongkol P. A Computer Program for Heat Exchanger Network Design Using Match Patterns Approach. Master's Thesis, Department of Chemical Engineering, Graduate School, Chulalongkorn University, 1992.
- Boyaci, C., Uzturk, D., Konukman, A. E. and Akman, U. Dynamics and Optimal Control of Flexible Heat Exchanger Networks. Comput. Chem. Eng. 20, Suppl (1996) : s775-s780.
- Calandranis, J. and Stephanopoulos, G. Structural Operability Analysis of Heat Exchanger Networks. Chem. Eng. Res. Des. 64 (1986) : 347-364.
- Calandranis, J. and Stephanopoulos, G. A Structural Approach to the Design of Control Systems in Heat Exchanger Networks. Comput. Chem. Eng. 12, 7 (1987) : 651-669.
- Cerda, J., Westerberg, A. W., Mason, D. and Linnhoff, B. Minimum Utility Usage in Heat Exchanger Network Synthesis – A Transportation Problem. Chem. Eng. Sci. 38, 3 (1983) : 373.
- Chen, J. J. Comments on Improvements on a Replacement for the Logarithmic Mean Chem. Eng. Sci. 42, 10 (1987) : 2488-2489.
- Ciric, A. R. and Floudas, C. A. A Retrofit Approach for Heat Exchanger Networks. Comp. Chem. Eng. 13, 6 (1989) : 703-715.
- Colberg, R. D. and Morari, M. A Resilience Target for Heat Exchanger Network Synthesis. Comp. Chem. Eng. 13, 7 (1989) : 821-837.
- Colmenares, T. R. and Seider, W. D. Heat and Power Integration of Chemical Process. AIChE J. 33, 6 (1987) : 898-915.

- Correa, D. J. and Marchetti, J. L. Dynamic Simulation of Shell-and-Tube Heat Exchanger. Heat Transfer Engineering 8 (1987) : 50-59.
- Daoutidis, P. and Kravaris, C. Structural Evaluation of Control Configurations for Multivariable Nonlinear Processes. Chem. Eng. Sci. 47, 5 (1992) : 1091-1107.
- Downs, J. J. and Vogel, E. F. A Plant-Wide Industrial Process Control Problem. Comput. Chem. Eng. 17, 3 (1993) : 245-255.
- Fisher W.R., Doherty, M.F. and Douglas, J.M. The Interface between Design and Control. 1. Process Controllability. Ind. Eng. Chem. Res. 27 (1988) : 597-605.
- Fisher W. R., Doherty, M. F. and Douglas, J. M. The Interface between Design and Control. 2. Process Operability. Ind. Eng. Chem. Res. 27 (1988) : 606-611.
- Fisher W. R., Doherty, M. F. and Douglas, J. M. The Interface between Design and Control. 3. Selecting a Set of Controlled Variables. Ind. Eng. Chem. Res. 27 (1988) : 597-605.
- Floudas, C. A., Ciric, A. R. and Grossmann, I. E. Automatic Synthesis of Optimal Heat Exchanger Network Configurations. AIChE J. 32, 2 (1986) : 276.
- Floudas, C. A. and Grossmann, I. E. Synthesis of Flexible Heat Exchanger Networks with Uncertain Flowrates and Temperatures. Comp. Chem. Eng. 11, 4 (1987) : 319-336.
- Floudas, C. A. and Grossmann, I. E. Synthesis of Flexible Heat Exchanger Networks for Multiperiod Operation. Comp. Chem. Eng. 10, 2 (1986) : 153-168.

