

โปรแกรมจำลองสำหรับการออกแบบและควบคุมอุปกรณ์แลกเปลี่ยน
ความร้อน

SIMULATION PROGRAM FOR DESIGN AND CONTROL OF A HEAT
EXCHANGER

อนุ หนูเล็ก
ANU NOOLEX

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2549

ISBN 974-15-2181-2

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

โปรแกรมแบบจำลองสำหรับการออกแบบและควบคุมอุปกรณ์แลกเปลี่ยน
ความร้อน

SIMULATION PROGRAM FOR DESIGN AND CONTROL OF A HEAT
EXCHANGER



อนุ หนูเล็ก

ANU NOOLEX

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน **63298**

วัน,เดือน,ปี **25 ส.ค. 2549**

.b.....

.i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาลัทธิปริญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2549

ISBN 974-15-2181-2

**SIMULATION PROGRAM FOR DESIGN AND CONTROL OF A
HEAT EXCHANGER**

ANU NOOLEX

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

2006

ISBN 974-15-2181-2

COPYRIGHT 2006

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์ โปรแกรมแบบจำลองสำหรับการออกแบบและควบคุมอุปกรณ์แลกเปลี่ยน
ความร้อน

นักศึกษา นาย อนุ หนูเล็ก

รหัสนักศึกษา 44061420

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมการควบคุม

พ.ศ. 2549

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ รศ. ประสิทธิ์ จุลเสรีวงศ์

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอ โปรแกรมจำลองสำหรับการออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนและการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดีที่เหมาะสม การเขียนแบบการควบคุมได้แบ่งออกเป็น 3 รูปแบบคือ การควบคุมการป้อนกลับ การควบคุมแบบป้อนล่วงหน้า และการควบคุมโดยเทคนิคการเปิดตารางร่วมกับการควบคุมพีไอดี โปรแกรมที่นำเสนอมีความง่ายและความสะดวกในการใช้งาน เหมาะสำหรับผู้ที่ไม่มีความเชี่ยวชาญ วิทยานิพนธ์นี้ใช้ภาษาวิซวลเบสิก ร่วมกับโปรแกรมแมตแล็บซิมูลิงก์เพื่อสร้างเป็นโปรแกรมจำลอง และในการทดสอบสมรรถนะของโปรแกรมได้ใช้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อเป็นกรณีศึกษา ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าโปรแกรมที่ได้พัฒนาขึ้นสามารถใช้งานได้สอดคล้องกับโปรแกรม S&THex เวอร์ชัน 1.4 นอกจากนี้ยังได้แสดงผลการควบคุมทั้ง 3 รูปแบบที่นำเสนอ

Thesis Title	Simulation Program for Design and Control of a Heat Exchanger
Student	Mr. Anu Noolex
Student ID.	44061420
Degree	Master of Engineering
Programme	Instrumentation engineering
Year	2006
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Prasit Julsereewong

ABSTRACT

This thesis presents the simulation program for heat exchanger design and suitable PID parameter tuning. The control simulation falls into three modes, which are feedback control, feed-forward control, and combine lookup-table technique with PID control. The proposed program is easy to use and being convenient to operate without skillful technician requirement. The simulation program is developed using Visual Basic Programming language and Matlab Simulink. The performances of the proposed program were studied using tube heat exchanger as an illustrative case study. Experimental results demonstrate that the benefits of the developed program are agreed with the use of S&THex v1.4 program. Here, the result from three control modes are also presented.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดีผู้เขียนใคร่ขอกราบขอบพระคุณ รศ.ประสิทธิ์ จุลเสรีวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาเป็นอย่างสูงที่ได้ให้คำปรึกษาแนวทางในการศึกษา ความคิดริเริ่ม ตลอดจนการฝึกฝนให้ผู้เขียนมีความสามารถในการทำการศึกษาได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ยังให้ความเอาใจใส่ดูแลสอบถามถึงความก้าวหน้าอย่างสม่ำเสมอทำให้ผู้เขียนทำงานอย่างมีระบบ และใช้เวลาได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ขอขอบคุณ คุณสิทธิกร จุลการณั์ แห่งบริษัท ที. เอส. ทรั้จิ่ง จำกัดที่แนะนำ Software เกี่ยวกับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

ขอขอบคุณ คณะอาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุมที่ช่วยแนะนำและเป็นธุระเกี่ยวกับเอกสารข้อมูลต่างๆ

และท้ายที่สุดขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ และ คุณแม่ ที่สนับสนุนให้โอกาสแก่ผู้เขียนจนได้เล่าเรียนจนถึงทุกวันนี้

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้เขียนขอมอบให้แก่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

อนุ หนูเล็ก

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ในการทำวิทยานิพนธ์.....	3
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....	3
1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	3
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	4
1.6 ขั้นตอนการศึกษา.....	4
1.7 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์.....	4
บทที่ 2 พื้นฐานเทอร์โมไดนามิกส์ กลศาสตร์ของไหลและการแลกเปลี่ยนความร้อน.....	5
2.1 บทนำ.....	5
2.2 ทฤษฎีการแลกเปลี่ยนความร้อน.....	5
2.3 การถ่ายเทความร้อนรวม.....	10
2.4 ความเสียดทานในการไหล.....	12
2.5 การไหลแบบราบเรียบและแบบปั่นป่วน.....	13
2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเสียดทานการไหลกับการถ่ายเทความร้อน.....	14
บทที่ 3 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนชนิดเป็นท่อ.....	16
3.1 บทนำ.....	16
3.2 การจำแนกอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนชนิดเป็นท่อพิจารณาที่ของไหล.....	16
3.3 การจำแนกอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนชนิดเป็นท่อพิจารณาที่โครงสร้าง.....	17
3.4 การจัดเส้นทางกรไหล.....	26
3.5 ท่อที่มีพื้นผิวเสริม.....	31

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.6 อุปกรณ์ระบายความร้อนด้วยอากาศ.....	32
3.7 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งาน.....	33
3.8 การพาความร้อน โดยอิสระและโดยบังคับ.....	33
3.9 ท่อความร้อน.....	35
3.10 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบกระบอก.....	37
3.11 บทสรุป.....	38
บทที่ 4 หลักการออกแบบทางความร้อน.....	39
4.1 บทนำ.....	39
4.2 การกำหนดการไหล.....	42
4.3 การแจกแจงอุณหภูมิ.....	42
4.4 ผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ย.....	42
4.5 ผลของความเสียหายในของไหลต่ออุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน.....	46
บทที่ 5 โครงสร้างโปรแกรมและระบบควบคุม.....	49
5.1 บทนำ.....	49
5.2 ระบบควบคุมและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	49
5.3 โครงสร้างโปรแกรมใช้งาน.....	64
5.4 การใช้งานโปรแกรม.....	67
5.5 ตัวอย่างการใช้งานโปรแกรม.....	68
5.6 การจำลองการทำงาน.....	71
5.7 เปรียบเทียบโปรแกรมที่จัดทำขึ้นกับโปรแกรมS&THex v.1.4 และการคำนวณ.....	75
5.8 เปรียบเทียบการใช้งานกับโปรแกรมที่ใช้งานทั่วไป.....	82
5.9 สรุป.....	85
บทที่ 6 บทสรุปและวิจารณ์.....	86
6.1 บทสรุป.....	86
6.2 ปัญหาที่พบ.....	86
6.3 ข้อเสนอแนะ.....	87

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
เอกสารอ้างอิง.....	88
ภาคผนวก.....	89
ประวัติผู้เขียน.....	100

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ค่าโดยประมาณของสภาพนำความร้อนของโลหะที่ใช้ในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน.....	9
2.2 พิสัยของค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน.....	8
2.3 ตัวอย่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายความร้อนรวม.....	11
3.1 ชื่อเรียกมาตรฐานของส่วนต่างๆ ของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน.....	23
5.1 แสดงค่าการเปิดควาล์วควบคุมเมื่อระบบควบคุมทำงานในโหมด Lookup table.....	72
5.2 เปรียบเทียบสมรรถนะจากรูปที่5.25 รูปที่5.27 และรูปที่5.29.....	75

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การนำความร้อนผ่านตัวกลางใน 1 มิติพิกัด X.....	6
2.2 ตัวอย่างการไหลแบบราบเรียบและการไหลแบบปั่นป่วน.....	13
3.1 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบมัดท่อ.....	18
3.2 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น.....	18
3.3 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้นหลายตัวต่อเข้ากันเป็นชุด.....	19
3.4 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบมีท่อภายในหลายท่ออยู่ภายใต้ท่อชั้นนอกหนึ่งท่อ.....	20
3.5 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อในเซลล์.....	20
3.6 แบบต่างๆ ของส่วนประกอบหลักของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อในเซลล์.....	21
3.7 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบหัวลอยแหวนคู่ (AES).....	22
3.8 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นยึดท่อตายตัว (BEM).....	24
3.9 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบหัวลอย (AEP).....	24
3.10 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อรูปตัว U (CFU).....	25
3.11 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลสวนกันท่อไหลกลับเดียวเซลล์.....	27
3.12 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อรูปตัว U ที่มีท่อไหลกลับ.....	28
3.13 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบอนุกรมและขนาน.....	29
3.14 รูปแบบการจัดการไหลแบบไหลขวาง.....	30
3.15 กระบวนการจัดเรียงท่อแบบมาตรฐาน.....	30
3.16 กระบวนการของรูบนแผ่นยึดท่อที่สมนัยกับกระบวนการจัดเรียงท่อ.....	30
3.17 ท่อเสริมครีบทามยาว.....	31
3.18 เครื่องทำความร้อนแบบท่อในเซลล์ที่มีท่อไหลสองกลับและเซลล์.....	31
3.19 อุปกรณ์ระบายความร้อนระบบดึงดูดลมที่ใช้ในการปรับอากาศ.....	34
3.20 โครงสร้างของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อความร้อน.....	35
3.21 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ประกอบด้วยท่อของกลุ่มความร้อน.....	36
3.22 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบกระบอกหลายชั้น.....	37
4.1 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่มีท่อไหลของอากาศผสมกัน.....	40
4.2 ลักษณะการแจกแจงอุณหภูมิสำหรับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลขวาง.....	41
4.3 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อคู่.....	42
4.4 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของของไหลในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน.....	44

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของของไหลอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนไม่เกิดตัดข้าม.....	46
5.1 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบป้อนกลับ.....	50
5.2 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการควบคุมแบบป้อนกลับ โดยใช้ตัวควบคุมแบบPID.....	50
5.3 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับโดยใช้ตัวควบคุมแบบPID	51
5.4 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการควบคุมแบบป้อนล่วงหน้าร่วมกับ PID.....	52
5.5 ระบบควบคุมแบบป้อนล่วงหน้าโดยใช้ตัวควบคุมแบบ PID.....	52
5.6 ระบบควบคุมแบบเปิดตารางร่วมกับ PID	53
5.7 Flow chart การทำงานระบบควบคุมในโหมด PID และ Lookup table.....	55
5.8 การควบคุมอุณหภูมิของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน.....	56
5.9 แสดงบล็อกไดอะแกรมสำหรับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน โดยทั่วไป.....	58
5.10 แสดงบล็อกไดอะแกรมเพื่อควบคุมอุณหภูมิที่ออกจากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน.....	59
5.11 แสดงบล็อกไดอะแกรมวงรอบของการควบคุมอุณหภูมิอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน.....	62
5.12 แสดงการยุบรวมบล็อกไดอะแกรมในรูปที่5.11.....	63
5.13 รูปแบบการสื่อสารของการหาผลตอบสนองอุณหภูมิของกระบวนการ.....	64
5.14 ลักษณะโปรแกรมสำหรับการใช้งานป้อนค่าพารามิเตอร์.....	65
5.15 แสดงส่วนที่เชื่อมโยงในการกำหนดค่าและโปรแกรม.....	65
5.16 แสดงค่าความร้อนจำเพาะที่สามารถดูได้จากโปรแกรม.....	66
5.17 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน.....	66
5.18 แสดงส่วนที่แสดงผลการคำนวณ.....	67
5.19 หน้าต่างสำหรับการหาค่า Time constant	67
5.20 แสดงส่วนของแสดงผลการควบคุมแต่ละแบบ.....	67
5.21 แสดงการเลือกสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน.....	69
5.22 แสดงการเลือกความร้อนจำเพาะจากตาราง.....	70
5.23 แสดงเมื่อป้อนค่าที่กำหนดต่างๆ	70
5.24 แสดงการต่อบล็อกใน Matlab Simulink (Feedback).....	72
5.25 แสดงผลตอบสนอง Unit Step Function ใช้ตัวควบคุม PID.....	72
5.26 แสดงการต่อบล็อกใน Matlab Simulink (Feedback+Feedforward).....	73
5.27 แสดงผลตอบสนอง Unit Step Function (Feedforward+Feedback).....	73

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.28 แสดงการตอบล๊อคใน Matlab Simulink (Feedback+Lookup table).....	74
5.29 แสดงการผลตอบสนอง Unistep Function (Feedback+ Lookup table).....	74
5.30 แสดงการหาค่าสัมประสิทธิ์ของน้ำกับน้ำมัน.....	79
5.31 แสดงการคำนวณโดยโปรแกรมที่จัดทำ.....	80
5.32 แสดงผลการคำนวณอุณหภูมิของน้ำที่ออกโดย โปรแกรม S&THex v.1.4.....	80
5.33 แสดงผลการคำนวณ Q โดยโปรแกรม S&THex v.1.4	81
5.34 แสดงผลการคำนวณพื้นที่โดยโปรแกรม S&THex v.1.4.....	81
5.35 หน้าต่างของโปรแกรม Chemcad 5.2.....	82
5.36 หน้าต่างของโปรแกรม S&THex v.1.4	82
5.37 หน้าต่างของโปรแกรมที่จัดทำขึ้นเอง.....	83
5.38 หน้าต่างของโปรแกรม Chemcad ป้อนค่ากำหนดต่าง.....	83
5.39 หน้าต่างของโปรแกรม S&THex v.1.4 ป้อนค่ากำหนดต่างๆ.....	84
5.40 หน้าต่างของโปรแกรม Chemcad ในการแสดงผล.....	84

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเป็นอุปกรณ์ช่วยยกระดับอุณหภูมิหรืออำนวยความสะดวกต่อการไหลของความร้อน มีตัวอย่างอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมากมายในร่างกายของสิ่งมีชีวิตในสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมมีอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ค่อนข้างซับซ้อน ตัวอย่างแรกก็คือปอด ซึ่งนอกจากจะระบายความร้อนออกจากร่างกายโดยการปล่อยไอน้ำออกมาพร้อมกับลมหายใจแล้ว ยังทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนมวลที่แสนจะสลับซับซ้อนอีกด้วย นั่นคือแลกเปลี่ยนเอาออกซิเจนออกจากอากาศที่หายใจเข้าไปและนำคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากเลือดในร่างกาย ผิวหนังจะทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเสริม โดยการเปลี่ยนสภาพของมันเพื่อช่วยส่งเสริมหรือลดทอนการถ่ายเทความร้อนออกจากร่างกายให้สอดคล้องกับอุณหภูมิ ความชื้น และความเร็วลมของอากาศ

นับว่าโชคดียิ่งที่อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนอุตสาหกรรมมีความสลับซับซ้อนน้อยกว่าในสิ่งมีชีวิตมาก แต่ความสำคัญก็ยังไม่ยิ่งหย่อนกว่ากันเลยสำหรับเทคโนโลยีสมัยใหม่ทุกวันนี้ อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนพบได้ทุกหนทุกแห่งไม่ว่าในครัวเรือนหรือในโรงงานอุตสาหกรรม การต้มน้ำและการหุงข้าวล้วนต้องใช้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ตู้เย็นแบบวัฏจักรอัดไอที่ใช้กันทั่วไปมีอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสองชุด ชุดที่หนึ่งทำหน้าที่ให้ความเย็นแก่ภายในตู้เย็น ส่วนชุดที่สองทำหน้าที่รับมาจากชุดที่หนึ่ง หม้อน้ำรถยนต์ก็เป็นอีกตัวอย่างหนึ่งของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

ระบบปรับอากาศในอาคารก็ต้องใช้ อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเช่นกัน โรงงานไฟฟ้าพลังความร้อนต้องใช้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน(หม้อไอน้ำ)ในการผลิตไอน้ำเพื่อขับเคลื่อนกังหันเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และใช้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน คอนเดนเซอร์ในการทำให้ไอน้ำควบแน่น โรงกลั่นน้ำมันและโรงงานกระบวนการทางเคมีใช้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนหลากหลายรูปแบบ โรงงานอุตสาหกรรมอาหาร โรงกลั่นสุรา และอุตสาหกรรมแช่แข็งล้วนต้องใช้ อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนไม่รูปร่างใดรูปร่างหนึ่ง

ย่อมเป็นที่ประจักษ์ชัดว่าอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมีมากมายหลายรูปแบบและมีการใช้งานอย่างกว้างขวางทั้งในอุตสาหกรรมและในอาคารพาณิชย์ มีกำลังการถ่ายเทความร้อนทุกขนาด ตั้งแต่เล็กสุด (ต่ำกว่า 1 W) ที่ใช้ในตัวระบายความร้อนขนาดเล็กสำหรับอุปกรณ์สร้างภาพอินฟาเรด ระบบจรวดนำวิถี ไปจนถึงขนาดใหญ่ (เกินกว่า 1GW) เช่น หม้อไอน้ำ คอนเดนเซอร์ และชุดระบายความร้อนจากน้ำหล่อเย็น ความหลากหลายของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนครอบคลุม

ทั้งชนิด รูปทรง และการจัดวางทางเรขาคณิตอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน โดยส่วนใหญ่ จะทำหน้าที่ในการให้ความสะดวกแก่การถ่ายเทความร้อนของไหลสองชนิดซึ่งมีอุณหภูมิแตกต่างกันแต่ก็มีอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนบางแบบที่ทำงานเป็นระบบให้ความร้อนหรือระบายความร้อนแก่ของแข็ง อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้ในการถ่ายเทความร้อนที่ใช้ในการถ่ายเทความร้อนระหว่างกระแสของไหลสองสายหรือมากกว่าจะจำแนกอย่างกว้างๆออกเป็นสองกลุ่มใหญ่คือ[12]

1. อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนประเภทรีคูเพอเรเตอร์ (Recuperator)
2. อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนประเภทรีเจนเนอเรเตอร์ (Regenerator)

สำหรับผู้ที่ยังใหม่หรือไม่ใช่ผู้เชี่ยวชาญในงานด้านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนนั้น สิ่งหนึ่งที่สร้างความพิศวงและสับสนมากที่สุดประการหนึ่งก็คือ ความไม่เที่ยงตรงในการออกแบบและการทำนายสมรรถนะของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน สำหรับระบบใหม่ผลการทำนายสมรรถนะของระบบน้อยครั้งที่เราจะมั่นใจว่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 20 % นอกจากนี้การใช้งานจะทำให้พื้นผิวถ่ายเทความร้อนเกิดความสกปรก ซึ่งมีผลให้สมรรถนะทางความร้อนเสื่อมสภาพลงเหลือไม่ถึงครึ่งของสมรรถนะ ขณะที่อยู่ในสภาพใหม่ในกรณีนี้จำเป็นต้องมีการทำความสะอาดพื้นผิวเพื่อฟื้นฟูสมรรถนะ ดังนั้นความสะดวกในการทำความสะดวกจึงเป็นเกณฑ์ที่สำคัญ

กระบวนการที่เป็นการถ่ายเทความร้อนจากของไหลตัวหนึ่งไปสู่ของไหลอีกตัวหนึ่งจะต้องมีผลต่างสุทธิของอุณหภูมิเสมอ ในขณะที่เกิดการถ่ายเทความร้อนนั้นของไหลร้อนจะมีอุณหภูมิลดลง ส่วนของไหลเย็นจะมีอุณหภูมิสูงขึ้น อย่างไรก็ตามอุณหภูมิสูงสุดของไหลเย็นสามารถขึ้นไปถึงนั้นจะต้องต่ำกว่าอุณหภูมิสูงสุดของของไหลร้อนเสมอ ในทำนองเดียวกัน อุณหภูมิต่ำสุดของของไหลร้อนจะต้องสูงกว่าอุณหภูมิต่ำสุดของไหลเย็นเสมอ[8] กล่าวคือจะต้องมีความแตกต่างของอุณหภูมิของไหลทั้งสอง เพื่อเป็นตัวขับเคลื่อนการถ่ายเทความร้อนจากของไหลร้อนไปสู่ของไหลเย็น ซึ่งเป็นไปตามกฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์ ในทำนองเดียวกันจะต้องมีพลังงานส่วนหนึ่งถูกใช้ไปในการทำให้ของไหลผ่านตัวอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งจะแสดงให้เห็นเป็นผลต่างความดันระหว่างทางเข้ากับทางออกของตัวอุปกรณ์นี้ การเสื่อมสภาพของพลังงานความดันอันเนื่องจากการเสียดทานในระหว่างการไหลจะทำให้ความดันของของไหลที่ทางออกต่ำกว่าที่ทางเข้า โดยทั่วไปสมรรถนะทางความร้อนจะสัมพันธ์กับการสูญเสียความดันที่เพิ่มขึ้น สำหรับของไหลที่ความหนาแน่นสูง(ของเหลว) โดยปกติการสูญเสียกำลังเนื่องจากความเสียดทานจะมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับอัตราการถ่ายเทความร้อน ในทางตรงข้ามสำหรับของไหลความหนาแน่นต่ำ(แก๊ส) การปรับปรุงอัตราการถ่ายเทความร้อนมักจะนำไปสู่ความสิ้นเปลืองกำลังทางกลสูงในรูปของพลังงานขับเคลื่อนคอมเพรสเซอร์หรือพัดลม การปรับปรุงในลักษณะดังกล่าวนี้มักจะคุ้มเนื่องจากพลังงานกลที่ต้องจ่ายไปมักจะมีคุณค่าสูงกว่าพลังงานความร้อนเกรดต่ำ

หลายเท่า การออกแบบและการใช้งานอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจึงต้องมีการพิจารณาอย่างถี่ถ้วน ทั้งในด้านอัตราการถ่ายเทความร้อนและกำลังทางกลที่ใช้ในการขับเคลื่อนการไหล การใช้ความระมัดระวังในการเลือกวัสดุให้เหมาะสม สำหรับใช้กับของไหลที่เกี่ยวข้องเป็นจุดที่สำคัญอย่างยิ่งของเทคโนโลยีอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนการกัดกร่อนของวัสดุจะนำไปสู่ความเสียหายของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจนไม่สามารถกักกันของไหลได้ การกัดกร่อนเกิดขึ้นในหลายลักษณะซึ่งจำเป็นต้องเรียนรู้และทำความเข้าใจให้ดีพอที่จะช่วยในการเลือกวัสดุอย่างสมเหตุสมผลและประหยัด[12]

1.2 วัตถุประสงค์ในการทำวิทยานิพนธ์

- 1.2.1 เพื่อศึกษาระบบควบคุมที่เหมาะสมกับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานสูงสุดของกระบวนการ
- 1.2.2 ศึกษาโปรแกรมเพื่อช่วยให้คำนวณหาพารามิเตอร์พื้นฐานที่จำเป็นและง่ายต่อการใช้งานไม่ต้องอาศัยประสบการณ์มากนัก
- 1.2.3 ศึกษาเปรียบเทียบผลตอบสนองทางเวลาของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน เมื่อใช้การระบบควบคุมแต่ละระบบและเลือกใช้ให้เหมาะสม

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

กระบวนการอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับพลังงานความร้อนได้แพร่หลายในกระบวนการอุตสาหกรรมไทยอย่างรวดเร็ว อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนได้ถูกนำมาใช้เพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนในกระบวนการอุตสาหกรรมและได้มีโปรแกรมใช้งานที่ช่วยในการออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเป็นจำนวนมาก แต่ผู้ใช้งานโปรแกรมห้างกล่าวต้องมีความชำนาญเฉพาะทางจึงไม่เหมาะสมกับผู้ที่ต้องการรู้ค่าพารามิเตอร์พื้นฐานของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน และในโปรแกรมโดยส่วนใหญ่จะไม่กล่าวถึงระบบควบคุมที่ใช้ร่วมกับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

ศึกษาทฤษฎีของการถ่ายเทความร้อนของของไหลและหลักการออกแบบของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน เมื่อเข้าใจความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ออกจากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ข้อจำกัดการออกแบบต่างๆ และศึกษาระบบควบคุมอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ใช้ภาษาวิซวลเบสิกร่วมกับ โปรแกรมแมตแล็บซิมูลิคส์เพื่อสร้างเป็นโปรแกรมจำลอง และนำโปรแกรมที่สร้างขึ้นเปรียบเทียบกับโปรแกรม S&THex v1.4 พร้อมกับแสดงผลการเลียนแบบการควบคุมแต่ละรูปแบบที่น่าเสนอ

1.5 ขอบเขตการวิจัย

สร้างโปรแกรมจำลองสำหรับการออกแบบและควบคุม อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่มี 3 โหมดการควบคุมคือ PID feedback , PID feed forward และ PID ร่วมกับ Look up table

1.6 ขั้นตอนการศึกษา

- 1 ทำการศึกษาหลักการทำงานของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน
- 2 ศึกษาข้อกำหนดพื้นฐานที่ใช้ในการออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน
- 3 ศึกษาโปรแกรม Visual Basic
- 4 ทำการศึกษาระบบควบคุมต่างๆที่ใช้กับกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน
- 5 ศึกษาการจำลองการทำงานโดยใช้ Matlab Simulink
- 6 หาผลตอบสนองของกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน
- 7 เปรียบเทียบการตอบสนองทางเวลาของกระบวนการแต่ละแบบ
- 8 สรุปผล และ เสนอผลการจำลองเปรียบเทียบกับโปรแกรม S&THex v1.4

1.7 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

ในวิทยานิพนธ์นี้จะแบ่งออกเป็น 6 บทโดยรายละเอียดในแต่ละบทดังนี้

บทที่ 1 เป็นวัตถุประสงค์และหลักการในการทำวิทยานิพนธ์พร้อมทั้งรายละเอียดของวิทยานิพนธ์แต่ละบท

บทที่ 2 ทฤษฎีการแลกเปลี่ยนความร้อน

บทที่ 3 เป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนชนิดเป็นท่อ

บทที่ 4 เป็นหลักการออกแบบทางความร้อน

บทที่ 5 เป็นโครงสร้างโปรแกรมและระบบควบคุม

บทที่ 6 เป็นการสรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะในการเลือกระบบควบคุมและเปรียบเทียบผลตอบสนองการควบคุม

ส่วนท้ายสุดของวิทยานิพนธ์เป็นภาคผนวก แสดงรายละเอียดต่างๆของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนพร้อมทั้งผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ และประวัติผู้เขียน

บทที่ 2

ทฤษฎีการแลกเปลี่ยนความร้อน

2.1 บทนำ

เมื่อไรก็ตามที่จุดสองจุดมีอุณหภูมิที่แตกต่างกันจะมีพลังงานถ่ายเทจากจุดที่มีอุณหภูมิสูงไปยังจุดที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ซึ่งพลังงานที่เคลื่อนที่ด้วยอิทธิพลของอุณหภูมิแตกต่างกันนี้ เรียกว่า พลังงานความร้อน

กลไกของการถ่ายเทความร้อนแบบต่างๆมีอยู่ด้วยกัน 3 แบบคือ [1]

1. การถ่ายเทความร้อนโดยการนำ หรือการนำความร้อน (Conduction)
2. การถ่ายเทความร้อนโดยการพา หรือการพาความร้อน (Convection)
3. การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสี หรือการแผ่รังสีความร้อน (Radiation)

2.2 ทฤษฎีการแลกเปลี่ยนความร้อน

ในการออกแบบระบบความร้อนและวิเคราะห์การแลกเปลี่ยนความร้อนจะต้องมีความเข้าใจกลไกในการแลกเปลี่ยนความร้อนในแต่ละแบบ โดยต้องทราบถึงความสัมพันธ์ของการถ่ายเทความร้อนแบบนั้นๆ [1]

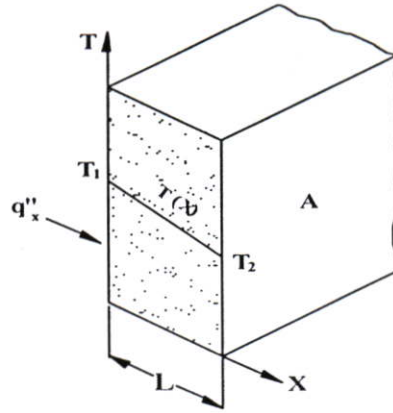
2.2.1 การถ่ายเทความร้อนโดยการนำ (Conduction Heat Transfer)

การนำความร้อน หมายถึง การส่งถ่ายพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นในตัวกลางอัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านตัวกลางจากด้านที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่ด้านที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า โดยส่งถ่ายความร้อนจากโมเลกุลหนึ่งสู่อีกโมเลกุลหนึ่งอย่างต่อเนื่อง การนำความร้อนสามารถเกิดขึ้นได้ในตัวกลางที่เป็นของแข็ง ของเหลว และก๊าซ อัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านตัวกลางแบบการนำความร้อนคำนวณได้จากกฎของฟูเรียร์ (Fourier's Law)

กฎของฟูเรียร์กล่าวว่า สำหรับการนำความร้อนผ่านตัวกลางในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง อัตราการถ่ายเทความร้อน (Q'_x) ผ่านตัวกลางในทิศทางนั้นเป็นปฏิภาคโดยตรงกับพื้นที่ถ่ายเทความร้อนที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหลของความร้อน และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของตัวกลางในทิศทางดังกล่าว (dT/dx)

สำหรับการนำความร้อนในทิศทาง x ภายใต้สภาวะคงตัว (Steady State) อุณหภูมิในตัวกลาง $T = T(x)$ จากกฎของฟูเรียร์

$$Q'_x = -kA \frac{dT}{dx} \quad \text{มีหน่วยเป็น W} \quad (2.1)$$



รูปที่ 2.1 การนำความร้อนผ่านตัวกลางใน 1 มิติพิภักด x

โดยที่ k คือค่าคงที่สัดส่วนที่เรียกว่าสภาพการนำความร้อน (Thermal Conductivity) ของตัวกลางมีหน่วยเป็น $\frac{W}{m.K}$
 ฟลักซ์ความร้อนผ่านตัวกลางคำนวณได้จาก

$$q''_x = \frac{Q'_x}{A} = -k \frac{dT}{dx} \quad \text{มีหน่วยเป็น } W/m^2 \quad (2.2)$$

ในสมการที่ (2.1) และ (2.2) ถ้าอุณหภูมิของตัวกลางลดลงตามทิศทาง $+x$ พบว่าค่าของ dT/dx เป็นลบ ดังนั้นถ้า Q'_x หรือ q''_x มีเครื่องหมายบวกแสดงว่า Q'_x หรือ q''_x มีทิศทางการไหลในทิศทาง $+x$ ภายใต้ภาวะคงตัวและตัวกลางมี k เป็นค่าคงที่อุณหภูมิ $T(x)$ เป็นฟังก์ชันเชิงเส้นดังรูปที่ 2.1 เมื่อ

$$\frac{dT}{dx} = \frac{T_2 - T_1}{L} = \frac{-(T_1 - T_2)}{L}$$

จะได้

$$q''_x = \frac{k(T_1 - T_2)}{L} = \frac{k\Delta T}{L} \quad \text{มีหน่วยเป็น } W/m^2 \quad (2.3)$$

ตารางที่ 2.1 ค่าโดยประมาณของสภาพนำความร้อนของโลหะที่ใช้ในอุปกรณ์แลกเปลี่ยน ความร้อน [1]

สภาพนำความร้อน, $W/(m \cdot ^\circ C)$				
โลหะ	$-100^\circ C$	$0^\circ C$	$100^\circ C$	$400^\circ C$
โลหะเจือของอะลูมิเนียม	120	160	180	-
เหล็กกล้าไร้สนิม	16	17	19	19
ทองแดง	407	380	374	350
ทองเหลือง	88	100	120	140
นิกเกิล/โครเมียม	12	13	16	18

2.2.2 การถ่ายเทความร้อนโดยการพา หรือ การพาความร้อน(Convection)

การพาความร้อนเป็นการถ่ายเทความร้อนที่เกิดจากการเคลื่อนพาของของไหล โดยเฉพาะอย่างยิ่งการถ่ายเทความร้อนระหว่างพื้นผิวของแข็งกับของไหลที่พัดผ่านไปบนพื้นผิวของแข็งนั้น การถ่ายเทความร้อนระหว่างพื้นผิวของแข็งกับของไหลอาจจะเป็นการนำความร้อนอย่างเดียวในกรณีที่ไม่มีการเคลื่อนที่ของของไหลเทียบกับพื้นผิวของแข็ง อัตราการพาความร้อนสามารถคำนวณหาโดยใช้กฎการระบายความร้อนของนิวตัน คือ

$$q' = Ah(T_w - T_f) \text{ มีหน่วยเป็น } W \quad (2.4)$$

เมื่อ

q' = อัตราการพาความร้อน

A = พื้นที่ของการพาความร้อน, m^2

h = สัมประสิทธิ์การพาความร้อน, $W/(m^2 \cdot K)$

T_w = อุณหภูมิของผิวของแข็งในหน่วยของศาเคลวิน

T_f = อุณหภูมิของของไหลในหน่วยของศาเคลวิน

ค่าของสัมประสิทธิ์การพาความร้อน h แปรผันได้กว้างมาก ค่าที่ถือเป็นแบบอย่างของ h แสดงอยู่ในตารางที่ 2.2 จะสังเกตได้ว่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนโดยบังคับมีค่าสูงกว่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนโดยอิสระมากและสัมประสิทธิ์การพาความร้อนในของเหลวจะสูงกว่าในแก๊สมากซึ่งเป็นผลโดยตรงของความหนาแน่น นอกจากนี้การถ่ายเทความร้อนในขณะที่มีการ

เปลี่ยนสถานะ เช่นจากของเหลวกลายเป็นไอ หรือจากไอกลายเป็นของเหลวจะมีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสูงมากเมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่มีการเปลี่ยนสถานะ

ตารางที่ 2.2 พิสัยของค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน [1]

Mode	h	
	$Btu/(h \cdot ft^2 \cdot F)$	$W/(m^2 \cdot K)$
การพาความร้อนอิสระ(อากาศ)	1-5	5-25
การพาความร้อนบังคับ(อากาศ)	2-100	10-500
การพาความร้อนบังคับ(น้ำ)	20-3,000	100-500
น้ำเดือด	500-5,000	2,500-25,000
ไอควบแน่น	1,000-20,000	5,000-10,000

การทำนายค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนในอุปกรณ์รูปลักษณะใหม่ที่ยังไม่เคยทดลองมาก่อนนับว่าเป็นเรื่องลำบาก ปกติจะคำนวณหาด้วยสูตรสำเร็จที่หามาได้จากการวิเคราะห์ทางทฤษฎีร่วมผลการทดลอง ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนโดยทั่วไปจะขึ้นกับสมบัติของของไหลและเส้นทางการไหลที่กำหนดให้นั้นสัมประสิทธิ์การพาความร้อนโดยหลักใหญ่จะขึ้นกับความเร็วของของไหล ในการถ่ายเทความร้อนโดยบังคับนั้นของไหลจะถูกบังคับให้ไหลด้วยความเร็วสูงกว่าการบังคับด้วยแรงลอยตัวตามธรรมชาติค่า h แปรผันตามความเร็ว v ของของไหลตามความสัมพันธ์โดยประมาณดังต่อไปนี้

สำหรับการไหลแบบราบเรียบ (laminar) ในท่อ : $h \propto v^{1/3}$

สำหรับการไหลแบบปั่นป่วน(turbulent) ในท่อ : $h \propto v^{3/4}$

การไหลนอกท่อ : $h \propto v^{2/3}$

เมื่อการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นโดยหลักใหญ่ การพาความร้อนอิสระจะเกิดการเคลื่อนที่ของของไหลเกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของความหนาแน่นของของไหลอันเกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิ ค่าของ h จะขึ้นกับผลต่างอุณหภูมิของไหล/ผนังตามความสัมพันธ์โดยประมาณดังต่อไปนี้

ผลต่างอุณหภูมิมาก : $h \propto \Delta T^{1/3}$

ผลต่างอุณหภูมิน้อย : $h \propto T^{1/4}$

เราอาจนำเอาหลักการของความต้านทานทางความร้อนมาใช้ในการคำนวณหาการพาความร้อนก็ได้ โดยการจัดรูปสมการดังต่อไปนี้

$$q' = \frac{T_W - T_F}{L / Ah} = \frac{T_W - T_F}{R_C} \quad \text{มีหน่วยเป็น } W/m \quad (2.5)$$

เมื่อ

$$R_C = L / Ah = \text{ความต้านทานทางความร้อนในการพาความร้อน}$$

2.2.3 การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสี (Radiation)

ในการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีความร้อนนั้นเป็นการส่งผ่านความร้อนไปในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งเคลื่อนที่ไปด้วยความเร็วแสง การแผ่รังสีความร้อนสามารถผ่านสุญญากาศได้ซึ่งต่างจากการนำความร้อนและการพาความร้อนซึ่งต้องอาศัยตัวกลางในการถ่ายเทความร้อน แสงแดดเป็นตัวอย่างพลังงานการแผ่รังสีที่เราคุ้นเคยที่สุดซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาหลอมตัวชนิดให้ความร้อนซึ่งเกิดขึ้นในสภาวะที่ค่อนข้างคงตัวดวงอาทิตย์เปรียบเทียบกับดวงไฟกลมที่อุณหภูมิ 5800 K ทรงกลมที่ร้อนแรงนี้จะปลดปล่อยรังสีที่เข้มข้นซึ่งเดินทางประมาณ 150 ล้านกิโลเมตรผ่านห้วงอวกาศซึ่งถือได้ว่าเป็นสุญญากาศจนถึงโลกของเราในเวลา 8 นาที พลังงานการแผ่รังสีที่ปลดปล่อยจากวัตถุสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$q''_{rad} = A \epsilon \sigma T^4 \quad \text{มีหน่วยเป็น } W/m^2 \quad (2.6)$$

เมื่อ

$$q''_{rad} = \text{อัตราการเปล่งพลังงานรังสี}$$

$$A = \text{พื้นที่เปล่งพลังงานรังสี, } m^2$$

$$\sigma = \text{ตัวคงค่าสเตฟาน-โบลต์ซมันน์เท่ากับ } (5.7 \times 10^{-8} W/m^2 K^4)$$

$$T = \text{อุณหภูมิของผิว, } K$$

จะเห็นได้ว่าอัตราการเปล่งพลังงานรังสีเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิยกกำลังสี่ ตามปกติการแผ่รังสีความร้อนจะมีค่าน้อยตัดทิ้งได้ เว้นแต่เมื่อพื้นผิวมีอุณหภูมิสูงมาก การแผ่รังสีความร้อนมีความสำคัญเช่นกันในระบบอุณหภูมิต่ำมากๆ ซึ่งได้มีการทำให้เป็นสุญญากาศเพื่อจัดการนำความร้อนและการพาความร้อน เมื่อวัตถุที่เปล่งรังสีถูกปิดล้อมโดยสมบูรณ์ตัวอย่างเช่นเปลวไฟในปล่องไฟ อัตราการถ่ายเทความร้อนสุทธิโดยการแผ่รังสีจากวัตถุไปสู่ผิวปิดล้อมสามารถหาได้จากสมการ

$$q'' = A_1 \epsilon_1 \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad \text{มีหน่วยเป็น } W/m^2 \quad (2.7)$$

เมื่ออักษรห้อย 1 และ 2 หมายถึงพื้นผิววัตถุและพื้นผิวปิดล้อมตามลำดับ ในกรณีของการแลกเปลี่ยนการแผ่รังสีความร้อนระหว่างวัตถุ 1 ไปสู่วัตถุ 2 สามารถได้จากสมการ

$$q''_{r(1-2)} = \alpha_2 A_2 F_{(1-2)} A_1 \varepsilon_1 \sigma (T_1^4 - T_2^4) \text{ มีหน่วยเป็น } W/m^2 \quad (2.8)$$

เมื่อ

α_2 = สภาพการดูดกลืนรังสีของพื้นผิวของวัตถุที่ 2 มีค่าระหว่าง 0 ถึง 1

A_2 = พื้นผิวของวัตถุในตำแหน่งที่ 2 , m^2

$F_{(1-2)}$ = สัดส่วนของรังสีที่ปลดปล่อยออกจากวัตถุ 1 และตกกระทบบนวัตถุ 2 มีค่า 0 ถึง 1

การแผ่รังสีความร้อนจะประกอบรวมกับการถ่ายเทความร้อนโดยการนำและการพา วิธีการที่สะดวกวิธีหนึ่งในการคำนวณเกี่ยวกับการแผ่รังสีความร้อนก็คือ การใช้หลักการของความร้อนนั้นคือจตุรูปสมการ (2.8) เสียใหม่ดังนี้

$$\begin{aligned} q''_{r(1-2)} &= \alpha_2 A_2 F_{(1-2)} A_1 \varepsilon_1 \sigma (T_1^2 + T_2^2)(T_1 + T_2)(T_1 - T_2) \\ &= \frac{T_1 - T_2}{R_r} \end{aligned} \quad (2.9)$$

เมื่อ

$$R_r = \frac{L}{q_{r(1-2)} \alpha_2 A_2 F_{(1-2)} A_1 \varepsilon_1 \sigma (T_1^2 + T_2^2)(T_1 + T_2)}$$

2.3 การถ่ายเทความร้อนรวม

โดยปกติเราจะไม่พิจารณากระบวนการถ่ายเทความร้อนในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแยกย่อยโดยละเอียด แต่มักจะพิจารณาการถ่ายเทความร้อนรวมกันในรูปของสัมประสิทธิ์ถ่ายเทความร้อนรวม U ซึ่งถูกนิยามขึ้นเพื่อใช้ในการหาการถ่ายเทความร้อนรวมของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน [1]

$$q = AU\Delta T \text{ มีหน่วยเป็น } W \quad (2.10)$$

เมื่อ

q = อัตราการถ่ายเทความร้อนจากของไหล 1 ไปสู่ของไหล 2

A = พื้นผิวถ่ายเทความร้อน , m^2

U = สัมประสิทธิ์ถ่ายเทความร้อนรวม , $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$

ΔT = ผลต่างของอุณหภูมิของไหล 1 และของไหล 2 , $^\circ C$

ตารางที่ 2.3 ตัวอย่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม [1]

ของของไหล	$U(W/m^2 \cdot \overset{\circ}{C})$
<u>อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อในเซลล์</u>	
น้ำ/น้ำ	1220-2440
แอมโมเนีย/น้ำ	1220-2440
สารอินทรีย์เบา ($\mu < 5 \times 10^{-4} Ns/m^2$)/น้ำ	370-730
สารอินทรีย์ปานกลาง ($5 \times 10^{-4} < \mu < 10 \times 10^{-4} Ns/m^2$)/น้ำ	240-370
สารอินทรีย์หนัก ($\mu > 10 \times 10^{-4} Ns/m^2$)/น้ำ	25-370
แก๊ส/น้ำ	10-240
น้ำ/น้ำเกลือ	490-980
ไอน้ำ/น้ำ (ตัวอุ่นน้ำป้อน)	980-5700
ไอน้ำ/แอมโมเนีย	980-3400
ไอน้ำ/สารอินทรีย์เบา	490-980
ไอน้ำ/อินทรีย์ปานกลาง	240-490
ไอน้ำ/สารอินทรีย์หนัก	30-300
ไอน้ำ/แก๊ส	25-240
<u>อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนชนิดระบายความร้อนด้วยอากาศ</u>	$U(W/m^2 \cdot \overset{\circ}{C})$
น้ำ	680-740
น้ำมันหล่อลื่น	85-170
ไอเสีย	50-170
อากาศ	114-511
ไอน้ำควบแน่น	740-795
น้ำยา R-12	340-455
น้ำ/น้ำ	3000-7000

2.4 ความเสียดทานในของไหล

ผลของความเสียดทานในของไหลมักจะคิดรวมไว้ในตัวประกอบความเสียดทาน (f) ความดันตกหรือการสูญเสียความดันเนื่องจากความเสียดทาน สำหรับการไหลภายในท่อสามารถคำนวณได้โดยสมการ [6]

$$\Delta p = f \frac{L \rho u^2}{d} \quad (2.11)$$

เมื่อ Δp = ความดันตกในท่อในความในช่วงความยาว L ของท่อ, N/m^2

f = ตัวประกอบความเสียดทาน

L = ความยาวท่อ, m

d = เส้นผ่าศูนย์กลางภายในของท่อ, m

ρ = ความหนาแน่นของของไหล, kg/m^3

u = ความเร็วเฉลี่ยของของไหล, m/s

ค่าของตัวประกอบความเสียดทานไม่ใช่เป็นตัวเลขที่แต่เป็นฟังก์ชันของตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number) และความขรุขระของผิวท่อ นอกจากนี้ตัวประกอบความเสียดทานยังขึ้นอยู่กับสภาพการไหลอีกด้วยว่า เป็นการไหลแบบราบเรียบ (Laminar) หรือแบบปั่นป่วน (Turbulent) ในกรณีทั่วไปตัวประกอบความเสียดทานอาจจะหาได้จากความสัมพันธ์ต่อไปนี้

การไหลแบบราบเรียบ ($Re < 2300$)

$$f = \frac{64}{Re} \quad (2.12)$$

การไหลแบบปั่นป่วน ($Re > 2300$)

สำหรับท่อเรียบ,

$$- Re < 10^5, f = 0.316 Re^{-1.4} \quad (2.13)$$

$$10^4 < 10^8, f = 1.02 (\log Re)^{-2.5} \quad (2.14)$$

สำหรับท่อขรุขระ

$$\frac{1}{f} = 1.14 - 2 \log \left(\frac{e}{d} + \frac{9.35}{Re \sqrt{f}} \right) \quad (2.15)$$

เมื่อ

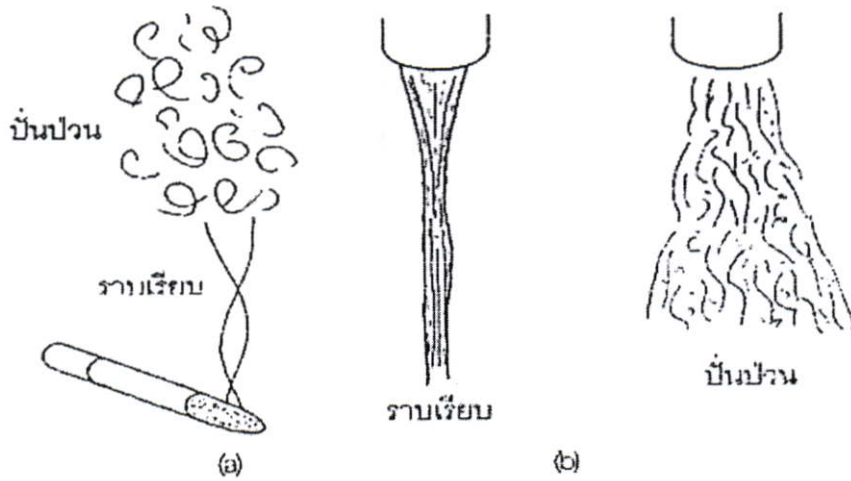
Re = คือตัวเลขเรย์โนลด์

u = ความหนืดพลวัตของของไหล

e = ความขรุขระของผิวท่อ

2.5 การไหลแบบราบเรียบและแบบปั่นป่วน

การไหลของของไหลโดยทั่วไปแบ่งออกได้เป็นสองแบบคือ การไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) และการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) การไหลแบบราบเรียบนั้นของไหลเคลื่อนที่ไปอย่างเป็นระเบียบด้วยความเร็วค่อนข้างต่ำโดยไม่มีการผสมกัน ส่วนการไหลแบบปั่นป่วนนั้นเป็นการไหลที่ไม่มีระเบียบและเต็มไปด้วยความสับสน [6]



รูปที่ 2.2 ตัวอย่างการไหลแบบราบเรียบและการไหลแบบปั่นป่วน

ในคริสต์ศตวรรษที่ 18 Osborne Reynolds วิศวกรชาวอังกฤษ ได้ทำการศึกษาการไหลของของไหลและการเปลี่ยนสภาพการไหล จากราบเรียบไปเป็นแบบปั่นป่วน เขาพบว่า การเปลี่ยนสภาพการไหลขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ไร่น้อยที่เรียกว่าตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number) ซึ่งนิยามดังนี้

$$Re = \frac{\rho u d}{\mu} \quad (2.16)$$

เมื่อ

ρ = ความหนาแน่นของของไหล, kg/m^3

u = ความเร็วของของไหล, m/s

μ = ความหนืดพลวัตของของไหล, $Pa \cdot s$

d = ความยาวที่เป็นลักษณะสมบัติของเส้นทางการไหล, m

ในกรณีของการไหลในท่อความยาวที่เป็นลักษณะก็คือเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อ ในกรณีนี้ความเร็ว u คือความเร็วเฉลี่ยของของไหล ค่าวิกฤตของตัวเลขเรย์โนลด์ที่สภาพการไหลเปลี่ยนจากราบเรียบไปเป็นแบบปั่นป่วนคือ 2300 โดยประมาณ สำหรับการไหลไปบนแผ่นเรียบนั้น ความที่เป็น

ลักษณะสมบัติคือระยะ x จากขอบส่วนหัวถึงตำแหน่งที่สนใจ ดังนั้นในกรณีนี้ตัวเลขเรย์โนลด์ $Re = \rho u x / \mu$ โดยที่ u คือความเร็วของของไหลที่ห่างออกไปจากแผ่นเรียบ ซึ่งเรียกว่าความเร็วกระแสน้ำจะเห็นได้ว่า ณ ตำแหน่งที่ห่างออกไปจากขอบส่วนหัว ค่าตัวเลขเรย์โนลด์จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ค่าวิกฤตของตัวเลขเรย์โนลด์ในกรณีนี้คือ 5×10^5 ส่วนในกรณีที่มีหน้าตัดไม่เป็นวงกลม วิธีที่สะดวกที่วิธีหนึ่งเป็นการแนวคิดของเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก D_H ซึ่งนิยามดังนี้

$$D_H = \frac{4A}{P} \quad (2.17)$$

เมื่อ

$$A = \text{พื้นที่หน้าตัดของท่อ, } m^2$$

$$P = \text{เส้นรอบที่เปียกของหน้าตัด, } m$$

สำหรับท่อกลม

$$D_H = \frac{4(\pi D^2 / 4)}{\pi D} = D \quad (2.18)$$

สำหรับท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสยาวด้านเท่ากับ L

$$D_H = \frac{4(L^2)}{4L} = L \quad (2.19)$$

สำหรับท่อสี่เหลี่ยมผืนผ้า ยาว \times กว้าง เท่ากับ $L \times H$

$$D_H = \frac{4(HL)}{2(H+L)} = \frac{2HL}{H+L} \quad (2.20)$$

2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเสียดทานการไหลกับการถ่ายเทความร้อน

ความพยายามที่จะปรับปรุงการถ่ายเทความร้อนระหว่างผนังกับของไหล มักจะนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของผลทางด้านเสียดทานซึ่งเป็นสิ่งที่อธิบายได้ สำหรับการไหลกับสภาพพื้นผิวผนังที่กำหนดให้คู่ใดคู่หนึ่ง การเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนสามารถกระทำได้ด้วยวิธีต่อไปนี้ [6]

1. การเพิ่มความเร็วของการไหลเพื่อเพิ่มค่าตัวเลขเรย์โนลด์
2. การดัดแปลงสภาพพื้นผิว เช่นการเสริมครีบ การทำให้ผิวขรุขระ หรือเป็นคลื่น

จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า การเพิ่มความเร็วการไหลหรือ การดัดแปลงสภาพพื้นผิวสัมผัสระหว่างของไหลกับผนังก็ช่วยให้อัตราการถ่ายเทความร้อนดีขึ้น แต่สิ่งที่ติดตามมาอย่างเลี่ยงไม่ได้คือการเพิ่มขึ้นความต้านทานการไหล ในความเป็นจริงนั้นความเชื่อมโยงระหว่างการถ่ายเทความร้อนกับความเสียดทานการไหล มีความแน่นอนถึงขนาดที่สามารถนำข้อมูลจากการวัดความเสียดทานไปใช้ในการประเมินค่าการถ่ายเทความร้อนอย่างได้ผลเป็นที่น่าพอใจในหลายกรณี วิธีการนี้นับว่ามีประโยชน์มาก เพราะการวัดความดันตกหรือแรงต้านบนวัตถุสามารถทำได้สะดวกและ

เที่ยงตรงกว่าการวัดอุณหภูมิในการทดลองเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนมาก เทคนิคนี้มีประโยชน์เป็นพิเศษสำหรับการไหลในท่อที่มีผิวภายในขรุขระ หรือท่อที่มีการไหลไม่สม่ำเสมอ ความสัมพันธ์เพื่อใช้ในการนี้คือ

$$St_x Pr^{2/3} = \frac{C_{fx}}{2} \quad (2.21)$$

เมื่อ St_x เป็นกลุ่มตัวแปรไร้มิติที่เรียกว่า ตัวเลขสแตนตัน (Stanton number) และ C_{fx} เรียกว่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานซึ่งนิยามดังต่อไปนี้

$$St_x = \frac{Nu_x}{Re_x Pr} = h\rho C_p u_\infty \quad (2.22)$$

$$C_{fx} = \frac{\tau_w}{\frac{1}{2}\rho u_\infty^2} \quad (2.23)$$

โดยที่

τ_w = ความเค้นเฉือนในชั้นของไหลที่ติดกับผนัง

ρ = ความหนาแน่นของของไหล, kg/m^3

u_∞ = ความเร็วของของไหลอิสระ, kg/s

ในการพิจารณาอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนนั้น สิ่งที่สำคัญที่ต้องพิจารณาควบคู่กันไปคือองค์ประกอบต่างซึ่งรวมถึงหลักเกณฑ์ต่างๆที่เกี่ยวข้องสำหรับการออกแบบทางความร้อนเช่น ทฤษฎีเทอร์โมไดนามิกส์ และองค์ประกอบที่เกี่ยวข้องกับการไหล นอกจากนี้ยังรวมถึงความเค้นที่เกิดจากแรงดันภายในซึ่งผลทางความร้อนตลอดจนวิธีการในการแก้ปัญหาต่างๆ เหล่านี้เพื่อให้ได้ อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่มีความเหมาะสมที่สุด

บทที่ 3

อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนชนิดเป็นท่อ

3.1 บทนำ

อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนชนิดเป็นท่อมีการใช้งานอย่างกว้างขวางมากกว่าชนิดอื่นใด อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนชนิดนี้มีการสร้างขึ้นหลากหลายขนาดและรูปแบบ ตั้งแต่ขนาดจิ๋วที่ใช้ในเครื่องทำความเย็นขนาดเล็ก ไปจนถึงระบบขนาดยักษ์ซึ่งประกอบด้วยท่อเป็นพันๆ ท่อ ดังเช่น คอนเดนเซอร์ที่ใช้ในโรงงานไฟฟ้าเป็นต้น อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนชนิดเป็นท่อได้รับความนิยมนำไปใช้งานอย่างแพร่หลายมาก ก็เพราะว่าเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องได้รับการพัฒนาจนเข้าที่แล้วเช่น การสร้างท่อโลหะที่มีความแข็งแรงซึ่งสามารถทนต่อความดันสูงได้แทบจะกล่าวได้ว่า ไม่มีขีดจำกัดของความดันและอุณหภูมิที่จะรองรับได้ นอกจากนี้วัสดุสำหรับรับท่อบนแผ่นยึดท่อ (Tube sheet) สามารถทำได้อย่างสะดวกโดยการเจาะ ความง่ายในการผลิตเป็นเหตุให้ผู้ผลิตรายใหญ่ ๆ และการพัฒนามาตรฐานอุตสาหกรรมสำหรับการผลิต การที่อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนชนิดเป็นท่อมีการใช้งานอย่างแพร่หลาย มีการให้บริการที่น่าพึงพอใจเป็นเวลายาวนาน และความคุ้นเคยในหมู่ผู้ใช้ จึงทำให้มักจะถูกเลือกใช้หรือนึกถึงเป็นอันดับแรกในระบบที่ติดตั้งขึ้นใหม่ [12]

3.2 การจำแนกอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนชนิดเป็นท่อพิจารณาที่ของไหล

อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนชนิดเป็นท่ออาจจะจำแนกอย่างกว้าง ๆ โดยพิจารณาที่ของไหลที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้ [12]

1. ของเหลว/ของเหลวนับว่าเป็นแบบที่พบมากที่สุดในการบรรดาอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนชนิดเป็นท่อ โดยทั่วไปน้ำระบายความร้อนจะไหลอยู่ในช่องทางการไหลด้านหนึ่ง เพื่อระบายความร้อนออกจากกระแสน้ำของเหลวที่ร้อนเช่น น้ำมันเครื่อง เป็นต้น ของเหลวทั้งสองจะถูกบีบให้ไหลผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน การถ่ายเทความร้อนหลักที่เกิดขึ้นจึงเป็นการพาความร้อนโดยบังคับ ความหนาแน่นที่ค่อนข้างสูงของของเหลวนำไปสู่การถ่ายเทความร้อนในอัตราที่สูงมาก ดังนั้นในสถานการณ์โดยทั่วไปจึงไม่มีความจำเป็นจะต้องใช้ครีป หรืออุปกรณ์อื่นเพื่อช่วยเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน

2. ของเหลว/แก๊สเป็นแบบที่พบมากเช่นกัน โดยทั่วไปจะเป็นการใช้อากาศเพื่อการระบายความร้อนให้แก่ของเหลวร้อนที่ปลดปล่อยออกมาของเหลวจะถูกบีบให้ไหลผ่านท่อโดยมีอัตราการพาความร้อนสูงมาก ส่วนอากาศจะไหลขวางอยู่นอกท่อซึ่งอาจจะเป็นการไหลโดย

ธรรมชาติ (ไม่ใช่พัดลมช่วย) หรือการไหลโดยใช้พัดลมช่วย สัมประสิทธิ์การพาความร้อนทางด้านอากาศจะต่ำเมื่อเทียบกับทางด้านของเหลว ดังนั้นจึงมักจะเสริมครีบท่ด้านนอก(ด้านอากาศ) ของท่อเพื่อเป็นการชดเชย

3. แก๊ส/แก๊ส เป็นแบบที่พบในรีคูเพอเรเตอร์ (Recuperator) ซึ่งใช้ในการอุ่นอากาศด้วยแก๊สปล่อยทิ้งของระบบกังหันแก๊ส เตาเผาเหล็ก และระบบแยกแก๊ส-ของเหลวเป็นต้น ในหลายกรณีแก๊สดวหนึ่งจะถูกอัดเพื่อเพิ่มความหนาแน่น ในขณะที่แก๊สอีกตัวหนึ่งจะอยู่ที่ความดันและความหนาแน่นต่ำ ตามปกติแก๊สความหนาแน่นสูงจะถูกจัดให้ไหลในท่อ บางครั้งอาจจะมี การเสริมครีบท่ภายในและภายนอกเพื่อเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน

4. เครื่องควบแน่นหรือคอนเดนเซอร์ (Condenser) ของไหลที่ใช้ในการระบายความร้อนออกจากของไหลที่ควบแน่น หรือกลั่นตัวอาจจะเป็นของเหลวเช่นน้ำหรือแก๊ส เช่นอากาศก็ได้ ของไหลควบแน่นมักจะถูกจัดให้ไหลอยู่นอกท่อสำหรับในกรณีที่ระบายความร้อนด้วยของเหลว และในกรณีนี้ไม่มีความจำเป็นต้องเสริมครีบท่ทั้งภายในและภายนอกของท่อ ส่วนในกรณีที่เป็นการระบายความร้อนด้วยแก๊ส ของไหลควบแน่นมักถูกจัดให้ไหลอยู่ในท่อและมักจะมี การเสริมครีบท่บนด้านนอก (ด้านแก๊ส) ของท่อ

5. เครื่องระเหยและหม้อไอน้ำ (Evaporator and Boiler) อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนในกลุ่มนี้อาจจะแบ่งออกเป็นกลุ่มย่อยได้ดังต่อไปนี้

5.1 ชนิดที่มีการเผาไหม้แก๊สที่เกิดจากการสันดาปของเชื้อเพลิงฟอสซิลเช่น น้ำมัน ถ่านหิน เป็นต้น ที่อุณหภูมิสูงภายใต้ความดันบรรยากาศ จะถูกใช้ในการผลิตไอน้ำที่ความดันสูงในระบบขนาดเล็ก แก๊สสันดาปมักจะไหลผ่านไปนท่อ (หม้อไอน้ำชนิดท่อไฟ) ส่วนในระบบที่ใหญ่ขึ้นน้ำหรือไอน้ำมักจะไหลอยู่ในท่อ โดยทั่วไปจะเสริมครีบท่บนด้านนอกของท่อ

5.2 ชนิดที่ไม่มีการเผาไหม้ครอบคลุมอุปกรณ์ต่างๆอย่างกว้างขวางตั้งแต่ อุณหภูมิสูงมากเช่น เครื่องกำเนิดไอน้ำพลังงานนิวเคลียร์จนถึงอุณหภูมิต่ำเช่นในหอกลั่นเป็นต้น ในอุตสาหกรรมเคมีหรือ อาหารอาจจะใช้ไอน้ำหรือไฟฟ้าในการระเหยสารละลายหรือเคี้ยวแห้ง

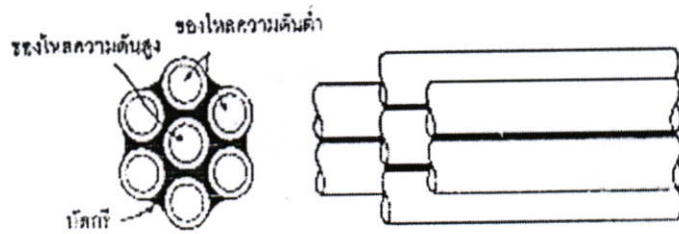
3.3 การจำแนกอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนชนิดเป็นท่อพิจารณาที่โครงสร้าง

อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนชนิดเป็นท่ออาจจะจำแนกตามลักษณะ โครงสร้างได้ดังต่อไปนี้ [12]

1. อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อเดี่ยวนับว่าเป็นแบบที่มีโครงสร้างง่ายที่สุด กล่าวคือ ประกอบด้วยท่อเปลือยเพียงท่อเดียวเพื่อให้ของไหลไหลผ่าน และเกิดการถ่ายเทความร้อนกับสิ่งแวดล้อมรอบท่อ ระบบทำความร้อนอาคารเป็นจำนวนมากเป็นแบบนี้ ท่อให้ความร้อนจะถูกติดตั้งในแนวนอนที่ระดับพื้นและมีน้ำร้อนหรือไอน้ำไหลเวียนไปในท่อความร้อน จะถูกถ่ายเทความร้อนให้แก่อากาศในห้องด้วยการพาโดยธรรมชาติ

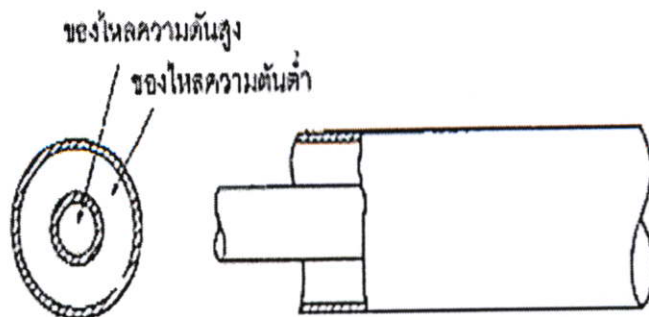
2. อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบมัดท่อเป็นพัฒนาการมาจากแบบท่อเดี่ยว ประกอบด้วยท่อหลายท่อมาเชื่อมเกาะกันด้วยวัสดุที่เป็นตัวนำความร้อนเพื่อให้มีการถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลในท่อ ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ในบางครั้งจะเป็นกลุ่มท่อล้อมรอบท่อศูนย์กลางหนึ่งท่อ ของไหลที่มีความหนาแน่นสูงจะไหลอยู่ในท่อศูนย์กลาง ส่วนของไหลความหนาแน่นต่ำจะไหลอยู่ในท่อโดยรอบ

3. อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้นประกอบด้วยท่อสองท่อสวมซ้อนกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.2



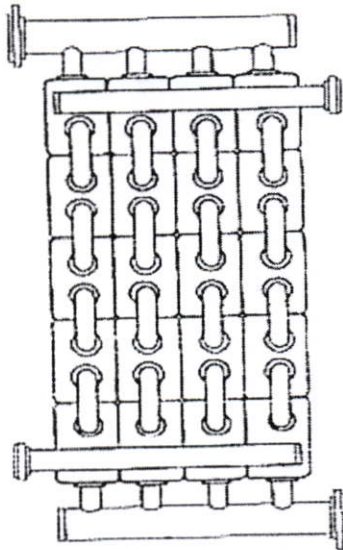
รูปที่ 3.1 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบมัดท่อ

อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบนี้เคยได้รับความนิยมอย่างกว้างขวาง เนื่องจากมีราคาถูก ผลิตง่าย และมีความยืดหยุ่นสูงเพราะสามารถสร้างให้มีความยาวตามต้องการได้แทบทุกขนาด และมีขนาดท่อและวัสดุให้เลือกใช้ได้อย่างกว้างขวาง ข้อปฏิบัติทั่วไปจะให้ของไหลที่มีความดันสูง อุณหภูมิสูง ความหนาแน่นสูง หรือความก่ดกร่อนสูงอยู่ในท่อชั้นใน ซึ่งจะประหยัดและปลอดภัยกว่าในบางครั้งอาจจะนำอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้นมาต่อกันหลายๆ ชุด ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ซึ่งในการต่ออาจจะต่อแบบขนาน หรืออนุกรมก็ได้ ในปัจจุบันนี้ อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบนี้ไม่ได้รับความนิยมมากเช่นในอดีตแล้ว ส่วนใหญ่จะถูกแทนที่โดยอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อในเซลล์ที่จะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป



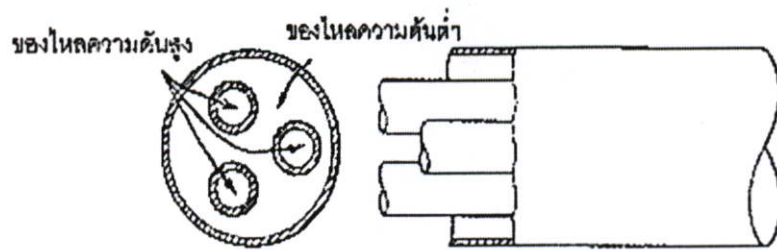
รูปที่ 3.2 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น

4. อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อในเชลล์ (Tube and Shell Heat Exchanger) ในบางครั้งเพื่อที่จะเพิ่มกำลังความจุ หรือเพื่อลดความยาวที่ต้องการลง เราอาจจะออกแบบให้มีท่อภายในมากกว่าหนึ่งท่อภายในได้ท่อภายนอกขนาดใหญ่หนึ่งท่อ ดังแสดงในรูปที่ 3.4 รูปแบบเช่นนี้เองที่เป็นจุดเริ่มต้นนำไปสู่อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อในเชลล์ ดังแสดงในรูปที่ 3.5 ดังจะกล่าวโดยละเอียดในลำดับต่อไป ซึ่งเป็นแบบที่มีการนำไปใช้งานอย่างกว้างขวางสำหรับการถ่ายเทความร้อนระหว่างของเหลว/ของเหลว ระหว่างของเหลว/ไอควบแน่น และระหว่างของเหลว/ของเหลวระเหย

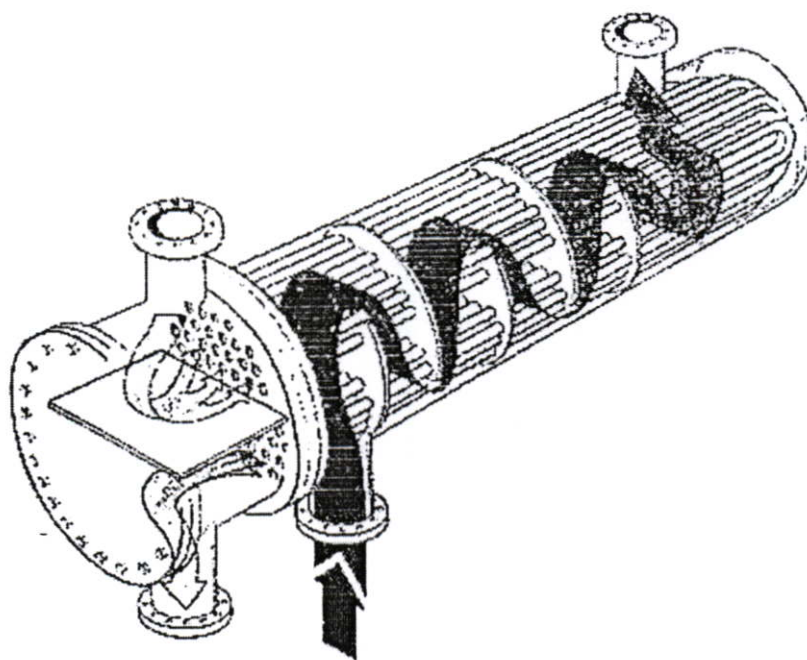


รูปที่ 3.3 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้นหลายตัวต่อเข้าด้วยกันเป็นชุด



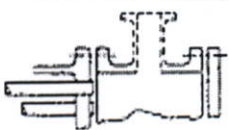



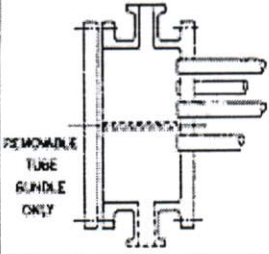
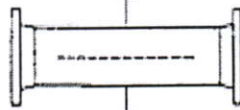
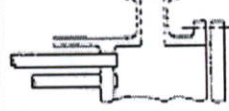
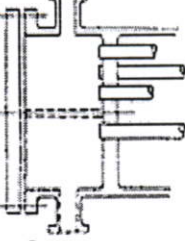
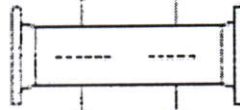

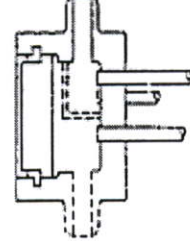
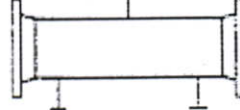
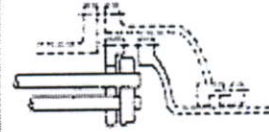
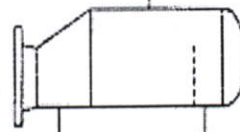
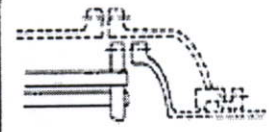



การที่มีอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อในเชลล์ใช้งานอยู่เป็นจำนวนมาก ได้นำไปสู่มาตรฐานอุตสาหกรรมที่ได้รับการยอมรับโดยทั่วไป มาตรฐานที่เป็นที่รู้จักดีที่สุดได้แก่ TEMA Standard ของ Tubular Exchanger Manufacture Association มาตรฐานนี้กล่าวถึงชื่อเรียก พื้นฐานวิธีการจำแนก การออกแบบการประกอบ และวัสดุที่ใช้ทำอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อในเชลล์



รูปที่ 3.4 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบมีท่อภายในหลายท่ออยู่ภายใต้ท่อชั้นนอกหนึ่งท่อ



รูปที่ 3.5 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อในเซลล์

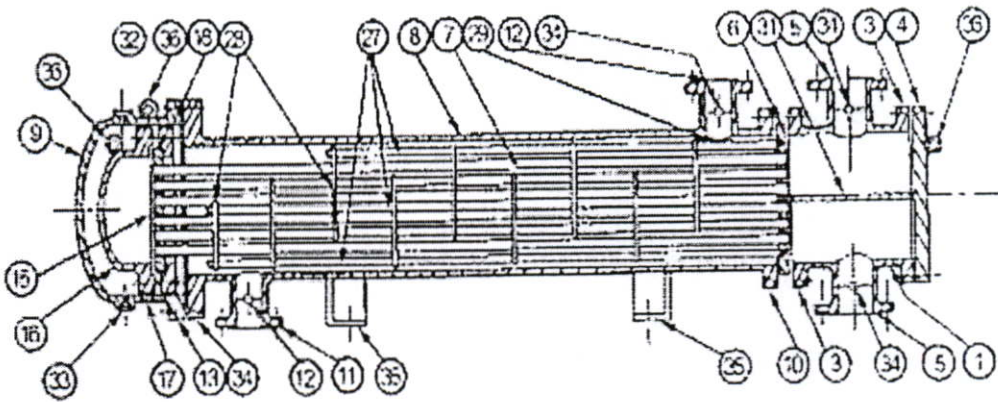
FRONT END STATIONARY HEAD TYPES		SHELL TYPES		REAR END HEAD TYPES	
A	 CHANNEL AND REMOVABLE COVER	E	 ONE PASS SHELL	L	 FIXED TUBESHEET LIKE "A" STATIONARY HEAD
B	 BONNET (INTEGRAL COVER)	F	 TWO PASS SHELL WITH LONGITUDINAL BAFFLE	M	 FIXED TUBESHEET LIKE "B" STATIONARY HEAD
C	 REMOVABLE TUBE BUNDLE ONLY CHANNEL INTEGRAL WITH TUBE-SHEET AND REMOVABLE COVER	G	 SPLIT FLOW	N	 FIXED TUBESHEET LIKE "N" STATIONARY HEAD
N	 CHANNEL INTEGRAL WITH TUBE-SHEET AND REMOVABLE COVER	H	 DOUBLE SPLIT FLOW	P	 OUTSIDE PACKED FLOATING HEAD
D	 SPECIAL HIGH PRESSURE CLOSURE	J	 DIVIDED FLOW	S	 FLOATING HEAD WITH BACKING DEVICE
		K	 KETTLE TYPE REBOILER	T	 PULL THROUGH FLOATING HEAD
		X	 CROSS FLOW	U	 U-TUBE BUNDLE
				W	 EXTERNALLY SEALED FLOATING TUBESHEET

รูปที่ 3.6 แบบต่าง ๆ ของส่วนประกอบหลักของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อในเชลล์

ส่วนประกอบหลักเหล่านี้โดยตัวมันเองมีแบบที่แตกต่างกันหลายแบบ เมื่อจับคู่ประกอบเข้าด้วยกันจึงทำให้ได้รูปแบบของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อในเซลล์ที่แตกต่างกันได้มากมาย รูปที่ 3.6 แสดงแบบต่างๆของส่วนประกอบหลักเหล่านี้ซึ่งแต่ละแบบจะแทนด้วยตัวอักษรแบบที่แสดงในรูปนี้ได้แก่

1. ส่วนปลายหน้าห้าแบบ เรียกว่าแบบ A,B,C,N, และ D
2. ตัวเซลล์เจ็ดแบบเรียกว่าแบบ E,F,G,H,I,K, และ X
3. ส่วนปลายหลังแปดแบบเรียกว่าแบบ L,M,N,P,S,T,U, และ W

ส่วนประกอบหลักเหล่านี้สามารถจับคู่ในลักษณะต่างๆ กัน อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่เกิดขึ้นจะมีชื่อย่อเป็นตัวอักษรสามตัว ซึ่งแต่ละตัวจะบ่งบอกถึงแบบของส่วนปลายหน้าตัวเซลล์และส่วนปลายหลังตัวอย่างเช่นแบบ AES ในรูปที่ 3.7 เป็นต้น



รูปที่ 3.7 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบหัวลอยแหวนคู่ (AES)

ชื่อย่อที่สมบูรณ์จะประกอบด้วยตัวเลขที่แสดงขนาดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนด้วย ซึ่งจะมีทั้งตัวเลขบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเซลล์และตัวเลขบอกความยาวท่อ เส้นผ่าศูนย์กลางดังกล่าวเป็นเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของเซลล์ มีหน่วยเป็นนิ้วโดยพิเศษให้เป็นจำนวนเต็ม และความยาวท่อมิหน่วยเป็นนิ้วเช่นกันสำหรับท่อรูปตัว U นั้นความยาวท่อเป็นความยาวของท่อที่วัดจากปลายข้างหนึ่งไปถึงจุดสัมผัสของส่วนงอของท่อ

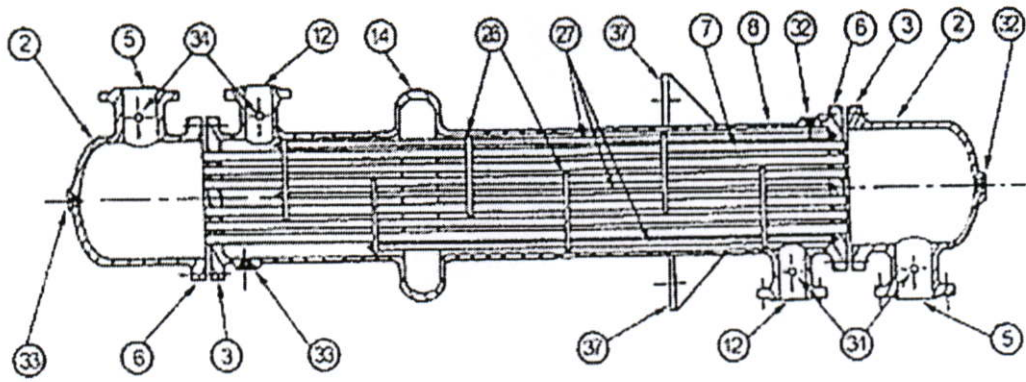
สำหรับเซลล์แบบ K (Kettle reboiler) ที่แสดงในรูปที่ 3.10 นั้นตัวเลขบอกขนาดประกอบด้วยสามส่วนซึ่งบ่งบอก

1. เส้นผ่าศูนย์กลางของพอร์ตหรือมัดท่อ พิเศษเป็นจำนวนเต็มของนิ้ว
2. เส้นผ่าศูนย์กลางของเซลล์ พิเศษเป็นจำนวนเต็มของนิ้ว
3. ความยาวท่อ

ตัวอย่างที่ให้ไว้ข้างล่างนี้เป็นตัวอย่างชื่อย่อที่บ่งบอกแบบและขนาดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนหลาย ๆ แบบ ส่วนต่าง ๆ ของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่แสดงด้วยตัวเลขในรูปที่ 3.7 ถึงรูปที่ 3.12 มีชื่อเรียกมาตรฐานดังแสดงในตารางที่ 3.1 รูปที่ 3.7 แสดงอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบหัวลอยแหวนคู่ ท่อไหลกลับเดียว เส้นผ่าศูนย์กลางภายในของเซลล์ นิ้วและท่อยาว 16 ฟุต (192 นิ้ว) ดังนั้นชื่อย่อที่สมบูรณ์จึงเป็นขนาด 23-192 แบบ AES

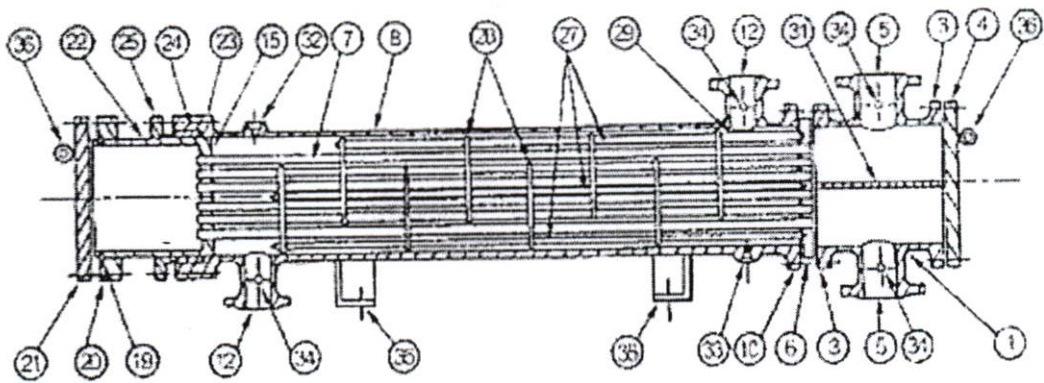
ตารางที่ 3.1 ชื่อเรียกมาตรฐานของส่วนต่าง ๆ ของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน [12]

1. stationary head – channel	21. Floating head cover-external
2. stationary head – bonnet	22. Floating tubesheet skirt
3. stationary head flange-channel or bonnet	23. Packing box
4. channel cover	24. Packing
5. stationary head nozzle	25. Packing gland
6. stationary tubesheet	26. Lantern ring
7. Tubes	27. Tierods and spacers
8. shell	28. Transverse baffles or support plates
9. shell cover	29. Impingement plate
10. shell flange stationary head end	30. Longitudinal baffle
11. shell flange-rear head end	31. Pass partition
12. shell nozzle	32. Vent connection
13. shell cover flange	33. Drain connection
14. Expansion joint	34. Instrument connection
15. Floating tubesheet	35. Support saddle
16. Floating head cover	36. Lifting lug
17. Floating head flange	37. Support bracket
18. Floating head backing device	38. Weir
19. Split shear ring	39. Liquid level connection
20. Slip-on backing flange	



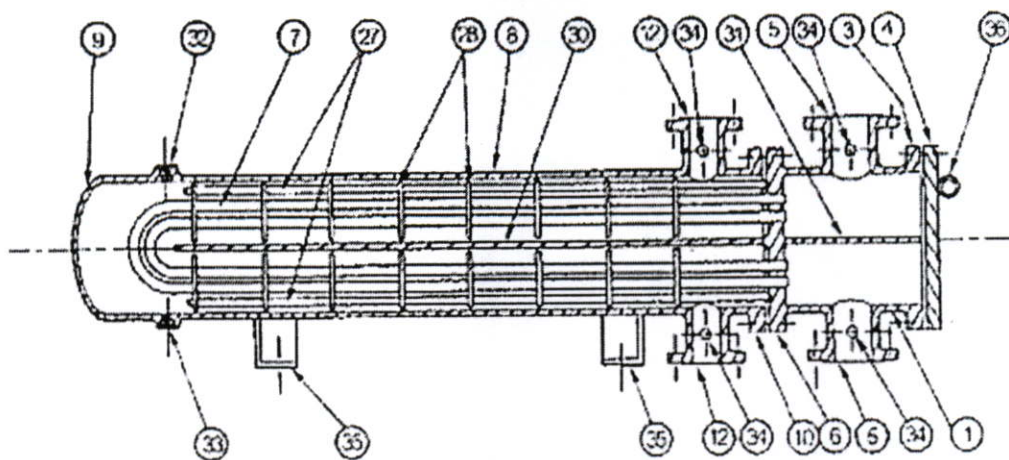
รูปที่ 3.8 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นขีดท่อตายตัว (BEM)

รูปที่ 3.8 แสดงอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นขีดท่อตายตัวส่วนปลายหน้าเป็นหัวครอบอยู่กับที่เซลล์ไหลกลับเดียวพร้อมด้วยข้อต่อรับการขยายตัว ส่วนประกอบหลังเป็นแบบแผ่นขีดท่อตายตัวหัวครอบอยู่กับที่ เส้นผ่าศูนย์กลางภายในของเซลล์เท่ากับ นิ้วและความยาวท่อเท่ากับ 16 ฟุต (192 นิ้ว) ดังนั้นชื่อที่สมบูรณ์จึงเป็นขนาด 23-192 แบบ BEM รูปที่ 3.9 แสดงอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบหัวลอย มีวัสดุกันรั่วอยู่ภายนอก เซลล์ไหลกลับเดียว ส่วนปลายอีกข้างหนึ่งเป็นแบบอยู่กับที่ เส้นผ่าศูนย์กลางภายในของเซลล์เท่ากับ นิ้วและความยาวท่อเท่ากับ 16 ฟุต (192) นิ้ว ดังนั้นชื่อที่สมบูรณ์จึงเป็น ขนาด 23-192 แบบ AEP



รูปที่ 3.9 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบหัวลอย มีวัสดุกันรั่วอยู่ภายนอก (AEP)