- Galli, M. R. and Cerda, J. Synthesis of Flexible Heat Exchanger Networks – III. Temperature and Flowrate Variations. Comp. Chem. Eng. 15, 1 (1991) : 7-24.
- Georgiou, A. and Floudas, C. A. Simultaneous Process Synthesis and Control : Minimization of Disturbance Propagation in Heat Recovery Systems. Foundations of Computer-Aided Process Design (1990) : 435-450.
- Glemmestas, B., Mathisen, K. W. and Gundersen, T. Optimal Operation of Heat Exchanger Networks Based on Structure Information. Comput. Chem. Eng. 20, Suppl (1996) : s823-s282.
- Glemmestas, B., Skogestad, S. and Gundersen, T. Optimal Operation of Heat Exchanger Networks Comput. Chem. Eng. 23 (1999) : 509-533.
- Govind, R. and Powers, G. J. Control System Synthesis Strategies. AIChE J. 28, 1 (1982) : 60-73.
- Holt, B. R. and Morari, M. Design of Resilient Processing Plants-V The Effect of Deadtime on Dynamic Resilience. Chem. Eng. Sci. 40, 7 (1983) : 1229-1237.
- Kern, D.Q. Process Heat Transfer, New York : McGraw-Hill, 1990.
- Knoukman, A. E., Akman, U. and Camurdan, M. C. Optimal Design of Controllable Heat Exchanger Networks Under Multi-Directional Resiliency-Target Constraints. Comput. Chem. Eng. 19, Suppl (1995) : s149-s154.
- Linnhoff, B. and Flower, J. R. Synthesis of Heat Exchanger Networks. AIChEJ. 24, 4 (1978) : 633-642.

- Linnhoff, B. and Hindmarsh, E. The Pinch Design Method for Heat Exchanger Networks. Chem. Eng. Sci. 38, 5 (1983) : 745-763.
- Linnhoff, B. and Kotjabasakis, E. Downstream Paths for Operable process Design. CEP. (May 1986) : 23-28.
- Lyman, P. R. and Georgakis, C. Plant-Wide Control of the Tennessee Eastman Problem. Comput. Chem. Eng. 19, 3 (1995) : 321-331.
- Luyben, W. L., Tyreus, B. D. and Luyben, M. L. Plantwide Process Control, New York : McGraw-Hill, 1998.
- Malleswararao, Y. S. N. and Chidambaram, M. Non-linear Controllers for a Heat Exchanger. J. Proc. Cont. 2, 1 (1992) : 17-21.
- Marlin, T. E. Process Control : Designing Processes and Control Systems for Dynamic Performance, Boston : McGraw-Hill, 2000.
- Marselle, D. F., Morari, M. and Rudd, D. F. Design of Resilient Processing Plants-II Design and Control of Energy Management Systemes. Chem. Eng. Sci. 37, 2 (1982) : 259-270.
- Mathisen, K. W., Skogestad, S. and Wolff, E. A. Bypass Selection for Control of Heat Exchanger Networks. Paper presented at ESCAPE-1 Elsinore, Denmark (1992) : s263-s272.
- Mathisen, K. W., Morari, M. and Skogestad, S. Dynamic Models for Heat Exchanger and Heat Exchanger Networks. Paper presented at ESCAPE-3 (1994) : s459-s463.

Morari, A. Flexibility and Resiliency of Process Systems. *Comp. Chem. Eng.* 7, 4 (1983) : 423-437.

Morari, M., Arkun, Y. and Stephanopoulos, G. Studies in the Synthesis of Control Structures for Chemical Processes Part I : Formulation of the problem. Process Decomposition and the Classification of the Control Tasks. Analysis of the Optimizing Control Structures. *AIChE J.* 26, 20 (1980) : 220-232.

Morari, M. and Stephanopoulos, G. Studies in the Synthesis of Control Structures for Chemical Processes Part II : Structural Aspects and the Synthesis of Alternative Feasible Control Schemes. *AIChE J.* 26, 2 (1980) : 232-246.

Ogunnaike, B. A. and Ray, W. H. Process Dynamics, Modeling and Control, New York : Oxford, 1997.

Papalexandri, K. P. and Pistikopoulos, E. N. Synthesis and Retrofit Design of Operable Heat Exchanger Networks 1. Flexibility and Structural Controllability Aspects *Ind. Eng. Chem. Res.* 33 (1994) : 1718-1737.

Papalexandri, K. P. and Pistikopoulos, E. N. Synthesis and Retrofit Design of Operable Heat Exchanger Networks 2. Dynamics and Control Structure Considerations. *Ind. Eng. Chem. Res.* 33 (1994) : 1718-1737.

Papastratos, S., Isambert, A. and Depeyre, D. Computerized Optimum Design and Dynamic Simulation of Heat Exchanger Networks. Paper Presented at EACAPE-2 (1993) : s329-s334.