รูปที่ 3.10 แสดงอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อรูปตัว U ที่มีช่องทางการไหลต่อเป็นชิ้นเดียวกันกับแผ่นขีดท่อและฝาครอบที่ถอดออกได้ เซลล์ไหลสองกลับพร้อมแผ่นกันตามยาว เส้นผ่าศูนย์กลางภายในของเซลล์เท่ากับท่อยาว 16 ฟุต ชื่อเต็มสมบูรณ์จึงเป็นขนาด 23-192 ชนิด CFU



รูปที่ 3.10 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อรูปตัว U (CFU)

รูปที่ 3.11 แสดงอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบหัวลอยชักออกได้ (Kettle reboiler) มีช่องทางไหลและฝาครอบที่ถอดได้ เซลล์ไหลสองกลีบพร้อมด้วยแผ่นกั้นตามยาว ปากทางออกของเซลล์เท่ากับ นิ้วเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของเซลล์เท่ากับ 37 นิ้ว และความยาวท่อเท่ากับ 16 ฟุต (192 นิ้ว) ดังนั้นชื่อที่สมบูรณ์จึงเป็นขนาด 23/37-192 แบบ AKT ในการกำหนดค่าของไหลตัวใด ควรจะอยู่ทางด้านท่อ ตัวใดควรจะอยู่ทางด้านเซลล์มีปัจจัยที่จะต้องพิจารณาหลายอย่างปัจจัยบางอย่างจะสวนทางกันหรือขัดแย้งกัน การเลือกจึงมักจะต้องทำการชั่งน้ำหนักหรือประเมินประนีประนอมระหว่างปัจจัยเหล่านี้ข้อควรพิจารณาหลักได้แก่

1. ความดันความหนาของผนัง ซึ่งหมายถึงน้ำหนัก และค่าใช้จ่ายของวัสดุ ที่จำเป็นในการเก็บกักความดันที่กำหนดให้จะแปรผัน โดยตรงกับเส้นผ่าศูนย์กลางดังนั้นของไหลที่มีความดันสูงจึงควรให้อยู่ในท่อ

2. อุณหภูมิ ที่อุณหภูมิสูงความแข็งแรงของวัสดุจะลดลงทำให้ต้องใช้ผนังหนาขึ้น ดังนั้นผลกระทบในกรณีนี้จึงคล้ายคลึงกับความดันและของไหลอุณหภูมิสูงควรให้อยู่ในท่อนอกจากนี้ถ้าให้ของไหลอุณหภูมิสูงอยู่ในเซลล์ อาจจะต้องเสริมฉนวนหุ้มเซลล์เพื่อลดการสูญเสียความร้อน หรือเพื่อความปลอดภัย

3. ความสะอาดของของไหลของไหลที่กัดกร่อนจำเป็นจะต้องใช้วัสดุพิเศษ ซึ่งแน่นอนว่าจะต้องมีราคาแพง ถ้าของไหลเพียงตัวเดียวเท่านั้นที่กัดกร่อนการจัดให้ของไหลนั้นอยู่ภายในท่อ เราก็จะสามารถหลีกเลี่ยงความจำเป็นในการทำเซลล์ด้วยโลหะพิเศษที่มีราคาแพงได้ แต่ถ้าให้ของไหลกัดกร่อนอยู่ทางด้านเซลล์ ทั้งเซลล์และท่อจะต้องทำด้วยวัสดุที่ทนต่อการกัดกร่อนได้

4. ความสะอาดของของไหล กระบวนการผลิตที่ความสะอาดของของไหลเป็นเรื่องสำคัญมาก ก็อาจจะจำเป็นต้องใช้วัสดุพิเศษในการสร้างอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนในทำนอง

เดียวกันกับข้อ 3. การใช้วัสดุพิเศษในการทำท่ออย่างเดียวย่อมจะประหยัดกว่าการใช้วัสดุพิเศษทำทั้งท่อและเซลล์

5. อันตรายนหรือราคาของของไหลของไหลที่อาจจะเป็นพิษหรืออันตรายหรือที่มีราคาแพงควรอยู่ทางด้านในท่อ เนื่องจากโอกาสที่ของไหลจะรั่วออกจากท่อจะน้อยกว่าการรั่วออกจากเซลล์

6. ความดันตกหรือการสูญเสียความดันภายในท่อสามารถคำนวณได้เที่ยงตรงกว่าในเซลล์ ซึ่งค่าความดันตกที่คำนวณได้อาจจะมีค่าคลาดเคลื่อนสูง อันเป็นผลจากความไม่แน่นอนของช่องว่างของการรั่วไหลทางด้านเซลล์ซึ่งเกิดขึ้นในการสร้าง ดังนั้นในของไหลที่ความดันตกมีความสำคัญมาก และจำเป็นจะต้องหาค่าให้ได้ถูกต้องที่สุด ควรให้ของไหลนั้นอยู่ในท่อ

7. ความหนืดของของไหลเพื่อให้การพาความร้อนระหว่างของไหลกับพื้นผิวของแข็ง เช่น ผิวท่อหรือผิวเซลล์ เป็นไปอย่างดีที่สุดของไหลควรจะเป็นของไหลอย่างปั่นป่วน (Turbulent) ของไหลที่มีความหนืดสูงอาจจะไหลแบบราบเรียบ(Laminar)ถ้าให้ไหลอยู่ในท่อแต่อาจจะไหลแบบปั่นป่วนก็ได้ ถ้าให้ไหลทางด้านเซลล์ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับช่องว่างระหว่างท่อแต่ถ้าเป็นการไหลแบบราบเรียบทั้งทางด้านท่อและทางด้านเซลล์ก็ควรจะให้ของไหลที่หนืดอยู่ในท่อซึ่งการทำนายการถ่ายเทความร้อนและการกระจายการไหลสามารถทำได้ด้วยความมั่นใจมากกว่า

8. อัตราการไหลโดยทั่วไปเรามักจะให้ของไหลที่มีอัตราไหลต่ำกว่าอยู่ทางด้านเซลล์ทางด้านเซลล์จะเกิดการไหลแบบปั่นป่วนที่ค่าเรย์โนลด์ต่ำกว่าในท่อ นอกจากนี้เราอาจจะหลีกเลี่ยงความซับซ้อนของโครงสร้างแบบหลายกลับได้ซึ่งนำไปสู่การปรับปรุงประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนให้ดียิ่งขึ้น

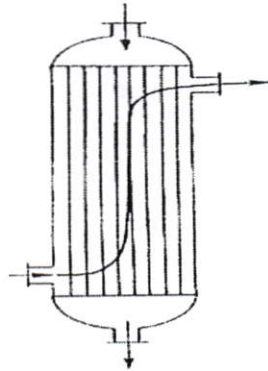
9. การทำความสะอาดพื้นผิวภายในของเซลล์และพื้นผิวภายนอกของท่อจะทำความสะอาดได้ยากกว่าพื้นผิวภายในของท่อ ดังนั้นของไหลที่สะอาดกว่าควรจะให้อยู่ทางด้านเซลล์

3.4 การจัดเส้นทางไหล

การจัดการเส้นทางไหลทั้งทางด้านท่อและทางด้านเซลล์มีให้เลือกได้หลายรูปแบบในการเลือกจะต้องคำนึงถึงปัจจัยหลายอย่างส่วนใหญ่จะต้องทำการประนีประนอมกันระหว่างข้อดีข้อเสียของแต่ละรูปแบบ เพื่อให้ได้สิ่งที่เหมาะสมที่สุด ปัจจัยดังกล่าวได้แก่ความแตกต่างของอุณหภูมิของของไหลทั้งสอง เทคนิคและค่าใช้จ่ายในการผลิตมากความดันตก ผลกระทบทางด้านความเสียดทาน และการเกิดคราบสกปรกบนพื้นผิวอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน [12]

การไหลสวนทางตามแนวแกนจัดว่าเป็นรูปลักษณะทางอุณหคณิตเพื่อพิจารณาในแง่ความร้อน ของไหลทางด้านเซลล์จะไหลตามยาวไปบนท่อในทิศทางตรงข้ามกับการไหลของของไหลภายในท่อ ในการไหลแบบนี้ผลต่างอุณหภูมิของของไหลจะมีค่าต่ำสุด จึงสามารถบรรลุประสิทธิภาพทางความร้อนที่สูงมาก

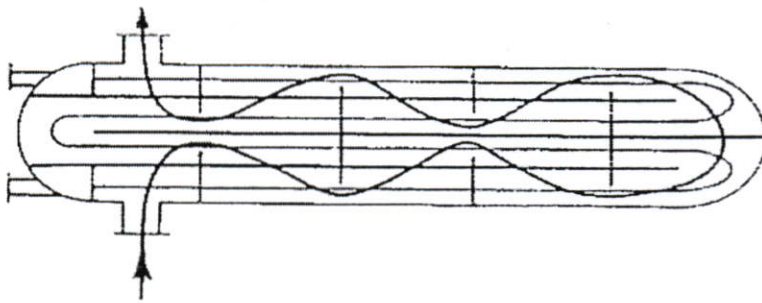
การจัดการการไหลแบบท่อไหลกลับเดียวและเซลล์ไหลกลับเดียวที่แสดงในรูปที่ 3.14 ให้ผลใกล้เคียงกับทางอุดมคติอย่างไรก็ตามนับว่าเป็นเรื่องยากที่จะทำให้มีการกระจายการไหลที่สม่ำเสมอทางด้านเซลล์ เพื่อที่จะปรับปรุงการทำงานให้ดีขึ้นจึงจัดให้มีแผ่นกั้นเพื่อช่วยในการนำทาง และควบคุมการไหลทางด้านเซลล์ทำให้เกิดการไหลผ่านมัดท่อในทางที่เป็นผลดียิ่งขึ้น นอกจากนี้แผ่นกั้นยังทำหน้าที่การจذبและรองรับท่ออีกด้วยท่อจำเป็นจะต้องได้รับการรองรับทุก ๆ ระยะ 30 ถึง 40 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางท่อและการจัดระยะห่างของท่อให้สม่ำเสมอจะเป็นหลักประกันว่าการกระจายการไหลและการถ่ายเทความร้อนในมัดท่อจะเป็นไปอย่างสมดุล กระสวนของรูนบนแผ่นกั้นสำหรับรับท่อควรจะมีเหมือนกับบนแผ่นยึดท่อ



รูปที่ 3.11 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลสวนกันท่อไหลกลับเดียวเซลล์ไหลกลับเดียว

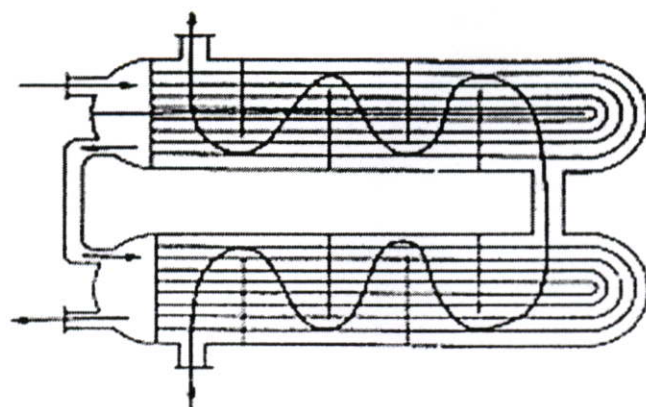
แผ่นกั้น (Baffle) แผ่นกั้นมีรูปแบบที่แตกต่างกันหลายรูปแบบรูปที่ 3.12 แสดงตัวอย่างแผ่นกั้นสี่แบบ ได้แก่แบบขึ้นเดี่ยว แบบขึ้นคู่ แบบโดนัสกับแผ่นงาน และแบบออริฟิส แผ่นกั้นแบบขึ้นเดี่ยวมีลักษณะเป็นแผ่นงานที่ถูกตัดออกไปส่วนหนึ่ง ตัวแปรของแผ่นกั้นแบบนี้ก็คืออัตราส่วนของการตัด ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างความลึกของการตัดต่อเส้นผ่าศูนย์กลางของแผ่นกั้น แผ่นกั้นแบบขึ้นเดี่ยวจะถูกจัดวางให้ช่องโหว่ของการตัดของแผ่นกั้นที่อยู่ติดกันทำมุม 180 องศาต่อกัน ลักษณะเช่นนี้จะทำให้ของไหลทางด้านเซลล์ไหลลดเลี้ยวตั้งฉากกับท่อ ฉะนั้นการไหลผ่านท่อถึงไหลขวางและถึงไหลตามแกน แผ่นกั้นแบบขึ้นเดี่ยวเป็นแบบที่พบแพร่หลายที่สุด แผ่นกั้นแบบนี้ให้อัตราการถ่ายเทความร้อนที่ดีสำหรับความดันตกและความสิ้นเปลืองกำลังค่าหนึ่ง แผ่นกั้นทุกแผ่นช่วยในการรองรับท่อ และระยะห่างตามยาวของแผ่นกั้นและความลึกของการตัวสามารถแปรผันได้ในช่วงกว้าง เพื่อให้เหมาะกับภาระหน้าที่ของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนนั้น แผ่นกั้นแบบขึ้นคู่ หรืออาจจะเรียกว่าแบบเป็นแถบ มีลักษณะคล้ายคลึงกับแบบขึ้นเดี่ยว แต่มีข้อดีที่สามารถรองรับการไหลปริมาณมากได้ แผ่นกั้นที่อยู่ติดกันแผ่นหนึ่งเรียกว่า ส่วนศูนย์กลางซึ่งเป็นงานที่ถูกตัดส่วนบนกับส่วนล่างออกไป แผ่นถัดไปเรียกว่า ส่วนบนและล่างซึ่งเป็นงานที่ถูกตัดส่วนตรงกลางออกไป แผ่นกั้นแบบโดนัสกับแผ่นงานประกอบด้วย แผ่นงานศูนย์กลางซึ่งมี

เส้นผ่านศูนย์กลางโตกว่าครึ่งหนึ่งของเส้นผ่านศูนย์กลางของเซลล์เล็กน้อย และแผ่นถัดไปเป็นแผ่นจานที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับเซลล์ แต่มีรูตรงกลางซึ่งมีขนาดเล็กกว่าครึ่งหนึ่งของเส้นผ่านศูนย์กลางของเซลล์เล็กน้อย แผ่นกันแบบนี้ สามารถแก้ไขปัญหามีของไหลบางส่วนไหลเฉียงผ่านมัดท่อ ดังเช่นที่เกิดขึ้นกับแผ่นกันแบบชั้นเดียว อย่างไรก็ตามข้อเสียของแผ่นกันแบบนี้คือ แท่งรองรับทั้งหมดจะต้องอยู่ในมัดท่อ และการรองรับที่รอบนอกเป็นการรองรับทางอ้อมโดยท่อที่อยู่คาบเกี่ยวทั้งโคนทับกับแผ่นจาน แผ่นกันแบบอริฟิสมัลลักษณะเป็นแผ่นจานเต็มที่มีรูสอดท่อที่โตเกิดขนาด ของไหลทางด้านเซลล์จะไหลผ่านแผ่นกันโดยทางช่องว่างระหว่างรูกับท่อ ความปั่นป่วนในการไหลจะมีส่วนช่วยให้การถ่ายเทความร้อนดีขึ้นเป็นแบบที่ไม่ค่อยใช้กันนักเนื่องจากมีการค้นพบว่าเป็นแบบที่มีประสิทธิภาพดียกว่าแบบอื่นการทำความสะดวกทำได้ยากและไม่มีการรองรับท่อ เป็นเหตุให้อาจมีปัญหาการสั่นสะเทือนเกิดขึ้นได้

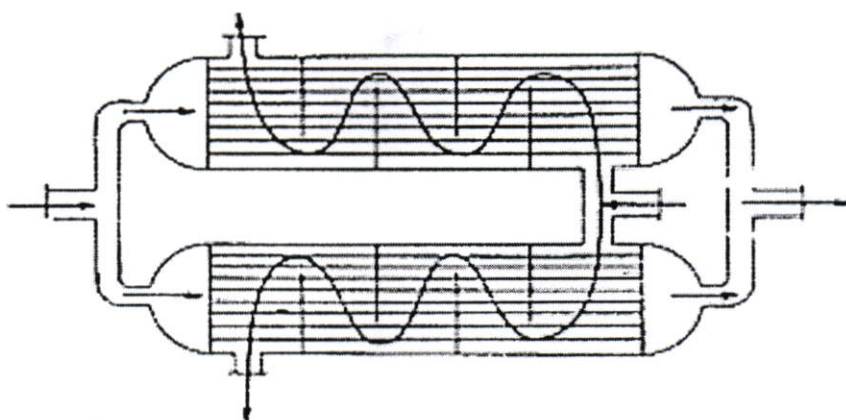


รูปที่ 3.12 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่มีท่อไหลสี่กลับ และเซลล์ไหลสองกลับ

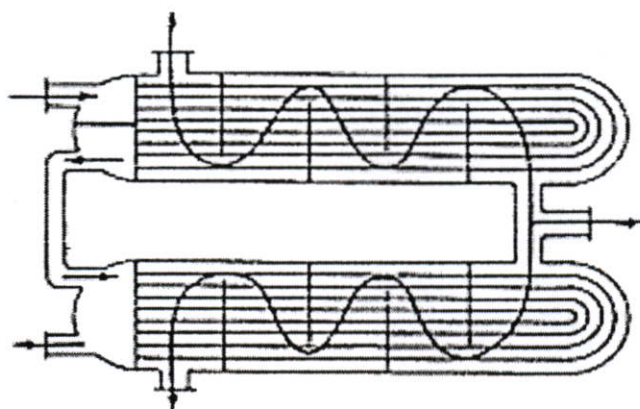
อาจจะมีการใช้ท่อมากกว่าสี่กลับ เช่นหกหรือแปดกลับเป็นต้น อย่างไรก็ตามในกรณีนี้จะมีการแปรผันของอุณหภูมิสูงมาก ทำให้ประสิทธิภาพทางความร้อนดียกว่า การใช้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสองตัวต่อกันแบบอนุกรม หรือแบบขนาน หรือแบบท่อต่ออนุกรมแต่เซลล์ต่อขนาด ดังแสดงในรูปที่3.13 การไหลขวางอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนบางแบบโดยเฉพาะอย่างยิ่งเครื่องควบแน่นขนาดใหญ่ ของไหลทางด้านเซลล์จะไหลพาดขวางกับแผงท่อ ดังแสดงในรูปที่3.17 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่มีทางเข้าทางเดียวและทางออกทางเดียวสำหรับของไหลทางด้านเซลล์ จะมีแผ่นกันตามยาวอยู่ที่ทางเข้าและทางออกเพื่อช่วยในการกระจายการไหล



ทางด้านท่อและเซลล์คือแบบอนุกรม

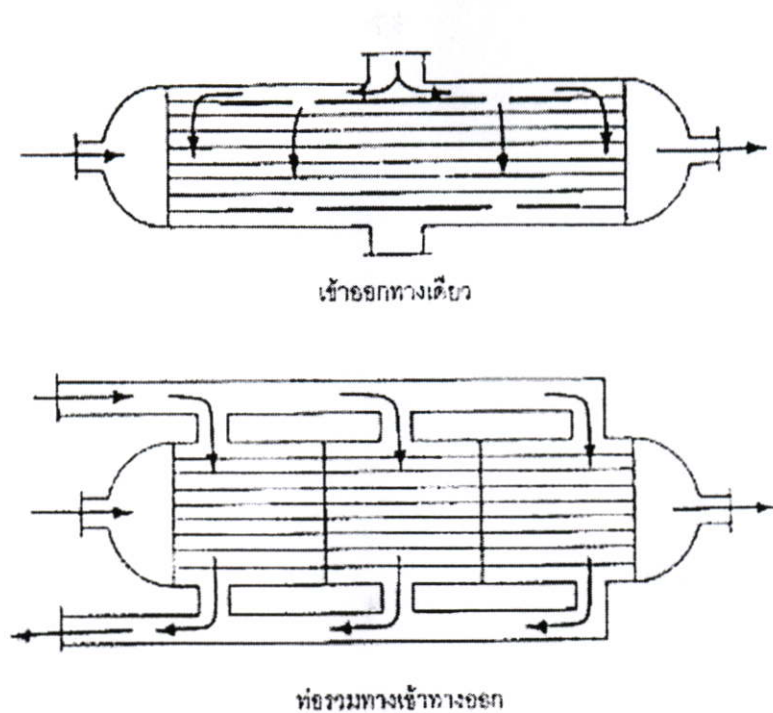


ทางด้านท่อและเซลล์คือแบบขนาน

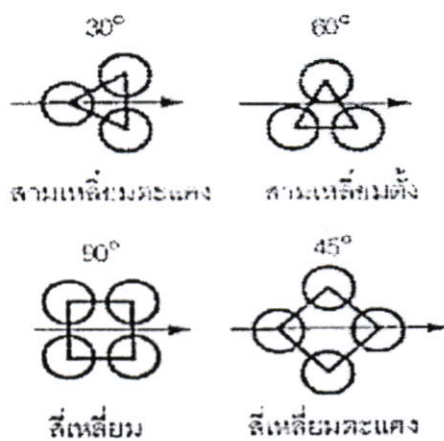


ทางด้านท่อต่ออนุกรม ทางด้านเซลล์ต่อขนาน

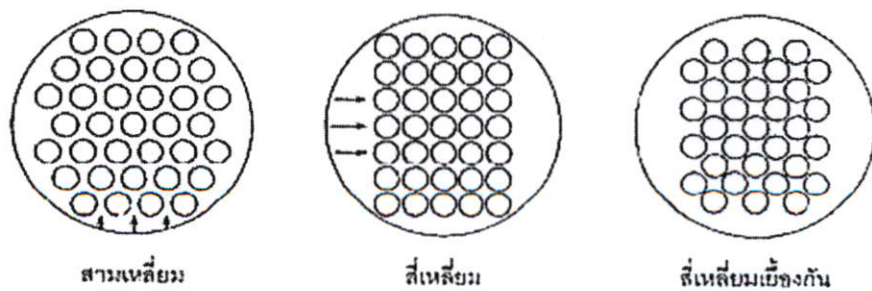
รูปที่ 3.13 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนต่อกันแบบอนุกรมและขนาน



รูปที่ 3.14 แบบการจัดการการไหลแบบไหลขวาง



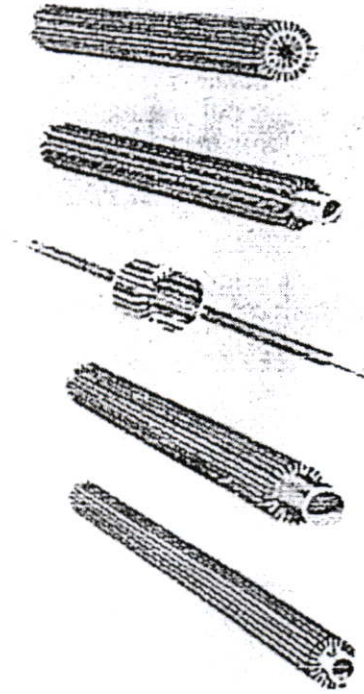
รูปที่ 3.15 กระบวนการจัดเรียงท่อแบบมาตรฐาน



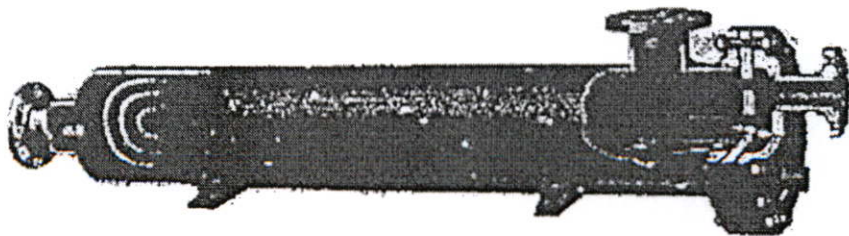
รูปที่ 3.16 กระบวนการของรูบนแผ่นยึดท่อที่สมนัยกับกระบวนการจัดเรียงท่อ

3.5 ท่อที่มีพื้นผิวเสริม

อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อในเซลล์ถูกทำขึ้นด้วยท่อเปลือยเปล่าธรรมดา แต่ในบางสถานการณ์ก็อาจจะมีผิวที่เข้ากันได้ดีกว่าที่จะใช้ท่อที่มีพื้นผิวเสริม ครีบเสริมอาจจะถูกนำมาติดเข้ากับพื้นผิวท่อเปลือยเปล่าโดยการเชื่อม หรือโดยการรีดทางกล อีกวิธีหนึ่งคือครีบเสริมอาจจะถูกทำขึ้นพร้อมกับการรีดขึ้นรูปท่อ (Extrusion) ให้เป็นครีบเสริมต่อเนื่องที่ติดเป็นเนื้อเดียวกันกับท่อ [12]



รูปที่ 3.17 ท่อเสริมครีบตามยาว



รูปที่ 3.18 เครื่องทำความร้อนแบบท่อในเซลล์ที่มีท่อไหลสองกลับและเซลล์ไหลกลับเดียว

ข้อดีที่สำคัญของท่อเสริมครีบกี้คือ ผลกระทบจากการเกิดคราบสกปรกหรือเฟาลิ่ง (Fouling) จะลดลงอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับท่อเปลือยเปล่า เฟาลิ่งเป็นคำเรียกรวมที่บ่งบอกถึงอาการที่ความต้านทานทางความร้อนของพื้นผิวเพิ่มสูงขึ้นในขณะใช้งาน ทั้งนี้เนื่องจากคราบสกปรกที่เกาะสะสมบนพื้นผิวถ่ายเทความร้อน ประสิทธิภาพได้แสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้ท่อเสริมครีบสามารถใช้งานได้เป็นเวลาอันยาวนานมากกว่า 10 ปี โดยไม่ต้องมีการซ่อมบำรุงหรือทำความสะอาด โดยที่ความสามารถในการทำงานลดลงไม่มากนัก (25%) ในขณะที่อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้ท่อเปลือยเปล่าจะเกิดเฟาลิ่งอย่างหนัก เกิดการเสื่อมสภาพอย่างรุนแรงท่อเสริมครีบภายในมีการใช้งานบ้างเช่นกันในบางโอกาส ซึ่งครีบจะถูกขีดเข้ากับผิวท่อโดยการเชื่อม หรือการบัดกรี อีกวิธีการหนึ่งครีบอาจจะถูกทำขึ้นพร้อมๆ กับการรีดขึ้นรูปท่อให้เป็นเนื้อเดียวกันกับตัวท่อ อีกทางหนึ่งในการเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของท่อ ก็คือการทำท่อให้มีร่องเกลียว วิธีสุดท้ายแทนที่จะทำเป็นครีบภายใน ก็อาจจะใช้แถบบิดเกลียวสอดไว้ข้างใน วิธีนี้นับว่ามีประโยชน์อย่างมากในเครื่องระเหย แถบบิดเกลียวจะทำให้ของไหลเกิดการหมุนวนและเม็ดของเหลวจะถูกแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางไปปะทะกับผนังท่อ เป็นการช่วยส่งเสริมกระบวนการเดือดของของไหล

3.6 อุปกรณ์ระบายความร้อนด้วยอากาศ

ในการประยุกต์ใช้งานเป็นจำนวนมาก อุปกรณ์และแลกเปลี่ยนความร้อนจะทำหน้าที่ในการถ่ายเทความร้อนระหว่างของเหลวหรือไอกับแก๊สซึ่งโดยทั่วไปก็คืออากาศในบรรยากาศ จึงเป็นที่มาของชื่ออุปกรณ์ระบายความร้อนด้วยอากาศดังกล่าว ในบางครั้งอากาศเองเป็นตัวถูกทำให้ร้อนขึ้น หรือเย็นลงเพื่อการปรับอากาศ ของเหลวที่เกี่ยวข้องมีหลากหลายชนิดขึ้นอยู่กับงานเช่น น้ำ น้ำยาทำความเย็นหรือน้ำมันเครื่องเป็นต้น ไอที่ควบแน่นอาจจะเป็นไอน้ำ น้ำยาทำความเย็นหรือไฮโดรคาร์บอนเป็นต้น อุปกรณ์ระบายความร้อนด้วยอากาศนับว่ามีความเหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับภาระหน้าที่ดังกล่าว ส่วนประกอบมีเพียงแผงของท่อที่เสริมครีบ ซึ่งอาจจะมีท่อเพียงแถวเดียวแต่ตามปกติจะมีหลายแถว พร้อมด้วยท่อรวมหรือขึ้นต่อเป็นท่อตัว U อยู่ที่ส่วนปลายของท่อแบบอย่างหนึ่งของอุปกรณ์ระบายความร้อนด้วยอากาศ ของเหลวจะไหลอยู่ภายในท่อ ส่วนอากาศไหลพาควางไปบนท่อ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของของเหลวที่ไหลในท่อ จะมีค่าสูงกว่าทางด้านอากาศนอกท่อมาก ในบางครั้งสูงกว่ากันหลายระดับขนาด เพื่อทำการชดเชยความแตกต่างกันนี้ พื้นผิวถ่ายเทความร้อนทางด้านอากาศจึงมักได้รับการเสริมด้วยครีบ ได้มีการคิดค้นอย่างกว้างขวางเพื่อเพิ่มการถ่ายเทความร้อนทางด้านอากาศในงานที่ต้องการความกะทัดรัด โดยการแปรเปลี่ยนรูปทรงและธรรมชาติของครีบ การทำเป็นลอน การทำให้ขุ่นและการเจาะรูเป็นต้น ความพยายามดังกล่าวดูเหมือนจะไม่ประสบความสำเร็จนัก เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของการถ่ายเทความร้อน มีสิ่งที่ตามมาคือการเพิ่มขึ้นของความต้านทานการไหล ความดันตกที่เกิดขึ้นบางครั้ง

ทำให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายมากกว่าสิ่งที่ได้จากการเพิ่มขึ้นของการถ่ายเทความร้อน ในกรณีที่ไม่มีความจำกัดในเรื่องเนื้อที่การออกแบบครีบมักจะถูกบังคับด้วยหลักทางด้านเศรษฐศาสตร์อุปกรณ์ระบายความร้อนด้วยอากาศเป็นจำนวนมากใช้ครีบบลูมิเนียมนั้นให้ตั้งไปบนท่อเรียบ [12]

3.7 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งาน

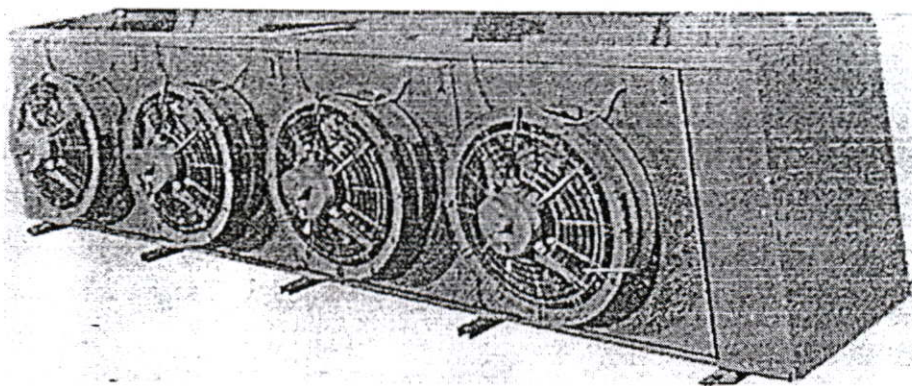
ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานอุปกรณ์ระบายความร้อนด้วยอากาศที่เราคุ้นเคยเป็นอย่างดีได้แก่หม้อน้ำรถยนต์น้ำจะทำหน้าที่ในการรับความร้อนจากส่วนต่างๆ ในเครื่องยนต์จากนั้นจึงระบายความร้อนทิ้งสู่บรรยากาศโดยการไหลเวียนผ่านท่อในรังผึ้ง อุปกรณ์ระบายความร้อนด้วยอากาศในขณะที่มีอากาศพัดผ่านไปบนแผงท่อเพื่อพาความร้อนสู่บรรยากาศ อีกตัวอย่างหนึ่งได้แก่ ชุดระบายความร้อนที่ด้านหลังของผู้เย็นที่ใช้ตามบ้าน ภายในชุดระบายความร้อนนี้ อุปกรณ์ระบายความร้อนด้วยอากาศไอน้ำยาทำความเย็นที่ผ่านการอัดจนมีความดันสูงโดยคอมเพรสเซอร์จะคายความร้อนและเกิดการควบแน่นอยู่ภายในท่อ ความร้อนที่คายออกมานี้จะถูกระบายออกสู่บรรยากาศโดยอากาศที่พัดผ่านไปบนแผงท่อ น้ำยาเหล่านี้จะไหลผ่านวาล์วลดความดันเพื่อทำให้ความดันลดต่ำลง จากนั้นจึงไหลผ่านเครื่องระเหย หรืออีแวพอเรเตอร์ซึ่งน้ำยาจะเกิดการระเหยและดึงความร้อนออกจากหรือให้ความเย็นแก่เนื้อที่ภายในตู้เย็น ไอน้ำยานี้จะถูกคอมเพรสเซอร์อัดให้มีความดันสูงขึ้นเพื่อป้อนให้แก่ชุดระบายความร้อนต่อไป [12]

ในระบบทำความเย็นและเครื่องปรับอากาศขนาดใหญ่มีการใช้อุปกรณ์ระบายความร้อนด้วยอากาศเช่นกันหลักการทำงานของอุปกรณ์ระบายความร้อนด้วยอากาศยังสามารถใช้ได้ในการที่เป็นการทำความเย็นอีกด้วย ตัวอย่างเช่นชุดทำความเย็นของเครื่องปรับอากาศซึ่งน้ำเย็นไหลอยู่ในท่อส่วนอากาศไหลผ่านนอกท่อและถ่ายเทความร้อนให้แก่น้ำเย็นเพื่อทำให้ได้ลมเย็นสำหรับการปรับอากาศในอาคารในเรือหรือในเครื่องบิน เป็นต้น นอกจากนี้ อุปกรณ์ระบายความร้อนด้วยอากาศถูกนำไปใช้ในระบายความร้อนแก่น้ำมันหล่อลื่นในเครื่องบินเรือหรือเครื่องจักรอุปกรณ์ที่อยู่กับที่อื่น ตัวอย่างอุปกรณ์ระบายความร้อนด้วยอากาศขนาดใหญ่มาได้แก่ที่ใช้ในโรงกลั่นน้ำมัน ในกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมและในการระบายความร้อนปล่อยทิ้งสู่บรรยากาศ เครื่องควบแน่นสำหรับกังหันไอน้ำในบางกรณีจะเป็นการระบายความร้อนด้วยอากาศโดยตรง

3.8 การพาความร้อนโดยอิสระและโดยบังคับ

ท่อในแผงท่อของอุปกรณ์ระบายความร้อนด้วยอากาศอาจจะถูกจัดวางในแนวนอน เพื่อให้การระบายความร้อนโดยอากาศเกิดขึ้นในรูปของการพาความร้อน โดยอิสระอย่างไรก็ตามจากการที่สัมประสิทธิ์การพาความร้อน โดยอิสระมีค่าต่ำตามธรรมชาติทำให้ต้องสร้างอุปกรณ์ระบายความร้อนด้วยอากาศให้มีขนาดใหญ่มากจนไม่เหมาะสมต่อการใช้งานอีกต่อไป ทางเลือก

ใหม่ก็คือการใช้อุปกรณ์ที่อาศัยการพาความร้อน โดยบังคับซึ่งใช้พัดลมเป็นตัวขับเคลื่อนที่ช่วยให้เราสามารถใช้อุปกรณ์ระบายความร้อนที่มีขนาดเล็กลงได้ ซึ่งเป็นการประหยัดเงินลงทุนเริ่มต้นทั้งช่วยผ่อนคลาให้สามารถวางท่อในลักษณะใดก็ได้ ค่าใช้จ่ายในส่วนที่เพิ่มขึ้นได้แก่ ค่าพัดลมและมอเตอร์ขับพัดลม รวมทั้งค่าใช้จ่ายในการขับเคลื่อนและค่าบำรุงรักษาพัดลมและมอเตอร์พัดลมขับเคลื่อนอากาศอาจจะติดตั้งไว้เหนือลมหรือใต้ลมของแผงท่อก็ได้ เมื่อพัดลมถูกติดตั้งไว้เหนือแผงท่อเราเรียกว่า ระบบผลัดดันลม (Forced-draft System) และเมื่อพัดลมถูกติดตั้งไว้ใต้แผงท่อเราเรียกว่า ระบบดึงดูดลม (Induced-draft system) รูปที่ 3.17 เป็นต้นอย่างอุปกรณ์ระบายความร้อนระบบดึงดูดลมที่ใช้ในเครื่องปรับอากาศ ทั้งสองระบบมีความแตกต่างกันไม่มากนักทางหนึ่งที่จะทำให้ประสิทธิภาพของพัดลมดีขึ้นคือ ให้พัดลมทำงานกับอากาศที่อุณหภูมิต่ำกว่าเสมอ นั่นคือใช้ระบบผลัดดันลมในกรณีที่เป็นการระบายความร้อนด้วยอากาศ และใช้ระบบดึงดูดลมในกรณีที่เป็นการทำลมเย็น พัดลมที่ใช้โดยทั่วไปจะเป็นแบบไหลตามแกน ซึ่งมีลักษณะสมบัติสำคัญคือ ให้อัตราไหลสูงที่ความดันต่ำ โดยให้ความเร็วลมผ่านแผงท่อในช่อง 1-5 เมตร/วินาที พัดลมนี้ตามปกติจะมีใบพัดสี่ถึงหกใบ และมีเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กกว่าความกว้างหรือความยาวของแผงท่อเล็กน้อย

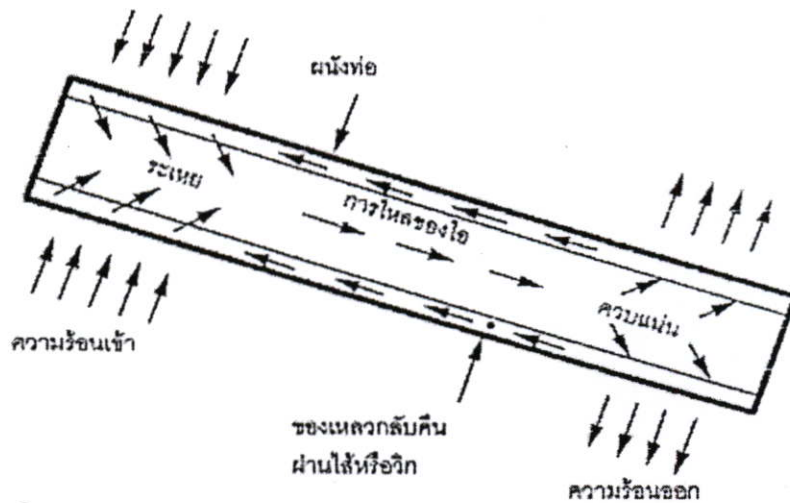


รูปที่ 3.19 อุปกรณ์ระบายความร้อนระบบดึงดูดลมที่ใช้ในการปรับอากาศ

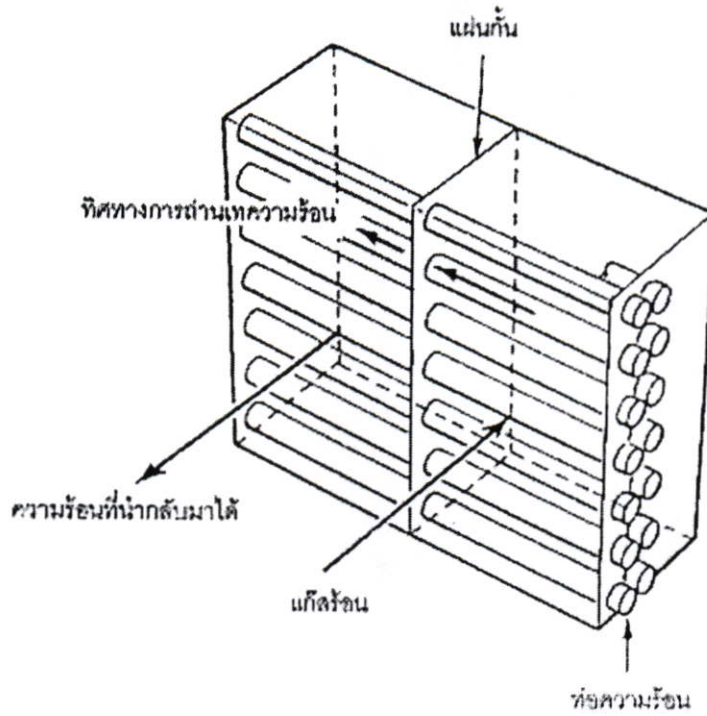
การลดค่าลงทุนโดยการใช้พัดลมขนาดเล็กลงให้ทำงานที่ความเร็วสูงขึ้นอาจจะก่อปัญหาทางด้านเสียงรบกวน และมักจะได้ประสิทธิภาพของพัดลมที่ต่ำ ฟังสังเกตว่าระดับเสียงของพัดลมเป็นฟังก์ชันกำลังสูงมาก (กำลังหก) ของความเร็วปลายใบพัดของพัดลม และมักจะเป็นปัจจัยบังคับในการเลือกความเร็วพัดลม พัดลมโดยทั่วไปจะขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าขั้วเดียวในระบบขนาดใหญ่บางครั้งอาจจะขับเคลื่อนด้วยกังหันไอน้ำ

3.9 ท่อความร้อน (Heat Pipe)

ท่อความร้อนเป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบเป็นท่อรูปหนึ่งซึ่งมีความแตกต่างจากรูปอื่น ๆ ค่อนข้างมาก โครงสร้างโดยทั่วไปของท่อความร้อนถูกแสดงอยู่ในรูปที่ 3.20 ซึ่งมีส่วนประกอบที่สำคัญสามส่วนคือท่อปิด ไส้สัง (Wick) และของไหลทำงาน ท่อปิดเป็นท่อโลหะที่ปิดปลายทั้งสอง และมีของเหลวทำงานบรรจุอยู่ประมาณหนึ่งในสี่ของท่อ ปลายข้างหนึ่งของท่อทำหน้าที่รับความร้อนเข้าเรียกว่า อีแวพอเรเตอร์ ส่วนปลายอีกข้างหนึ่งทำหน้าที่ระบายความร้อนออกเรียกว่า คอนเดนเซอร์ ในขณะที่ทำงานของเหลวที่อยู่ที่ปลายข้างที่เป็นอีแวพอเรเตอร์เมื่อได้รับความร้อนจะกลายเป็นไอและเก็บความร้อนไว้ในรูปของความร้อนแฝง จากนั้นจะไหลผ่านช่องว่างในท่อไปทางปลายข้างที่เป็นคอนเดนเซอร์ ไอที่ไหลไปถึงปลายข้างนี้จะควบแน่นกลับคือเป็นของเหลวและคายความร้อนแฝงออกมา และถูกส่งกลับคืนไปสู่อีแวพอเรเตอร์ผ่านทางไส้สัง โดยอาศัยผลทางแคพิลลารี (Capillary Effect) เพื่อทดแทนของเหลวส่วนที่ระเหยไป ดังนั้นภายในท่อความร้อนจึงเกิดการถ่ายเทความร้อนโดยการพาไปของไอของไหลทำงานจากปลายข้างหนึ่งไปสู่ปลายอีกข้างหนึ่ง ในขณะที่มีการถ่ายเทมวลของเหลวในทิศทางตรงกันข้ามผ่านทางไส้สัง

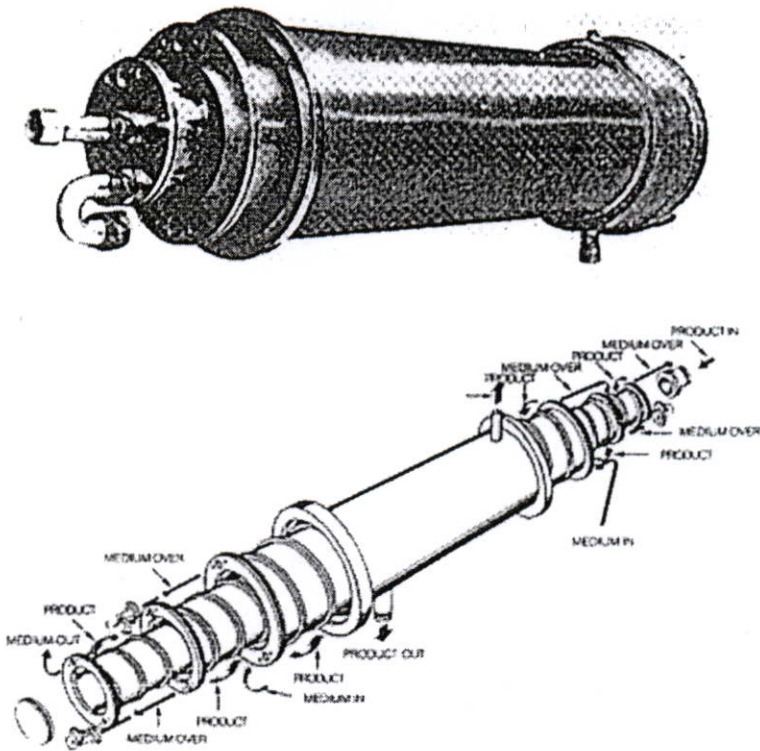


รูปที่ 3.20 โครงสร้างทั่วไปของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อความร้อน



รูปที่ 3.21 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับการนำคืนความร้อนปล่อยทิ้ง

ท่อความร้อนช่วยให้เราสามารถส่งถ่ายความร้อนปริมาณมาก ๆ เป็นระยะทางที่ค่อนข้างไกล (หลาย ๆ เมตร) ด้วยผลต่างอุณหภูมิระหว่างปลายอิเวพอเรเตอร์กับปลายคอนเดนเซอร์เพียงไม่กี่องศา ผลที่ได้จะเป็นเช่นเดียวกันกับผลการนำความร้อนที่ได้จากการใช้แท่งโลหะที่เป็นตัวนำยิ่งยวด สภาพนำความร้อนมากกว่าเงิน หรือทองแดงเป็นร้อยเป็นพันเท่า แทนที่ท่อความร้อน ท่อความร้อนได้รับการนำไปใช้งานในวงกว้างขึ้นเรื่อยในแทบทุกระดับอุณหภูมิ ตั้งแต่อุณหภูมิต่ำจนถึงอุณหภูมิสูงมาก ๆ ของเหลวทำงานที่ใช้ย้อมจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิทำงาน อุณหภูมิของอิเวพอเรเตอร์และคอนเดนเซอร์ ที่เกี่ยวข้องกับส่วนความดันภายในท่อความร้อนก็คือความดันอิ่มตัวของอุณหภูมิทำงาน การใช้งานที่อุณหภูมิสูงเราใช้โลหะเหลวเป็นของเหลวทำงานเพื่อไม่ให้ความดันทำงานมีค่าสูงเกินไป ที่ระดับอุณหภูมิต่ำอากาศเรามักใช้น้ำและที่อุณหภูมิค้ำน้ำยาฮาโลเจนจะมีความเหมาะสมมากกว่า รูปที่ 3.21 แสดงอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่เกิดจากการเอากลุ่มท่อความร้อนมาต่อเข้าด้วยกัน ซึ่งมีความเหมาะสมสำหรับการนำคืนความร้อนปล่อยทิ้งในเครื่องสู่อากาศหรือในงานอื่นที่คล้ายคลึงกัน [12]



รูปที่ 3.22 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบกระบอกหลายชั้น

3.10 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบกระบอก

อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบกระบอกที่แสดงในรูปที่ 3.22 ถูกประดิษฐ์ขึ้นเมื่อในถึง 20 ปีมาแล้ว จึงนับว่ายังมีอายุไม่มากนักเมื่อเทียบกับแบบอื่นๆ อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบนี้ ประกอบด้วยกลุ่มของกระบอกผนังสองชั้นสวมซ้อนกันของไหลให้ความร้อนหรือระบายความร้อนจะให้ไหลอยู่ในช่องวงแหวนบนผนังสองชั้นของกระบอก จากกระบอกใหญ่สุดไปสู่เล็กสุด ช่องทางการไหลนี้ถูกเชื่อมต่อถึงกันด้วยข้อต่อรูปตัว U ส่วนของไหลกระบวนการผลิตจะไหลอยู่ในช่องวงแหวนที่เกิดขึ้นระหว่างกระบอกสองกระบอก พื้นผิวภายนอกของกระบอกอาจจะมีครีบนำทางเป็นเกลียวเชื่อมติดอยู่ เพื่อบังคับให้ของไหลกระบวนการผลิตไหลวนเป็นระยะทางยาวขึ้น ลักษณะการออกแบบดังกล่าวทำให้ได้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อที่กะทัดรัดมาก โดยมีข้อดีหลายอย่างสำหรับงานบางประเภท ช่องทางการไหลของของไหลกระบวนการผลิตมีเพียงช่องเดียว แทนที่จะเป็นหลายช่องดังเช่นแบบทั่วไปเป็นการขจัดปัญหาการกระจายการไหลไม่ดี ซึ่งนับว่าเป็นผลดีอย่างยิ่ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งของสกรปรกจะทำให้ช่องทางการไหลเล็กลงและความเร็วการไหลเพิ่มสูงขึ้น ณ จุดนั้นซึ่งจะมีส่วนช่วยในการกำจัดคราบเกาะหรือตะกอนสกรปรกที่กีดขวางโดยปริยาย วัสดุของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบกระบอกหลายชั้นมีทั้งโลหะซึ่งมีให้เลือก

หลายชนิดรวมทั้งวัสดุอื่นๆ เช่น แก้วและเทฟลอน เป็นต้น อาจกล่าวได้ว่า ไม่มีข้อจำกัดทางด้านความดันและอุณหภูมิทำงาน สำหรับการใช้งานโดยทั่วไปของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบนี้ [12]

3.11 บทสรุป

ในบทนี้เราได้ทำการสำรวจขอบข่ายของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่ออย่างกว้าง งานจำนวนมากจะเกี่ยวข้องกับ การถ่ายเทความร้อนระหว่างของเหลวกับของเหลวสำหรับการให้ความร้อน การระบายความร้อน การควบแน่น และการระเหยเท่าที่เป็นอยู่ในขณะนี้ อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนส่วนใหญ่เป็นแบบท่อสองชั้นและแบบท่อในเซลล์ซึ่งมีพิสัยกว้างมากทั้งทางด้านขนาด รูปทรง และรูปลักษณะ อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อที่สำคัญอีกกลุ่มหนึ่ง เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทความร้อนระหว่างของเหลวกับแก๊ส อุปกรณ์ในกลุ่มนี้มักจะมีการเสริมพื้นผิวทางด้านแก๊สเพื่อชดเชยสัมประสิทธิ์การพาความร้อนซึ่งมีค่าต่ำบนด้านนั้น อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบอื่นที่มีการกล่าวถึงในบทนี้ได้แก่ระบบสำหรับควบแน่น ระเหยและ อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่มีเครื่องชุดผิววนนอกจากนี้บทนี้ยังได้พิจารณาอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ทำด้วยวัสดุที่ไม่ใช่โลหะเพื่อให้ทนต่อของไหลที่มีความกัดกร่อนสูง วัสดุดังกล่าวได้แก่พลาสติก เทฟลอน แกรไฟต์ และแก้ว ในตอนท้ายได้กล่าวถึงการใช้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ทำด้วยท่อรูปอื่นๆที่ไม่ใช่ท่อกลมเพื่อใช้ในงานพิเศษต่าง ๆ

บทที่ 4

หลักการออกแบบทางความร้อน

4.1 บทนำ

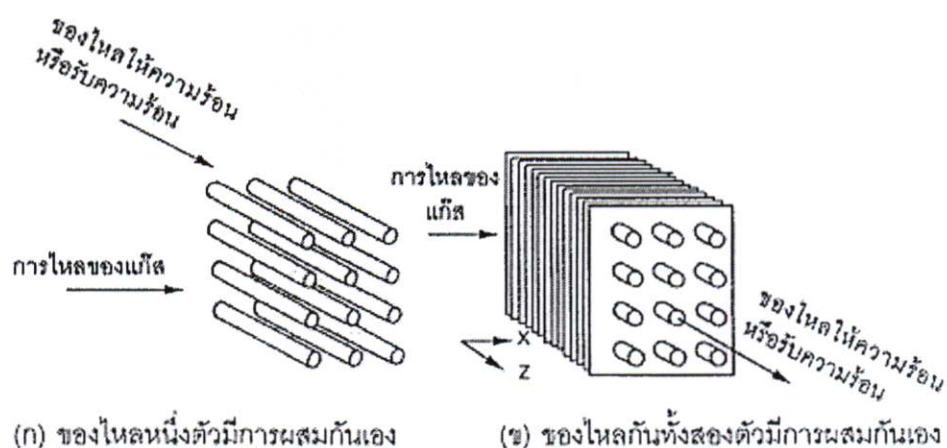
การออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนอาจจะแบ่งภารกิจออกเป็นสองส่วนที่มีความสัมพันธ์กันได้แก่ [6]

1. การออกแบบทางความร้อน
2. การออกแบบทางกล

การออกแบบทางความร้อนจะเกี่ยวข้องกับสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อให้หลักประกันว่าอุปกรณ์ที่ออกแบบมีพื้นที่ผิวเพียงพอสำหรับการทำหน้าที่ทางความร้อนงานในส่วนนี้รวมไปถึงการประเมินการเสื่อมถอยลงของสมรรถนะซึ่งมีแนวโน้มจะเกิดขึ้นในขณะใช้งาน อันเป็นผลจากเกาะสะสมของคราบสกปรกบนพื้นผิวถ่ายเทความร้อน ผู้ทำหน้าที่ออกแบบทางความร้อนจะต้องพิจารณาถึงเทคนิคหรือวิธีการในการลดทอนผลกระทบจากการเกิดคราบสกปรกหรือเฟอลิง(Fouling) ด้วย

ผลกระทบในแง่ของการไหลก็นับว่ามีความสำคัญเช่นกัน การถ่ายความร้อนระหว่างของไหลที่เคลื่อนที่ จะต้องเกี่ยวข้องกับความเสียดทานของของไหลเสมออันเป็นผลจากความหนืดของของไหล ผลของความหนืดดังกล่าวนี้จะปรากฏออกมาในรูปของการสูญเสียความดันจากทางเข้าถึงทางออก เพื่อที่จะเอาชนะความดันตกจากการสูญเสียความดัน ของไหลจะต้องถูกปั๊มหรืออัด ซึ่งจะต้องใช้กำลังทางกลในการขับเคลื่อน ซึ่งอาจจะได้จากมอเตอร์ไฟฟ้า เครื่องยนต์ หรือการพลังงานจากแหล่งอื่น สำหรับแก๊สและไอซึ่งเป็นของไหลที่อัดได้นั้น ค่าใช้จ่ายในการปั๊มหรืออัด เพื่อขับเคลื่อนของไหลในบางกรณีอาจจะสูงกว่ามูลค่าของการถ่ายเทความร้อนเอง ดังนั้นในการออกแบบทางความร้อนจึงครอบคลุมไปถึงการจัดรูปทรง และรูปแบบของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อลดทอนการสูญเสียความดันให้เหลือน้อยที่สุดสำหรับภาระทางความร้อนที่ต้องการ

การออกแบบทางความร้อนจะต้องมุ่งให้บรรลุภาระกิจทางความร้อนภายใต้ข้อจำกัดทางเศรษฐศาสตร์ซึ่งได้แก่ ราคาของอุปกรณ์ การขนส่ง การติดตั้ง การบำรุงรักษาและการเปลี่ยน นอกจากนี้จะต้องมีการชั่งน้ำหนักระหว่างการลดค่าลงทุนเริ่มต้น แต่ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานสูงภายใต้สภาวะที่พลังงานมีราคาสูงขึ้น เพื่อใช้ในการขับเคลื่อนและพัดลมเป็นต้น ผู้ออกแบบจะต้องตระหนักถึงการแจกแจงอุณหภูมิของของไหลภายในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน แนวโน้มการเกิดการกัดกร่อนของวัสดุและของไหลต่าง ๆ ความเป็นไปได้ของการเกิดโพลิเมอร์ของสารอินทรีย์บนพื้นผิวที่มีอุณหภูมิสูงเกินไปการตกตะกอนของเกลือในน้ำกร่อย



รูปที่ 4.1 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการไหลของอากาศแบบผสมกัน

ความห่วงใยต่อความร้อนปล่อยทิ้งจากโรงงานมีมากขึ้นไม่ว่าจะปล่อยทิ้งสู่แหล่งน้ำหรือบรรยากาศก็ตาม ผู้ออกแบบจะต้องให้ความสนใจปัญหาที่เกิดจากการปลดปล่อยสาร (การรั่วไหล) ออกสู่บรรยากาศ และการรั่วซึมของของไหลชนิดหนึ่งไปสู่ของไหลอีกชนิดหนึ่ง จะต้องมีการคาดการณ์ถึงอุบัติเหตุที่อาจเกิดขึ้นเกี่ยวกับของไหลที่อันตรายและเตรียมมาตรการที่รับมือกับผลที่จะเกิดตามมา

สุขอนามัยและความปลอดภัยของคนทำงานอยู่กับอุปกรณ์นั้นๆหรือของสาธารณชนก็เป็นสิ่งที่ผู้ออกแบบทางความร้อนจะต้องให้ความสำคัญอย่างยิ่งยวดเช่นกันไม่ว่าจะเป็นในขณะที่ทำงานตามปกติหรือในกรณีที่เกิดอุบัติเหตุก็ตาม

การออกแบบทางกลของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเกี่ยวข้องกับการให้หลักประกันว่าอุปกรณ์นั้นมีความแข็งแรงเพียงพอที่จะทนต่อความดันออกแบบและความดันเกินขีดที่อาจเกิดขึ้นได้ นอกจากนี้ยังเกี่ยวข้องกับซีลและรองถัน(Bearings) ผลกระทบจากการสั่นการกัดกร่อนวิธีการในการประกอบขึ้นรูป การเตรียมการเพื่อการเคลื่อนย้ายและติดตั้งและวิธีการในการทำความสะอาด การบำรุงรักษาและการซ่อมแซมอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

4.2 การกำหนดการไหล

อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเกือบทั้งหมดทำงานในลักษณะที่ของไหลร้อนและของไหลเย็นซึ่งถูกกันแยกจากกันด้วยผนังร่วมจะทำการแลกเปลี่ยนความร้อนขึ้นอยู่อย่างมากกับลักษณะการไหลที่เกิดขึ้นการไหลของของไหลมีการเป็นไปได้สามลักษณะคือ [6]

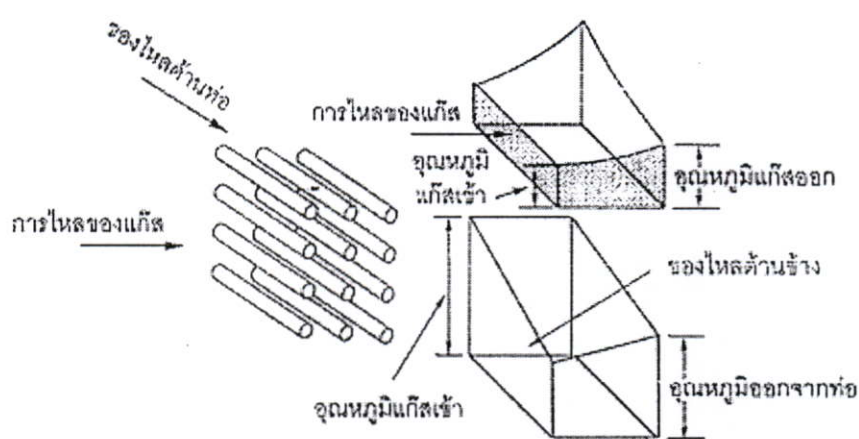
1. ของไหลทั้งสองมีแกนของการไหลร่วมกัน เมื่อของไหลทั้งคู่ไหลไปในทิศเดียวกันเราเรียกว่า การไหลตามกัน ถ้าไหลไปในทิศตรงข้ามกันเราเรียกว่า การไหลสวนกัน

2. แกนของการไหลของของไหลทั้งสองตั้งฉากกันเราเรียกว่า การไหลขวาง

3. การไหลของของไหลทั้งสองมีทั้งในส่วนที่ไหลอยู่ในแกนเดียวกันและส่วนที่ไหลขวางกันเราเรียกว่า การไหลประสม

การไหลของของไหลยังแบ่งได้เป็นแบบผสมกันและแบบไม่ผสมกันรูปที่ 4.1 แสดงการไหลทั้งสองแบบ ในรูปที่ 4.1(ก) ของเหลวร้อนไหลอยู่ในท่อ ส่วนอากาศเย็นไหลผ่านไปบนท่อ เนื่องจากของเหลวไหลอยู่ในท่อจึงไม่เกิดการผสมกันนั่นคือสิ่งที่เกิดขึ้นภายในท่อใดท่อหนึ่งจะได้รับผลกระทบน้อยมากจากสิ่งที่เกิดขึ้นในท่ออื่น ๆ

ในกรณีที่ยกมานี้ท่อที่อยู่ต้นทางจะมีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าท่อที่อยู่ก่อนไปทางท้ายของกระแสน้ำไหลของอากาศ ทั้งนี้เนื่องจากอากาศที่ไหลผ่านจะมีอุณหภูมิต่ำที่สุดที่ต้นทาง ดังนั้นของเหลวที่ออกจากท่อต้นทางจะมีอุณหภูมิต่ำกว่าที่ออกจากท่อที่ค่อนข้างไปทางปลายทาง ถ้าท่อเหล่านี้ต่างก็ต่อเข้ากับท่อพักรวมร่วมกันที่ทางออกของเหลวทั้งหมดก็จะผสมกันและมีอุณหภูมิต่ำเดียวในที่สุด



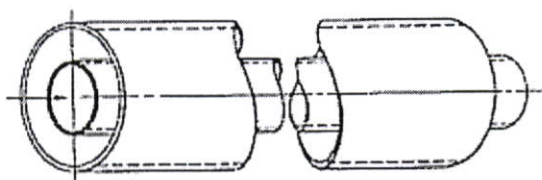
รูปที่ 4.2 ลักษณะการกระจายอุณหภูมิสำหรับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลขวาง

อากาศเย็นจะมีอุณหภูมิสูงขึ้น โดยลำดับในขณะที่ไหลผ่านแผงท่อ ดังนั้นจึงมีอุณหภูมิสูงเมื่อไปถึงท่อที่ปลายทางในทำนองเดียวกันอุณหภูมิของของเหลวในท่อไม่ได้มีค่าคงที่แต่จะลดลงอย่างต่อเนื่องจากทางเข้าไปสู่ทางออกผลต่างอุณหภูมิระหว่างของเหลวร้อนทางด้านท่อกับอากาศเย็น จะมีค่าสูงสุดที่ทางเข้าและต่ำสุดที่ทางออกของท่อ ความแตกต่างกันของผลต่างอุณหภูมินี้ทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนจากของเหลวไปสู่อากาศมีค่าสูงที่บริเวณทางเข้าของท่อเป็นเหตุให้อุณหภูมิของอากาศเพิ่มขึ้นเร็วมากในส่วนนั้นดังจะเห็นได้จากภาพการแจกแจงอุณหภูมิในรูปที่ 4.2 ถ้าท่อที่ใช้เป็นท่อเปลือยธรรมดา (ไม่ติดครีป) ดังแสดงในรูปที่ 4.1 (ก) อากาศที่ไหลผ่านไปบนท่อจะผสมเข้าด้วยกันดังนั้นอุณหภูมิและสภาวะการไหลของอากาศที่ส่วนหนึ่งในแผงท่อ จะมี

ผลกระทบต่ออุณหภูมิและการไหลที่ส่วนอื่นของแผงท่อแนวโน้มจึงเป็นไปในทางที่จะสร้างสมดุลขึ้นในการไหล เมื่อท่อที่ใช้ถูกติดตั้งด้วยครีบบังซึ่งเป็นแผ่นติดต่อกันดังแสดงในรูปที่ 4.1 (ข) อากาศที่ไหลผ่านจะไม่ผสมกันอากาศที่ไหลอยู่ในช่องระหว่างแผ่นครีบบังจะไหลผ่านแผงท่อและได้รับความร้อนจากท่อที่สัมผัสโดยไม่เกี่ยวข้องผสมกับอากาศในช่องทางไหลอื่นๆ ผลก็คือการกระจายอุณหภูมิของอากาศจะยังไม่สม่ำเสมอมากกว่าที่แสดงในรูปที่ 4.2 นอกจากนี้การถ่ายเทความร้อนไปสู่อากาศจะมีค่าสูงกว่ามาก เนื่องจากมีพื้นที่ถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นจากครีบบัง

4.3 การแจกแจงอุณหภูมิ

การแจกแจงอุณหภูมิของของไหลสองตัวหรือมากกว่า ผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนขึ้นอยู่กับวิธีการจัดการการไหลอย่างมากเพื่อให้เข้าใจจุดนี้ชัดเจนขึ้นขอให้พิจารณาอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อคู่อย่างง่ายที่แสดงในรูปที่ 4.3 [6]



รูปที่ 4.3 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อคู่

ในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมีลักษณะการไหลที่อาจจะเกิดขึ้นได้มากมายหลายแบบอย่าง รูปที่ 4.4 เป็นตัวอย่างบางส่วนของ การแจกแจงอุณหภูมิอันอาจจะเกิดขึ้นได้ดังกล่าวความเป็นไปได้อันดับแรกที่จะพิจารณาถูกแสดงอยู่ในรูปที่ 4.4 (ก) เป็นกรณีที่อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนนี้ทำงานเป็นคอนเดนเซอร์ ซึ่งของไหลทั้งสองตัวต่างก็มีการเปลี่ยนสถานะ ของไหลร้อนที่เป็นไอจะควบแน่นเป็นของเหลวและของเหลวเย็นจะระเหยกลายเป็นไอ แม้ว่าการเดือดและการควบแน่นจะเป็นกระบวนการที่ค่อนข้างซับซ้อน แต่การแจกแจงอุณหภูมิที่เกี่ยวข้องกลับค่อนข้างง่าย นั่นคืออุณหภูมิมีค่าคงที่ตลอดกระบวนการดังกล่าว ผลต่างอุณหภูมิที่เป็นตัวขับเคลื่อนการถ่ายเทความร้อนคือ $\Delta T = t - T$ และมีค่าคงที่ทั้งระบบ

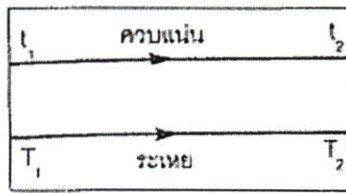
ความเป็นไปได้ลำดับต่อไปได้แก่แบบที่แสดงในรูปที่ 4.4 (ข) ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อของไหลร้อนที่เป็นไอเกิดการควบแน่นที่อุณหภูมิคงที่ t และความร้อนถูกถ่ายเทให้แก่ของไหลเย็น ทำให้ของไหลเย็นมีอุณหภูมิสูงขึ้น ในขณะที่ไหลผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนผลต่างอุณหภูมิที่

เป็นตัวขับเคลื่อนการถ่ายเทความร้อนมีค่าไม่คงที่กล่าวคือมีค่าแปรเปลี่ยนจาก $\Delta T_1 = t - T_1$ ที่ทางเข้าไปเป็น $\Delta T_2 = t - T_2$ ที่ทางออก

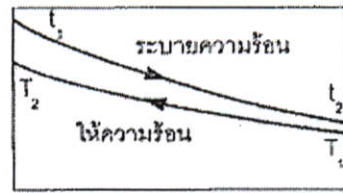
รูปที่ 4.4 (ค) แสดงอีกกรณีหนึ่งที่คล้ายกับกรณีที่แล้วกล่าวคือ มีของไหลหนึ่งตัวมีการเปลี่ยนสถานะในขณะที่เกิดการถ่ายเทความร้อน ในที่นี้ของเหลวเย็นจะเกิดการระเหยที่อุณหภูมิคงที่ T ในขณะที่รับการถ่ายเทความร้อนจากของไหลร้อน ซึ่งจะมีอุณหภูมิลดลงในขณะที่ไหลผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนในทำนองเดียวกันกับข้างต้น ผลต่างอุณหภูมิที่เป็นตัวขับเคลื่อนการถ่ายเทความร้อนมีค่าแปรเปลี่ยนจาก $\Delta T_1 = t_1 - T_1$ ที่ทางเข้าไปเป็น $\Delta T_2 = t_2 - T_2$ ที่ทางออก

ลักษณะการทำงานที่พบมากที่สุดทางปฏิบัติคือ การที่ของไหลทั้งสองไม่มีการเปลี่ยนสถานะ ดังนั้นจึงมีอุณหภูมิแปรเปลี่ยนอย่างต่อเนื่องทั้งคู่จากทางเข้าสู่ทางออกแบ่งย่อยออกได้เป็นสองกรณีคือ ของไหลทั้งสองไหลตามกันและไหลสวนกันในกรณีที่ของไหลไหลตามกันถูกแสดงในรูปที่ 4.4 (ง) ในกรณีนี้ของไหลทั้งสองไหลเข้ามาจากทางด้านซ้ายและไหลออกไปทางด้านขวาของรูป ของไหลเย็นจะมีอุณหภูมิสูงขึ้น ส่วนของไหลร้อนจะมีอุณหภูมิต่ำลง ผลต่างอุณหภูมิที่เป็นตัวขับเคลื่อนการถ่ายเทความร้อนมีค่าแปรเปลี่ยนจาก $\Delta T_1 = t_1 - T_1$ ที่ทางเข้าไปเป็น $\Delta T_2 = t_2 - T_2$ ที่ทางออก อุณหภูมิทางออก T_2 ของของไหลเย็นไม่สามารถสูงกว่าอุณหภูมิทางออก t_2 ของของไหลร้อนได้ ไม่เช่นนั้นจะเกิดการขัดแย้งกับกฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์ ซึ่งบังคับว่าความร้อนไม่สามารถถ่ายเทจากที่อุณหภูมิต่ำไปสู่ที่อุณหภูมิสูงได้ในกรณีพิเศษที่ของไหลทั้งสองเป็นของไหลชนิดเดียวกันเช่น น้ำและมีอัตราไหลเท่ากัน การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของของไหลทั้งสองจะเท่ากันกล่าวคือ $T_2 - T_1 = t_1 - t_2$ การถ่ายเทความร้อนสูงสุดที่จะเป็นไปได้เกิดขึ้นเมื่อ $T_2 = t_2$ ของไหลทั้งสองจะมีอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปเท่ากัน ซึ่งเท่ากับครึ่งหนึ่งของผลต่างอุณหภูมิที่ทางเข้ากล่าวคือ

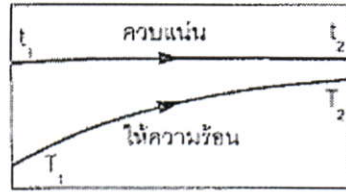
$$(T_2 - T_1)_{\max} = (t_1 - t_2)_{\max} = 0.5(t_1 - T_1) \quad (4.1)$$



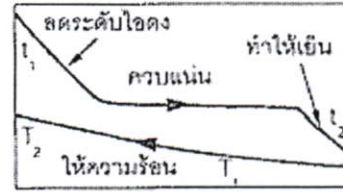
(ก) ของไหลเปลี่ยนสถานะทั้งคู่



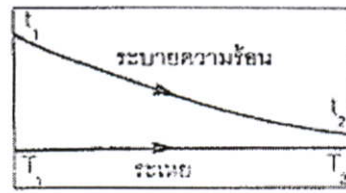
(จ) ไหลสวนกันไม่มีการเปลี่ยนสถานะ



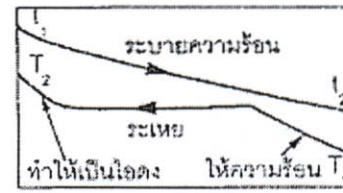
(ข) ของไหลเปลี่ยนสถานะหนึ่งตัว



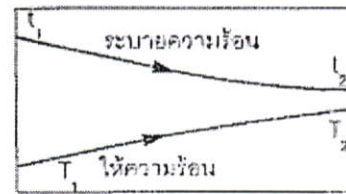
(ฉ) ของไหลเปลี่ยนสถานะหนึ่งตัว



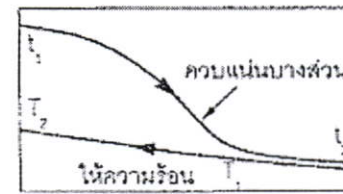
(ค) ของไหลเปลี่ยนสถานะหนึ่งตัว



(ช) ของไหลเปลี่ยนสถานะหนึ่งตัว



(ง) ไหลสวนกันไม่มีการเปลี่ยนสถานะ



(ซ) มีส่วนประกอบที่ควบแน่นได้และควบแน่นไม่ได้

รูปที่ 4.4 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของของไหลในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อคู่

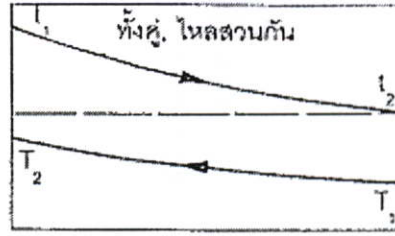
รูปที่ 4.4 (จ) แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในกรณีที่เป็นการไหลสวน ในกรณีนี้ของไหลทั้งสองไหลในทิศทางตรงข้ามกัน ซึ่งมีข้อดีเหนือกว่าการไหลตามกันมาก จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิทางออก T_2 ของของไหลเย็นอาจจะมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิทางออก t_2 ของของไหลร้อนได้ โดยไม่ขัดกับกฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์ ผลต่างอุณหภูมิที่เป็นตัวขับเคลื่อนการถ่ายเทความร้อนมีค่ามีแปรเปลี่ยนจาก $\Delta T = t_1 - T_2$ ที่ปลายข้างหนึ่งไปเป็น $\Delta T = t_2 - T_1$ ที่ปลายอีกข้างหนึ่ง ถ้าของไหลทั้งสองเป็นของไหลชนิดเดียวกัน มีอัตราไหลเท่ากันและคุณสมบัติของของไหลไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ผลต่างอุณหภูมิ $t - T$ จะมีค่าคงที่โดยตลอดจากปลายข้างหนึ่งไปสู่ปลายอีกข้างหนึ่ง ในทางทฤษฎีมีความเป็นไปได้ที่จะทำให้อุณหภูมิทางออกของของไหลตัวหนึ่งเข้าใกล้หรือเท่ากับ อุณหภูมิทางเข้าของของไหลอีกตัวหนึ่งนั่นคือ $t_2 \rightarrow T_1$ และ $T_2 \rightarrow t_1$ ดังนั้นเราจึงสามารถทำให้การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของไหลเย็นและการลดลงของอุณหภูมิของ

ไหลร้อน มีค่าเท่ากันและเท่ากับ $t_1 - T_1$ ซึ่งเป็นสองเท่าของค่าสูงสุดที่เป็นไปได้ทางทฤษฎีสำหรับกรณีของการไหลตามกัน

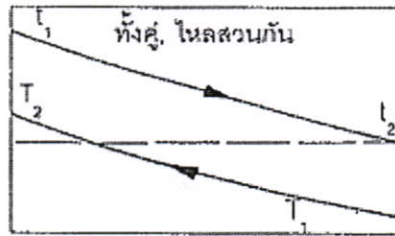
ข้อดีของการไหลสวนที่กล่าวถึงข้างต้นเมื่อเทียบกับการไหลตามกันเป็นข้อดีที่สำคัญอย่างปราศจากข้อเคลือบแคลงสงสัย ในการเปรียบเทียบการทำงานของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสองตัวที่เหมือนกัน จะพิสูจน์ให้เห็นได้ว่ากำลังความจุทางความร้อนของตัวที่ทำงานจะต้องทำงานแบบไหลสวนเสมอไม่ควรให้ทำงานแบบไหลตามกันถ้าสามารถทำได้ อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจะต้องทำงานแบบไหลสวนเสมอไม่ควรให้ทำงานแบบไหลตามกัน สภาวะการทำงานของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่แสดงในรูปที่ 4.4 (ฉ) คล้ายกับรูปที่ 4.4 (ข) ในแง่ที่ว่ามิของไหลตัวหนึ่งเกิดการควบแน่นในขณะทำงาน แต่ในกรณีนี้มีสภาวะใกล้เคียงที่เกิดขึ้นจริงมากกว่า กล่าวคือของไหลที่ให้ความร้อนเข้าสู่อุปกรณ์ในสภาวะที่เป็นไอคง ในขณะที่ให้ความร้อนแก่ของไหลอีกตัวหนึ่ง อุณหภูมิของมันจะลดลงจนกลายเป็นไออิ่มตัว และเกิดการควบแน่นที่อุณหภูมิคงที่ ในขณะที่คายความร้อนออกไป ในที่สุดเมื่อควบแน่นเป็นของเหลวหมดแล้ว ก็อาจจะเป็นการคายความร้อนต่อไปจนเป็นเหลวอัดซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิจึงตัว และไหลออกจากอุปกรณ์ในรูปของของเหลวอัด การไหลอาจจะจัดให้ไหลสวนกันดังแสดงในรูปหรือให้ไหลตามกันก็ได้

การทำงานของรูปที่ 4.4 (ข) เป็นไปในทางที่กลับกันกับรูปที่ 4.4 (ฉ) นั่นคือของไหลเย็นเข้าสู่อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนในสภาพที่เป็นของเหลว (ของเหลวอัด) จากนั้นจะรับความร้อนและมีอุณหภูมิสูงขึ้น จนมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิจึงตัว ซึ่งการถ่ายเทความร้อนให้แก่ของเหลวต่อไป จะทำให้เกิดการระเหยขึ้นที่อุณหภูมิจึงตัว จนกว่าของเหลวจะระเหยเป็นไออิ่มตัวจนหมด การให้ความร้อนต่อไปจะทำให้ไออิ่มตัวมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจนสูงกว่าอุณหภูมิจึงตัว นั่นคือกลายเป็นไอคงและออกจากอุปกรณ์ในสภาพที่เป็นไอคง ในกรณีที่ของไหลร้อนประกอบด้วยทั้งไอที่ควบแน่นได้และก๊าซที่ไม่ควบแน่น การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะเป็นไปในรูปที่ค่อนข้างจะซับซ้อน ดังแสดงเป็นลักษณะทั่วไปในรูปที่ 4.4 (ข) เราจะเห็นได้จากรูปที่ 4.4 (จ) ว่าในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลสวนนั้น มีความเป็นไปได้ที่อุณหภูมิทางออก T_2 ของของไหลเย็นจะมีค่ามากกว่าอุณหภูมิออก t_2 ของของไหลร้อนลักษณะเช่นนี้เราเรียกว่าอุณหภูมิตัดข้าง (Temperature Cross) รูปที่ 4.5 แสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นใน 3 กรณีคือ [6]

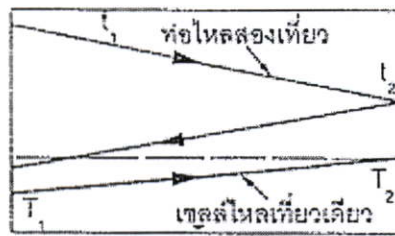
1. การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของของไหลในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อคู่ โดยไม่เกิดอุณหภูมิตัดข้าม
2. เช่นเดียวกับข้อ 1 แต่เกิดอุณหภูมิตัดข้าม
3. การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อในเซลล์ โดยมี การไหลในท่อสองเที่ยวและการไหลในเซลล์หนึ่งเที่ยวพร้อมทั้งเกิดอุณหภูมิตัดข้าม



(ก) อุณหภูมิไม่ตัดข้ามกัน



(ค) อุณหภูมิตัดข้ามกัน



(ด) อุณหภูมิตัดข้ามกัน

รูปที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของของไหลในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

การเกิดอุณหภูมิตัดข้ามมีความสำคัญในฐานะที่เป็นตัวบ่งบอกถึงผลต่างอุณหภูมิที่ค่อนข้างน้อย ดังนั้นเพื่อให้มีอัตราการถ่ายเทความร้อนไม่ต่ำจนเกินไป เราจำเป็นต้องใช้พื้นที่ถ่ายเทความร้อนค่อนข้างมากหรือให้ของไหลไหลด้วยความเร็วสูงเพื่อเพิ่มสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ซึ่งจะทำให้เกิดการสูญเสียความดันสูงตามมา จะเห็นได้อย่างชัดเจนจากรูปที่ 4.4 และรูปที่ 4.5 ว่าผลต่างอุณหภูมิต่างๆของไหลร้อนกับของไหลเย็น น้อยครั้งที่จะมีค่าคงที่ดังเช่นที่แสดงในรูปที่ 4.4 (ก) โดยทั่วไปผลต่างอุณหภูมิจะแปรเปลี่ยนจากปลายข้างหนึ่งไปสู่ปลายอีกข้างหนึ่งของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

4.4 ผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ย (MTD)

การคำนวณการถ่ายเทความร้อนโดยใช้สมการในรูป $q = AU\Delta T$ มีเหตุจูงใจสำคัญคือความเรียบง่ายและความสะดวก อย่างไรก็ตามดังได้เห็นจากข้อสังเกตก่อนหน้านี้แล้วว่า ผลต่างอุณหภูมิจึงมีการแปรเปลี่ยนอย่างกว้างขวางและหลากหลายแบบนับจากปลายข้างหนึ่งถึงปลายอีกของ

อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน เพื่อจัดการกับความยุ่งยากนี้ จึงได้นำเอาแนวคิดของผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ย (Mean Temperature Difference, MTD) มาใช้ผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยรูปที่ใช้กันทั่วไปคือ ผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยเชิงล็อก (Logarithm Mean Temperature Difference, LMTD) [9]

4.4.1 ผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยเชิงล็อก (LMTD)

ผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยเชิงล็อก ซึ่งแทนด้วยสัญลักษณ์ ΔT_{\ln} ถูกนิยามตามสมการข้างล่างนี้

$$\Delta T_{\ln} = \frac{\max imum\Delta T - \min imum\Delta T}{\ln(\max imum\Delta T / \min imum\Delta T)} \quad (4.2)$$

โดยทั่วไปเรามักจะเพิ่มพื้นที่ผิวถ่ายเทความร้อนให้มากกว่าที่คำนวณได้ เพื่อเผื่อสำหรับเฟลิ่งที่จะเกิดขึ้นในภายหลังการเพิ่มพื้นที่อาจจะกระทำโดยการขยายความยาวท่อหรือเพิ่มจำนวนท่อวิธีที่ดีที่สุดน่าจะเป็นการขยายความยาวท่อเพิ่มขึ้น แม้ว่าจะผลให้ความดันตกเพิ่มขึ้นก็ตาม การเพิ่มจำนวนท่อจะทำให้ความเร็วของของไหลลดลง ซึ่งมีผลให้สมรรถนะทางความร้อนตกลงและเพิ่มแนวโน้มในการเกิดเฟลิ่งเร็วขึ้น ตัวอย่างการคำนวณออกแบบข้างต้นซึ่งใช้วิธีของ LMTD เป็นตัวอย่างปัญหาที่เรียกว่า การกำหนดขนาด (Sizing problem) กล่าวคือเป็นการเลือกรูปลักษณะและขนาดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน เพื่อให้ทำงานภายใต้สภาวะที่ต้องการหรือที่กำหนดให้ เช่น อัตราการไหลของของไหล อุณหภูมิเข้าและออกของของไหล

4.5 ผลของความเสียดทานในของไหลต่ออุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