Peter, M. S. and Timmerhaus, K.D. Plant Design and Economics for Chemical Engineers, Fourth Edition. New York : McGraw-Hill, 1991.

- Ponton, J. W. and Donaldson, R. A. B. A Fast Method for the Synthesis of Optimal Heat Exchanger Networks. Chem. Eng. Sci. 29 (1974) : 2375-2377.
- Price, M. R, Lyman, P. R. and Georgakis, C. Throughput Manipulation in Plantwide Control Structures. Ind. Eng. Chem. Res. 33 (1994) : 1197-1207.
- Ptacnik, R. and Klemes, J. An Application of Mathematical Optimization Methods in Heat Exchanger Network Synthesis. Comp. Chem. Eng. 12, 2/3 (1988) : 231-235.
- Rahman, F. and Devanathan, R. Modelling and Dynamic Feedback Linearisation of a Heat Exchanger Model. IEEE. (1994) : 1801-1806.
- Rotea, M. A. and Marchetti, J. L. Integral Control of Heat-Exchanger-Plus-Bypass Systems. Proceedings of the IEEE. International Conference on Control Applications Harford (October 1997) : 151-156.
- Saboo, A. K. and Morari, M. Design of Resilient Processing Plant – IV Some New Results on Heat Exchanger Network Synthesis. Chem. Eng. Sci. 39, 3, (1984) : 579-592.
- Saboo, A. K, Morari, M. and Woodcock, D. C. Design of Resilient Processing Plants-VIII. A Resilience Index for Heat Exchanger Networks. Chem. Eng. Sci. 40, 8 (1985) : 1553-1565.
- Saboo, A. K. and Morari, M. Resilient Analysis of Heat Exchanger Networks-I Temperature Dependent Heat Capacities. Comp. Chem. Eng. 11, 4 (1987) : 399-408.



- Saboo, A. K. and Morari, M. Resilient Analysis of Heat Exchanger Networks-II Stream Splits and Flowrate Variations. Comp. Chem. Eng. 11, 5 (1987) : 457-468.
- Stephanopoulos, G., Synthesis of Control Systems for Chemical Plants – A Challenge for Creativity. Comp. Chem. Eng. 7, 4 (1983) : 331-365.
- Terrill, D. L. and Douglas, J. M. Heat-Exchanger Network Analysis. 1. Optimization. Ind. Eng. Chem. Res. 26 (1987) : 685-691.
- Trivedi, K. K., O'Neill, B. K. and Roach, J.R. A New Dual-Temperature Design Method for the Synthesis of Heat Exchanger Networks. Comp. Chem. Eng. 13, 6 (1989) : 667-685
- Uzturk, D. and Akman, U. Centralized and Decentralized Control of Retrofit Heat-Exchanger Networks. Comp. Chem. Eng. 21 ,Suppl (1997) : s373-s378.
- Wongsri, M., Resilient Heat Exchanger Network Design, Doctoral Dissertation, Washington University, (1990)
- Viswanathan, M. and Evans, L. B. Studies in the Heat Integration of Chemical Process Plants. AIChE J. 33, 11 (1978) : 1781-1790.
- Yan, Q. Z., Yang, Y. H. and Huang, Y. L. Cost-Effective Bypass Design of Highly Controllable Heat-Exchanger Networks. AIChE J. 47, 10 (2001) : 2253-2276.
- Yang, Y. H., Gong, J. P. and Huang, Y. L. A Simplified System Model for Rapid Evaluation of Disturbance Propagation Through a Heat Exchanger Network. Ind. Eng. Chem. Res. 36 (1996) : 4550-4558.

Zhang, J. and Zhu, X. X. Simultaneous Optimization approach for Heat Exchanger Network Retrofit with Process Changes. Ind. Eng. Chem. Res. 39 (2000) : 4963-4973.



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก

### การหาเอนโทรปีเอนทาลปีและอัตราการขยายเชิงสถิติ

สมการสมดุลพลังงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแสดงได้ดังสมการ

$$Q = W_h(T_i^h - T_o^h) = W_c(T_o^c - T_i^c) \quad (\text{ก.1})$$

$$Q = UA \frac{(T_i^h - T_o^c) - (T_o^h - T_i^c)}{\ln \frac{T_i^h - T_o^c}{T_o^h - T_i^c}} \quad (\text{ก.2})$$

เมื่อตัวยก  $h$  หมายถึงกระแสร้อน, ตัวยก  $c$  หมายถึงกระแสเย็น, ตัวห้อย  $i$  หมายถึงภาวะขาเข้า, ตัวห้อย  $o$  หมายถึงภาวะขาออก,  $Q$  หมายถึงไหลของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน,  $W$  หมายถึงอัตราการไหลคูณกับความจุความร้อนจำเพาะ,  $U$  หมายถึงสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม,  $A$  หมายถึงพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน และ  $T$  หมายถึงอุณหภูมิ

กำหนดให้

$$r = \frac{W_{min}}{W_{max}} \quad (\text{ก.3})$$

กำหนดให้  $W_{min}$  คือ  $W_c$  ดังนั้นจากสมการ ก.1 จะแสดงอุณหภูมิขาออกของกระแสร้อนได้เป็น

$$T_o^h = T_i^h - r(T_o^c - T_i^c) \quad (\text{ก.4})$$

นำสมการ ก.4 ไปแทนในสมการ ก.1 และ ก.2 แสดงได้ดังนี้

$$W_c(T_o^c - T_i^c) = UA \frac{(T_i^h - T_o^c) - ((T_i^h - r(T_o^c - T_i^c)) - T_i^c)}{\ln \frac{T_i^h - T_o^c}{T_i^h - r(T_o^c - T_i^c) - T_i^c}} \quad (\text{ก.5})$$

$$(T_o^c - T_i^c) \ln \frac{T_i^h - T_o^c}{T_i^h - r(T_o^c - T_i^c) - T_i^c} = -\frac{UA}{W_c} (1-r)(T_o^c - T_i^c) \quad (\text{ก.6})$$

สมการ ก.6 แสดงได้เป็น

$$\frac{T_i^h - T_o^c}{T_i^h - r(T_o^c - T_i^c) - T_i^c} = e^{\left(\frac{UA}{W_c}(1-r)\right)} \quad (\text{ก.7})$$

กำหนดให้

$$N_{Tu} = \frac{UA}{W_{min}} \quad (\text{ก.8})$$

ดังนั้นสามารถแสดงอุณหภูมิขาออกของกระแสน้ำในรูปของอุณหภูมิขาเข้าของกระแสน้ำร้อนและเย็นได้ดังสมการ ก.9

$$T_o^c = \frac{1 - e^{(-N_{Tu}(1-r))}}{1 - re^{(-N_{Tu}(1-r))}} T_i^h + \frac{(1-r)e^{(-N_{Tu}(1-r))}}{1 - re^{(-N_{Tu}(1-r))}} T_i^c \quad (\text{ก.9})$$

เพื่อให้ง่ายต่อการแสดงค่า กำหนดให้  $a = e^{(-N_{Tu}(1-r))}$  และแสดงสมการ ก.9 และ ก.4

ในรูปของเมทริกซ์ แสดงได้ดังสมการ ก.10

$$\begin{bmatrix} T_o^h \\ T_o^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1-r}{1-ra} & \frac{r(1-a)}{1-ra} \\ \frac{1-a}{1-ra} & \frac{a(1-r)}{1-ra} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_i^h \\ T_i^c \end{bmatrix} \quad (\text{ก.10})$$

สมการที่ ก.10 จะเห็นได้ว่าค่าทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันจะเป็นฟังก์ชันกับ  $r$  และ  $N_{Tu}$  ดังนั้น

$$\varepsilon = \frac{1 - e^{(-N_{Tu}(1-r))}}{1 - re^{(-N_{Tu}(1-r))}} \quad (\text{ก.11})$$

แทนสมการ ก.11 ลงในสมการ ก.10 จะได้

$$\begin{bmatrix} T_o^h \\ T_o^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1-r\varepsilon & r\varepsilon \\ \varepsilon & 1-\varepsilon \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_i^h \\ T_i^c \end{bmatrix} \quad (\text{ก.12})$$