การออกแบบทางด้านความร้อนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมุ่งไปที่การจัดให้มีพื้นที่ถ่ายเทความร้อนอย่างเพียงพอ เพื่อให้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนนั้นสามารถรับมือกับภาระหน้าที่ทางความร้อนที่ต้องการได้ ผลของความเสียดทานในของไหลในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนนับว่ามีความสำคัญไม่ยิ่งหย่อนไปกว่ากัน เพราะเป็นตัวทำให้เกิดความดันตกขึ้นในของไหลที่ไหลอยู่ในระบบ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีกำลังป้อนเข้าให้แก่ของไหลผ่านทางปั๊มหรือพัดลมเพื่อรักษาการไหลไว้ ปั๊มหรือพัดลมที่ใช้ทำให้ค่าลงทุนของระบบเพิ่มขึ้น และเป็นส่วนสำคัญของค่าใช้จ่ายดำเนินการของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน การประหยัดเงินลงทุนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนโดยการเลือกซื้อประเภทกะทัดรัดที่มีการไหลด้วยความเร็วสูง อาจจะสูญหายไปโดยไม่ช้า จากค่าใช้จ่ายดำเนินการที่เพิ่มสูงขึ้น เพราะฉะนั้นการออกแบบและการเลือกอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนในขั้นสุดท้ายจึงขึ้นอยู่กับการใช้อย่างมีประสิทธิภาพของผลของความดันตกที่ยอมรับให้ได้และค่าใช้จ่ายของปั๊มและพัดลมพอ การจัดให้มีพื้นที่ถ่ายเทความร้อนอย่างพอเพียง ความดันตกรวมที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเป็นผลสะสมทั้งหมดของส่วนประกอบย่อยจำนวนมาก การสูญเสียหลักตัวแรกโดยทั่วไปเกิดขึ้นในการไหลของของไหลไปในท่อการ

ไหลผ่านแผงท่อ ในกรณีของการไหลขวาง ซึ่งอาจจะมีการใส่ครีบริบหรือไม่มีก็ได้ หรือการไหลผสมกันทั้งการไหลขวางและไหลตามแนวแกน ในกรณีของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนชนิดท่อในเซลล์ที่มีแผงกัน การสูญเสียในส่วนต่อมาเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่หน้าตัดของการไหลทั้งหมดเล็กน้อย และขยายโตขึ้นอย่างกะทันหัน ในขณะที่ของไหลไหลเข้าสู่ หรือออกจากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ความสูญเสียอีกส่วนหนึ่งเป็นผลจากสิ่งๆ ที่ทำขึ้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อน เช่น การทำให้พื้นผิวขรุขระ การเพิ่มพื้นที่ถ่ายเทความร้อนโดยการเสริมครีบริบ การทำพื้นผิวให้เป็นลอนและการทำเป็นเกล็ด เป็นต้น ในบางกรณีสิ่งๆ ที่ทำขึ้นเพื่อขีดความสามารถในการถ่ายเทความร้อน อาจจะมีผลในทางเพิ่มความเสียดทานต่อการไหล ซึ่งเป็นผลให้ต้องสิ้นเปลืองกำลังงานในการขับเคลื่อนของไหลเพิ่มขึ้นเกินกว่าผลดีที่ได้จากการถ่ายเทความร้อนที่เพิ่มขึ้นเสียอีก [6]

ในการออกแบบถ้าปรากฏว่าของเหลวที่กำลังพิจารณาจะมีการไหลเป็นแบบลามินาร์ทางด้านเซลล์ เราควรจะต้องสอบถามว่าการเปลี่ยนให้ของเหลวนั้นไปอยู่ทางด้านเซลล์จะทำให้การไหลกลายเป็นแบบเทอร์บิวเลนต์หรือไม่ ถ้าเป็นก็ควรที่จะเปลี่ยนให้ไปอยู่ทางด้านเซลล์ แต่สำหรับของเหลวที่มีความเร็วต่ำมาก หรือมีความหนืดสูงมากจนมั่นใจว่าจะยังคงการไหลแบบลามินาร์ก็ควรจะให้อยู่ทางด้านท่อ ซึ่งการคำนวณมีความแน่นอนเที่ยงตรงกว่า อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแทบทั้งหมดทำหน้าที่ทั้งเป็นตัวถ่ายเทพลังงานความร้อน จากของไหลตัวหนึ่งไปสู่ของไหลอีกตัวหนึ่ง และเป็นภาระหน้กของไหลภายใต้ความดัน โดยส่วนใหญ่จะมีภาระความดันดังกล่าวสองส่วนประกอบเข้าด้วยกัน ภาระหน้กที่ที่แยกกันแต่เกี่ยวพันกันดังกล่าวของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสะท้อนออกที่การออกแบบ ซึ่งแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ การออกแบบทางความร้อนและการออกแบบทางกล การออกแบบทางความร้อนเกี่ยวข้องกับการจัดให้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมีพื้นที่ถ่ายเทความร้อนอย่างพอเพียงสำหรับภาระทางความร้อน และมีช่องทางการไหลอย่างเหมาะสมโดยมีความการสิ้นเปลืองกำลังในการส่งถ่ายของเหลวในระดับที่ยอมรับได้ ส่วนการออกแบบทางกลเกี่ยวข้องกับการออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนให้มีความแข็งแรงทนทานสามารถรองรับความดันและสภาวะทางเคมีของของไหลได้

กิจกรรมการออกแบบทั้งสองส่วน ในบางครั้งอาจจะกระทำโดยคนออกแบบคนเดียวกัน อย่างไรก็ตามบ่อยครั้งที่มักจะมีกลุ่มผู้เชี่ยวชาญทำหน้าที่ออกแบบแต่ละส่วนแยกจากกัน ในกรณีหลังนี้มีข้อดีคือ บุคลากรในแต่ละกลุ่มสามารถที่จะสะสมความรู้ความสามารถเฉพาะด้านได้ลึกซึ้งยิ่งขึ้น และสามารถติดตามพัฒนาการความก้าวหน้าทางวิทยาการที่เกี่ยวข้องได้ใกล้ชิดมากขึ้น แต่หากการประสานงานไม่ดีพอ อาจจะทำให้เกิดปัญหาจากการที่แต่ละฝ่ายมุ่งไปทำงานของตัวเองอย่างอิสระจนก่อนให้เกิดข้อจำกัดต่ออีกฝ่ายหนึ่งเกิดค่าใช้จ่ายและเกิดความล่าช้าโดยไม่จำเป็น

บทที่ 5

โครงสร้างโปรแกรมและระบบควบคุม

5.1 บทนำ

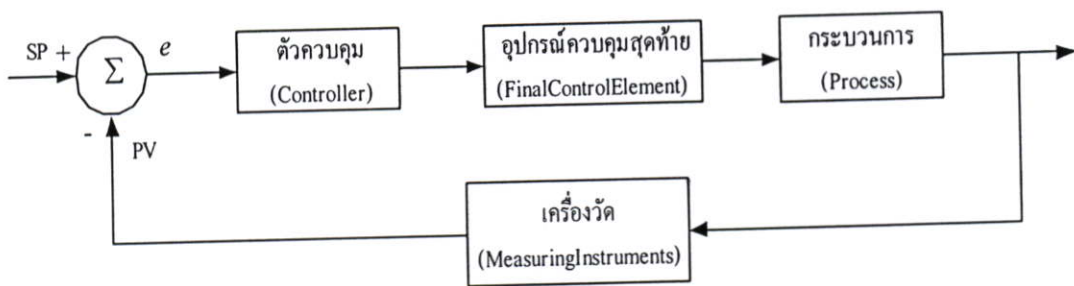
การวิเคราะห์และออกแบบกระบวนการอุตสาหกรรมหรือระบบควบคุมที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมจำเป็นต้องทราบธรรมชาติและคุณสมบัติต่างๆของกระบวนการและอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในกระบวนการทั้งหมดเพื่อใช้ศึกษาและวิเคราะห์คุณสมบัติการเปลี่ยนแปลงสภาพของกระบวนการเมื่อถูกรบกวนจากการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมภายนอกหรือได้รับการควบคุมจากเครื่องควบคุมหรืออุปกรณ์ควบคุมอื่นๆ สำหรับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเมื่อได้รับการออกแบบทางกลเป็นอย่างดีแล้ว หลังจากกระบวนการดังกล่าวเป็นการออกแบบระบบควบคุมคือการเลือกค่าตัวแปรควบคุมที่เหมาะสมกับกระบวนการหรือการปรับเครื่องควบคุมให้สามารถควบคุมกระบวนการได้ดีและมีประสิทธิภาพวิธีการปรับเครื่องควบคุมแบบป้อนกลับในกระบวนการอุตสาหกรรมมี 4 วิธี [13]

1. ปรับเครื่องควบคุม โดยกำหนดหลักเกณฑ์การควบคุมจากผลตอบสนองของกระบวนการเฉพาะจุด
2. ปรับเครื่องควบคุมโดยใช้หลักการของอินทิเกรตทางเวลาความคลาดเคลื่อนแบบต่างๆ
3. การปรับเครื่องควบคุมโดยใช้สูตรสำเร็จที่ได้จากการทดลอง
 - Process reaction curve method
 - Closed loop cycling method
4. การปรับเครื่องควบคุมแบบวิธีการทดลองผิดทดลองถูก (Trial and error method)

5.2 ระบบควบคุมและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

สภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจะถูกสิ่งรบกวนจากสภาพแวดล้อมต่างๆภายนอกที่ไม่สามารถควบคุมได้เช่น การเปลี่ยนแปลงของอัตราการไหลและอุณหภูมิของของไหลที่เข้าสู่ภายในถังซึ่งไม่สามารถควบคุมค่าความเปลี่ยนแปลง และคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงล่วงหน้าได้ ถ้าปัจจัยต่างๆ ภายนอกนี้เหล่านี้ไม่มีการเปลี่ยนแปลงภายหลังสภาพของ อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเข้าสู่เป้าหมายที่วางไว้ แต่ในสภาพความเป็นจริงเหตุการณ์เหล่านี้จะมีโอกาสเป็นไปได้ยาก เนื่องจากอัตราการไหลและอุณหภูมิของของไหลจะเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา การควบคุมที่ใช้วิธีวัดค่าตัวแปรที่ต้องการควบคุมโดยตรง และส่งสัญญาณควบคุมไปปรับสภาพ

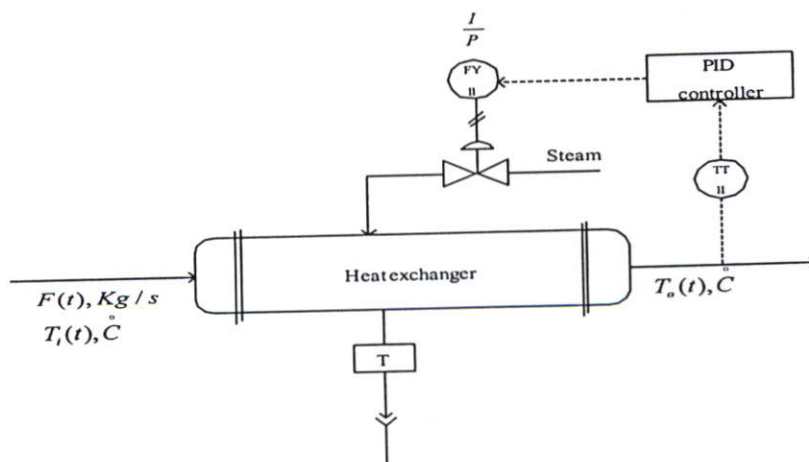
กระบวนการ ภายหลังการตรวจพบความคลาดเคลื่อน การตรวจสอบแบบนี้เรียกว่าการควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback control) แสดงในรูปที่ 5.1



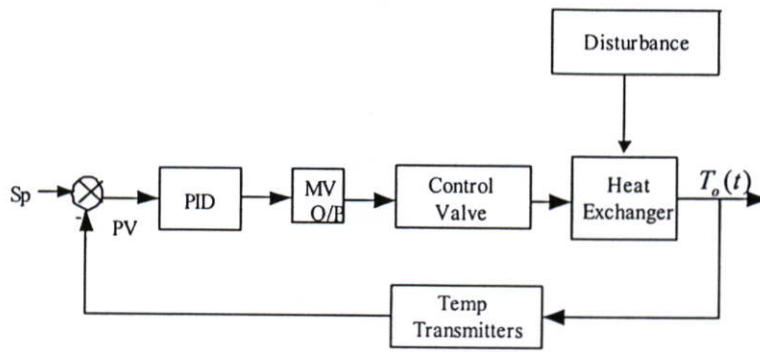
รูปที่ 5.1 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบป้อนกลับ

จากรูปที่ 5.1 จะเห็นได้ว่าระบบควบคุมแบบป้อนกลับประกอบด้วยอุปกรณ์ 4 ส่วนคือ [13]

1. อุปกรณ์ในการวัด (Measuring Instrument) หมายถึงอุปกรณ์ซึ่งอาจจะเป็น เซนเซอร์ (Sensor) ทรานสดิวเซอร์ (Transducer) หรืออุปกรณ์แปลงหรือวัดสัญญาณอื่นๆ
2. ตัวควบคุม (Controller) เป็นเครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างสัญญาณควบคุมให้กับระบบ เพื่อให้มีผลตอบสนองเป็นไปตามต้องการ
3. อุปกรณ์ควบคุมสุดท้าย (Final Control Element) คืออุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ปรับสภาวะของกระบวนการ ด้วยการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรปรับกระบวนการ (Manipulated Variable: MV) ตามคำสั่งหรือสัญญาณควบคุมที่ได้รับจากตัวควบคุม
4. กระบวนการ (Plant or Process) หมายถึงระบบหรือกระบวนการทางฟิสิกส์ที่ต้องการควบคุมให้มีสถานะเป็นไปตามต้องการในที่จะกล่าวต่อไปคืออุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน



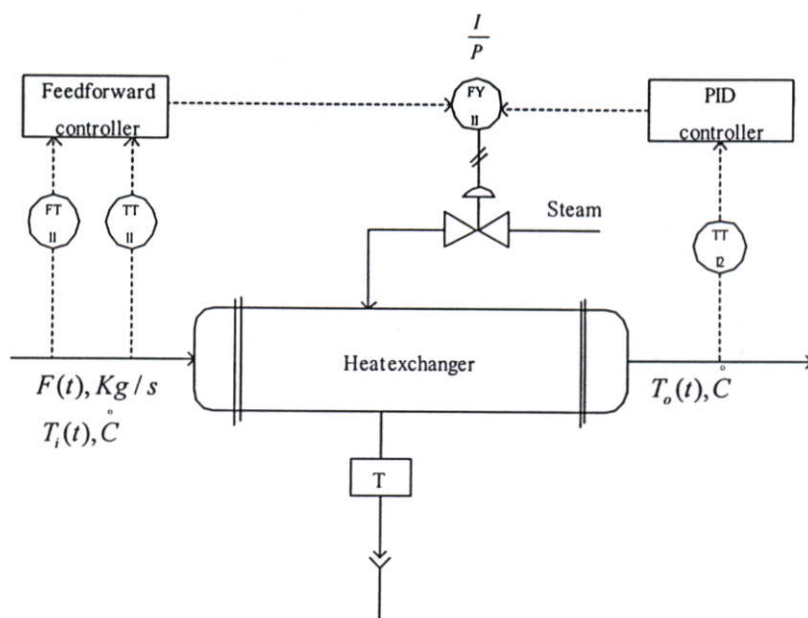
รูปที่ 5.2 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการควบคุมแบบป้อนกลับ โดยตัวควบคุมแบบ PID [11]



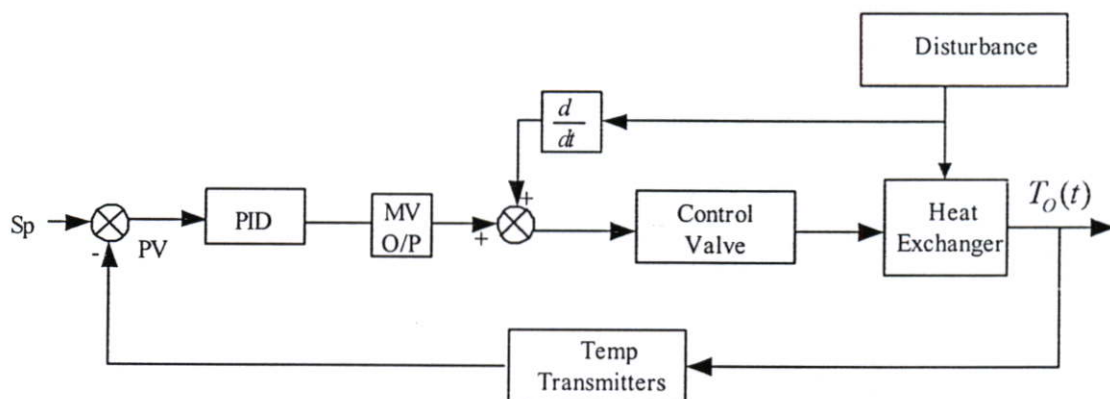
รูปที่ 5.3 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ โดยใช้ตัวควบคุมแบบ PID

ในรูปที่ 5.3 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ โดยใช้ตัวควบคุมแบบ PID เป็นกระบวนการที่มีเป้าหมายควบคุมอุณหภูมิของน้ำ $T_o(t)$ ที่ออกจากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน โดยการควบคุมอัตราการไหลของไอน้ำที่ไหลเข้าอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน โดยมีเครื่องส่งสัญญาณ (Temp Transmitter) จะวัดค่าของอุณหภูมิซึ่งเป็นตัวแปรกระบวนการ (PV) เพื่อเปรียบเทียบกับค่าเป้าหมาย (Set Point: Sp) จากนั้นตัวควบคุม พีไอดี (PID) จะนำค่าความคลาดเคลื่อน (Error) ในการควบคุมมาใช้ในการคำนวณเพื่อหาสัญญาณที่เหมาะสมที่จะไปควบคุม ดังจะเห็นได้ว่าสัญญาณควบคุมหรือตัวแปรกระบวนการ (MV) ที่ออกจากตัวควบคุม PID จะถูกกำหนดโดยตัวแปรกระบวนการ (PV) กับสัญญาณเป้าหมาย โดยที่ความสัมพันธ์ดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับกฎเกณฑ์ที่ผู้ควบคุมปรับแต่งไว้ (คือการปรับแต่งพารามิเตอร์ K_c , T_i และ T_d ของตัวควบคุม PID นั้นเอง) โดยวาล์วควบคุม (Control Valve) จะถูกใช้ในการกำหนดปริมาณของไอน้ำที่จะผ่านเข้าไปในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนให้กับน้ำให้อุณหภูมิของน้ำที่ออกสูงขึ้นตามที่ต้องการ ในที่นี้การรบกวนจากภายนอก (Disturbance) ที่มีผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำที่ออกจากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนก็คือการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและอัตราการไหลของน้ำก่อนที่จะเข้าสู่อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

ระบบควบคุมแบบป้อนกลับอาจทำให้กระบวนการควบคุมอุณหภูมิของน้ำที่ออกจากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนไม่ได้ผลตามจุดมุ่งหมาย เนื่องจากเครื่องควบคุมแบบป้อนกลับจะทำงานหลังจากตรวจพบที่มีความคลาดเคลื่อนในการควบคุมเกิดขึ้นเท่านั้น ทำให้การควบคุมแบบป้อนกลับมีความคลาดเคลื่อนในการควบคุมเกิดขึ้นอยู่ตลอดเวลา ระบบควบคุมแบบป้อนล่วงหน้าจึงถูกสร้างขึ้นเพื่อแก้ไขข้อเสียดังกล่าว โดยระบบควบคุมแบบป้อนล่วงหน้าจะตรวจสอบสภาพแวดล้อมที่มีเหตุทำให้เกิดมีความคลาดเคลื่อนในการควบคุมขึ้นโดยตรงและสัญญาณควบคุมจะเกิดขึ้นทันที เมื่อพบสาเหตุที่จะทำให้เกิดมีสภาพกระบวนการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น โดยสัญญาณควบคุมจะให้ผลการควบคุมหักล้างกับสาเหตุที่ทำให้สภาพกระบวนการเปลี่ยนแปลง



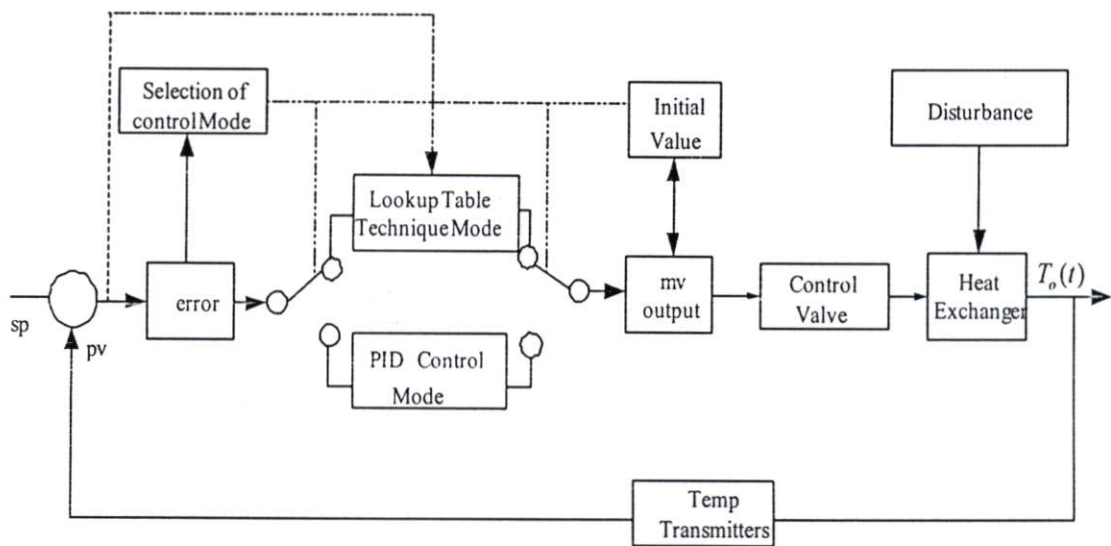
รูปที่ 5.4 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่การควบคุมแบบป้อนล่วงหน้าร่วมกับ PID [11]



รูปที่ 5.5 ระบบควบคุมแบบป้อนล่วงหน้าโดยใช้ตัวควบคุมแบบ PID

ในรูปที่ 5.4 และรูปที่ 5.5 เป็นระบบควบคุมแบบป้อนล่วงหน้าโดยใช้ตัวควบคุมแบบ PID เป็นกระบวนการที่มีเป้าหมายควบคุมอุณหภูมิของน้ำ $T_o(t)$ ที่ออกจากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน โดยการควบคุมอัตราการไหลของไอน้ำที่ไหลเข้าอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเช่นเดียวกับรูปที่ 5.3 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและอัตราการไหลของน้ำก่อนเข้าสู่อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเราให้เป็นสัญญาณรบกวนภายนอก (Disturbance) โดยระบบควบคุมแบบป้อนกลับสามารถใช้เพื่อควบคุมอุณหภูมิของน้ำที่ออกจากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนได้เช่นเดียวกับระบบควบคุมในรูปที่ 5.3 แต่สำหรับการควบคุมแบบป้อนล่วงหน้าจะมีการควบคุมอุณหภูมิของน้ำที่ออกจากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแตกต่างจากการควบคุมแบบป้อนกลับ โดยจะมีการคำนวณไว้ล่วงหน้าแล้วนำผลที่ได้นี้ไปรวมกับค่าของ MV ที่ออกจากตัวควบคุม PID เพื่อปรับตำแหน่งการเปิดวาล์วควบคุมไอน้ำตาม

อัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของน้ำและการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลเข้าของน้ำ เมื่ออุณหภูมิลดลงแล้วควบคุมการเปิดไอน้ำจะเปิดกว้างขึ้นและเมื่ออุณหภูมิของน้ำที่ไหลเข้าสูงขึ้นแล้วจะหรี้แคบลงตลอด เมื่อเปรียบเทียบกันแล้วจะพบว่าสัญญาณการควบคุมแบบป้อนกลับจะเกิดขึ้นหลังจากตรวจพบว่ามี ความคลาดเคลื่อนในการควบคุมเกิดขึ้นแล้วเท่านั้น ซึ่งต่างจากสัญญาณการควบคุมแบบป้อนล่วงหน้า ที่สัญญาณควบคุมจะเกิดขึ้นทันทีที่ตรวจพบสาเหตุที่ทำให้มีความคลาดเคลื่อนของอัตราการไหลและผลของอุณหภูมิของน้ำทางด้านเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งสาเหตุที่ทำให้อุณหภูมิของน้ำเปลี่ยนแปลงคือการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและอัตราการไหลของน้ำที่ก่อนเข้าสู่อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนนั่นเอง



รูปที่ 5.6 ระบบควบคุมแบบเปิดตารางร่วมกับ PID

จากรูปที่ 5.6 แสดงระบบควบคุมแบบเปิดตารางร่วมกับ PID ซึ่งเป็นระบบควบคุมที่ชดเชยจุดบกพร่องของการควบคุมแบบป้อนล่วงหน้าและการควบคุมแบบป้อนกลับ จากที่อธิบายในตั้งแต่รูปที่ 5.1 ถึงรูปที่ 5.4 แสดงให้เห็นว่าการควบคุมแบบป้อนล่วงหน้าถึงแม้จะให้ผลการควบคุมดีกว่าการควบคุมแบบป้อนกลับแต่การควบคุมแบบป้อนล่วงหน้าก็มีข้อบกพร่องหลายประการ ที่อาจทำให้การควบคุมไม่ประสบความสำเร็จได้เช่นเดียวกันคือ [13]

1. การควบคุมแบบป้อนล่วงหน้าต้องสามารถวัดค่าและทราบผลกระทบของสภาพแวดล้อมภายนอกที่รบกวนสภาพของกระบวนการที่ถูกต้องทั้งหมด ซึ่งในที่นี้เราหมายถึงต้องทราบค่าของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและอัตราการไหลของน้ำก่อนเข้าสู่อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน
2. การควบคุมแบบป้อนล่วงหน้าไม่สามารถชดเชยผลการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของกระบวนการเองได้เช่น การเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนจากความ

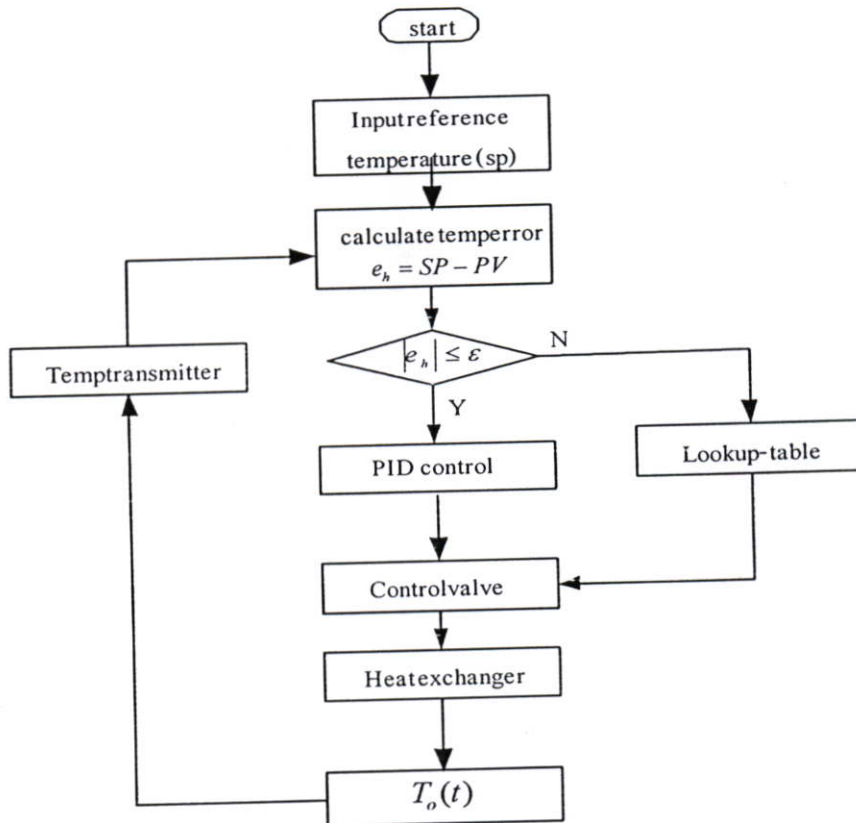
สกปรกของพื้นผิว การส่งผ่านความร้อนหรือความจุความร้อนที่มีค่าเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิตลอดเวลา

3. การควบคุมแบบป้อนล่วงหน้าจำเป็นต้องทราบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ถูกต้องของกระบวนการและอุปกรณ์ทั้งหมดในระบบควบคุม

ข้อบกพร่องของระบบควบคุมแบบป้อนกลับต่างกับระบบควบคุมแบบป้อนล่วงหน้าคือ ผลการควบคุมค่อนข้างช้า แต่ระบบควบคุมแบบป้อนกลับไม่จำเป็นต้องทราบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ถูกต้องของกระบวนการ ซึ่งแม้ว่าการรวมเอากระบวนการควบคุมทั้งสองแบบเข้าด้วยกันแล้ว ในแต่ละระบบควบคุมยังมีจุดด้อยอยู่ ดังนั้นในรูปที่ 5.6 เป็นระบบควบคุมที่ชัดเจนจุดบกพร่องของการควบคุมแบบป้อนล่วงหน้าและการควบคุมแบบป้อนกลับ ซึ่งเราสามารถอธิบายการทำงานของระบบควบคุมแบบเปิดตารางร่วมกับ PID ได้ว่า เป้าหมายของเราคือการควบคุมอุณหภูมิของน้ำ $T_o(t)$ ที่ออกจากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนโดยการควบคุมอัตราการไหลของไอน้ำที่ไหลเข้าอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของน้ำที่ก่อนเข้าสู่อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเราให้เป็นสัญญาณรบกวนภายนอก(Disturbance) โดยมีเครื่องวัดอุณหภูมิ(Temp Transmitter) จะวัดค่าของอุณหภูมิของน้ำซึ่งเป็นตัวแปรกระบวนการ (PV) นำมาเปรียบเทียบกับค่าเป้าหมาย(Set Point:Sp) เราก็จะได้ค่าความคลาดเคลื่อน ซึ่งในสภาวะดังกล่าวนี้กระบวนการจะมีการเลือกโหมดสำหรับการควบคุมโดย ในการเลือกว่าจะใช้ระบบควบคุมแบบใดนั้นจะมีการกำหนดโดยให้มีการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนกับค่าเงื่อนไขของผู้ใช้งาน ซึ่งขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้ใช้เอง โดยเมื่อกระบวนการเลือกระบบควบคุมที่ใช้ตัวควบคุมแบบ PID ก็จะมีการควบคุมอุณหภูมิของน้ำเหมือนกับระบบการควบคุมแบบป้อนกลับโดยใช้ตัวควบคุมแบบ PID ซึ่งอธิบายได้ตามรูปที่ 5.3 แต่เมื่อระบบเลือกการทำงานให้ทำงานในโหมดควบคุมแบบเปิดตาราง ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจากกระบวนการจะเป็นตัวกำหนดการเลือกค่าแปรกระบวนการ(MV)ในตารางให้ตรงกับค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น โดยค่าของสัญญาณ MV จะมีการกำหนดไว้ในตารางไว้แล้ว หลังจากได้สัญญาณ MV จากตารางแล้วจะถูกส่งไปที่วาล์วควบคุมเพื่อกำหนดปริมาณของไอน้ำที่จะผ่านเข้าไปในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนให้กับน้ำต่อไป และจะครบวงจรการทำงานการควบคุมอุณหภูมิของน้ำที่ออกจากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน จากกระบวนการควบคุมอุณหภูมิที่กล่าวมาเราสามารถเขียนขั้นตอนในการทำงานได้ใน Flow chart รูปที่ 5.7

สำหรับข้อดีของการควบคุมแบบเปิดตารางคือช่วยลดข้อเสียของตัวควบคุมแบบ PID คือ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมาย(Set Point:Sp) อย่างรวดเร็วจะทำให้ค่าของเทอม D มีค่ามากและทำให้เกิดควบคุม D พุ่งสูง (Derivative Kick) ในอุปกรณ์ควบคุมตัวสุดท้าย และในการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID คือ K_c อัตราขยายของตัวควบคุม, T_i ค่า Integral or Reset Time และ T_d ค่า Derivative or Rate Time จะต้องอาศัยผู้ที่มีความชำนาญ สำหรับการเปรียบเทียบ

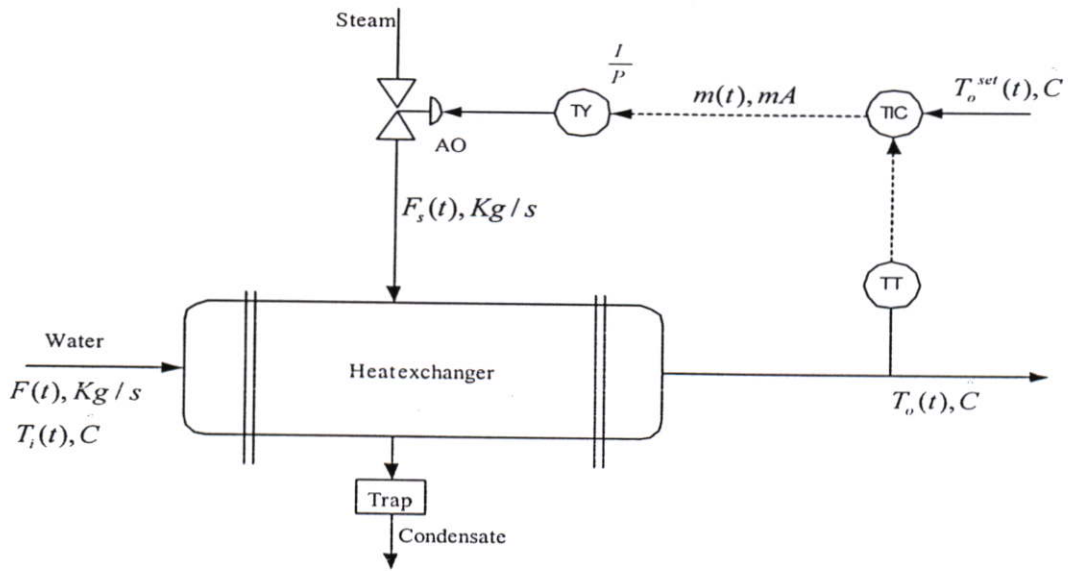
ผลตอบสนองของกระบวนการควบคุมอุณหภูมิของน้ำที่ออกจากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจะแสดงให้เห็นในรูปที่ 5.25 รูปที่ 5.27 และรูปที่ 5.29



รูปที่ 5.7 Flow chart การทำงานของระบบควบคุมในโหมด PID และ Lookup table

จาก Flow chart ในรูปที่ 5.7 เราสามารถอธิบายทำงานได้ว่าในสถานะเริ่มต้นเรากำหนดค่าอุณหภูมิเป้าหมาย (Set Point :SP) เมื่อ Temp transmitter ตรวจวัดค่าอุณหภูมิของกระบวนการ (PV) จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่าอุณหภูมิเป้าหมาย เพื่อหาค่าความคลาดเคลื่อน e_n โดยในสถานะที่ขนาดของความผิดพลาดของอุณหภูมิของน้ำที่ด้านออก $|e_n|$ มีขนาดมากกว่าค่าความคลาดเคลื่อนอ้างอิงที่กำหนด ในที่นี้เราแทนด้วยสัญลักษณ์ (ϵ) ระบบจะทำงานในระบบการควบคุมแบบ Lookup table และส่งสัญญาณควบคุมให้วาล์วควบคุมจะเปิดหรือเพื่อปรับอัตราการไหล ให้สัมพันธ์กับการแลกเปลี่ยนความร้อนภายในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน เมื่อค่า $|e_n| \leq \epsilon$ กระบวนการจะกลับไปทำงานในโหมดการควบคุม PID อีกครั้งหนึ่ง โดยค่าของสัญญาณการเปิดหรือวาล์วควบคุมจะถูกจัดเก็บไว้ในรูปของตารางที่ 5.1 (หน้าที่ 72) โดยภายในตารางจะจัดเก็บค่าของความคลาดเคลื่อนและสัญญาณควบคุมที่จะส่งไปควบคุมวาล์วควบคุม สัญญาณที่จะ

ควบคุม สัญญาณที่จะถูกส่งไปควบคุมวาล์วควบคุมจะเป็นตามค่าที่จัดเก็บในตาราง โดยผู้ที่ ออกแบบจำเป็นต้องรู้ค่าอัตราการไหลของวาล์วควบคุมเป็นอย่างดี ระบบการควบคุมแบบเปิด ตารางนี้นิยมใส่ค่าการเปิดหรือวาล์วที่มีการผิดพลาดของอุณหภูมิของน้ำที่ออกที่มีค่าสูง และใช้ตัว ควบคุมแบบ PID ช่วยในการปรับค่าพารามิเตอร์อีกครั้งเพื่อให้มีความคงที่ของอุณหภูมิรวดเร็วขึ้น



รูปที่ 5.8 การควบคุมอุณหภูมิของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน [11]

จากรูปที่ 5.8 กระบวนการที่มีเป้าหมายควบคุมอุณหภูมิของน้ำ $T_o(t)$ ที่ออกจากอุปกรณ์ แลกเปลี่ยนความร้อน โดยการควบคุมอัตราการไหลของไอน้ำ $F_s(t)$ ที่ไหลเข้าอุปกรณ์แลกเปลี่ยน ความร้อน โดยมีเครื่องวัดอุณหภูมิ Temperature Transmitter (TT) จะวัดค่าของอุณหภูมิของน้ำที่ ออกจากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน สัญญาณจาก (TT) จะถูกส่งไปเปรียบเทียบกับสัญญาณค่า เป้าหมาย $T_o^{set}(t)$ หลังจากนั้น TIC จะมีการเปลี่ยนเป็นสัญญาณควบคุมซึ่งในที่นี้เป็นสัญญาณ กระแสไฟฟ้า 4-20 mA dc แต่เนื่องจากวาล์วควบคุมทำงานด้วยสัญญาณลม ดังนั้น TY คือตัวแปลง ะสัญญาณไฟฟ้าเป็นสัญญาณลม หรือ I-To-P Converter เปลี่ยนสัญญาณกระแสไฟฟ้ามาตรฐาน 4-20 mA dc เป็นสัญญาณลม (Pneumatic) มาตรฐาน 0.2-1.0 Kg/cm^2 [13] เพื่อนำสัญญาณไปใช้ ในการควบคุมวาล์วควบคุมการเปิดไอน้ำตามอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของน้ำ เมื่อ อุณหภูมิลดลงวาล์วควบคุมการเปิดไอน้ำจะเปิดกว้างขึ้นและเมื่ออุณหภูมิของน้ำที่ออกสูงขึ้นวาล์ว จะหรีแคบลงลด การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและอัตราการไหลของน้ำที่ก่อนเข้าสู่อุปกรณ์ แลกเปลี่ยนความร้อนเป็นตัวแปรสำคัญที่ทำให้อุณหภูมิของน้ำที่ออกจากอุปกรณ์เปลี่ยนแปลง

ดังนั้นจากรูปที่ 5.8 เมื่อเราต้องการหาค่าคงที่ทางเวลาของกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน เพื่อหารูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการดังกล่าว เราสามารถนำเอาการสมมูลย์พลังงานมาประยุกต์ใช้โดยใช้เงื่อนไขภายใต้ข้อกำหนดดังนี้

1. สมมุติให้ไม่มีการสูญเสียเกิดขึ้น
2. เป็นการแลกเปลี่ยนความร้อนที่สมบูรณ์แบบ
3. ปริมาตรของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมีค่าคงที่
4. คุณสมบัติทางฟิสิกส์มีค่าคงที่

เมื่อนำเอาการสมมูลย์พลังงานมาประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเราจะได้สมการซึ่งสามารถใช้ได้กับทุกรูปแบบของของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนดังนี้ [11]

$$V \rho C_p \frac{dT_o(t)}{dt} = F(t) \rho C_p T_i(t) + UA[T_s(t) - T_o(t)] - F(t) \rho C_p T_o(t) \quad (5.1)$$

เมื่อ

A คือพื้นที่ส่งผ่านความร้อน, m^2

$T_s(t)$ คืออุณหภูมิกลั่นตัวของไอน้ำ, $^{\circ}C$

จากกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนที่กล่าวมาทั้งหมด เมื่อนำมาประยุกต์กับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่มีใช้งานทั่วไปเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ นั้นเรานิยมใช้กฎการอนุรักษ์พลังงานและการสมมูลย์ของพลังงานในสภาวะคงตัวมาพิจารณา โดยเราจะไม่พิจารณาการสูญเสียของความร้อน โดยจากรูปที่ 5.8 เมื่อเราสมมุติว่าไม่มีการสูญเสียความร้อนเราสามารถเขียนสมการพลังงานสมมูลย์ในสภาวะคงตัวได้ดังนี้ [11]

$$FC_p(T_o - T_i) = F_s \lambda \quad (5.2)$$

เมื่อ

F คืออัตราการไหลของน้ำในสภาวะคงที่, Kg/s

C_p คือค่าความจุความร้อนของน้ำ, $J/Kg^{\circ}C$

λ คือความร้อนแฝงของไอน้ำ, J/Kg

F_s คืออัตราการไหลของไอน้ำ, Kg/s

T_o คืออุณหภูมิขาออกของน้ำ, $^{\circ}C$

T_i คืออุณหภูมิขาเข้าของน้ำ, $^{\circ}C$

สำหรับวัสดุที่ใช้ส่งผ่านความร้อนที่อยู่ภายในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนชนิดใดก็ตาม เราสมมติให้ได้รับอุณหภูมิจากไอน้ำเดียวกันดังนั้นใช้การกฏสมมูลย์พลังงาน [11]

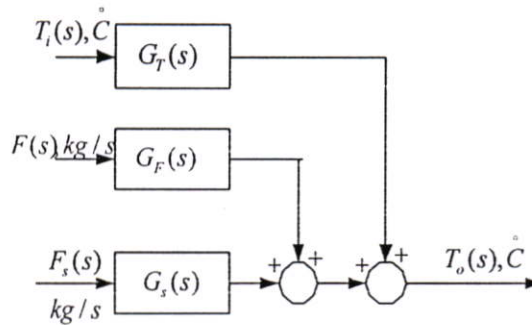
$$C_M \frac{dT_s(t)}{dt} = F_s(t)\lambda - UA[T_s(t) - T(t)] \quad (5.3)$$

เมื่อ

$F_s(t)$ คืออัตราการไหลของไอน้ำ, Kg/s

C_M คือค่าความจุความร้อนของวัสดุที่ใช้แลกเปลี่ยนความร้อน, $J/^\circ C$

เพื่ออธิบายวงรอบการควบคุมมาให้ได้นั้น เราสามารถเขียนอธิบายในรูปแบบของบล็อกไดอะแกรม โดยอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนประกอบด้วย 3 บล็อกดังนี้ [11]



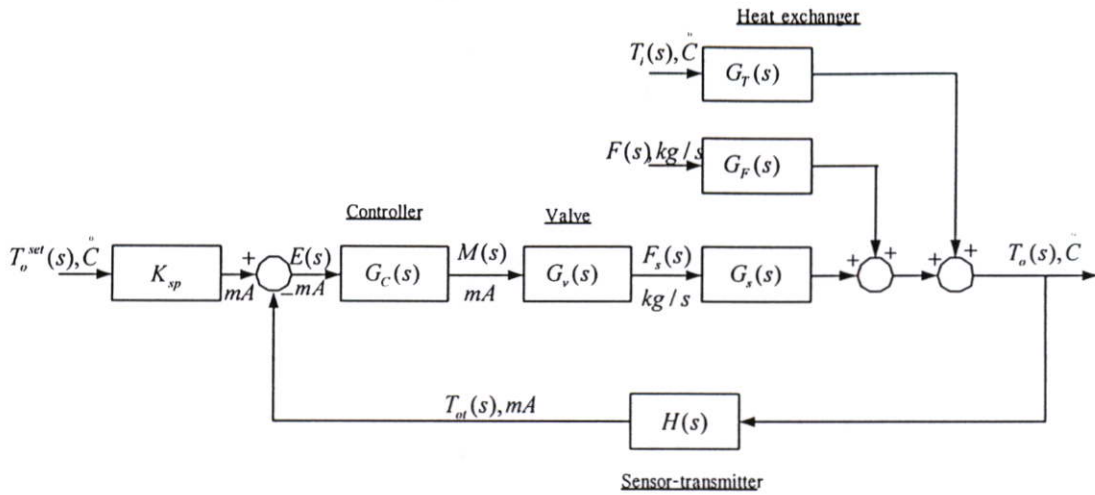
รูปที่ 5.9 แสดงบล็อกไดอะแกรมสำหรับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนโดยทั่วไป

จากรูปที่ 5.9 แสดงบล็อกไดอะแกรมสำหรับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนที่มีใช้งานโดยทั่วไป โดยตัวแปรในบล็อกมีความหมายดังนี้

$G_T(s)$ คือทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของกระบวนการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของน้ำที่ออกและอุณหภูมิของน้ำที่ไหลเข้าอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

$G_F(s)$ คือทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของกระบวนการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของน้ำที่ออกและอัตราการไหลเข้าของน้ำที่ไหลอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

$G_s(s)$ คือทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของกระบวนการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของน้ำที่ออกและอัตราการไหลเข้าของไอน้ำที่ใช้แลกเปลี่ยนความร้อนให้กับน้ำ



รูปที่ 5.10 แสดงบล็อกไดอะแกรมเพื่อควบคุมอุณหภูมิที่ออกจากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

จากรูปที่ 5.10 แสดงให้เห็นบล็อกไดอะแกรมการควบคุมแบบป้อนกลับ เมื่อเราต้องการผลตอบสนองของอุณหภูมิของน้ำด้านออก $T_o(s)$ กับอุณหภูมิด้านเข้า $T_i(s)$ ดังนั้นในขั้นแรกเราสามารถเขียนสมการในแต่ละบล็อกไดอะแกรมจากรูปที่ 5.11 ดังนี้

สัญญาณความผิดพลาด

$$E(s) = K_{sp} T_o^{set}(s) - T_{ot}(s) \quad (5.4)$$

สัญญาณตัวแปรของกระบวนการ

$$M(s) = G_c(s) E(s) \quad (5.5)$$

อัตราการไหลการไหลไอน้ำ

$$F_s(s) = G_v(s) M(s) \quad (5.6)$$

อุณหภูมิด้านออก

$$T_o(s) = G_s(s) F_s(s) + G_f(s) F(s) + G_T(s) T_i(s) \quad (5.7)$$

สัญญาณทรานสมิตเตอร์

$$T_{ot} = H(s) T_o(s) \quad (5.8)$$

$G_c(s)$ คือทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของตัวควบคุม [11]

$$G_c(s) = K_c \left(1 + \frac{1}{\tau_I s} + \tau_D s \right) = \frac{M(s)}{R(s) - T_{ot}(s)} \quad (5.9)$$

G_v คือทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของวาล์วควบคุม [13]

$$G_v(s) = \frac{K_v}{\tau_v s + 1} \quad (5.10)$$

$H(s)$ คือทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของเซ็นเซอร์ทรานส์มิเตอร์ (Sensor-transmitter) [13]

$$H(s) = \frac{K_t}{\tau_t s + 1} \quad (5.11)$$

เมื่อ

K_t คืออัตราขยายของเซ็นเซอร์ทรานส์มิเตอร์ (Sensor-transmitter)

τ_t คือค่าคงที่ทางเวลาของการตรวจวัด

K_{sp} สามารถเปลี่ยนแปลงได้โดยการปรับค่าจากผู้ใช้งานเพื่อคุณกับอุณหภูมิเป้าหมาย ดังนั้น K_{sp} จะอยู่ในส่วนของสัญญาณเป้าหมาย โดยปกติจะมีการสอบเทียบให้มีหน่วยเหมือนกับการเปลี่ยนแปลงของตัวควบคุม

จากรูปที่ 5.10 เราสมมุติให้อัตราการไหลของน้ำและค่าที่เป้าหมาย (Set Point) ไม่มีการเปลี่ยนแปลงเพราะฉะนั้น

$$F(s) = 0 \quad (5.12)$$

$$T_o^{set}(s) = 0 \quad (5.13)$$

เมื่อเราแทนค่าตัวแปรในสมการที่ 5.7 เราสามารถหาค่า $T_o(s)$ โดยวิธีการยุบบล็อกจะได้

$$T_o(s) = G_s(s)G_v(s)G_c(s)[-H(s)T_o(s)] + G_T(s)T_i(s) \quad (5.14)$$

เราสามารถจัดรูปแบบสมการที่ 5.14 ใหม่ได้ดังนี้

$$\frac{T_o(s)}{T_i(s)} = \frac{G_T(s)}{1 + H(s)G_s(s)G_v(s)G_c(s)} \quad (5.15)$$

จากรูปที่ 5.10 เราให้ $T_i(s) = 0$ และ $T_o^{set}(s) = 0$ ดังนั้นทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันระหว่างการไหลเข้าของน้ำและอุณหภูมิออกของน้ำที่ออก

$$- \frac{T_o(s)}{F(s)} = \frac{G_F(s)}{1 + H(s)G_s(s)G_v(s)G_c(s)} \quad (5.16)$$

จากรูปที่ 5.10 เมื่อเรากำหนด $T_i(s) = 0$ และ $F(s) = 0$ จากสมการที่กล่าวมาเราสามารถทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของระหว่างค่าเป้าหมาย (Set Point) กับอุณหภูมิของน้ำที่ออก

$$\frac{T_o(s)}{T_o^{set}(s)} = \frac{G_s(s)G_v(s)G_c(s)K_{sp}}{1 + H(s)G_s(s)G_v(s)G_c(s)} \quad (5.17)$$

ถ้าเราสมมุติให้อุณหภูมิของน้ำที่ออก $T_o(s)$ ในรูปที่ 5.10 ไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าดังนั้นเราจะได้

$G_F(0) = K_F$ คืออัตราขยายในสภาวะคงที่วงเปิดของกระบวนการเปลี่ยนแปลงตามอัตราการไหลของน้ำ

$G_s(0) = K_s$ คืออัตราขยายในสภาวะคงที่วงเปิดของกระบวนการเปลี่ยนแปลงตามอัตราการใช้ของไอน้ำ

$G_v(0) = K_v$ คืออัตราขยายของวาล์วควบคุม

$G_T(0) = K_T$ คืออัตราขยายในสภาวะคงที่วงเปิดของกระบวนการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของไหลเข้า

สำหรับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนในรูปที่ 5.10 สมการสมดุลพลังงานในสภาวะที่ T_o คงที่ เราจะได้ว่า

$$T_o = T_i + \frac{F_s \lambda}{FC_p} \quad (5.18)$$

ดังนั้นจากรูปที่ 5.8 เราพิจารณากระบวนการที่มีการเปลี่ยนแปลงด้วยวิธีเชิงเส้น (Linearization) เราจะได้ว่า [11]

$$K_F = \frac{\partial T_o}{\partial F} = -\frac{\bar{F}_s \lambda}{\bar{F}^2 C_p}, K_T = \frac{\partial T_o}{\partial T_i}, K_s = \frac{\partial T_o}{\partial T_i} = \frac{\lambda}{\bar{F} C_p}$$

เมื่อ

\bar{F} คืออัตราการไหลของน้ำในสภาวะคงที่, Kg/s

\bar{F}_s คืออัตราการไหลของไอน้ำในสภาวะคงที่, Kg/s

เพราะฉะนั้นด้วยวิธีการเชิงเส้นและลาปลาซ (Linearization and Laplace Transformation)

กับสมการที่ 5.1 และ 5.2 เราจะได้ว่า

$$T_o(s) = \frac{K_F}{\tau s + 1} F(s) + \frac{K_i}{\tau s + 1} T_i(s) + \frac{K_s}{\tau s + 1} T_s(s) \quad (5.19)$$

$$T_s(s) = \frac{1}{\tau_c s + 1} T(s) + \frac{K_w}{\tau_c s + 1} F_s(s) \quad (5.20)$$

โดย

$$K_i = \frac{\bar{f} \rho C_p}{UA + \bar{f} \rho C_p}; \tau_c = \frac{C_M}{UA}; \tau = \frac{V \rho C_p}{UA + \bar{f} \rho C_p}; K_s = \frac{UA}{UA + \bar{f} \rho C_p}; K_F = \frac{\rho C_p (\bar{T}_i - \bar{T})}{UA + \bar{f} \rho C_p};$$

$$K_w = \frac{\lambda}{UA}$$

เมื่อ

K_i คืออัตราขยายวงเปิดของกระบวนการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิขาเข้าของน้ำ

K_F คืออัตราขยายวงเปิดของกระบวนการเปลี่ยนแปลงตามอัตราการใช้ของน้ำ

K_s คืออัตราขยายวงเปิดของกระบวนการเปลี่ยนแปลงตามอัตราการใช้ของไอน้ำ

K_w คืออัตราขยายวงเปิดของกระบวนการที่เกิดจากความร้อนแฝงของไอน้ำต่อพื้นที่และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

K_{sp} คืออัตราการการคูณสำหรับอุณหภูมิเป้าหมาย

τ คือค่าคงตัวทางเวลาซึ่งสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนและพื้นที่ส่งผ่านความร้อนและการไหลของน้ำ

τ_c คือค่าคงตัวทางเวลาซึ่งสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุความร้อนของวัสดุที่ใช้แลกเปลี่ยนความร้อนกับพื้นที่ในการส่งผ่านความร้อนและสัมประสิทธิ์ถ่ายเทความร้อนรวมและความหมายของตัวแปรต่างๆดังนี้

\bar{f} คืออัตราการไหลของน้ำในสถานะคงที่, Kg/s

ρ คือความหนาแน่นน้ำ, Kg/m^3

C_p คือค่าความจุความร้อนของน้ำ, $J/Kg^{\circ}C$

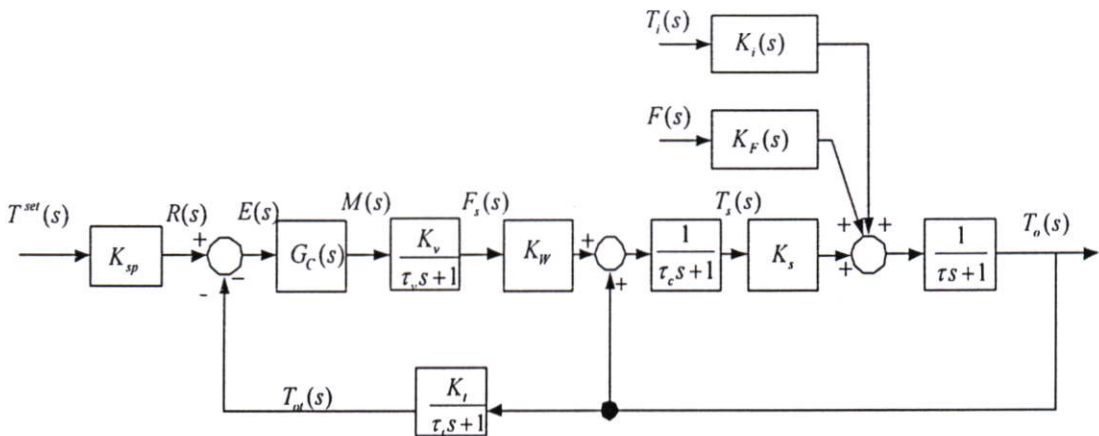
U คือสัมประสิทธิ์ถ่ายเทความร้อนรวม, $W/m^2^{\circ}C$

A คือพื้นที่ในการส่งผ่านความร้อน, m^2

C_M คือค่าความจุความร้อนของวัสดุที่ใช้แลกเปลี่ยนความร้อน, $J/^{\circ}C$

V คือปริมาตรอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน, m^3

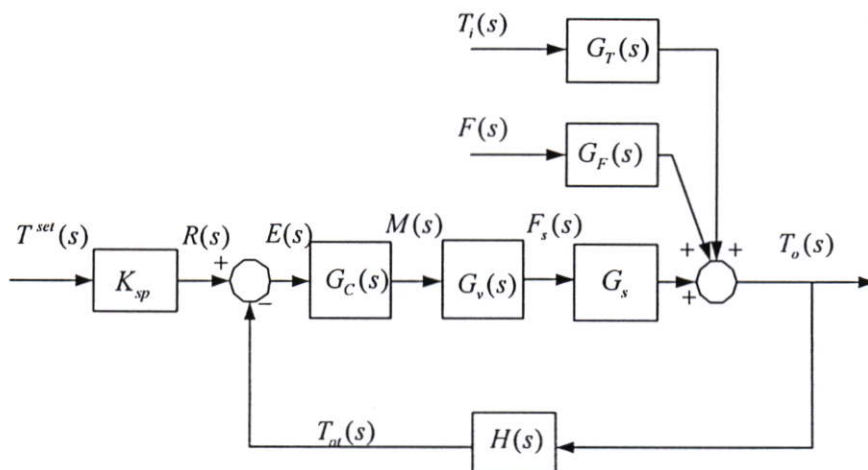
λ คือความร้อนแฝงของไอน้ำ, J/Kg



รูปที่ 5.11 แสดงบล็อกไดอะแกรมวงรอบของการควบคุมอุณหภูมิอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

จากรูปที่ 5.11 หลังจากที่พิจารณาค่าคงที่ทางเวลาโดยอาศัยกฎทางฟิสิกส์แล้ว และพิจารณาอุปกรณ์ความร้อนในสถานะที่อุณหภูมิของน้ำที่ออกจากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนไม่มีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นเราสามารถนำค่าคงที่ต่างๆใส่ในบล็อกไดอะแกรมดังรูปที่ 5.11 เพื่อพิจารณาผลตอบสนองทางเวลาของกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน โดยเราอาศัยการรวบรวมบล็อกตาม

กฎการขบรวม พิจารณาทรานส์เฟอ์ฟังก์ชันของแต่ละอินพุตที่เข้าระบบ โดยในรูปที่ 5.11 เป็นการแสดงค่าคงที่ทางเวลาของอุปกรณ์ในแต่ละตัวในระบบการแลกเปลี่ยนความร้อน



รูปที่ 5.12 แสดงการขบรวมบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 5.11

จากรูปที่ 5.12 เป็นการขบรวมบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 5.11 ให้ดูง่ายขึ้น ดังนั้นเราสามารถหาทรานส์เฟอ์ฟังก์ชันในรูปที่ 5.11 ดังนี้ [11]

ทรานส์เฟอ์ฟังก์ชันของระบบการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของน้ำที่ออกและอุณหภูมิของน้ำที่เข้า

$$G_T(s) = \frac{K_i(\tau_c s + 1)}{(\tau s + 1)(\tau_c s + 1) - K_s} \quad (5.21)$$

ทรานส์เฟอ์ฟังก์ชันของระบบการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของน้ำที่ออกและการอัตราไหลเข้าของน้ำ

$$G_F(s) = \frac{K_F(\tau_c s + 1)}{(\tau s + 1)(\tau_c s + 1) - K_s} \quad (5.22)$$

ทรานส์เฟอ์ฟังก์ชันของระบบการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของน้ำที่ออกและการไหลของไอน้ำ

$$G_s(s) = \frac{K_W K_s}{(\tau s + 1)(\tau_c s + 1) - K_s} \quad (5.23)$$

จากบล็อกไดอะแกรมรูปที่ 5.12 สามารถหาทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของแต่ละอินพุตได้ดังนี้

ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันอุณหภูมิของน้ำที่ออกจากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนและอุณหภูมิของน้ำที่เข้าอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

$$\frac{T_o(s)}{T_i(s)} = \frac{G_T(s)}{1 + H(s)G_c(s)G_v(s)G_s(s)} \quad (5.24)$$

ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของการไหลเข้าของน้ำและอุณหภูมิของน้ำที่เข้าอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

$$\frac{T_o(s)}{F(s)} = \frac{G_F(s)}{1 + H(s)G_c(s)G_v(s)G_s(s)} \quad (5.25)$$

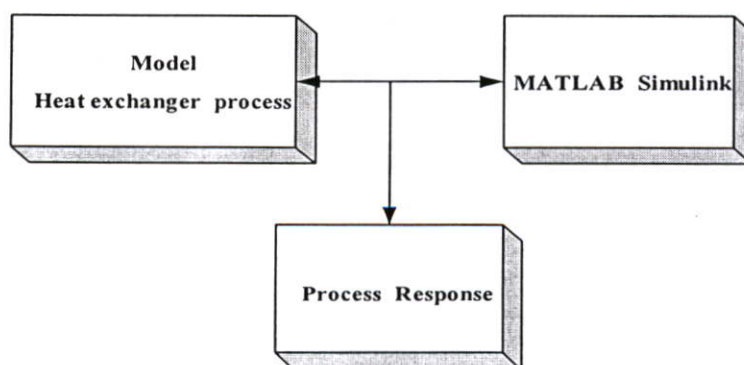
ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของค่าเป้าหมาย(Set point) และอุณหภูมิของน้ำที่เข้าอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

$$\frac{T_o(s)}{T^{set}(s)} = \frac{K_{sp}G_c(s)G_v(s)G_s(s)}{1 + H(s)G_c(s)G_v(s)G_s(s)} \quad (5.26)$$

5.3 โครงสร้างโปรแกรมใช้งาน

โปรแกรม Visual Basic 6.0 เป็นโปรแกรมที่ Run และสร้างบนระบบปฏิบัติการ Windows ซึ่งเป็นระบบที่เข้าใจได้ง่ายต่อผู้ใช้งาน โปรแกรมจะแสดง Dialog Box สำหรับใช้งานซึ่งผู้ใช้โปรแกรม และไม่จำเป็นต้องศึกษากระบวนการโดยละเอียด แต่ต้องการนำผลการออกแบบไปใช้งานในสถานะต่อไปสำหรับโปรแกรมแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ

1. ส่วนที่คำนวณเกี่ยวกับพื้นที่ในการส่งผ่านความร้อน อุณหภูมิขาออกของไหล และอัตราการส่งผ่านความร้อนทั้งหมด
2. ส่วนการหาค่าคงที่ทางเวลา เพื่อหาค่าตอบสนองของกระบวนการ



รูปที่ 5.13 รูปแบบของการหาผลตอบสนองอุณหภูมิของกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน

ใส่ข้อกำหนด

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน		$W / m^2 K$
Steam inlet		kg / s
Fluid inlet		kg / s
อุณหภูมิ steam outlet		C
อุณหภูมิ fluid inlet		C
อุณหภูมิ steam inlet		C
ความร้อนจำเพาะ fluid		J / kgK
ความร้อนจำเพาะ steam		J / kgK

รูปที่ 5.14 ลักษณะโปรแกรมสำหรับการใช้งานหน้าต่างสำหรับป้อนค่าพารามิเตอร์

ตารางสัมประสิทธิ์ การถ่ายเทความร้อน
ตารางความร้อน จำเพาะ
Matlab
Chemcad
Exit

รูปที่ 5.15 แสดงส่วนที่เชื่อมโยงในการกำหนดค่าและโปรแกรม

Form3

ความร้อนจำเพาะของน้ำ		ความร้อนจำเพาะของอากาศที่ความดันบรรยากาศ		ความร้อนจำเพาะของไอน้ำ	
อุณหภูมิ (c)	ความร้อนจำเพาะ (J/kgK)	อุณหภูมิ (K)	ความร้อนจำเพาะ (J/kgK)	อุณหภูมิ (K)	ความร้อนจำเพาะ (J/kgK)
0	4218	250	1005	380	2060
20	4182	300	1006	400	2014
40	4178	350	1009	450	1980
60	4184	400	1014	500	1985
80	4196	450	1021	550	1937
100	4216	500	1030	600	2026
120	4250	550	1039	650	2056
140	4283	600	1055	700	2085
160	4342	650	1063	750	2119
180	4417	700	1075	800	2152
200	4505	750	1086	850	2186
220	4610	800	1098		
240	4756	850	1110		
260	4949	900	1121		
280	5208	950	1132		
300	5728	1000	1142		
		1100	1161		
		1200	1179		
		1300	1197		

รูปที่ 5.16 แสดงค่าความร้อนจำเพาะที่สามารถดูจากโปรแกรม

Form2

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในกรณีต่างๆ โดยประมาณ (Kreith [2])

ประเภทของของไหล	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน
-	
ระหว่างน้ำกับอากาศที่มีความดัน	60-180
ระหว่างน้ำกับน้ำ	800-1500
ระหว่างน้ำกับน้ำมันเบนซิน	300-500
ระหว่างน้ำกับแอลกอฮอล์	250-800
ระหว่างน้ำกับน้ำมันหล่อลื่น	100-300
ระหว่างน้ำกับฟิวลอน-12 ที่กำลังความแน่น	300-900
ระหว่างน้ำกับอลูมิเนียมที่กำลังความแน่น ทวีคูณ	800-1500

รูปที่ 5.17 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในโปรแกรม

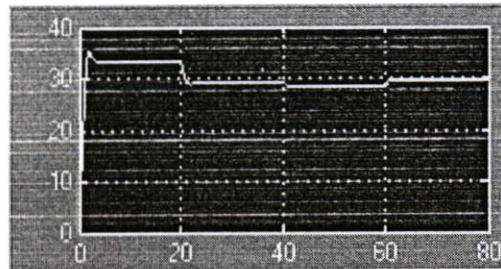
อัตราการถ่ายเทความร้อน(Q)	<input type="text"/>	W	Result
พื้นที่ถ่ายเทความร้อน (A)	<input type="text"/>	m^2	
อุณหภูมิ fluid outlet (T _{out})	<input type="text"/>	C	Clear

รูปที่ 5.18 แสดงส่วนที่แสดงผลการคำนวณ

อัตราการไหลเข้าของของไหล	<input type="text"/>	kg / s	Result
ความร้อนจำเพาะของไหล (c)	<input type="text"/>	J / kgK	
อัตราการไหลออกของของไหลสภาวะคงที่	<input type="text"/>	kg / s	
$RC = \tau$		<input type="text"/>	Clear

รูปที่ 5.19 หน้าต่างสำหรับการหาค่า Time constant

- PID controller
- Feed forward
- Lookup table +PID



รูปที่ 5.20 แสดงส่วนของแสดงผลการควบคุมแต่ละระบบ

5.4 การใช้งานโปรแกรม

ขั้นตอนการใช้งานโปรแกรมมีรายละเอียดคือ

1. เปิดโปรแกรมการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ขึ้นมาหลังจากทำการติดตั้งโปรแกรมเรียบร้อยแล้ว
2. ใส่ข้อกำหนดในการออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งสามารถดูเปรียบเทียบกับรูปภายในโปรแกรมด้านข้าง

- สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน
- อัตราการไหลของไอน้ำทางด้านขาเข้า
- อัตราการไหลของน้ำทางด้านขาเข้า
- อุณหภูมิของไอน้ำทางด้านขาออก
- อุณหภูมิของน้ำด้านขาเข้า
- อุณหภูมิของไอน้ำทางด้านขาเข้า
- ความร้อนจำเพาะของไอน้ำและของน้ำ

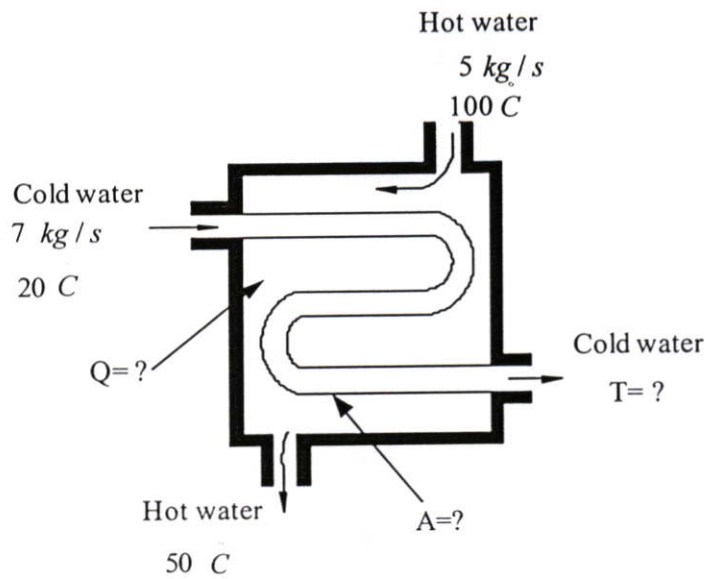
3. เมื่อป้อนข้อกำหนดในข้อสองเรียบร้อยแล้ว ก็กดปุ่ม Result เพื่อดูค่าผลการออกแบบ เมื่อต้องการที่จะหาค่าคงที่ทางเวลา (Time constant) เพื่อต้องการที่จะนำค่าไปใช้ใน โปรแกรม Matlab สามารถป้อนค่าของอัตราการไหลของน้ำที่กำลังพิจารณาและความร้อนจำเพาะและอัตราการไหลในสภาวะคงที่ด้านออกจากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจากนั้นให้กดปุ่ม Result เพื่อหาค่าคงที่ทางเวลา เมื่อผู้ออกแบบได้ค่าคงที่ทางเวลานำค่าที่ได้ไปใช้ใน โปรแกรม Matlab Simulink เมื่อได้ค่าดังกล่าวก็สามารถเลือกระบบควบคุมที่ประยุกต์ใช้ควบคุมให้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมีประสิทธิภาพ บล็อกการต่อใช้งานระบบควบคุม 3 ระบบซึ่งสามารถนำไปใช้คือ

1. ระบบควบคุมแบบ PID และมีระบบ Feedback control ร่วมด้วย
2. ระบบควบคุมแบบ Feed forward ร่วมกับ Feedback control
3. ระบบควบคุมแบบ PID ร่วมกับ Lookup table

นอกจากนี้ยังสามารถคลิกเลือกดูตัวอย่าง และผลตอบสนองระบบควบคุม แต่ละแบบที่อยู่ภายใต้เงื่อนไขเดียวกันทั้งหมด

5.5 ตัวอย่างการใช้งานโปรแกรม

ตัวอย่างที่ 1 กำหนดให้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างน้ำเย็นกับน้ำร้อน โดยมีอัตราการไหลเข้าของน้ำเย็นก่อนเข้าอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน 7 kg/s ที่อุณหภูมิ 20°C และอุณหภูมิของน้ำร้อนก่อนเข้าอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเป็น 100°C และไหลออกที่อุณหภูมิ 50°C เมื่อน้ำร้อนมีอัตราการไหล 5 kg/s จากข้อมูลให้หาอัตราการถ่ายเทความร้อน พื้นที่การถ่ายเทความร้อน อุณหภูมิของน้ำเย็นที่ออกจากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ดังนั้นจากข้อมูลที่ให้มา



เมื่อพิจารณากระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนภายใต้เงื่อนไข

- ไม่มีน้ำร้อนและน้ำเย็น เกิดการรั่วไหลออกจากกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนที่กำลังพิจารณา
- ไม่มีของไหลชนิดอื่นๆ ไหลเข้ากระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนที่พิจารณา
- ไม่มีการคิดผลจากการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์และพลังงานศักย์

จากโปรแกรมเลือกคดปุ่มตารางสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่น้ำร้อนกับน้ำเย็น ได้ค่า

Form2

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในกรณีต่างๆ โดยประมาณ (Kreith [2])

ประเภทของของไหล	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน
ระหว่างน้ำกับอากาศที่มีความดัน	60-180
ระหว่างน้ำกับน้ำ	800-1500
ระหว่างน้ำกับน้ำมันเบนซิน	300-500
ระหว่างน้ำกับแอลกอฮอล์	250-800
ระหว่างน้ำกับน้ำมันหล่อลื่น	100-300
ระหว่างน้ำกับฟลูออ-12 ที่กำลังความดัน	300-900
ระหว่างน้ำกับอะมโมเนียที่กำลังความดัน หรืออะเทม	800-1500

รูปที่ 5.21 แสดงการเลือกสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

- น้ำร้อนทางด้านขาเข้า 5 kg/s
- น้ำเย็นทางด้านขาเข้า 7 kg/s
- อุณหภูมิน้ำร้อนทางด้านขาออก 50 °C
- อุณหภูมิน้ำร้อนทางด้านขาเข้า 100 °C
- อุณหภูมิน้ำเย็นทางด้านขาเข้า 20 °C

จากโปรแกรมเลือกคัปมตารางความร้อนจำเพาะของน้ำร้อนและน้ำเย็น โดยเลือกค่าที่อุณหภูมิ 20 °C ได้ค่า 4182 J/kg°C เมื่อใส่ค่าครบแล้วให้คัปม Result จะได้ค่าในรูปที่ 5.22

อุณหภูมิ (c)	ความร้อนจำเพาะ (J/kgK)
0	4218
20	4182
40	4178
60	4184
80	4196
100	4216
120	4250
140	4283
160	4342
180	4417
200	4505
220	4610
240	4756

รูปที่ 5.22 แสดงการเลือกความร้อนจำเพาะจากตาราง

ใส่ข้อกำหนด

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน	1500	W / m ² K
Steam inlet	5	kg / s
Fluid inlet	7	kg / s
อุณหภูมิ steam outlet	50	°C
อุณหภูมิ fluid inlet	20	°C
อุณหภูมิ steam inlet	100	°C
ความร้อนจำเพาะ fluid	4182	J / kgK
ความร้อนจำเพาะ steam	4182	J / kgK

อัตราการถ่ายเทความร้อน(Q)	1045500	W
พื้นที่ถ่ายเทความร้อน (A)	13.6727689840087	m ²
อุณหภูมิ fluid outlet (T _{out})	55.7142857142857	°C

รูปที่ 5.23 แสดงเมื่อทำการป้อนค่าที่กำหนดต่างๆ

เมื่อใส่ค่าครบแล้วให้กดปุ่ม Result จะได้ค่าดังนี้คือ

- อัตราการถ่ายเทความร้อน(Q) คือ 1045000 W
- พื้นที่ที่ใช้ถ่ายเทความร้อน คือ 13.67 m²
- อุณหภูมิของน้ำที่ออกจากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนคือ 55.71 °C

5.6 การจำลองการทำงาน

จากรูปที่ 5.8 และบล็อกไดอะแกรมรูปที่ 5.11 หาผลตอบสนองทางเวลาในสภาวะคงที่ โดยพิจารณาของอุณหภูมิของน้ำที่ออกจากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน โดยมีเงื่อนไขของค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการดังต่อไปนี้ [10]

$$K_{sp} = K_i = 1 ; \tau_i = 0.75 ; \tau_v = ; 0.20 ; \tau = 4.93 ; \tau_c = 0.524 ; K_F = -2.06$$

$$K_i = 0.617 ; K_s = 0.383 ; K_w = 1.905 ; K_c = 1 ; \tau_i = 1 ; \tau_D = 1$$

โดยค่าต่างๆที่สมมุติขึ้นเพื่อการจำลองการทำงาน

$$G_T(s) = \frac{K_i(\tau_c s + 1)}{(\tau s + 1)(\tau_c s + 1) - K_s} = \frac{(0.323s + 0.617)}{(4.93s + 1)(0.524s + 1) - 0.383}$$

$$G_F(s) = \frac{K_F(\tau_c s + 1)}{(\tau s + 1)(\tau_c s + 1) - K_s} = \frac{-(1.07s + 2.06)}{(4.93s + 1)(0.524s + 1) - 0.383}$$

$$G_s(s) = \frac{K_w K_s}{(\tau s + 1)(\tau_c s + 1) - K_s} = \frac{0.72}{(4.93s + 1)(0.524s + 1) - 0.383}$$

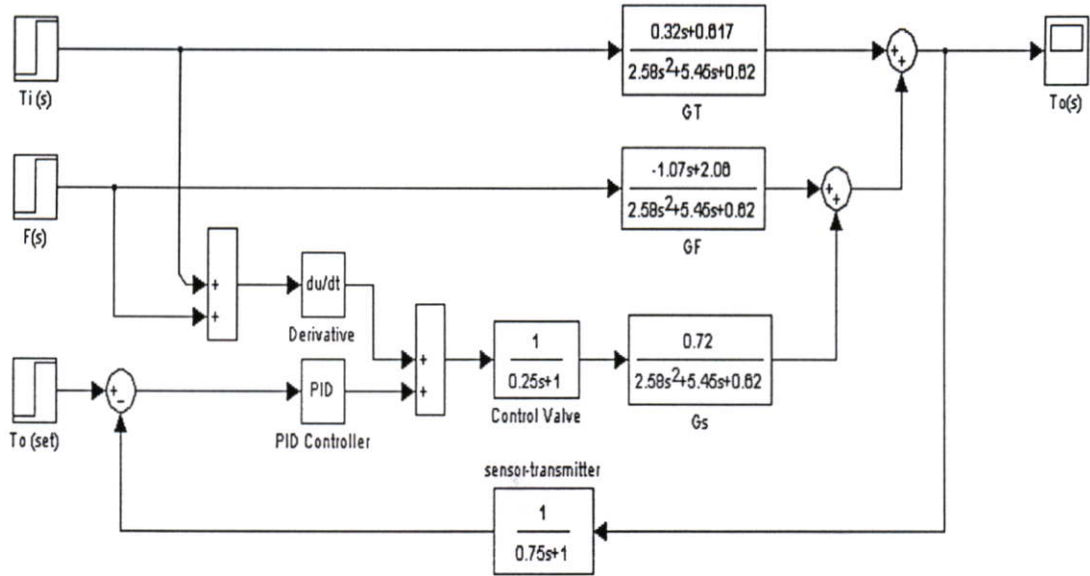
$$G_c(s) = K_c \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_D s\right) = \left(1 + \frac{1}{s} + s\right)$$

$$G_v(s) = \frac{K_v}{\tau_v s + 1} = \frac{1}{0.20s + 1}$$

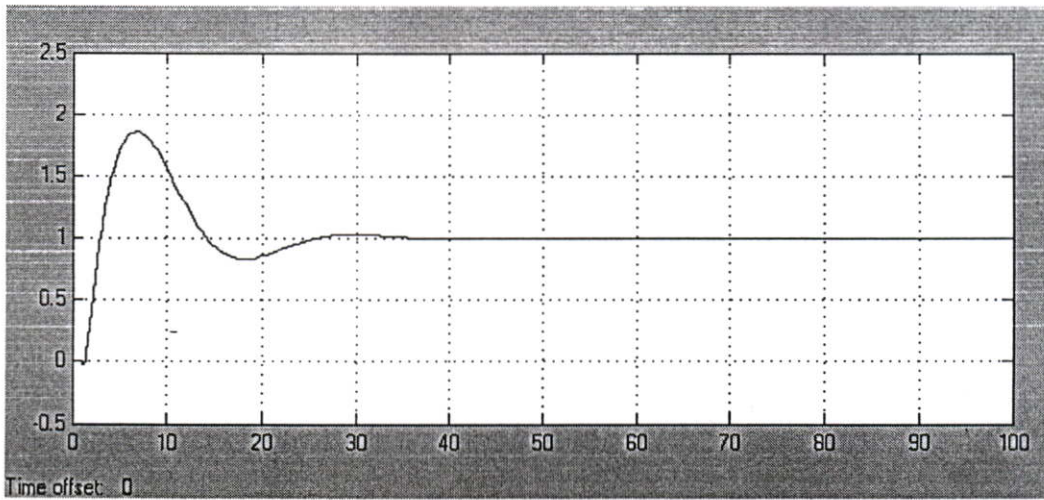
$$H(s) = \frac{K_i}{\tau_i s + 1} = \frac{1}{0.75s + 1}$$

ใช้โปรแกรม Matlab Simulink เพื่อดูผลการตอบสนองด้านเอาต์พุตโดยใช้ค่าเงื่อนไขเดียวกันเพื่อดูเปรียบเทียบระบบควบคุมแต่ละแบบคือควบคุมแบบป้อนล่วงหน้า(Feed forward) ระบบควบคุมแบบ PID และเพื่อให้การควบคุมที่ดีขึ้นเสนอการควบคุมแบบ PID ร่วมกับ Lookup table เพื่อนำไปเปรียบเทียบข้อแตกต่างของระบบ แต่ละแบบภายใต้เงื่อนไขอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนตัวเดียวกัน โดยได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อดูผลตอบสนองทางด้านเอาต์พุตโดยใช้โปรแกรม Matlab Simulink มีค่าดังต่อไปนี้

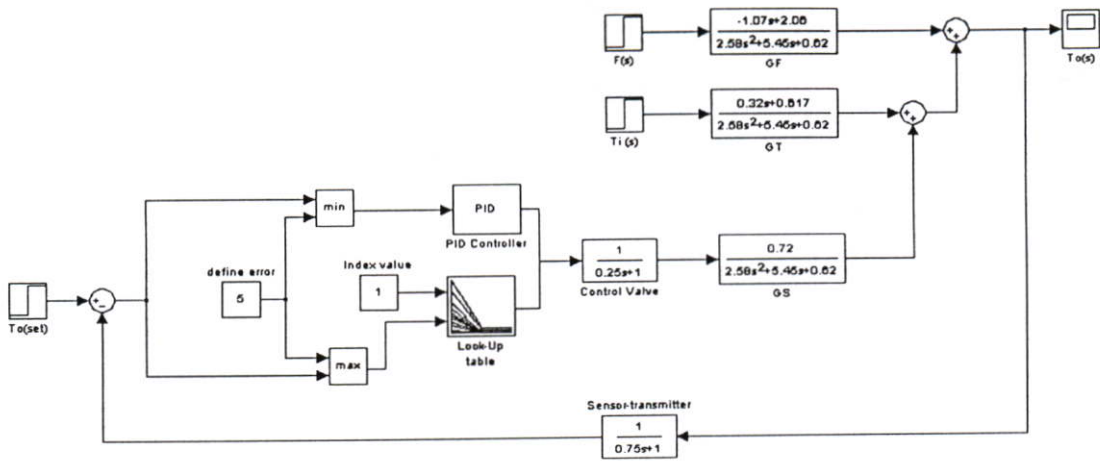
1. ใช้ค่า $\varepsilon_s = 5$ เมื่อ $\varepsilon > 5$ จะทำงานในโหมดของ Lookup table
2. ใช้ค่า Lookup table ในการควบคุม K_s ดังนี้



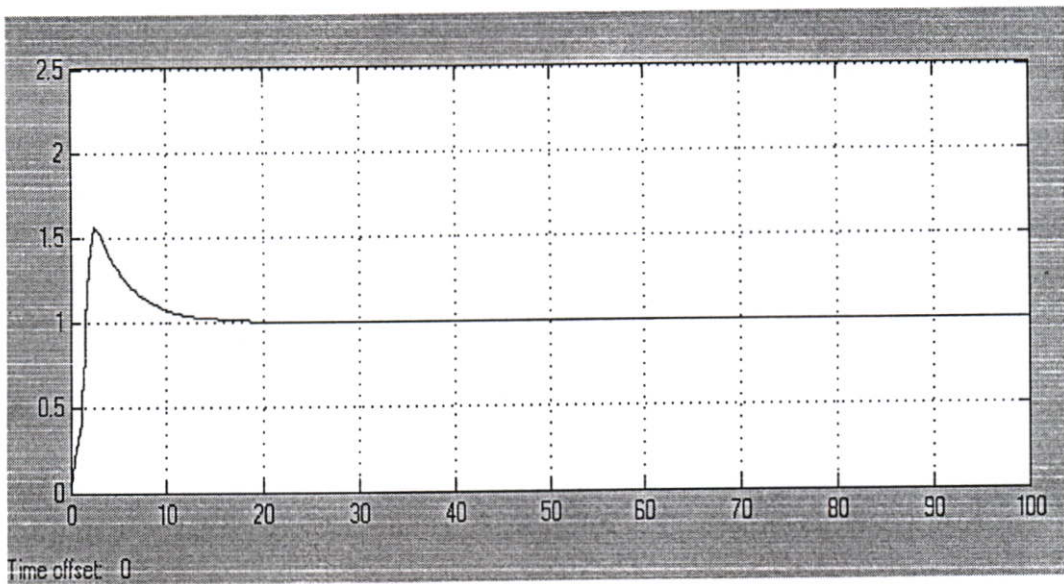
รูปที่ 5.26 แสดงการต่อบล็อกใน Matlab Simulink (Feedback+Feedforward)



รูปที่ 5.27 แสดงการผลตอบสนอง Unit Step Function (Feed forward + Feedback)



รูปที่ 5.28 แสดงการต่อบล็อกใน Matlab Simulink (Feedback+Look up table)



รูปที่ 5.29 แสดงการผลตอบสนอง Unit Step Function (Feedback+ Look up table)

จากผลการจำลองการทำงานที่ผ่านมาเป็นวิธีหนึ่งในการปรับปรุงสมรรถนะการควบคุม อุณหภูมิของน้ำที่ได้รับการแลกเปลี่ยนความร้อนจากไอน้ำ ซึ่งในการทดลองนั้นใช้เงื่อนไขในการทำงานเดียวกันทั้งหมด โดยจากรูปที่ 5.25 รูปที่ 5.27 และรูปที่ 5.29 แสดงให้เห็นผลตอบสนองทางเวลาของอุณหภูมิของกระบวนแลกเปลี่ยนความร้อน โดยใช้ระบบควบคุมในแต่ละแบบเปรียบเทียบกับระบบควบคุมที่ใช้ตัวควบคุมแบบ PID เพียงอย่างเดียว โดยในการทดลองได้ใช้วิธีการปรับตัวควบคุมแบบ PID ด้วยวิธีการทดลองผิดทดลองถูก (Trial and error method) เมื่อได้กราฟผลตอบสนองดังรูปที่ 5.25 จากนั้นจะใช้ค่าพารามิเตอร์ของ PID (P=2 I=1 D=1) ค่าเดิมในการทดลองระบบควบคุมแบบป้อนล่วงหน้าและแบบเทคนิคการเปิดตาราง ซึ่งจากการทดลองได้ผลดังนี้

1. Rise time และ Fall time เร็วกว่าการควบคุมด้วย PID เพียงอย่างเดียวเมื่อมีการประยุกต์ใช้ระบบการควบคุมแบบ (Feed forward + Feedback) และ (Feedback+ Lookup table)

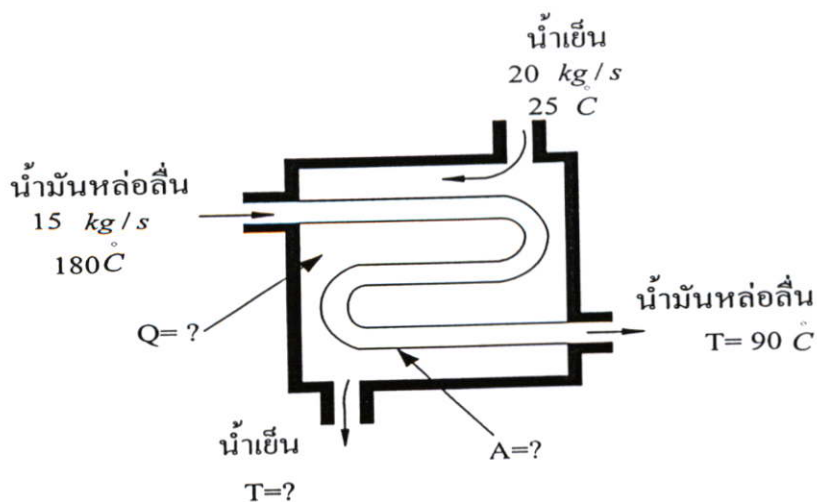
2. เกิด Overshoot น้อยลง แต่ไม่จำเป็นว่าการใช้ PID ต้องเกิด Overshoot เสมอไปขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ของ PID ซึ่งถ้าไม่ต้องการ Overshoot ก็ทำได้แต่จะทำให้ช่วง Rise time นานขึ้น

ตารางที่ 5.2 เปรียบเทียบสมรรถนะจากรูปที่ 5.25 รูปที่ 5.27 รูปที่ 5.29

การควบคุม	Overshot (%)	Rise time (sec)	Setting time (sec)
PID	40	5.5	42
Feedforward	20	5	32
PID+Lookup table	10	5	14

5.7 เปรียบเทียบโปรแกรมที่จัดทำขึ้นกับโปรแกรม S & T Hex v.1.4 และการคำนวณ

ตัวอย่างที่ 2 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนใช้ในการลดอุณหภูมิระหว่างน้ำเย็นกับน้ำมันหล่อลื่น โดยมีอัตราการไหลเข้าของน้ำมันก่อนเข้าอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน 15 kg/s ที่อุณหภูมิ 180°C และอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นก่อนเข้าอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเป็น 25°C โดยให้น้ำมันไหลออกที่อุณหภูมิ 90°C เมื่อน้ำมันมีอัตราการไหล 20 kg/s จากข้อมูลให้หาอัตราการถ่ายเทความร้อน พื้นที่การถ่ายเทความร้อนอุณหภูมิของน้ำที่ออกจากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน



เมื่อพิจารณากระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนภายใต้เงื่อนไข

- ไม่มีน้ำมันหล่อลื่นและน้ำเย็นไหลเกิดการรั่วไหลออกจากกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนที่กำลังพิจารณา
- ไม่มีของไหลชนิดอื่นๆไหลเข้ากระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนที่พิจารณา
- ไม่มีการคิดผลจากการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์และพลังงานศักย์

5.7.1 ใช้วิธีการคำนวณ

พื้นฐานการคำนวณและความหมายของตัวแปรต่างที่จะใช้ในการคำนวณดังนี้ [12]

- อัตราส่วนของความจุความร้อน (Capacity Ratio, C)

อัตราส่วนของความจุความร้อน (C) ของของไหลในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนคืออัตราส่วนของผลคูณของ อัตราการไหลของของไหล (m) กับความร้อนจำเพาะ (c) ของของไหลทั้งสองในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน โดยให้ค่าที่ต่ำกว่าเป็นเศษ และค่าที่สูงกว่าเป็นส่วน ซึ่งจะเขียนได้ดังนี้คือ

สำหรับ $m_h c_h > m_c c_c$

$$C = \frac{m_c c_c}{m_h c_h} \quad \text{หรือ} \quad C = \frac{(mc)_{\min}}{(mc)_{\max}}$$

สำหรับ $m_h c_h < m_c c_c$

$$C = \frac{m_h c_h}{m_c c_c} \quad \text{หรือ} \quad C = \frac{(mc)_{\min}}{(mc)_{\max}}$$

เมื่อ

m_c เป็นอัตราการไหลของของไหลเย็น

m_h เป็นอัตราการไหลของของไหลร้อน

- ประสิทธิภาพ (Effectiveness) ของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (E)

ประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนคือ อัตราส่วนระหว่างความร้อนที่ถ่ายเทจริงๆ ในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนต่อความร้อนที่อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจะถ่ายเทได้มากที่สุด

สำหรับในกรณีที่ $m_h c_h > m_c c_c$

$$E = \frac{m_h c_h (T_{hi} - T_{ho})}{(mc)_{\min} (T_{hi} - T_{ci})}$$

สำหรับในกรณีที่ $m_h c_h < m_c c_c$

$$E = \frac{m_c c_c (T_{co} - T_{ci})}{(mc)_{\min} (T_{hi} - T_{ci})}$$

เมื่อ

(T_{ci}) เป็นค่าของของอุณหภูมิของของไหลเย็นด้านเข้า

(T_{hi}) เป็นค่าของของอุณหภูมิของของไหลร้อนด้านเข้า

(T_{co}) เป็นค่าอุณหภูมิของของไหลเย็นด้านออก

(T_{ho}) เป็นค่าอุณหภูมิของของไหลร้อนด้านออก

- นัมเบอร์ ออฟ ทรานสเฟอร์ยูนิต (Number of Transfer Unit - NTU)

NTU คืออัตราส่วนผลคูณของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (U) และพื้นที่อุปกรณ์แลกเปลี่ยน

ความร้อน (A) ต่อผลคูณของอัตราการไหล (m) และความร้อนจำเพาะ (c) ที่มีค่าน้อย

สำหรับในกรณีนี้ $m_h c_h > m_c c_c$

$$NTU = \frac{UA}{m_c c_c}$$

สำหรับในกรณีนี้ $m_h c_h < m_c c_c$

$$NTU = \frac{UA}{m_h c_h}$$

โดยทั่วไปแล้วจะเขียนในรูปแบบสมการดังนี้

$$NTU = \frac{UA}{(mc)_{\min}}$$

ความสัมพันธ์ระหว่าง E, C และ NTU ในกรณีของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่เป็นแบบขนานและแบบสวนทาง ความสัมพันธ์ในกรณีต่างๆ สามารถสรุปได้ดังนี้

$$E = 1 - e^{-NTU}$$

สำหรับการคำนวณค่าของอุณหภูมิของของไหลที่ออกจากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจากสมการ

$$T_{ho} = T_{hi} - Q / m_h c_h$$

$$T_{co} = T_{ci} - Q / m_c c_c$$

สำหรับอัตราการถ่ายเทความร้อนสามารถคำนวณได้จากอัตราการไหลและอุณหภูมิของของไหลดังนี้

$$Q = m_c c_c (\Delta T)_c = m_h c_h (\Delta T)_h$$

จากตัวอย่างที่ 2 เลือกค่าข้อกำหนดต่างที่ต้องใช้ในการคำนวณ โดยค่าสัมประสิทธิ์การแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างน้ำกับน้ำมันหล่อลื่นคือ $300 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ และความร้อนจำเพาะของน้ำมันหล่อลื่นคือ $2220 \text{ J/kg }^\circ\text{C}$ ของน้ำคือ $4182 \text{ J/kg }^\circ\text{C}$ นำค่าต่างไปคำนวณการคำนวณจะเป็นขั้นตอนดังนี้

$$(1) \text{ หาค่า } C = \frac{(mc)_{\min}}{(mc)_{\max}} \text{ และ } NTU = \frac{UA}{(mc)_{\min}}$$

$$(2) \text{ จากค่า } C \text{ และ } NTU \text{ ค่าของ } E \text{ หาได้จากสมการ } E = 1 - e^{-NTU}$$

(3) ค่าของ E หาได้จาก

$$E = (\text{ค่าการถ่ายเทความร้อน}) / (\text{ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงสุด})$$

(4) จำนวนค่าของอุณหภูมิของของไหลที่ออกจากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจากสมการ

$$T_{ho} = T_{hi} - Q / m_h c_h$$

$$T_{co} = T_{ci} - Q / m_c c_c$$

(5) อัตราการถ่ายเทความร้อนสามารถคำนวณได้จากอัตราการไหลและอุณหภูมิของของไหล ดังนี้

$$Q = m_c c_c (\Delta T)_c = m_h c_h (\Delta T)_h$$

จากขั้นตอนดังกล่าว (T_{ci}) และ (T_{hi}) เป็นค่าของของอุณหภูมิของน้ำเย็นและน้ำมันตอนขาเข้า และ (m_c) และ (m_h) คือ อัตราการไหลของน้ำเย็นและของน้ำมัน (c) คือค่าความร้อนจำเพาะของของน้ำมันและน้ำเย็น

เพราะฉะนั้นจากข้อมูลที่ให้

$$m_h c_h = 15 \times 2,220 = 33,300 \text{ W/}^\circ\text{C}$$

$$m_c c_c = 20 \times 4,182 = 83,640 \text{ W/}^\circ\text{C}$$

ดังนั้น $m_h c_h < m_c c_c$

$$C = \frac{m_h c_h}{m_c c_c} = \frac{33,300}{83,640} = 0.4$$

อัตราการถ่ายเทความร้อน

$$Q = m_h c_h (T_{hi} - T_{ho})$$

$$= 15 \times 2220 (180 - 90)$$

$$= 2997000 \text{ W}$$

$$E = \frac{Q}{Q_{\max}} = \frac{Q}{m_h c_h (T_{hi} - T_{ci})} = \frac{2997000}{33300(180 - 25)} = 0.58$$

จาก

$$E = 1 - e^{-NTU}$$

เพราะฉะนั้น

$$NTU = 0.86$$

เราจะได้พื้นที่ในการส่งผ่านความร้อนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนคือ

$$A = \frac{NTU \times m_h c_h}{U} = \frac{0.86 \times 33300}{300} = 96.46 \text{ m}^2$$

ค่าของอุณหภูมิของน้ำเย็นที่ออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

$$Q = m_c c_c (T_{co} - T_{ci})$$

$$T_{co} = \frac{2997000}{20 \times 4182} + 25 = 60.83 \text{ } ^\circ\text{C}$$

5.7.2 ใช้โปรแกรมที่จัดทำขึ้น

Form2

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในกรณีต่างๆ โดยประมาณ (Kreith [2])

ประเภทของของไหล	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน
ระหว่างน้ำกับอากาศที่มีความดัน	60-180
ระหว่างน้ำกับน้ำ	800-1500
ระหว่างน้ำกับน้ำมันเบนซิน	300-500
ระหว่างน้ำกับแอลกอฮอล์	250-800
ระหว่างน้ำกับน้ำมันหล่อลื่น	100-300
ระหว่างน้ำกับฟริวอน-12 ที่กำลังควบแน่น	300-900
ระหว่างน้ำกับแอมโมเนียที่กำลังควบแน่น หรือจะเทย	800-1500

รูปที่ 5.30 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของน้ำกับน้ำมันหล่อลื่น

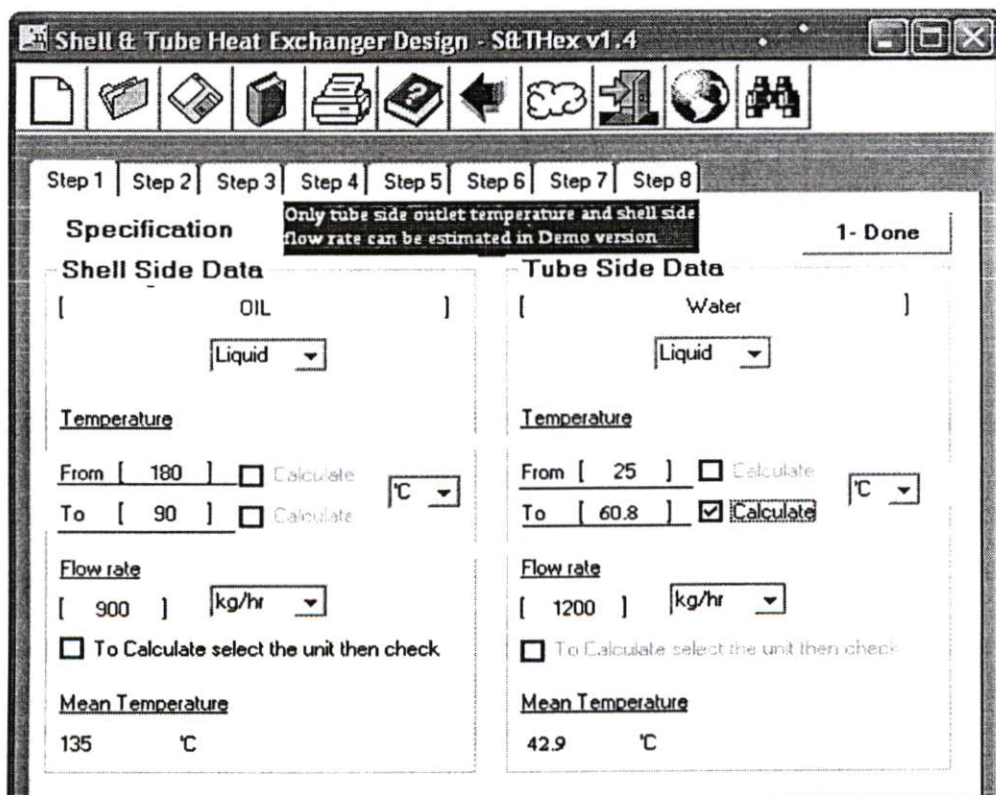
ใส่ข้อกำหนด

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน	300	$W / m^2 K$
Steam inlet	15	kg / s
Fluid inlet	20	kg / s
อุณหภูมิ steam outlet	90	$^{\circ}C$
อุณหภูมิ fluid inlet	25	$^{\circ}C$
อุณหภูมิ steam inlet	180	$^{\circ}C$
ความร้อนจำเพาะ fluid	4182	J / kgK
ความร้อนจำเพาะ steam	2220	J / kgK

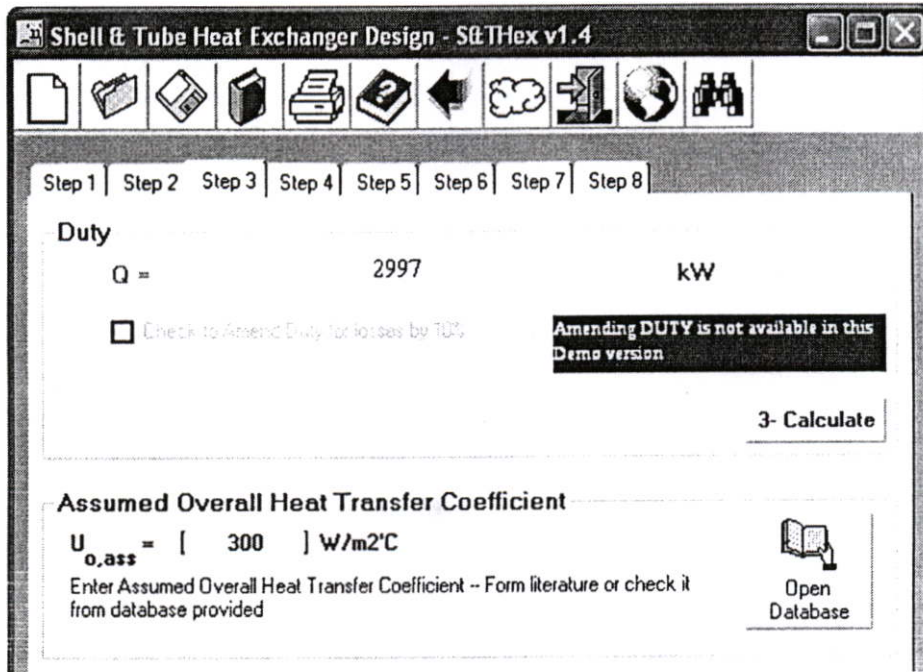
อัตราการถ่ายเทความร้อน(Q)	2997000	W	Result
พื้นที่ถ่ายเทความร้อน (A)	96.463	m^2	
อุณหภูมิ fluid outlet (T _{out})	60.832	$^{\circ}C$	

Clear

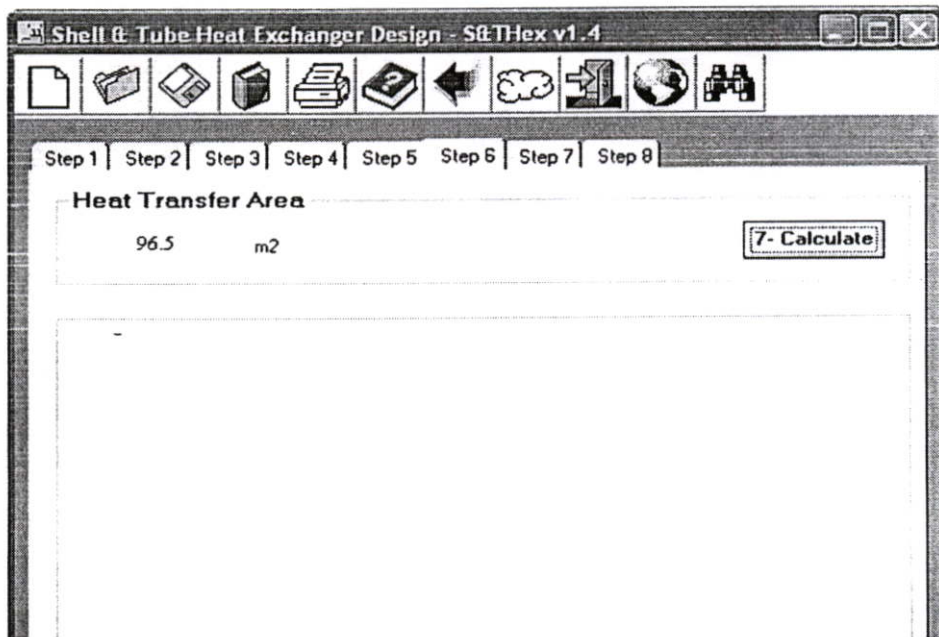
รูปที่ 5.31 แสดงผลการคำนวณโดยโปรแกรมที่จัดทำขึ้น



รูปที่ 5.32 แสดงผลการคำนวณอุณหภูมิของน้ำที่ออกโดยโปรแกรม S &THex v.1.4

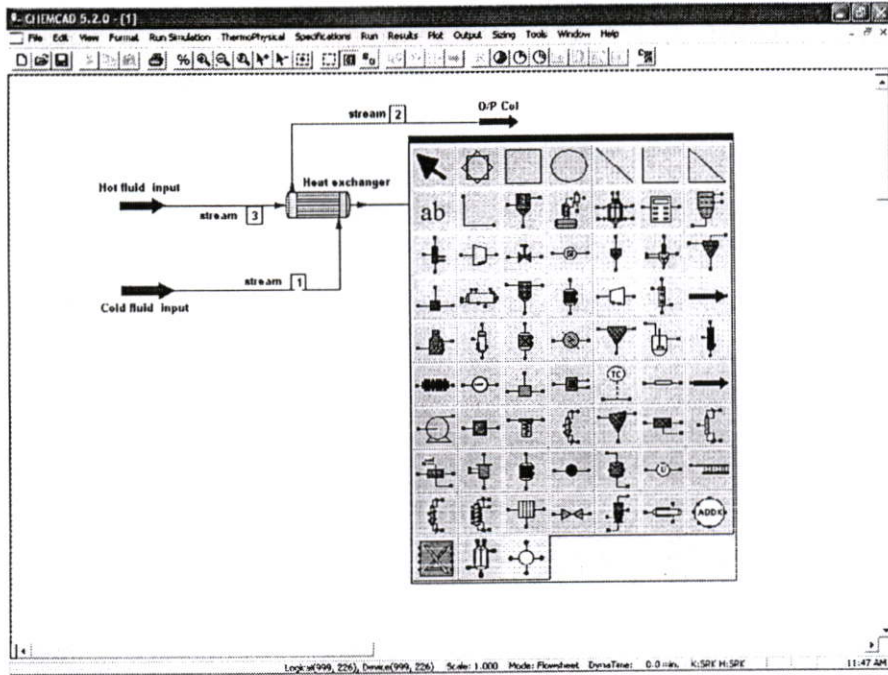


รูปที่ 5.33 แสดงผลการคำนวณ Q โดยโปรแกรม S &THex v.1.4

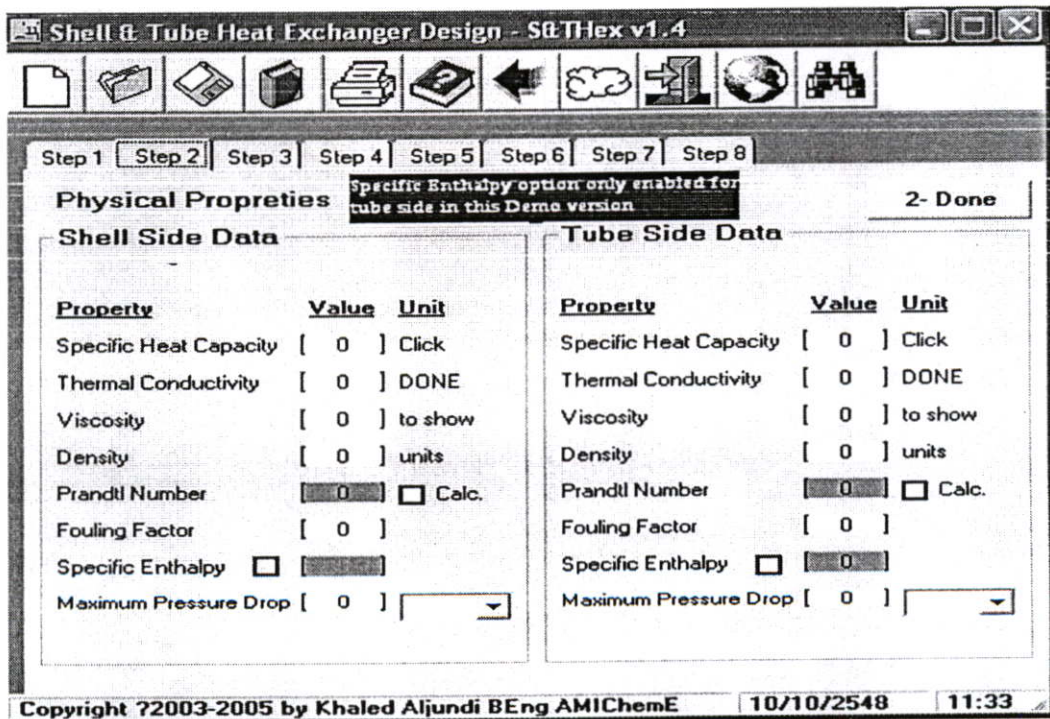


รูปที่ 5.34 แสดงผลการคำนวณพื้นที่โดยโปรแกรม S &THex v.1.4

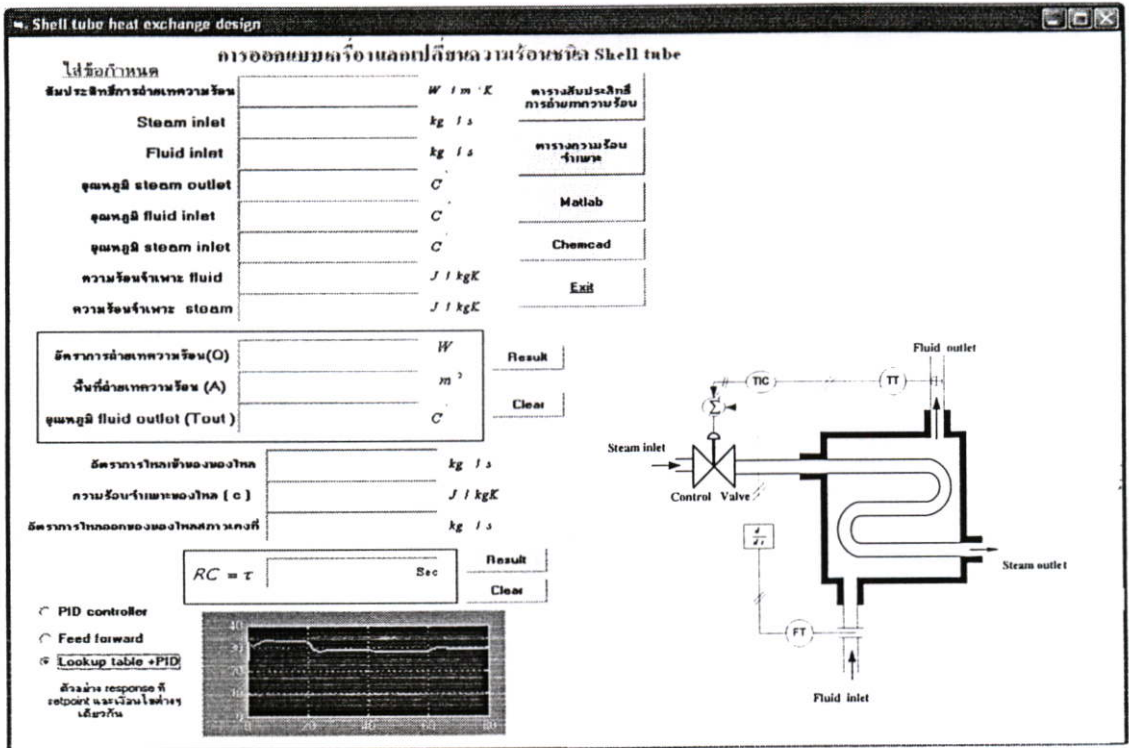
5.8 เปรียบเทียบการใช้งานกับโปรแกรมที่ใช้ทั่วไป



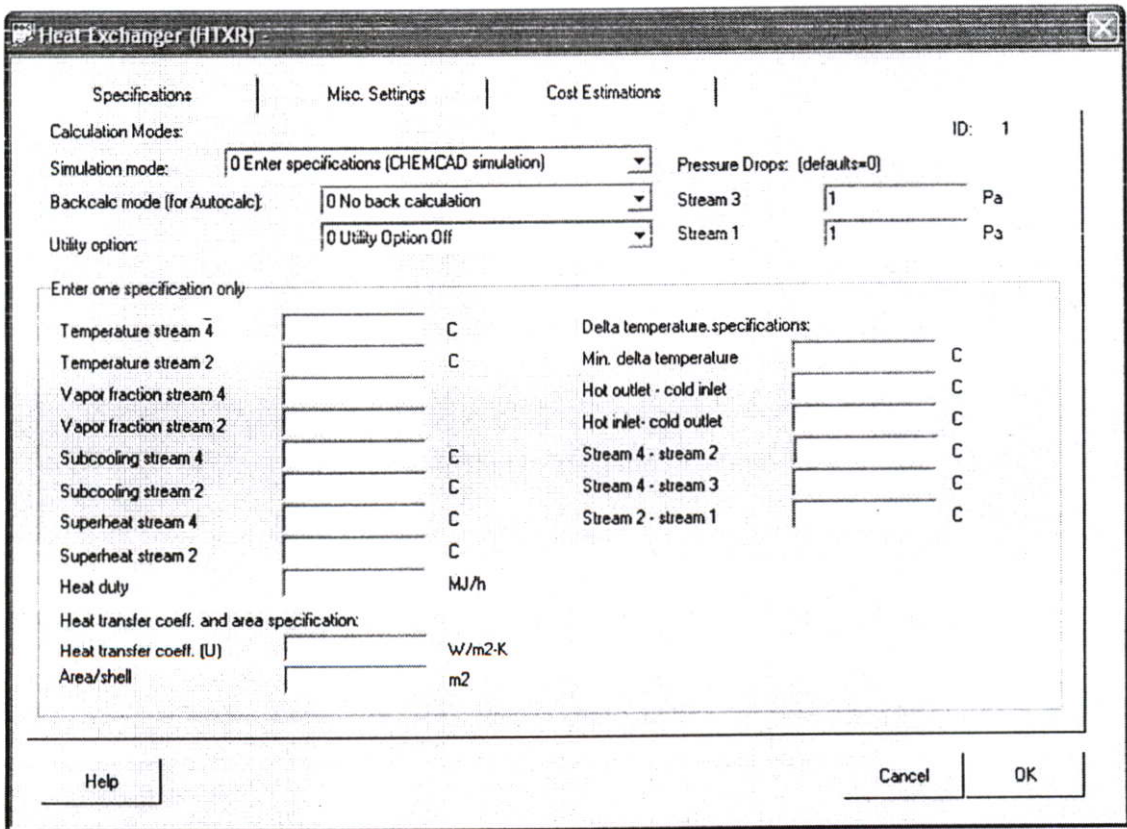
รูปที่ 5.35 หน้าต่างของโปรแกรมChemcad 5.2



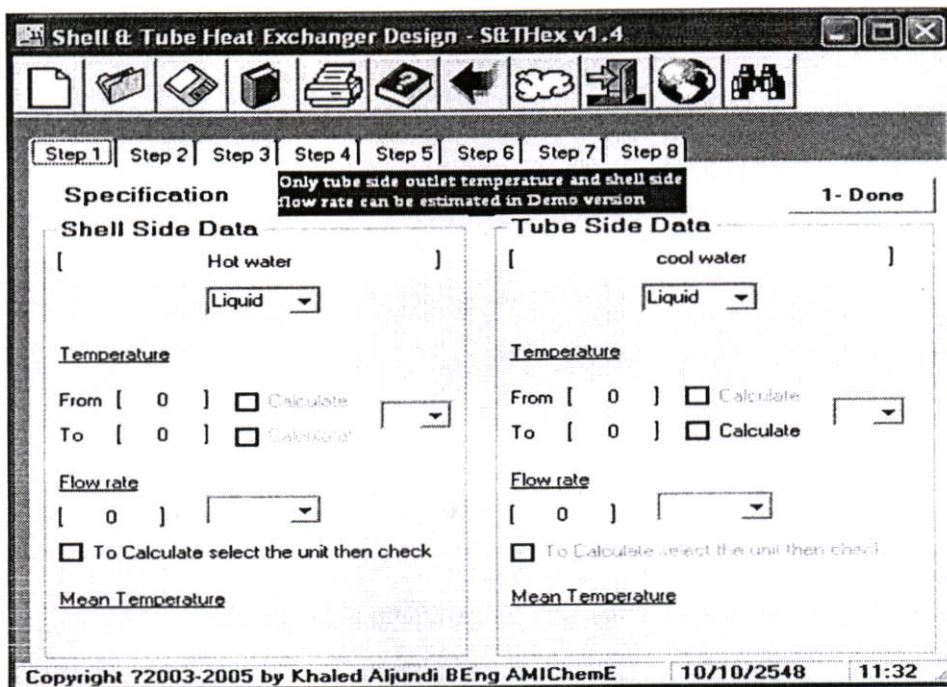
รูปที่ 5.36 หน้าต่างของโปรแกรมS &THex v.1.4



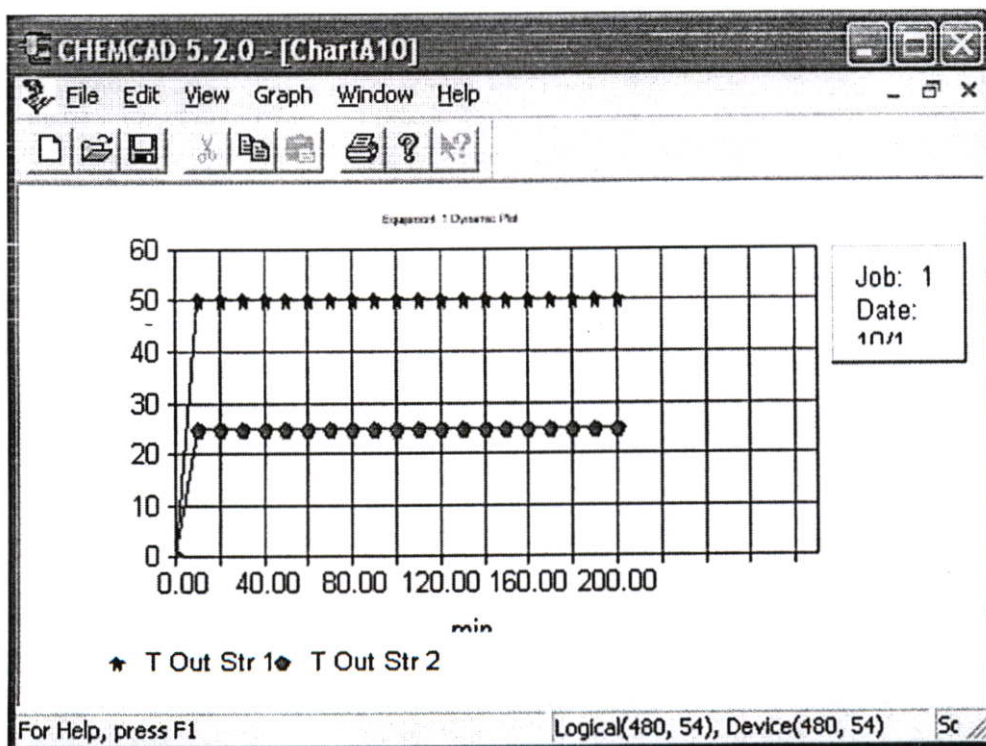
รูปที่ 5.37 หน้าต่างของโปรแกรมที่จัดทำขึ้น



รูปที่ 5.38 หน้าต่างของโปรแกรมChemcad สำหรับป้อนข้อกำหนดต่างๆ



รูปที่ 5.39 หน้าต่างของโปรแกรม S &THex v.1.4 สำหรับป้อนข้อกำหนดต่างๆ



รูปที่ 5.40 หน้าต่างของโปรแกรม Chemcad ในส่วนการแสดงผล

5.9 สรุป

จากที่นำเสนอมานั้นเป็นการเปรียบเทียบให้เห็นถึงวิธีการควบคุมกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน และการคำนวณค่าต่างๆ ของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งจากการทดลองใช้โปรแกรมที่พัฒนานั้นสามารถหาคำตอบได้เหมือนกับโปรแกรม S &THex v.1.4 โดยสามารถสรุปได้ว่าการใช้โปรแกรม Chemcad จะต้องนำผลมาวิเคราะห์อีกครั้งหนึ่งซึ่งเกี่ยวข้องกับเทอร์โมไดนามิกส์เป็นส่วนใหญ่ ในส่วนโปรแกรม S &THex v.1.4 สามารถคำนวณได้เหมือนกับโปรแกรมที่จัดทำขึ้น ส่วนของระบบควบคุมนั้นได้เปรียบเทียบให้เห็นผลตอบสนองการควบคุมแต่ละแบบและแสดงเปรียบเทียบสมรรถนะดังตารางที่ 5.2 รูปที่ 5.25 รูปที่ 5.27 และรูปที่ 5.29 ตามลำดับ

บทที่ 6

บทสรุปและวิจารณ์

6.1 บทสรุป

วิทยานิพนธ์ที่เสนอมานี้เป็นการช่วยแก้ปัญหาในการคำนวณเกี่ยวกับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งแบ่งออกเป็นสองประเภทคือ การหาคุณสมบัติของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งเกี่ยวข้องกับปริมาณที่สำคัญๆของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่มีอยู่แล้ว เช่นอัตราการถ่ายเทความร้อน (Q) และอุณหภูมิของของไหล ประเภทที่สอง คือการหาขนาดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งเกี่ยวข้องกับการหาพื้นที่ของการถ่ายเทความร้อน สำหรับปัญหาประเภทนี้ ค่าที่รู้คืออัตราการไหล อุณหภูมิที่เข้า และออกจากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ลักษณะการไหลของของไหล และอัตราการถ่ายเทความร้อน แต่จะต้องคำนวณหาค่าพื้นที่สำหรับการถ่ายเทความร้อน โดยเมื่อเราเปรียบเทียบโปรแกรมที่เขียนขึ้นมาและใช้วิธีคำนวณหรือใช้โปรแกรมS&THex v1.4 ให้ผลเหมือนกัน สำหรับวิทยานิพนธ์ที่เสนอมายังได้ เปรียบเทียบการประยุกต์ระบบควบคุมที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพระบบแลกเปลี่ยนความร้อน โดยแสดงให้เห็นว่าเมื่อเราประยุกต์ใช้ ระบบควบคุมแบบ PID ร่วมกับ Lookup table จะทำให้ลดช่วง Overshots ลง ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับระบบควบคุมแบบ PID เพียงอย่างเดียว หรือระบบควบคุมแบบ Feed forward ภายใต้งานไขเดียวกันทั้งหมด ซึ่งเป็นการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเมื่อต้องการให้อุณหภูมิของน้ำที่นำไปใช้งานมีค่าคงที่มากที่สุด ซึ่งการคำนวณออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน จะเกี่ยวกับการคำนวณพื้นที่ สำหรับที่จะถ่ายเทความร้อนตามปริมาณที่ต้องการ เมื่อรู้อัตราการไหล และอุณหภูมิของของไหลที่เข้า และออกจากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน นอกจากที่กล่าวมาแล้วผู้ที่ออกแบบระบบยังต้องกำหนดส่วนต่างๆ ของการควบคุมหลักก่อนที่จะนำมาใช้ในการออกแบบระบบแลกเปลี่ยนความร้อน และต้องใช้ค่าใช้จ่ายรวมของระบบแลกเปลี่ยนความร้อนมีค่าต่ำสุด

6.2 ปัญหาที่พบ

จากรายละเอียดที่เสนอมานี้ทั้งหมดก็เป็นแนวทางในการควบคุมเสถียรภาพของอุณหภูมิของน้ำที่ออกจากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน และออกแบบระบบแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งจะหาค่าพื้นที่ของการถ่ายเทความร้อนและอุณหภูมิของน้ำที่ออกจากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน โดยได้เสนอโปรแกรมที่ช่วยในการออกแบบ ซึ่งในความเป็นจริง โปรแกรมที่เกี่ยวกับระบบแลกเปลี่ยนความร้อนมีใช้งานทั่วไป ซึ่งการใช้งานนั้นประสบปัญหาคือต้องทำการศึกษาโปรแกรมที่จะนำมา

เปรียบเทียบ เพื่อนำเอาบางส่วนของโปรแกรมที่มีมาใช้อยู่แล้วนั้น จึงทำให้ผู้เขียนต้องเข้าใจกระบวนการทางเคมีและตัวแปรในโปรแกรมซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่ค่อยถนัดมากเท่าที่ควร สำหรับการดูแลคอบสนองโดยส่วนใหญ่ต้องใช้การทดลองผิดพลาดซึ่งต้องใช้เวลาในการศึกษานานและการทดลองในบางหัวข้อไม่ได้นำมาแสดงในวิทยานิพนธ์ได้ทั้งหมด

6.3 ข้อเสนอแนะ

ถึงแม้ว่าการนำเอาโปรแกรมที่ได้เขียนขึ้นมาช่วยในการออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแต่เป็นเพียงตัวช่วยถ้าต้องการรายละเอียดเกี่ยวกับการออกแบบโดยละเอียดผู้เขียนขอแนะนำให้ศึกษาเพิ่มเติมจากโปรแกรมที่มีใช้โดยทั่วไปแต่ถ้าเป็นการออกแบบไม่ละเอียดมากก็สามารถใช้งานได้เพราะถ้าเป็นโปรแกรมที่มีใช้ทั่วไปจะค่อนข้างมีราคาแพงและเป็นโปรแกรมเฉพาะทาง การใช้งานแต่ละโปรแกรมผู้ใช้ต้องมีความรู้กระบวนการทางเคมี นอกจากนี้ผู้ที่อ่านวิทยานิพนธ์นี้ต้องมีความเข้าใจเกี่ยวกับโปรแกรม Matlab เพื่อใช้ในการจำลองผลการควบคุมอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

เอกสารอ้างอิง

- [1] Simon J.R., *An Introduction to Engineering Heat Transfer*. McGraw-Hill Publishing Ltd.,USA.1967.
- [2] Katsuhiko Ogata., *Modern Control Engineering*. Third. Prentic Hall International, Simon & Schuster / A Viacom Company. Sanddle River New jersey,1997.
- [3] Klaynil P.,Pannil A., Julserewong P., andK.Tirasesth, "Application of Lookup Table Technique with PID Controler for Fast Flow Ratio Response". *KACC Abstract Book 15th Korea Automatic Control Conference,2000*, p. 504.
- [4] Jones A.H., and De Moura Oliveira. P.B., "Auto Tunning of PI Smith Predictor Controllers Using GeneticAlgorithms".*IEE UKACC International Conference on control*,Conference Publication No.427 ,1996. pp.454-459.
- [5] Katayamat T.,Itoh T.,Ogawa M., and Yamamoto H., "Optimal Tracking Control of a Heat Exchanger with change in Load Condition". *IEEE Proceeding of the 29th Confarence on Decision and Control*, Honolulu Hawali,1990.pp.1584-1589.
- [6] T.Kuppan. *Heat Exchanger Design Hand book*,New York:Marcel Dekker.2000
- [7] Eric C.Guyer,David L. Brownell.*Hand book of Applied Thermal design*,New York:McGraw-Hill.1989
- [8] G.F.Hewitt,G.L.Shires,and T.R. Boot. *Process Heat Transfer*.United States of America:CRC Press.Inc.1994
- [9] P. Promwong, A. Chaikla, R. Masuchun, D. Chansangasuk, P. Julsereewong, " Improving Cooling System for Energy Saving in Composite Plant " , *Proc. Of 2004 International Conference on Control, Automation and System*, pp. 710-735, 2004
- [10] F.G.Shinsky.Process-Control Systems. ,New York:McGraw- Hill.1989
- [11] Carlos A. Smith ,Armando B. Corripio.*Principles and Practice of Automatic Process control*. United States of America:,Braun-Brumfield ,Inc.1985
- [12] จี. วอร์คเกอร์. *อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับงานอุตสาหกรรม* แปลจาก Industrial heat exchanfers : a basic guide. พิมพ์ครั้งที่ 2 โดย พงษ์ธร จริญญากรณ์ . กรุงเทพฯ :เอ็มแอนด์ อี.2542
- [13] สุเชียร เกียรติสุนทร.พื้นฐานวิศวกรรมระบบควบคุมในกระบวนการอุตสาหกรรม1.สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย-ญี่ปุ่น), 29 ถนนสุขุมวิท คลองเตย กรุงเทพฯ,2540

ภาคผนวก



บันทึกข้อความ

ส่วนราชการ งานส่งเสริมการวิจัย ข้าราชการสำนักงานอธิการบดี ชั้น 8 สจล. โทร 3780

ที่ ศร. 0524.01(5)พิเศษ (0444) วันที่ 20 เมษายน 2548

เรื่อง ตอบรับตีพิมพ์ต้นฉบับบทความวารสารพระจอมเกล้าลาดกระบัง

เรียน คุณประสิทธิ์ จุลเสวีวงศ์ และ คุณอนุ นบุญเล็ก

เนื่องจากกองบรรณาธิการวารสารพระจอมเกล้าลาดกระบัง ได้รับต้นฉบับ

บทความวิจัย

บทความวิชาการ

เรื่อง โปรแกรมแมนจัวลของสำหรับการออกแบบและควบคุมอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน
Simulation Program for Heat Exchanger Design and Control

ซึ่งท่านได้ดำเนินการแก้ไขตามข้อแนะนำของผู้อ่านบทความเรียบร้อยแล้ว และได้รับการพิจารณาอนุมัติพิมพ์ในวารสารพระจอมเกล้าลาดกระบัง

ฉบับที่ 1 ปีที่ 13 เดือน เมษายน พ.ศ. 2548

ฉบับที่ 2 ปีที่ 13 เดือน สิงหาคม พ.ศ. 2548

ฉบับที่ 3 ปีที่ 13 เดือน ธันวาคม พ.ศ. 2548

ในการนี้ของบรรณาธิการวารสารพระจอมเกล้าลาดกระบัง ขอขอบพระคุณท่านเป็นอย่างยิ่ง ที่ได้ให้ความสนใจและสนับสนุนวารสารพระจอมเกล้าลาดกระบัง และหวังว่าคงได้รับการสนับสนุนจากท่านอีกในโอกาสต่อไป

S. S. U.

(รองศาสตราจารย์ ดร. ศักดา ไกรศักดิ์)

บรรณาธิการ

วารสารพระจอมเกล้าลาดกระบัง

โปรแกรมแบบจำลองสำหรับการออกแบบ และควบคุมอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

Simulation Program for Heat Exchanger Design and Control

ประสิทธิ์ จุลเสวีวงศ์

อนุ หนูเล็ก

รองศาสตราจารย์

นักศึกษาปริญญาโท

ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้นำเสนอ โปรแกรมจำลองสำหรับการออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน และการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดีที่เหมาะสม โดยมีการควบคุม 3 โหมดให้เลือกใช้ คือ การควบคุมการป้อนกลับ การควบคุมแบบป้อนกลับล่วงหน้า และการควบคุมโดยการประยุกต์ใช้เทคนิคการเปิดตารางร่วมกับพีไอดี โปรแกรมที่ได้พัฒนาขึ้นนี้มีความง่าย และสะดวกในการใช้งาน เหมาะสำหรับผู้ใช้ที่ไม่มีความเชี่ยวชาญเรื่องเกี่ยวกับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ในการพัฒนาโปรแกรมได้ใช้ Visual Basic และ Matlab Simulink การทดสอบสมรรถนะของโปรแกรมได้ใช้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อเป็นกรณีศึกษา คำสำคัญ: การควบคุมพีไอดี ,เทคนิคการเปิดตาราง,การควบคุมแบบป้อนกลับล่วงหน้า

Abstract

This paper presents the simulation program for heat exchanger design and suitable PID parameters tuning. The control simulation has three modes, which are feedback control, feed-forward control, and the combined lookup-table technique and PID control. The proposed program is easy to use and convenient to operate without skillful requirement about heat exchanger. The simulation program is developed using Visual Basic Programming language and Matlab Simulink. The performances of the proposed program are verified and validated using tube heat exchanger as an illustrative case study.

Keywords: PID control, Lookup-table technique, Feed-forward control

1. บทนำ

ในปัจจุบันกระบวนการอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับพลังงานความร้อนได้แพร่หลายในประเทศไทยอย่างรวดเร็ว เพื่อให้การใช้พลังงานความร้อนเป็นไปอย่างถูกหลัก กระบวนการเหล่านี้มีระบบแลกเปลี่ยนความร้อน [1 -6] การนำเอาความร้อนมาใช้ อย่างถูกหลักการและให้มีประสิทธิภาพต้องอาศัยผู้ที่มีประสบการณ์ในการออกแบบจากเหตุผลดังกล่าวจึงได้เสนอ โปรแกรมเพื่อให้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งได้รับการออกแบบมีการทำงานเต็มประสิทธิภาพ และระบบควบคุมที่นำมาใช้จะเป็นประโยชน์จำเป็นต้องศึกษาการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่ออ้างอิงก่อนนำไปประยุกต์ใช้งานจริง การจำแนกอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบ่งตามทิศทางการ

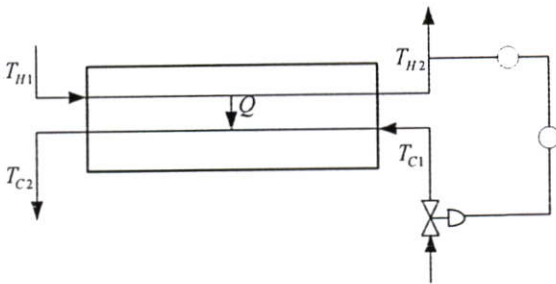
เคลื่อนที่ของไหล และลักษณะของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งมีหลายแบบ และแบบที่ได้รับความนิยม คือ แบบเซลล์และท่อ [2] ดังนั้นการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนรวมถึงระบบควบคุมต่างๆที่ใช้งานโดยโปรแกรมที่เสนอจะเป็นตัวช่วยให้ผู้ออกแบบที่ไม่มีประสบการณ์สามารถนำโปรแกรมไปใช้งานในการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน และพารามิเตอร์ของตัวควบคุม สำหรับการควบคุมการทำงานนั้นที่มีใช้กันทั่วไป คือระบบที่ควบคุมแบบป้อนล่วงหน้า(feed-forward) ระบบควบคุมแบบพีไอดี (PID) ก็นิยมใช้กันโดยทั่วไป [3] แต่ในบทความนี้ได้เสนอ การควบคุมให้กับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ประยุกต์ขึ้น คือ ได้เสนอ

ระบบควบคุมแบบพีไอดี(PID) ร่วมกับการประยุกต์ใช้เทคนิคการเปิดตาราง (Lookup-table) เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับระบบการควบคุมที่กล่าวมาในการใช้งานและศึกษาผลกระทบต่างๆ เพื่อลดค่าใช้จ่ายในการออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

2. ทฤษฎี

อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ได้รับการออกแบบ อย่างถูกต้องควรมีค่าใช้จ่ายรวมต่ำสุด อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมีหลายแบบ การจำแนกอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนอาจทำได้โดยอาศัยทิศทาง การเคลื่อนที่ของของไหลในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน [2] และลักษณะของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเป็นหลักโดยทั่วไป ได้แบ่งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเป็น 3 แบบ คือ

1. แบบท่อสองชั้น
2. แบบที่ของไหลมีทิศทางตั้งฉากกัน
3. แบบเซลล์ และท่อ



รูปที่ 1 แสดงระบบแลกเปลี่ยนความร้อน

การคำนวณพื้นที่ที่ใช้ในการถ่ายเทความร้อนหาได้จากสมการ

$$Q = UA(\Delta T)_m \tag{1}$$

หรือ

$$Q = m_c c_c (\Delta T)_c = m_h c_h (\Delta T)_h \tag{2}$$

ภายในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ของไหลจะถ่ายเทความร้อนให้แก่กันดังนั้นถ้าไม่มีการเปลี่ยนแปลงสภาวะ อุณหภูมิของของไหลทั้งสองก็เปลี่ยนแปลงไปด้วยทำให้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$C = \frac{(mc)_{min}}{(mc)_{max}} \tag{3}$$

ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของของไหล (Effective Mean Temperature Difference)

$$(\Delta T)_m = \frac{(\Delta T)_{max} - (\Delta T)_{min}}{\ln \left[\frac{(\Delta T)_{max}}{(\Delta T)_{min}} \right]} \tag{4}$$

ประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

$$E = \frac{m_c c_c (T_{co} - T_{ci})}{(mc)_{min} (T_{hi} - T_{ci})} \tag{5}$$

นัมเบอร์ ออฟ ทรานส์เฟอร์ยูนิต (Number of Transfer Unit-NTU)

$$NTU = \frac{UA}{(mc)_{min}} \tag{6}$$

ความสัมพันธ์ของ E,C,NTU ใน กรณีอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่เป็นแบบไหลขนาน และแบบสวนทางมีความสัมพันธ์ดังนี้

สำหรับการเปลี่ยนแปลงสภาวะ

$$E = 1 - e^{-NTU} \tag{7}$$

สำหรับไหลสวนทาง

$$E = \frac{1 - e^{-NTU(1-c)}}{1 - Ce^{-NTU(1-c)}} \tag{8}$$

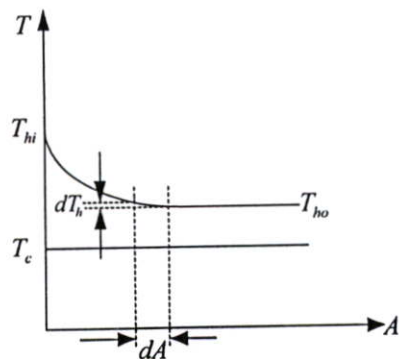
สำหรับไหลขนาน

$$E = \frac{1 - e^{-NTU(1-c)}}{1 + C} \tag{9}$$

ค่าของอุณหภูมิของของไหลที่ออกจาก อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

$$T_{ho} = T_{hi} - \frac{Q}{m_h c_h} \tag{10}$$

$$T_{co} = T_{ci} - \frac{Q}{m_c c_c} \tag{11}$$



รูปที่ 2 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในระบบการการ
ละเหยของของเหลว

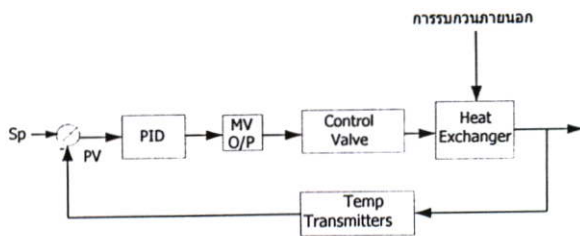
จากรูปที่ 2 มีความสัมพันธ์การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิดังนี้

$$\int_{T_c}^{T_h} \frac{dT_h}{T_h - T_c} = - \int_0^A \frac{UdA}{m_h c_h} \quad (12)$$

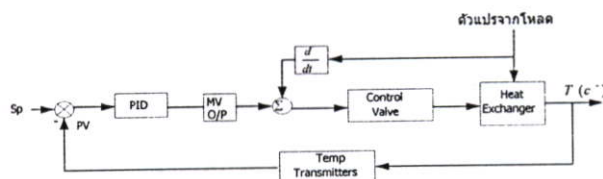
เมื่อเราใช้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนไประยะหนึ่งสิ่งสกปรกจากของไหลจะเริ่มจับติดกับผิวของโลหะ ปริมาณที่บ่งบอกผลของความสกปรกเราเรียกว่า ฟาวลิงแฟคเตอร์ (Fouling factor) คือค่าความต้านทานอันเกิดจากสิ่งสกปรกที่ผนัง ในการออกแบบเราต้องคำนึงถึงค่านี้เข้าช่วยในการสร้างอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน [2] โดยเราสามารถทำให้ขนาดอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเล็กลงได้โดยเพิ่มสัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทความร้อนซึ่งก็อาจทำได้ โดยการเพิ่มความเร็วยังของไหลด้านใดด้านหนึ่งหรือสองด้าน การกระทำดังกล่าวจะทำให้ราคาของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนต่ำลง แต่จะทำให้เกิดการสูญเสียแรงดันของของไหลภายในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

3. ระบบควบคุม และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

สภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน จะถูกรบกวนจากสภาพแวดล้อมต่างๆ ภายนอกที่ไม่สามารถควบคุมได้เช่น การเปลี่ยนแปลงของอัตราการไหลและอุณหภูมิของของไหลที่เข้าสู่ภายในถึงซึ่งไม่สามารถควบคุมค่าความเปลี่ยนแปลง [2] และคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงล่วงหน้าได้ ถ้าปัจจัยต่างๆ ภายนอกนี้เหล่านี้ไม่มีการเปลี่ยนแปลงภายหลังสภาพของ อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเข้าสู่เป้าหมายที่วางไว้ แต่ในสภาพความเป็นจริงเหตุการณ์เหล่านี้จะมีโอกาสเป็นไปได้ยาก เนื่องจากอัตราการไหลและอุณหภูมิของของไหลจะเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา การควบคุมที่ใช้วิธีวัดค่าตัวแปรที่ต้องการควบคุมโดยตรง และส่งสัญญาณควบคุมไปปรับสภาพกระบวนการภายหลังการตรวจพบความคลาดเคลื่อนการตรวจสอบแบบนี้เรียกว่า การควบคุมแบบป้อนกลับ (feedback control) [3]

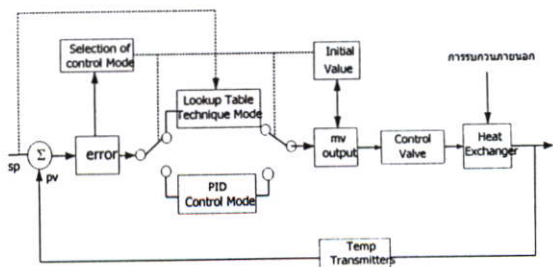


รูปที่ 3 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ โดยใช้ตัวควบคุมแบบ PID ระบบควบคุมแบบป้อนกลับในรูปที่ 3 จะมีความคลาดเคลื่อนในการควบคุมระหว่างสภาพของกระบวนการและเป้าหมายการควบคุมเกิดขึ้นอยู่ตลอดเวลาเสมอดังนั้นการควบคุมแบบป้อนล่วงหน้า (Feed-forward control) จึงถูกนำมาประยุกต์ใช้



รูปที่ 4 ระบบควบคุมแบบป้อนล่วงหน้า

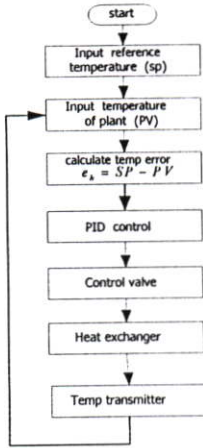
ระบบการควบคุมแบบป้อนล่วงหน้าในรูปที่ 4 สามารถเพิ่มประสิทธิภาพได้ระดับหนึ่ง แต่การควบคุมดังกล่าวต้องสามารถวัดค่า และทราบผลการรบกวนภายนอกทั้งหมดซึ่งเป็นไปได้ยากมาก ดังนั้นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ควบคุมแบบพีไอดีจึงเป็นระบบที่นิยมใช้เป็นอุปกรณ์ชดเชย แต่การเลือกใช้และปรับตัวควบคุมต้องอาศัยประสบการณ์ และความชำนาญของผู้ใช้งาน [4]



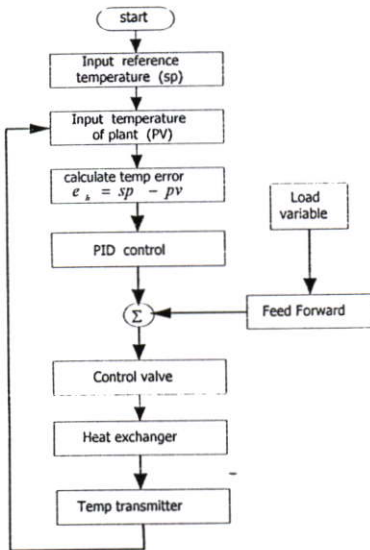
รูปที่ 5 ระบบควบคุมแบบเปิดตารางร่วมกับ PID

การควบคุมอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ให้มีเสถียรภาพในการทำงาน และควบคุมอุณหภูมิด้านออกให้มีค่าคงที่ตาม

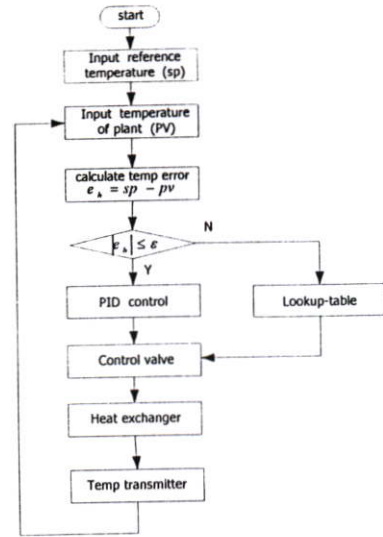
วัตถุประสงค์ การควบคุมกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนจึงได้เสนอระบบควบคุม แบบ PID ร่วมกับโหมด Lookup-table โดยรูปที่ 5 เราใช้ตัวควบคุม 2 แบบ คือ PID และ Lookup-table mode



รูปที่ 6 Flow chart การทำงานระบบควบคุมแบบ PID



รูปที่ 7 Flow chart การทำงานของระบบควบคุมแบบ Feed Forward



รูปที่ 8 Flow chart การทำงานของระบบควบคุมในโหมด PID

และ lookup table

จาก Flow chart ในรูปที่ 8 เราประยุกต์ใช้พลังงานสมดุลในโหมดของ Lookup table ในสภาวะที่ขนาดของความผิดพลาดของอุณหภูมิที่ด้านออก $|e_h|$ มีขนาดมากกว่าค่าความคลาดเคลื่อนอ้างอิง (ϵ) ระบบจะทำงานในโหมด Lookup table โดย control valve จะเปิด และปิดเพื่อปรับอัตราการไหล ให้สัมพันธ์กับการแลกเปลี่ยนความร้อน Heat Exchang เมื่อค่า $|e_h| \leq \epsilon$ ระบบจะกลับไปทำงานในโหมด PID อีกครั้งหนึ่ง ค่าโดยมีรูปแบบของทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันดังนี้ อุปกรณ์ควบคุมแบบ PID มีทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันคือ

$$G_c(s) = K_c \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s \right) \quad (13)$$

อุปกรณ์ควบคุมสุดท้าย (control valve) มีทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันคือ

$$G_f = \frac{K_v}{\tau_v s + 1} \quad (14)$$

ระบบควบคุมอุณหภูมิ เมื่อ T_m คือค่าวัดของอุณหภูมิ และ K_m คือค่าคงที่และมีทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันคือ

$$\frac{T_m(s)}{T(s)} = K_m \quad (15)$$

รูปแบบทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน สมมติให้อุณหภูมิไหลเข้าของไหลให้มีความคงที่ cooling fluid และอุณหภูมิของเข้าของ Process fluid มีการเปลี่ยนแปลงจาก

\bar{T}_p เป็น $T_p + \bar{T}_{pi}$ ซึ่ง T_p แสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของ Process fluid อุณหภูมิค้ำออกของของ Process fluid จะเปลี่ยนแปลงเป็น $\bar{T}_{po} + T_{po}$ และอุณหภูมิของ cooling fluid ค้ำออกจากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ก็จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงจาก $\bar{T}_{co} + T_{co}$ โดยกำหนดความสัมพันธ์ดังนี้

$$C = Mc, R = \frac{1}{Gc} \tag{16}$$

เมื่อกำหนดให้

- C คืออัตราส่วนของความจุความร้อน
- M คืออัตราการไหลของมวล
- c คือความร้อนจำเพาะ
- R คือค่าความต้านทานทางความร้อน
- G คืออัตราการไหลในสภาวะคงที่

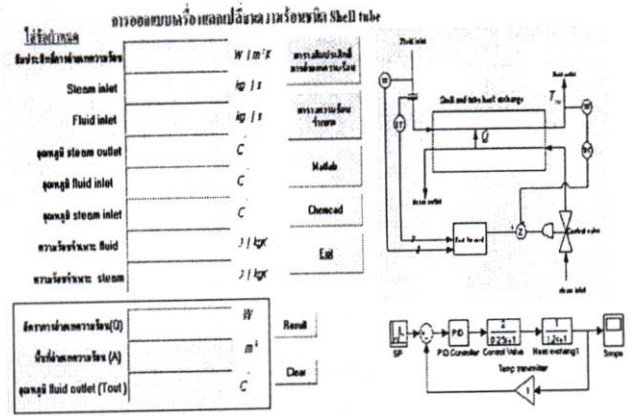
เพราะฉะนั้นทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิขาออกและเข้าอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนคือ

$$\frac{T_o(s)}{T_i(s)} = \frac{1}{RCs + 1} \tag{17}$$

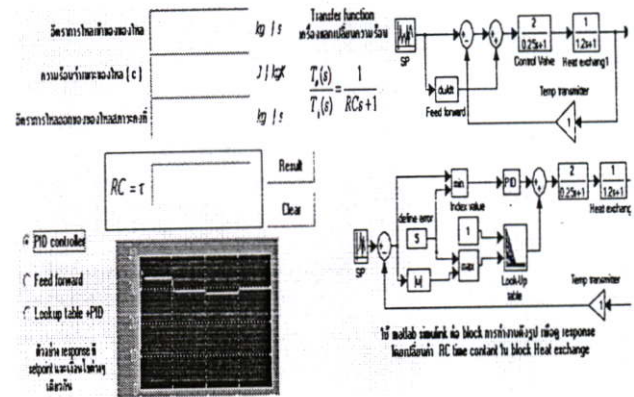
4. โปรแกรมใช้งาน

ประยุกต์ใช้โปรแกรม Visual Basic 6.0 ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ Run และสร้างบนระบบปฏิบัติการ Windows เป็นระบบที่เข้าใจได้ง่ายต่อผู้ใช้งาน โปรแกรมที่เสนอจะแสดง Dialog Box สำหรับใช้งานซึ่งผู้ใช้โปรแกรมไม่จำเป็นต้องมีเข้าใจ แต่ต้องการนำผลการออกแบบไปใช้งานในสภาวะต่อไป สำหรับโปรแกรมแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ

1. ส่วนที่คำนวณเกี่ยวกับพื้นที่ในการส่งผ่านความร้อน อุณหภูมิขาออกของไหลและอัตราการส่งผ่านความร้อนทั้งหมด
2. ส่วนการหาค่าคงที่ทางเวลา เพื่อหาการตอบสนองของกระบวนการ



รูปที่ 9 ลักษณะ โปรแกรมสำหรับการใช้งานหน้าต่าง สำหรับป้อนค่าพารามิเตอร์ สำหรับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน



รูปที่ 10 หน้าต่างสำหรับการหาค่า time constant สำหรับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

5. การใช้งานโปรแกรม

ขั้นตอนการใช้งาน โปรแกรมมีรายละเอียด คือ

1. เปิดโปรแกรมการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ขึ้นมาหลังจากทำการติดตั้งโปรแกรมเรียบร้อยแล้ว
2. ใส่ข้อกำหนดในการออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งสามารถดูเปรียบเทียบกับรูปภายใน โปรแกรมด้านข้าง
 - สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน
 - ใอน้ำทางด้านขาเข้า(Steam inlet)
 - ของไหลทางด้านขาเข้า(Fluid inlet)
 - อุณหภูมิไอของเหลวทางด้านขาออก(Steam outlet)
 - อุณหภูมิของไหลทางด้านขาเข้า(Fluid inlet)
 - อุณหภูมิไอของเหลวทางด้านขาเข้า(Steam inlet)

- ความร้อนจำเพาะของของไหลแต่ละชนิด

3. เมื่อป้อนข้อกำหนดในข้อสองเรียบร้อยแล้ว ก็กดปุ่ม Result เพื่อดูค่าผลการออกแบบเมื่อต้องการที่จะหาค่าค่าคงที่ทางเวลาของการแลกเปลี่ยนความร้อน เพื่อต้องการที่จะนำค่าไปใช้ในโปรแกรม Matlab สามารถป้อนค่าของอัตราการไหลของของไหลที่กำลังพิจารณา และความร้อนจำเพาะ และ อัตราการไหลในสภาวะคงที่ด้านออกจากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน จากนั้นให้กดปุ่ม Result เพื่อหาค่า time constant เมื่อผู้ออกแบบได้ค่า time constant นำค่าที่ได้ไปใช้ในโปรแกรม Matlab Simulink เมื่อได้ค่าดังกล่าวก็สามารถเลือกดูระบบควบคุมที่ประยุกต์ใช้ควบคุมให้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมีประสิทธิภาพ บล็อกการต่อใช้งานระบบควบคุม 3 ระบบซึ่งสามารถนำไปใช้คือ

1. ตัวควบคุมแบบ PID และมีระบบ feedback control ร่วมด้วย
2. ตัวควบคุมแบบ Feed-forward ร่วมกับ feedback control
3. ระบบควบคุมแบบ PID ร่วมกับ Lookup table

จะนำเสนอระบบควบคุมแบบ PID ร่วมกับ Lookup table นอกจากนี้ยังสามารถเลือกดูตัวอย่าง และผลตอบสนองของระบบควบคุม แต่ละแบบที่อยู่ภายใต้เงื่อนไขเดียวกันทั้งหมด

5.1 ตัวอย่างการใช้งานโปรแกรม

กำหนดให้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างน้ำกับไอน้ำ โดยมีอัตราการไหลเข้าของน้ำก่อนเข้าอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน 7 kg/s ที่อุณหภูมิ 20°C และ อุณหภูมิของไอน้ำก่อนเข้าอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเป็น 100°C และไหลออกที่อุณหภูมิ 50°C เมื่อได้มีอัตราการไหล 5 kg/s ข้อมูลแล้วให้อัตราการถ่ายเทความร้อน พื้นที่การถ่ายเทความร้อน อุณหภูมิของน้ำที่ออกจากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมีขั้นตอนดังนี้

จากโปรแกรมเลือกกดปุ่มตารางสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ที่ไอน้ำกับน้ำได้ค่า $1,500 \text{ W/m}^2\text{K}$

- ไอน้ำทางด้านขาเข้า 5 kg/s
- ของไหลทางด้านขาเข้า 7 kg/s
- อุณหภูมิไอน้ำทางด้านขาออก 50°C
- อุณหภูมิไอน้ำทางด้านขาเข้า 100°C
- อุณหภูมิของไหลทางด้านขาเข้า 20°C

จากโปรแกรมเลือกกดปุ่มตารางความร้อนจำเพาะ โดยเลือกค่า 20°C ได้ค่า 4182 J/kgK เมื่อใส่ค่าครบแล้วให้กดปุ่ม Result จะได้ค่าดังนี้คือ

- อัตราการถ่ายเทความร้อน(Q) คือ 52500 W
- พื้นที่ที่ใช้ถ่ายเทความร้อน คือ 6.375 m^2
- อุณหภูมิของน้ำที่ออกจากอุปกรณ์แลกเปลี่ยน

ความร้อนคือ 37.59°C

6. ผลการจำลองการทำงาน

เมื่อนำค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จากเงื่อนไขที่กำหนดขึ้นจากตัวอย่างคือ อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเป็นแบบการไหลที่สวนทางกัน โดยมีเป้าหมายในการทดลอง คือการดูผลการทำงานของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ที่เกิดจากการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างน้ำที่อุณหภูมิห้องกับไอน้ำ โดยให้น้ำร้อนที่ออกจากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนนั้นอุณหภูมิควรมีค่าคงที่มากที่สุด ดังตัวอย่างที่นำเสนอมา เมื่อเราพิจารณาการไหลเข้าของน้ำที่อุณหภูมิ 20°C แต่ให้อัตราการไหลออกของน้ำเมื่อผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนในสภาวะคงที่มีการไหลอยู่ที่ 5 kg/s เมื่อเราใช้โปรแกรมที่จัดทำขึ้นเพื่อหาค่าคงที่ทางเวลาของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Time constant) 1.4 วินาที นำค่าที่ได้ใช้โปรแกรม Matlab Simulink เพื่อดูผลการตอบสนองด้านเอาต์พุตโดยใช้ค่าเงื่อนไขดังนี้ เพื่อดูเปรียบเทียบระบบควบคุมแต่ละแบบ คือ ควบคุมแบบป้อนล่วงหน้า (Feed-forward) ระบบควบคุมแบบ PID ที่ใช้กันโดยทั่วไป และเพื่อให้การควบคุมที่ดีขึ้นเสนอการควบคุมแบบ PID ร่วมกับ Lookup table เพื่อนำไปเปรียบเทียบข้อแตกต่างของระบบ แต่ละแบบภายใต้เงื่อนไขอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนตัวเดียวกัน โดยได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อดูผลตอบสนองทางด้านเอาต์พุตโดยใช้โปรแกรม Matlab Simulink มีค่าดังต่อไปนี้

1. PID มีค่า $K_c = 1, \tau_i = 1, \tau_d = 1$ โดยค่า PID ได้จากวิธีการลองผิดลองถูก
2. จาก $K_{v,1} = C_v \sqrt{\Delta p}$ กำหนด $K_v = 12$
3. ใช้ค่า $\tau_v = 0.25$
4. ใช้ค่า Temp transmitter $K_m = 1$

5. ใช้ค่า $\varepsilon_r = 5$ เมื่อ $\varepsilon > 5$ จะทำงานในโหมดของ

Lookup table

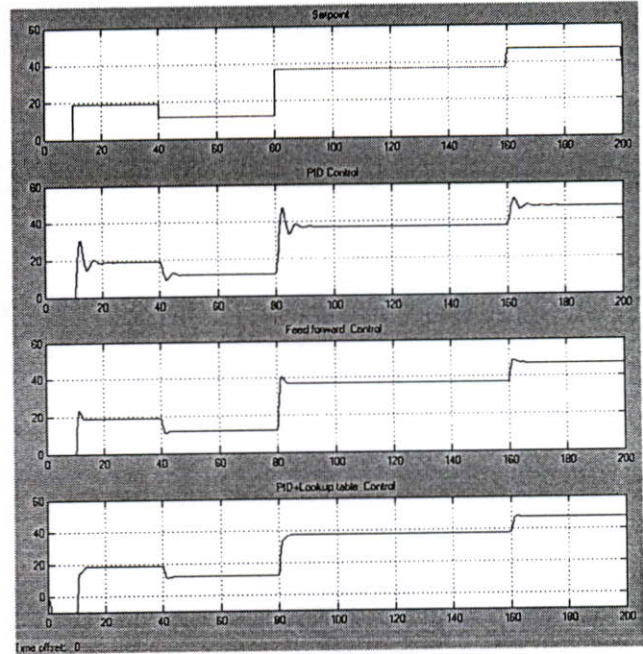
6. ใช้ค่า Lookup table ในการควบคุม K_v ดังนี้

ตารางที่ 1 แสดงค่าการเปิดวาล์วควบคุมเมื่อระบบควบคุมทำงาน

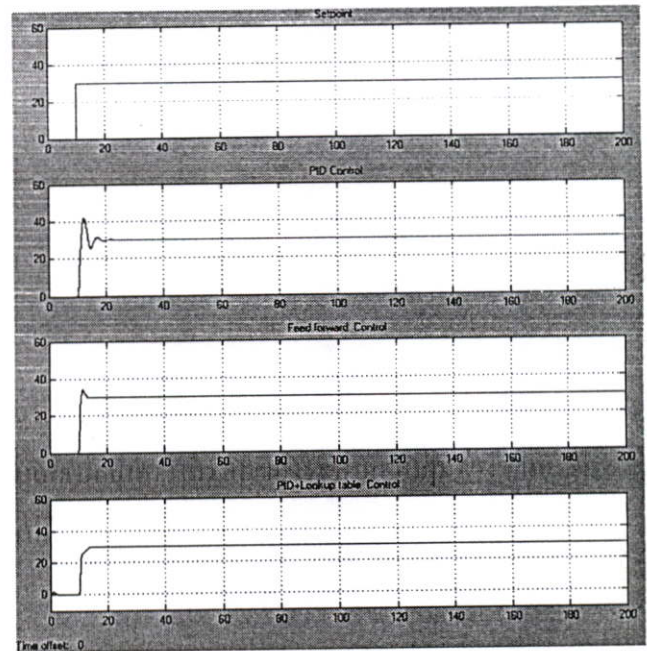
ในโหมด Lookup table

ขนาดอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปมากกว่า $\varepsilon > 5, (C^\circ)$	ขนาดของ K_v
1	2
2	4
3	6
4	8
5	9
6	10
7	12
8	15
9	20
10	25

เมื่อเราทดลองเปรียบเทียบการตอบสนองด้านออกของอุณหภูมิของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน โดยทำการเปรียบเทียบในกรณี Setpoint มีการเปลี่ยนแปลงโดยแสดงให้เห็นเมื่อใช้การควบคุมแต่ละแบบดังรูปที่ 11 และดังรูปที่ 12 เป็นการแสดงให้เห็นในกรณีที่ใช้ Step function ป้อนเป็นอินพุตให้กับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน โดยจากรูปจะเห็นความแตกต่างของรูปคลื่นของการควบคุมแต่ละแบบ ซึ่งจะเห็นได้ว่าการควบคุมแบบ PID ร่วมกับ Lookup table จะสามารถลด Overshoot ของการตอบสนองด้านออกจากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนได้ดีกว่าการควบคุมแบบ Feed-forward และ การใช้เครื่องควบคุมแบบ PID เพียงอย่างเดียว



รูปที่ 11 แสดงผลตอบสนองด้านออกจากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนของระบบควบคุมต่างๆ เมื่อ Setpoint เปลี่ยนแปลง



รูปที่ 12 แสดงผลตอบสนองด้านออกจากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนของระบบควบคุมต่างๆ เมื่อ Step function

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบสมรรถนะเมื่อใช้การควบคุม
แตกต่างกันที่ Setpoint เดียวกันจากรูปที่ 12

การควบคุม	Overshot (%)	Rise time (sec)	Setting time (sec)
PID	33	5.5	24
Feed - forward	6	5	16
PID+Lookup table	0	5	14

7. บทสรุป

บทความที่เสนอมานี้เป็นการเปรียบเทียบการประยุกต์ระบบ
ควบคุมที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพ ระบบแลกเปลี่ยนความร้อน
โดยแสดงให้เห็นว่าเมื่อเราประยุกต์ใช้ ระบบควบคุมแบบ PID
ร่วมกับ Lookup table จะทำให้ลดช่วง Overshoot ลง ซึ่งเมื่อ
เปรียบเทียบกับระบบควบคุมแบบ PID เพียงอย่างเดียว หรือ
ระบบควบคุมแบบ Feed-forward ภายใต้งื่อนไขเดียวกัน
ทั้งหมด ซึ่งเป็นการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์
แลกเปลี่ยนความร้อน เมื่อต้องการให้อุณหภูมิให้อุณหภูมิของ
ของไหลที่นำไปใช้งานมีค่าคงที่มากที่สุด ซึ่งการคำนวณ
ออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน จะเกี่ยวกับการคำนวณ
พื้นที่ สำหรับที่จะถ่ายเทความร้อนตามปริมาณที่ต้องการ เมื่อรู้
อัตราการไหล และอุณหภูมิของของไหลที่เข้า และออกจาก
อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน นอกจากนี้ที่กล่าวมาแล้วผู้ที่
ออกแบบระบบยังต้องกำหนดส่วนต่างๆ ของการควบคุมหลัก
ก่อนที่จะนำมาใช้ในการออกแบบระบบแลกเปลี่ยนความร้อน
และต้องใช้ค่าใช้จ่ายรวมของระบบแลกเปลี่ยนความร้อนมีค่า
ต่ำสุด จากรายละเอียดที่เสนอมานี้ทั้งหมดก็เป็นแนวทางในการ
ควบคุม และออกแบบระบบแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งได้เสนอ
ตัวอย่าง โดยใช้โปรแกรมที่ช่วยในการออกแบบได้ง่ายยิ่งขึ้น
โดยที่สามารถนำไปใช้งานจริง หรือผู้ที่ออกแบบกระบวนการ
สภาวะต่อไปไม่จำเป็นต้องมีความชำนาญในการออกแบบ
อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน และระบบควบคุม โดยสามารถดู
ผลการออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน พร้อมผลดู
ตัวอย่างผลตอบสนองของระบบแลกเปลี่ยนความร้อนในแต่ละ
กรณีที่เลือกใช้ระบบควบคุมแบบต่างๆ จากโปรแกรมที่เสนอ
ในบทความ เป็นเบื้องต้น ในกรณีที่จะใช้งานจริงก็สามารถ
ประมาณค่าใช้จ่ายในการสร้างอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

และเป็นการลดค่าใช้จ่ายในการทดลองเดินระบบจริง และจะ
เป็นประโยชน์ต่อผู้ที่นำไปใช้ร่วมกับกระบวนการอื่นๆ

8. ภาคผนวก

ความหมายของตัวแปรและค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ปรากฏใน
บทความ

- Q อัตราการถ่ายเทความร้อน
- A พื้นที่การถ่ายเทความร้อน
- U ค่าของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน
- C อัตราส่วนของความจุความร้อน
- c ความร้อนจำเพาะของของไหล
- E ประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน
- T_{ci}, T_{hi} ค่าของอุณหภูมิของของไหลคอนเข้า
- m_c, m_h อัตราการไหลของของไหล

NTU คือ อัตราส่วนระหว่างผลคูณของสัมประสิทธิ์การ
ถ่ายเทความร้อน และพื้นที่อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ต่อ
ผลคูณของอัตราการไหล และความร้อนจำเพาะที่มีค่านั้น
น้อยกว่า

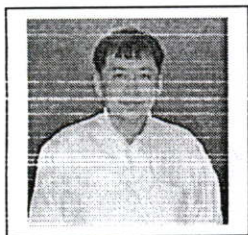
EMTD(Effective Mean Temperature Difference) คือ
ความแตกต่างของอุณหภูมิของของไหล โดยใช้ค่าเฉลี่ยทางเลข
คณิตมาลบกัน

เอกสารอ้างอิง

- [1] สุเชิธร เกียรติสุนทร. พื้นฐานวิศวกรรมระบบควบคุมใน
กระบวนการอุตสาหกรรม1.สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย-
ญี่ปุ่น), 29 ถนนสุขุมวิท คลองเตย กรุงเทพฯ, 2540.
- [2] Simon J.R., **An Introduction to Engineering Heat
Transfer.** McGraw-Hill Publishing Ltd., USA. 1967.
- [3] Katsuhiko Ogata., **Modern Control Engineering.**
Third. Prentic Hall International, Simon & Schuster / A
Viacom Company. Sanddler River New jersey, 1997.
- [4] Klaynil P., Pannil A., Julserewong P., and
K. Tirasesth, "Application of Lookup Table Techingue
with PID Controler for Fast Flow Ratio Response".
**KACC Abstract Book 15th Korea Automatic Control
Conference, 2000, p. 504.**

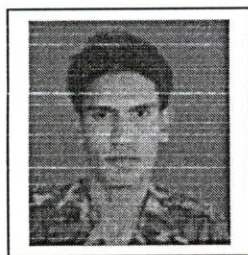
- [5] Jones A.H., and De Moura Oliveira. P.B., "Auto Tunning of PI Smith Predictor Controllers Using Genetic Algorithms". **IEE UKACC International Conference on CONTROL**, Conference Publication No.427 ,1996. pp.454-459.
- [6] Katayamat T.,Itoh T.,Ogawa M., and Yamamoto H., "Optimal Tracking Control of a Heat Exchanger with change in Load Condition". **IEEE Proceeding of the 29th Conference on Decision and Control**, Honolulu Hawali,1990.pp.1584-1589.

ประวัติผู้เขียน และผู้เขียนร่วม



รศ.ประสิทธิ์ จุลเสวีวงศ์
(Prakit Julsereewong)

หัวหน้าภาควิชา วิศวกรรมการวัดคุม
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



อนุ หนูเล็ก
(Anu Noolex)

ปริญญาตรี วิศวกรรมการวัดคุม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

นักศึกษา ป.โท สาขาวิศวกรรมการวัดคุม สถาบันเทคโนโลยีพระจอม
เกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และ ผู้จัดการฝ่ายประกันคุณภาพบริษัท
T.S. Trunking Co. Ltd.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นาย อนุ หนูเล็ก
วัน เดือน ปีเกิด	13 มิถุนายน พ.ศ. 2520 ที่จังหวัด พัทลุง
ที่อยู่	134 ม.6 ต.ป่าพะยอม อ.ป่าพะยอม จ.พัทลุง 93110
ประวัติการศึกษา	ปี 2541 ปวส. สาขา อิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตเทคนิคกรุงเทพ ปี 2544 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิศวกรรมการวัดคุม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ประสบการณ์ทำงาน	
พ.ศ. 2544-2545	Network Engineer มหาลัยเกษมบัณฑิต
พ.ศ. 2546-2547	Project Engineer บริษัท Antech Associate co.Ltd.
พ.ศ. 2547- ปัจจุบัน	ธุรกิจส่วนตัว