## ภาคผนวก ข

### การคำนวณ $C_p^*$

แบบจำลองของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน จะต้องมีการรวมความต้านทานการถ่ายโอนพลังงานของผนังท่อ Correa และ Marchetti (1987) เสนอให้เพิ่มผลของความต้านทานการถ่ายโอนของผนังในรูปของ  $C_p^*$  อัตราการสะสมของพลังงานใน 1 หน่วยแสดงดังสมการ ข.1

$$\begin{aligned} \text{อัตราการสะสมพลังงาน} = & \rho_c C_{pc} V_c(i) \frac{dT_c(i)}{dt} + \rho_h C_{ph} V_h(i) \frac{dT_h(i)}{dt} \\ & + M_t(i) C_{Mt} \frac{dT_{Mt}(i)}{dt} + M_s C_{Ms} \frac{dT_{Ms}(i)}{dt} \end{aligned} \quad (\text{ข.1})$$

โดย ตัวห้อย  $c$  แทนกระแสน้ำเย็น,  $h$  แทนกระแสน้ำร้อน,  $s$  แทนเซลล์,  $t$  แทนท่อ,  $\rho$  คือความหนาแน่น,  $C_p$  แทนความจุความร้อนจำเพาะของของไหล,  $C_M$  แทนความจุความร้อนจำเพาะของของแข็ง,  $V$  แทนปริมาตร,  $M$  แทนน้ำหนักของของแข็ง และ  $T$  แทนอุณหภูมิ เมื่อพจน์ที่ 3 และ 4 ของด้านขวามือของสมการ ข.1 คือการสะสมพลังงานในผนังของท่อและเซลล์ จากสมมติฐานที่ว่า อุณหภูมิของผนังด้านท่อภายในจะเท่ากับอุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างของไหลด้านท่อในและของไหลด้านท่อนอก และอุณหภูมิของผนังด้านท่อนอกจะเท่ากับอุณหภูมิของของไหลที่ไหลอยู่ในท่อนอก เมื่อกำหนดให้ของไหลในท่อเป็นกระแสน้ำเย็น และของไหลในเซลล์เป็นกระแสน้ำร้อน จะแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการ

$$T_{Mt}(i) = \frac{1}{2} [T_c(i) + T_h(i)] \quad (\text{ข.2})$$

$$T_{Ms}(i) = T_h(i) \quad (\text{ข.3})$$

แทนค่าสมการ ข.2 และ ข.3 ในสมการ ข.1 จะได้

$$\begin{aligned} \text{อัตราการสะสมพลังงาน} &= [\rho_c C_{Pc} V_c(i) + \frac{1}{2} W_t(i) C_{Mt}] \frac{dT_c(i)}{dt} \\ &+ [\rho_h C_{Ph} V_h(i) + \frac{1}{2} M_t(i) C_{Mt} + M_s(i) C_{Ms}] \frac{dT_h(i)}{dt} \end{aligned} \quad (9.4)$$

สมการที่ 9.4 สามารถจัดรูปได้เป็น

$$\text{อัตราการสะสมพลังงาน} = \rho_c C_{Pc}^*(i) V_c(i) \frac{dT_c(i)}{dt} + \rho_h C_{Ph}^*(i) V_h(i) \frac{dT_h(i)}{dt} \quad (9.5)$$

เมื่อ  $C_{Pc}^* = C_{Pc} [1 + x_t(i)] \quad (9.6)$

$$x_t(i) = \frac{M_t(i) C_{Mt}}{2 \rho_c C_{Pc} V_c(i)} \quad (9.7)$$

และ  $C_{Ph}^*(i) = C_{Ph} [1 + x_s(i)] \quad (9.8)$

$$x_s(i) = \frac{M_t(i) C_{Mt}}{2 \rho_c C_{Pc} V_c(i)} + \frac{M_s(i) C_{Ms}}{\rho_h C_{Ph} V_s(i)} \quad (9.9)$$

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ค

## ข้อมูลสำหรับการจำลอง

## ค.3 ตัวอย่าง 5.1

ตาราง ค.1 ข้อมูลแสดงภาวะขาเข้าและขาออกของข่ายงานในตัวอย่าง 5.1

กระแส	W	คุณหมูมิขาเข้า (C)	คุณหมูมิขาออก (C)
H1	9	357	187
H2	6.5	277	207
H3	3	257	207
H4	36	197	87
H5	7	177	37
H6	72	137	77
C1	27	37	377



ตาราง ค.2 ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในตัวอย่าง 5.1

หน่วย	UA (kW/C)
E2	57
E3	29
E4	14
E6	116
E8	57

## ค.2 ตัวอย่าง 5.2

ตาราง ค.3 ข้อมูลแสดงภาวะขาเข้าและขาออกของข่างานในตัวอย่าง 5.2

กระแสน้ำ	W	อุณหภูมิขาเข้า (C)	อุณหภูมิขาออก (C)
H1	0.0978	327	196
H2	0.1200	220	180
H3	0.1340	495	309
C1	0.1284	212	500
C2	0.2000	146	176
C3	0.0986	102	350

ตาราง ค.4 ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในตัวอย่าง 5.2

หน่วย	UA (kW/C)
E1	0.04
E2	0.07
E3	0.04
E4	0.16
E5	0.07
E6	0.18

ค.3 ตัวอย่าง 5.3

ตาราง ค.5 ข้อมูลแสดงภาวะขาเข้าและขาออกของข่างานในตัวอย่าง 5.3

กระแสน้ำ	W	อุณหภูมิขาเข้า (C)	อุณหภูมิขาออก (C)
H1	1.0	615	350
H2	2.0	750	580
C1	2.8	340	420
C2	2.0	415	590

ตาราง ค.6 ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในตัวอย่าง 5.3

หน่วย	UA (kW/C)
E1	2.7
E2	0.6
E3	3.5



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ง

### การควบคุมแบบป้อนกลับและการปรับค่าเครื่องควบคุม

การควบคุมแบบป้อนกลับ เป็นการควบคุมโดยวัดค่าเอาต์พุตแล้วทำการเปรียบเทียบกับค่าเซตพอยต์ (Set Point) เพื่อกำหนดค่าความผิดพลาด (Error) ที่เกิดขึ้น หลังจากนั้นจะนำค่าความผิดพลาดที่ได้ไปคำนวณค่าตัวแปรปรับกระบวนการ (การควบคุมจะเกิดขึ้นเมื่อมีค่าความผิดพลาด) วิธีการควบคุมแบบป้อนกลับที่ใช้โดยทั่วไปมี 3 แบบคือ การควบคุมแบบพี, พีไอ และพีไอดี

การควบคุมแบบป้อนกลับ คือการควบคุมเพื่อลดค่าความผิดพลาดจนเป็นศูนย์

$$E(t) = R(t) - B(t) \quad (ง.1)$$

โดยที่  $E(t)$  คือ ค่าความผิดพลาด

$R(t)$  คือ ค่าเซตพอยต์

$B(t)$  คือ ค่าตัวแปรควบคุมกระบวนการที่วัดได้

สำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนใช้เพียงเครื่องควบคุมแบบพีไอก็เพียงพอต่อการควบคุม (Lyben และคณะ 1998)

#### ง.1 การควบคุมแบบพีไอ

การควบคุมแบบพีไอเป็นที่นิยมใช้กันมากที่สุดในจำนวนทั้ง 3 แบบ เทอมอินที่กรัลช่วยในการกำจัดค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นที่สภาวะคงตัว

$$P(t) = P + K_c [ E(t) + \frac{1}{\tau_i} \int E(t) dt ] \quad (ง.2)$$

โดยที่  $P(t)$  คือ ค่าเอาต์พุตของตัวควบคุม

$P$  คือ ค่าเอาต์พุตของตัวควบคุมที่ภาวะคงตัว

$K_c$  คือ ค่าเกนของตัวควบคุม

$\tau_I$  คือ ค่าเวลาอินทิกรัลหรือรีเซ็ตไทม์

ค่าที่ใช้ปรับค่าเอาต์พุตของตัวควบคุมคือค่าเกนของตัวควบคุม และค่าเวลาอินทิกรัล โดยถ้าค่าเวลาอินทิกรัลมีค่าเล็กกลง ค่าความผิดพลาดก็จะลดลงอย่างรวดเร็ว

## ง.2 การปรับค่าเครื่องควบคุม

ในงานวิจัยนี้จะปรับค่าเครื่องควบคุมโดยวิธีหาผลการแกว่งของระบบปิด โดยมีขั้นตอนดังนี้

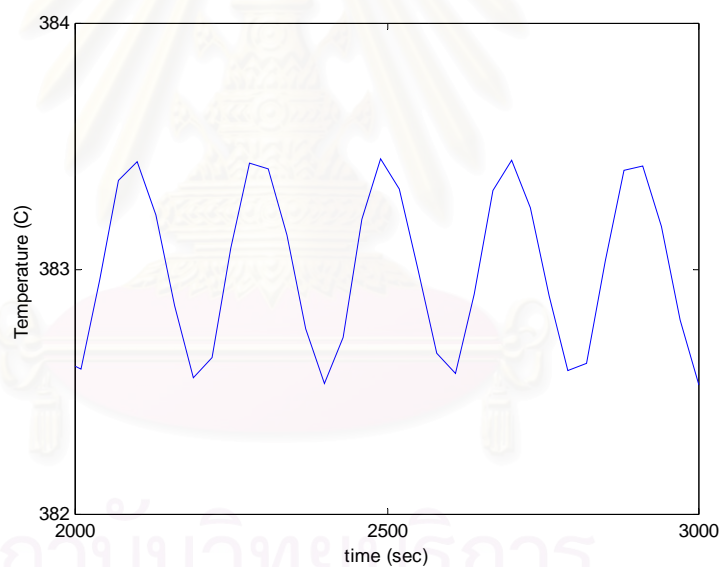
1. ปรับเครื่องควบคุมให้ระบบรวมอยู่ในสภาพสมดุลไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปรกระบวนการและสัญญาณควบคุม
2. ปรับตัวแปรควบคุมให้เครื่องควบคุมเหลือการควบคุมแบบพีเพียงอย่างเดียว โดยปรับค่าเวลาอินทิกรัลให้มีค่ามากที่สุด
3. เปลี่ยนค่าเป้าหมายการควบคุมและสังเกตผลการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรกระบวนการจากค่าวัด
4. ปรับเครื่องควบคุมโดยเพิ่มค่าเกนของตัวควบคุมจนค่าวัดของตัวแปรกระบวนการแกว่งด้วยความถี่และขนาดคงที่
5. บันทึกค่าเกนของตัวควบคุมที่ทำให้ระบบมีการแกว่งโดยมีขนาดคงที่ ( $K_{cr}$ ) และคาบเวลาการแกว่งของตัวแปรกระบวนการ ( $T_{cr}$ ) นำค่าที่ได้แทนลงในสูตรดังนี้

$$K_c = K_{cr} / 2.2 \quad (\text{ง.3})$$

$$\tau_I = T_{cr} / 1.2 \quad (\text{ง.4})$$

### ง.3 ตัวอย่างการปรับค่าเครื่องควบคุม

ปรับตัวควบคุมให้เหลือแคพีเพียงอย่างเดียว และทำการเปลี่ยนค่าเป้าหมายการควบคุมเพิ่มขึ้น  $3^{\circ}\text{C}$  ปรับเครื่องควบคุมจนทำให้ระบบเกิดการแกว่งด้วยความถี่และขนาดคงที่ แสดงได้ดังรูป ง.1 ซึ่งจะได้ค่า  $K_{cr}$  เท่ากับ 1 และค่าคาบเวลาการแกว่งของตัวแปรกระบวนการเท่ากับ 180 รอบต่อวินาที ซึ่งจะคำนวณค่า  $K_c$  ได้เท่ากับ 0.45 และค่า  $\tau_I$  ได้เท่ากับ 150



รูป ง.1 ผลการตอบสนองที่เกิดการแกว่งด้วยความถี่และขนาดคงที่ เมื่อมีการเปลี่ยนค่าเป้าหมาย

การควบคุม

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวจตุพร กุลลวะนิจิวัฒน์ เกิดเมื่อวันที่ 11 มกราคม พ.ศ. 2520 อำเภอเมือง จ.ฉะเชิงเทราสำเร็จการศึกษาในระดับมัธยมศึกษาปีที่ 6 จากโรงเรียนเบญจมราชรังสฤษฎิ์ จ.ฉะเชิงเทรา เมื่อปี พ.ศ.2537

สำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี จากมหาวิทยาลัยบูรพา เมื่อปี พ.ศ. 2541



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย