

การพัฒนากระบวนการนำกลับความร้อนจากสายอากาศขาออก
ของหอบแห้งแบบพ่นฝอย



นางสาว วัชรารวรรณ วิชยานุวัตติ

ศูนย์วิทยทรัพยากร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2551

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DEVELOPMENT OF PROCESS TO RECOVERY HEAT FROM AIR OUTLET STREAM
OF SPRAY DRYING TOWER



Miss Watcharawan Wlitchayanuwat

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

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2008

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การพัฒนากระบวนการนำกลับความร้อนจากสายอากาศ
ขาออกของหม้ออบแห้งแบบพ่นฝอย

โดย

นางสาววัชราวรรณ วิชาญวิติ

สาขาวิชา

วิศวกรรมเคมี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ดร. สุรเทพ เขียวหอม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต



คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

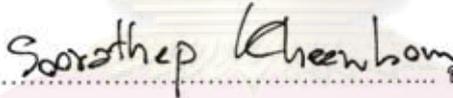
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



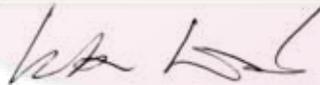
ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มนต์รี วงศ์ศรี)



อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ดร. สุรเทพ เขียวหอม)



กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. เหมือนเดือน พิศาลพงศ์)



กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วีรวัฒน์ บัณฑิตวงศ์)

ศูนย์วิจัยและพัฒนา
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยารวรรณ วิทยานวัตกรรม : การพัฒนากระบวนการนำกลับความร้อนจากสายอากาศขาออก
ของหออบแห้งแบบพ่นฝอย. (DEVELOPMENT OF PROCESS TO RECOVERY HEAT
FROM AIR OUTLET STREAM OF SPRAY DRYING TOWER)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ดร. สุรเทพ เขียวหอม, 119 หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการนำกลับความร้อนจากอากาศขาออกของหออบแห้งแบบ
พ่นฝอยที่มีฝุ่นผงซักฟอกเจือปนโดยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อขด ซึ่งน้ำจะไหลอยู่
ภายในขดท่อ ส่วนอากาศร้อนที่มีฝุ่นผงซักฟอกขนาดเฉลี่ย 43 ไมโครเมตรไหลภายในเซลล์ โดย
ระยะห่างของขดท่อที่ใช้ในการทดลองมี 4 รูปแบบ ลักษณะการไหลที่ใช้เป็นแบบสวนทางกัน โดย
ได้ทำการทดลองทั้งหมด 400 ค่า เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนด้านในและด้านนอก
ท่อของผิวแลกเปลี่ยนความร้อน โดยเป็นความสัมพันธ์ของค่านัสเซลล์นัมเบอร์ ด้านในท่อและด้าน
นอกท่อกับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์, ค่าพรีนัมเบอร์, ค่าอัตราส่วนของอัตราการไหลเชิงมวล
ของปริมาณฝุ่นผงซักฟอกต่ออัตราการไหลเชิงมวลของอากาศร้อน และตัวแปรไรต์หน่วยของ
ระยะห่างขดท่อซึ่งความสัมพันธ์ที่พัฒนาขึ้นจะสามารถนำไปใช้ในการทำนายการถ่ายเทความ
ร้อนระหว่างขดท่อและเซลล์ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนได้ และยังพบว่ามุมระยะห่างของขด
ท่อจะแปรผกผันกับสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนด้านในท่อ แต่มุมระยะห่างของขดท่อมี
ผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนด้านนอกท่อ

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมเคมี

ลายมือชื่อนิสิต

วิทยารวรรณ

วิทยานวัตกรรม

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาหลัก

Sorathep Khewhom

ปีการศึกษา 2551

5070436921 : CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORDS : SHELL AND COILED TUBE HEAT EXCHANGER / SPRAY DRYING TOWER / HEAT TRANSFER COEFFICIENTS

WATCHARAWAN WITCHAYANUWAT : DEVELOPMENT OF PROCESS TO RECOVERY HEAT FROM AIR OUTLET STREAM OF SPRAY DRYING TOWER.
ADVISOR : SOORATHEP KHEAWHROM, D.Eng., 119 pp.

In this work, we experimentally study heat transfer from exhaust particulate air of detergent spray drying tower to water by using coiled tube heat exchanger. Water flows in the coiled tubes, where air loaded with detergent particles of 43 micrometers in diameter flows within the shell. Four coiled tubes with different coil pitches are used in a counter-current flow configuration. We investigate heat transfer coefficients of inside and outside the heat transfer surfaces through 400 experiments. The correlations between Nusselt number and Reynolds number, Prandtl number, mass flow rate of particulates to mass flow rate of air ratio and coiled tube pitch parameter are proposed. The correlations procured can be used to predicted heat transfer between tube and shell of the heat exchanger. Moreover, we find that the increasing an angle of coiled tube pitch results in a decreasing of heat transfer coefficient of inside tube. It was found that an angle of coil pitches of heat exchanger slightly affect to the heat transfer coefficient of outside tube.

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department : Chemical Engineering

Student's Signature : *วิชรพรรณ วิชชาพรดี*

Field of Study : Chemical Engineering

Advisor's Signature : *Soorathep Kheawhrom*

Academic Year : 2008

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้เป็นอย่างดีด้วยความความช่วยเหลือของ อ.ดร.สุรเทพ เขียวหอม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.มนตรี วงศ์ศรี ประธานกรรมการ รศ.ดร.เหมือนเดือน พิศาลพงศ์ และผศ.ดร.วีรวัฒน์ ปัตทวิคองคา กรรมการ ซึ่งได้สละเวลาให้คำแนะนำ แนวทางและข้อคิดเห็นต่างๆ ในงานวิจัยด้วยดีเสมอมา ผู้วิจัยขอขอบพระคุณท่านอาจารย์เป็นอย่างสูงที่ได้ให้ความกรุณาจนงานวิจัยนี้สำเร็จลงได้

และเนื่องจกงานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ภายใต้โครงการเชื่อมโยงภาคการผลิตกับงานวิจัย ทุน สกว. - อุตสาหกรรม สัญญาเลขที่ MRG-WI515E013 จึงขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

ขอขอบพระคุณบริษัทยูนิลีเวอร์ ไทย โฮลดิ้งส์ จำกัด และพี่ๆ ของบริษัททุกท่านที่เอื้อเฟื้อข้อมูลและให้ความช่วยเหลือด้วยดีมาตลอด

ขอขอบพระคุณพี่ๆ เพื่อนๆ นิสิตปริญญาโท ทุกคน ที่ได้ให้คำปรึกษา ช่วยเหลือและให้กำลังใจด้วยดีมาตลอดระยะเวลาที่ศึกษา

ขอขอบพระคุณ ครูอาจารย์ทุกท่านที่มีโอกาสกล่าวถึงได้หมด ณ ที่นี้ ที่ได้ให้ความรู้ อบรมสั่งสอนจนสามารถสำเร็จการศึกษา

ท้ายสุดนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณพ่อและแม่ ที่ได้สนับสนุนการศึกษาของผู้วิจัยรวมถึงความเข้าใจและกำลังใจที่มีให้เสมอมา จนสามารถสำเร็จการศึกษา ประโยชน์และคุณค่าอันใดที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์นี้ ขอมอบเป็นกตัญญูตราบุชาแด่พ่อและแม่ ครูอาจารย์ ตลอดจนผู้มีพระคุณทุกท่าน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญภาพ.....	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฎ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	9
3.1 ผงซักฟอก.....	9
3.2 กรรมวิธีการผลิตผงซักฟอก.....	15
3.3 การถ่ายเทความร้อน.....	17
3.4 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม.....	24
3.5 การแบ่งประเภทเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน.....	26
3.6 วิธีการวิเคราะห์เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน.....	27
3.7 วัสดุสำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน.....	30
4. การออกแบบและคำนวณ.....	34
5. การวิเคราะห์ความสัมพัทธ์.....	41
5.1 ความสัมพันธ์ของตัวแปรไร้หน่วย.....	41
5.2 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของข้อมูล.....	42

บทที่	หน้า
6. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง.....	46
6.1 อุปกรณ์.....	46
6.2 วิธีการทดลอง.....	48
7. ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	49
8. สรุปผลการทดลอง.....	58
รายการอ้างอิง.....	60
ภาคผนวก.....	62
ภาคผนวก ก เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนต้นแบบ.....	63
ภาคผนวก ข วัสดุดิบและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	64
ภาคผนวก ค เครื่องมือวิเคราะห์หาการกระจายขนาดของอนุภาค.....	69
ภาคผนวก ง ผลการวิเคราะห์หาการกระจายขนาดของอนุภาค.....	72
ภาคผนวก จ สภาวะที่ใช้ในการทดลอง.....	79
ภาคผนวก ช ผลการทดลอง.....	84
ภาคผนวก ซ การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม.....	100
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	119

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1.1	ค่าสภาวะที่ดำเนินการทดลองแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างน้ำกับอากาศร้อน..	2
3.1	ความสัมพันธ์ระหว่างกลุ่มตัวแปรไว้มิติต่างๆ.....	22
4.1	ผลการคำนวณที่เกี่ยวข้องเนื่องกับการสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายนอกท่อ	38
4.2	ผลการคำนวณหาพื้นที่การถ่ายเทความร้อน.....	39
ง-1	สรุปผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคฝุ่นผงซักฟอก.....	72
จ-1	ช่วงของสภาวะในการทดลองแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างน้ำกับอากาศร้อน...	79
จ-2	สภาวะที่ดำเนินการทดลอง.....	79
ช-1	ผลการทดลองที่มุมของชุดท่อ 25 องศา.....	84
ช-2	ผลการทดลองที่มุมของชุดท่อ 35 องศา.....	88
ช-3	ผลการทดลองที่มุมของชุดท่อ 45 องศา.....	92
ช-4	ผลการทดลองที่มุมของชุดท่อ 55 องศา.....	96
ช-1	เปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจากการทดลองและจากการ ทำนายที่ระยะห่างของชุดท่อ 25 องศา.....	103
ช-2	เปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจากการทดลองและจากการ ทำนายที่ระยะห่างของชุดท่อ 35 องศา.....	107
ช-3	เปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจากการทดลองและจากการ ทำนายที่ระยะห่างของชุดท่อ 45 องศา.....	111
ช-4	เปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจากการทดลองและจากการ ทำนายที่ระยะห่างของชุดท่อ 55 องศา.....	115

สารบัญญภาพ

ภาพที่		หน้า
3.1	โครงสร้างของสารลดแรงตึงผิว.....	9
3.2	กรรมวิธีการผลิตผงซักฟอก.....	16
3.3	การนำความร้อนแบบมีติเดียวผ่านผนัง.....	19
3.4	ทรงกระบอกกลวงซึ่งมีการพาความร้อนที่ผิว.....	20
3.5	เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อซ้อน.....	25
3.6	ตัวอย่างลักษณะการทำงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบปริเจเนเนอเรเตอร์	26
3.7	ตัวอย่างลักษณะการทำงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบรีคูเปอร์เรเตอร์	27
3.8	โครงข่ายการแลกเปลี่ยนความร้อนแบบสวนทางกัน.....	29
4.1	ลักษณะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อชุด.....	38
4.2	แบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อชุด.....	40
5.1	โครงสร้างของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อชุด.....	41
6.1	แผนภาพชุดอุปกรณ์ทดลองต้นแบบ.....	47
6.2	ชุดท่อที่มุมต่างๆ.....	48
7.1	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าไนส์เซลินัมเบอร์กับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ด้านในท่อ.....	50
7.2	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าไนส์เซลินัมเบอร์กับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ด้านนอกท่อ....	50
7.3	เปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจากการทดลองและจาก การทำนายที่มุมระยะห่างของชุดท่อ 25, 35, 45 และ 55 องศา.....	51
7.4	เปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจากการทดลองและจาก การทำนายที่มุมระยะห่างของชุดท่อ 25 องศา.....	52
7.5	เปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจากการทดลองและจาก การทำนายที่มุมระยะห่างของชุดท่อ 35 องศา.....	53
7.6	เปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจากการทดลองและจาก การทำนายที่มุมระยะห่างของชุดท่อ 45 องศา.....	53
7.7	เปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจากการทดลองและจาก การทำนายที่มุมระยะห่างของชุดท่อ 55 องศา.....	54

7.8	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของอากาศขาเข้า ผลต่างอุณหภูมิของน้ำที่ได้จากการแลกเปลี่ยนความร้อนและอัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงมวลของฝุ่นผงซักฟอกต่ออัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ.....	56
7.9	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของอากาศขาเข้า ความดันลดของอากาศ และอัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงมวลของฝุ่นผงซักฟอกต่ออัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ.....	56
7.10	เปรียบเทียบที่มุมระยะห่างของชุดท่อต่างๆ.....	57
ก-1	เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนต้นแบบ.....	63
ก-2	การวางชุดท่อภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนต้นแบบ.....	63
ข-1	ฝุ่นผงซักฟอก.....	64
ข-2	เครื่องเป่าลม.....	64
ข-3	เครื่องทำความร้อน.....	65
ข-4	อุปกรณ์ป้อนฝุ่น.....	65
ข-5	เครื่องบันทึกข้อมูลอัตโนมัติ.....	66
ข-6	ถังพักน้ำเย็น.....	66
ข-7	อุปกรณ์ดักฝุ่น.....	67
ข-8	ชุดท่อที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อน.....	67
ข-9	บริเวณที่ทำการทดสอบ.....	68
ค-1	เครื่องวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาค (MASTERSIZER รุ่น S long bed Ver.2.19).....	69
ง-1	ผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคฝุ่นผงซักฟอกครั้งที่ 1.....	73
ง-2	ผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคฝุ่นผงซักฟอกครั้งที่ 2.....	74
ง-3	ผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคฝุ่นผงซักฟอกครั้งที่ 3.....	75
ง-4	ผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคฝุ่นผงซักฟอกครั้งที่ 4.....	76
ง-5	ผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคฝุ่นผงซักฟอกครั้งที่ 5.....	77
ง-6	ผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคฝุ่นผงซักฟอกครั้งที่ 6.....	78

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

A	พื้นที่ผิวของการถ่ายเทความร้อน
A_i	พื้นที่ผิวของการถ่ายเทความร้อนด้านในท่อ
A_o	พื้นที่ผิวของการถ่ายเทความร้อนด้านนอกท่อ
C_p	ความจุความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่
$C_{p,c}$	ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ
$C_{p,h}$	ค่าความจุความร้อนจำเพาะของอากาศร้อน
D	เส้นผ่านศูนย์กลาง
D_{coil}	เส้นผ่านศูนย์กลางของขดท่อ
D_h	เส้นผ่านศูนย์กลางของเซลล์ที่ของไหลไหลผ่าน (Hydraulic diameter of shell side)
D_{Shell}	เส้นผ่านศูนย์กลางของเซลล์
d_i	เส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อถ่ายเทความร้อน
h	สัมประสิทธิ์การพาความร้อน
h_i	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในท่อ
h_o	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนนอกท่อ
k	สัมประสิทธิ์การนำความร้อน
k_o	สัมประสิทธิ์การนำความร้อนด้านนอกท่อ
k_i	สัมประสิทธิ์การนำความร้อนด้านในท่อ
L	ความยาว
L_{tube}	ความยาวของขดท่อ
m_c	อัตราการไหลเชิงมวลของสายเย็น
m_h	อัตราการไหลเชิงมวลของสายร้อน
m_g	อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศร้อน
m_w	อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำ
P	ระยะห่างระหว่างขดท่อ
q	อัตราการถ่ายเทความร้อน
Q_h	อัตราการถ่ายเทความร้อนของสายร้อน
Q_g	อัตราการถ่ายเทความร้อนของสายเย็น
r	รัศมี

r_i	รัศมีด้านในท่อ
r_o	รัศมีด้านนอกท่อ
R_w	ความต้านทานของน้ำ
R_g	ความต้านทานของอากาศร้อน
S_w	ความหนาของผนังท่อ
T	อุณหภูมิ
$T_{c,i}$	อุณหภูมิของน้ำขาเข้า
$T_{c,o}$	อุณหภูมิของน้ำขาออก
$T_{h,i}$	อุณหภูมิของอากาศร้อนขาเข้า
$T_{h,o}$	อุณหภูมิของอากาศร้อนขาออก
T_s	อุณหภูมิสมบูรณ์ (Absolute temperature; K)
T_{sur}	อุณหภูมิสมบูรณ์ของสิ่งแวดล้อม
V	ความเร็วเชิงเส้น
U	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม
ΔT	ผลต่างอุณหภูมิ
ΔT_{lm}	ผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยเชิงลอการิทึม
ρ	ความหนาแน่น
μ	ความหนืด
σ	Stefan-Boltzmann constant ($\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W / m}^2 \cdot \text{K}$)
ε	ค่า emissivity ของพื้นผิว
φ, γ	ตัวแปรไร้หน่วยของระยะห่างขดท่อ (มุมของขดท่อ)
Re_o	ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ด้านนอกท่อ
Pr_o	ค่าพรันด์เทิลนัมเบอร์ด้านนอกท่อ
Nu_o	ค่านัสเซลนัมเบอร์ด้านนอกท่อ
β	ค่าอัตราส่วนของปริมาณฝุ่นผงซักฟอกต่ออัตราการไหลของอากาศร้อน
Re_i	ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ด้านในท่อ
Pr_i	ค่าพรันด์เทิลนัมเบอร์ด้านในท่อ
Nu_i	ค่านัสเซลนัมเบอร์ด้านในท่อ

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันมีความต้องการใช้เชื้อเพลิงในปริมาณมากขึ้น และมีแนวโน้มจะปรับตัวสูงขึ้นในอนาคต ขณะที่ราคาเชื้อเพลิงมีอัตราการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและเชื้อเพลิงที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติบางชนิดมีแนวโน้มหมดไปในไม่ช้า การแก้ไขปัญหานี้สามารถทำได้โดยการอนุรักษ์พลังงาน การประหยัดพลังงาน และการปรับปรุงอุปกรณ์ที่ใช้ให้มีประสิทธิภาพ วิธีหนึ่งที่สามารถช่วยในการอนุรักษ์พลังงานคือ การนำความร้อนมาใช้ประโยชน์ (Waste heat recovery) ซึ่งเมื่อพิจารณากระบวนการผลิตผงซักฟอกพบว่าอุปกรณ์สำคัญในกระบวนการผลิตที่ใช้พลังงานมากที่สุดคือ หอบแห้งแบบพ่นฝอย (Spray drying tower) โดยเป็นการให้พลังงานความร้อนแก่อากาศทำให้อากาศร้อนขึ้น เพื่อช่วยไล่ความชื้นจากของเหลวชั้นภายในหอบแห้งแบบพ่นฝอย จนได้ผงซักฟอกที่มีปริมาณความชื้น และขนาดตรงตามมาตรฐานของผลิตภัณฑ์ โดยอากาศขาออกของหอบแห้งแบบพ่นฝอยจะมีฝุ่นของผงซักฟอกขนาดเล็กเจือปน มีอุณหภูมิประมาณ 98 องศาเซลเซียส และมีปริมาณค่อนข้างสูง ดังนั้นการลดการใช้พลังงานโดยการนำความร้อนซึ่งสูญเสียจากอากาศขาออกของหอบแห้งแบบพ่นฝอย ซึ่งมีอุณหภูมิสูงกลับมาใช้ใหม่ จึงเป็นการอนุรักษ์พลังงานอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ ส่งผลให้เกิดแนวคิดที่จะนำอากาศร้อนทิ้งนี้กลับมาใช้ใหม่คือการนำกลับมาใช้เผาไหม้อีกรอบก่อนป้อนเข้าสู่หอบแห้งแบบพ่นฝอย แต่การทำในลักษณะนี้มีข้อเสียหลายประการคือ อากาศมีปริมาณออกซิเจนต่ำ มีปริมาณความชื้นเจือปนอยู่สูง และยังส่งผลเสียต่อมาตรฐานของผลิตภัณฑ์ เช่น สีของผงซักฟอก สิ่งเจือปนต่างๆ เป็นต้น ดังนั้นจึงเกิดอีกแนวคิดหนึ่ง คือนำอากาศร้อนที่มีอุณหภูมิสูงกลับมาใช้แลกเปลี่ยนความร้อนกับน้ำ เพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้กับน้ำก่อนนำมาผสมกับวัตถุดิบ เพื่อป้อนเข้าสู่หอบแห้งแบบพ่นฝอยต่อไป ซึ่งแนวคิดนี้นอกจากไม่ส่งผลกระทบต่อมาตรฐานของผลิตภัณฑ์แล้ว ยังส่งผลดีต่อสิ่งแวดล้อม ลดการใช้เชื้อเพลิง และยังช่วยลดอุณหภูมิอากาศร้อนก่อนปล่อยทิ้งจากหอบแห้งแบบพ่นฝอยได้อีกด้วย

กล่าวโดยสรุป คืองานวิจัยนี้เป็นการศึกษาหาวิธีการที่มีประสิทธิภาพในการนำกลับความร้อน โดยพัฒนากระบวนการเพื่อนำกลับความร้อนจากอากาศขาออกของหอบแห้งแบบพ่นฝอย ซึ่งถือได้ว่าเป็นการนำความรู้ทางวิศวกรรมที่ได้ศึกษามาประยุกต์ใช้กับปัญหาที่เกิดขึ้นจริงในโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งผลจากงานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กับอุตสาหกรรมประเภท

ต่างๆ ที่มีการปล่อยความร้อนทิ้งสู่บรรยากาศ เพื่อเป็นการประหยัดพลังงาน และลดปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อพัฒนากระบวนการที่มีประสิทธิภาพในการนำกลับความร้อนจากอากาศขาออก
- 1.2.2 เพื่อหาความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการหาวิธีการที่มีประสิทธิภาพในการนำพลังงานกลับมาใช้ใหม่

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 ศึกษาขอบเขตแบบปล่อยของกระบวนการผลิตผงซักฟอก
- 1.3.2 ออกแบบและสร้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างอากาศกับน้ำ
- 1.3.3 หาความสัมพันธ์ของตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการแลกเปลี่ยนความร้อน เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม

ตารางที่ 1.1 ค่าสภาวะที่ดำเนินการทดลองแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างน้ำกับอากาศร้อน

ตัวแปร		หน่วย	ค่า
ด้านท่อ น้ำ	อัตราการไหลเชิงมวล	กิโลกรัมต่อวินาที	0.02
	อุณหภูมิขาเข้า	องศาเซลเซียส	อุณหภูมิห้อง
	มุมระยะห่างระหว่างชุดท่อ	องศา	25,35,45 และ 55
ด้านเซลล์ อากาศร้อน	อัตราการไหลเชิงมวล	กิโลกรัมต่อวินาที	0.3 - 0.6
	อุณหภูมิขาเข้า	องศาเซลเซียส	70 - 100
	ปริมาณฝุ่น	กรัมต่อวินาที	0.5 - 1.0

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 กระบวนการที่มีประสิทธิภาพในการนำกลับความร้อนจากอากาศขาออก
- 1.4.2 ลดการใช้ทรัพยากรพลังงานและลดปัญหาสิ่งแวดล้อม

บทที่ 2

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปิยะภัทร คุ่มปรีดี [1] ได้ศึกษาและพัฒนาอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับเตาเผาเซรามิค ซึ่งเตาเผาเซรามิคมีพลังงานที่ถูกปล่อยทิ้งโดยเฉลี่ยราว 35-50% ในรูปของความร้อนที่ปล่อยทิ้งทางปล่องควันซึ่งมีอุณหภูมิประมาณ 600 - 800 องศาเซลเซียส ซึ่งการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโดยวิธีผลต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยเชิงล็อกการิทึม (Logarithmic mean temperature difference, LMTD) โดยในการออกแบบคำนึงถึงค่าความร้อนในการเก็บกลับคืนจากก๊าซเสีย ความดันสูญเสียในระบบ ความเหมาะสมในการลงทุน ความสะดวกในการติดตั้ง สามารถสร้างอุปกรณ์อุ่นอากาศ แบบ Cross flow four pass heat exchanger มีท่อแลกเปลี่ยนความร้อนจำนวน 22 ท่อ ก๊าซเสียไหลในท่อ 1 เที้ยว และอากาศไหลในเซลล์ 4 เที้ยว ซึ่งจากการทดลองพบว่าสามารถอุ่นอากาศจากอุณหภูมิ 49 เป็น 394 องศาเซลเซียส สามารถประหยัดก๊าซ LPG ลง 23% ต่อการเผา 1 ครั้ง คิดเป็นค่าใช้จ่ายที่ประหยัดได้ประมาณ 14,553 บาทต่อปี มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาเผาเท่ากับ 2.3% โดยเกิดความดันสูญเสียประมาณ 124 ปาสคาล มีระยะเวลาคืนทุนประมาณ 2 ปี 2 เดือน

แมคพาวเวอร์ [2] ได้กล่าวถึงตัวแปรที่สำคัญในการออกแบบและผลกระทบในการสร้างอีโคโนไมเซอร์และเครื่องอุ่นอากาศ ซึ่งที่สำคัญที่ทำให้การออกแบบได้เปรียบนั้น พอจะสรุปได้ดังนี้

- ต้องพิจารณาผิวรับความร้อนที่จะสามารถรับเอาการถ่ายเทความร้อนได้สูงสุด
- การขาดฤดูที่ผิวของท่อที่ใช้แลกเปลี่ยนความร้อนที่เกิดจากการไหลในท่อต้องมีอัตราการสึกหรอต่ำสุด

- ใช้วัสดุที่เป็นโลหะจะเกิดความประหยัดกว่า

- ต้องมีตะแกรงและอัตราการกัดกร่อนเกิดขึ้นต่ำสุด

นอกจากนั้นแล้ว แมคพาวเวอร์ ยังสรุปถึงการป้องกันการกัดกร่อนที่พื้นผิวกรณีของทั้งอุณหภูมิสูงและอุณหภูมิต่ำในบริเวณที่ผิวความร้อนดังนี้

- เปลี่ยนการใช้วัสดุที่กัดกร่อนได้ง่าย เช่น เหล็ก ไปใช้วัสดุอื่นแทนเช่น แก้ว และให้มีความหนาอย่างน้อย 3.5-4 มิลลิเมตร

- เคลือบผิวท่อด้วยสารป้องกันการกัดกร่อน ได้แก่ กรดที่ต้านการกัดกร่อนจำพวกอีนาเมล

- ฉีดสารเติมแต่ง เช่น ฉีดให้กับน้ำมันเตาที่มีเปอร์เซ็นต์ของกำมะถันสูง ทำให้ไอกรดที่เกิดจากการเผาไหม้เป็นกลาง ซึ่งเป็นการช่วยลดผลกระทบกับอีโคโนมัยเซอร์และเครื่องอุ่นอากาศ เป็นผลให้ลดการสูญเสียพลังงานที่ใช้ในการผลิตได้ดียิ่งขึ้น

วรวิฒิ มั่นสกุล [3] ได้ศึกษาการออกแบบอุปกรณ์อุ่นอากาศ สำหรับเตาเผาสปริงแผ่น เพื่อนำก๊าซไอเสียจากเตาเผามาอุ่นอากาศก่อนเข้าเตาเผา โดยปัจจัยสำคัญที่ควรคำนึงถึงในการออกแบบและสร้างอุปกรณ์อุ่นอากาศ คือ อัตราการไหล อุณหภูมิของอากาศและก๊าซไอเสียที่เข้าสู่อุปกรณ์อุ่นอากาศ อัตราการแลกเปลี่ยนความร้อน ขนาดของอุปกรณ์อุ่นอากาศซึ่งรวมถึงช่องว่างภายในอุปกรณ์อุ่นอากาศ วัสดุและฉนวนที่ใช้ รวมถึงความดันสูญเสียที่เกิดขึ้น ซึ่งจากการทดลองเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเซลล์และท่อ ในรูปแบบ **Cross parallel two pass heat exchanger** พบว่าสามารถอุ่นอากาศก่อนเข้าเผาไหม้จากเฉลี่ยที่อุณหภูมิ 48 องศาเซลเซียส เป็น 200 องศาเซลเซียส สามารถประหยัดน้ำมันเตาได้เฉลี่ยประมาณ 9% ของการใช้น้ำมันเตาของเตาเผา คิดเป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายประมาณ 416,000 บาทต่อปี มีประสิทธิผล 26% เมื่อติดตั้งกับเตาเผาสามารถเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาเผาจาก 21% เป็น 26% โดยเกิดความดันสูญเสียประมาณ 0.343 กิโลปาสคาล มีระยะเวลาคืนทุนประมาณ 8 เดือน

สมเกียรติ บุญณะ [4] ได้ศึกษาพารามิเตอร์และทำการทดลองระบบการนำความร้อนที่สูญเสียออกจากเตาหลอมซิลิกาไปกับก๊าซไอเสียกลับมาใช้โดยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดท่อสองชั้นโดยพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการแลกเปลี่ยนความร้อน คือ อัตราการไหล อุณหภูมิ และพื้นที่ผิวของการแลกเปลี่ยนความร้อน โดยสร้างเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แล้วนำไปเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการคำนวณการแลกเปลี่ยนความร้อนของก๊าซไอเสียที่ปล่อยออกจากเตาหลอมซิลิกาที่มีอุณหภูมิประมาณ 1,373 องศาเซลวิน สรุปว่าประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะแปรผกผันกับอัตราการไหลของอากาศและจะแปรผันตรงกับอัตราการไหลของก๊าซไอเสียที่เข้าสู่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

อนุรักษ์ จิตระวีวรรณ และคณะ [5] ได้ทำการวิเคราะห์การใช้พลังงานของเตาควิปล่าขนาด 3 ตันต่อชั่วโมง สรุปว่าการนำก๊าซไอเสียกลับมาใช้ใหม่จากเตาที่มีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 250 - 700 องศาเซลเซียส เมื่อนำมาอุ่นอากาศจะทำให้การใช้ถ่านโค้กใน Charge น้อยลง และยังทำให้ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อน (Thermal efficiency) ของเตาเพิ่มขึ้นอีกด้วย แต่ต้องลงทุนในการสร้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนขึ้นมาใช้เป็นตัวแลกเปลี่ยนความร้อนและพบว่าการเพิ่ม

ปริมาณลมที่เข้าเตาถ้ามากเกินไปจะทำให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ถ่านโค้กภายในเตาลดน้อยลง เพราะความร้อนส่วนใหญ่จะถูกพาออกไปกับก๊าซไอเสีย

A. Nuntaphan และคณะ [6] ได้ศึกษาพฤติกรรมทางด้านความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อมีครีบบิดเกลียว (Spiral fin and tube heat exchanger) ที่มีการผสมของซีเมนต์ โดยเป็นการถ่ายเทความร้อนระหว่างสายอากาศร้อนที่มีซีเมนต์ปนกับสายน้ำเย็นที่อยู่ในท่อ และตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ ช่องว่างของครีบ อัตราไหลเชิงมวลของอากาศ อัตราการไหลเชิงมวลของซีเมนต์ และอุณหภูมิขาเข้าของสายอากาศร้อน ซึ่งให้อัตราการไหลและอุณหภูมิของสายน้ำเย็นคงที่ อยู่ที่ 101 ลิตรต่อนาที และ 5 องศาเซลเซียสตามลำดับ จากการทดลองพบว่าเวลาที่ใช้ในการถ่ายเทความร้อนควรจะน้อยกว่า 8 ชั่วโมง เนื่องจากความต้านทานความร้อนที่เกิดจากการอุดตันจะเพิ่มขึ้นตามเวลา และการผสมของซีเมนต์บนพื้นผิวการถ่ายเทความร้อนนั้นยังแปรผันตรงกับอัตราส่วนระหว่างอากาศและฝุ่น และจะแปรผกผันกับช่องว่างระหว่างครีบ

D.G. Prabhanjan และคณะ [7] ได้ศึกษาเปรียบเทียบอัตราการถ่ายเทความร้อนระหว่างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อตรง (Straight tube heat exchanger) และเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อขด (Helically coiled heat exchanger) ซึ่งวัตถุประสงค์ของการศึกษาก็คือ การหาข้อดีของการใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อขด เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อตรง เพื่อใช้ในการให้ความร้อนกับน้ำ จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะขึ้นอยู่กับรูปแบบของเครื่องถ่ายเทความร้อนและอุณหภูมิของอ่างน้ำ (Water bath) ที่อยู่รอบๆ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งการทดลองทำภายใต้สภาวะที่เป็นทรานซิชัน (Transition) และแบบปั่นป่วน (Turbulent) โดยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อขดจะมีสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมากกว่าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อตรง และเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทั้งสองแบบยังมีสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเพิ่มสูงขึ้น เมื่อน้ำในอ่างน้ำมีอุณหภูมิสูงขึ้น

M.A. Akhavan-Behabadi และคณะ [8] ได้ทำการศึกษาการเพิ่มขึ้นของความดันลดของน้ำยาทำความเย็น (R-134) ภายในท่อที่มีลวดขนาดต่างๆ อยู่ในท่อ โดยเป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้นยาว 1,040 มิลลิเมตร โดยมีตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ ระยะห่างระหว่างขดลวด เส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวด ซึ่งจากการศึกษาพบว่าเมื่อเพิ่มขดลวดลงในท่อจะทำให้ความดันลดเพิ่มขึ้นจาก 260% เป็น 1,600% และความดันลดจะมีค่าลดลงเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อลดลงและเมื่อระยะห่างระหว่างขดลวดเพิ่มสูงขึ้น โดยความสัมพันธ์ที่พัฒนาขึ้น

เพื่อทำนายความดันตกในท่อนี้ตั้งอยู่บนความสัมพันธ์ของ Chisholm และการทดลอง นอกจากนี้ยังพบว่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของท่อจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อลดความหนาของลวดและเพิ่มระยะห่างระหว่างขดท่อ

M.R. Salimpour [9] ได้ศึกษาคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนที่ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของของไหลในเซลล์และขดท่อของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยเป็นการถ่ายเทความร้อนระหว่างน้ำหล่อเย็นในเซลล์และน้ำมันในขดท่อ โดยจะมีการควบคุมตัวแปรเช่น อุณหภูมิขาเข้าและขาออกของของไหลด้านเซลล์และท่อ อัตราการไหลของของไหล ให้อยู่ในค่าที่เหมาะสม จากความสัมพันธ์ของการทดลองในงานวิจัยที่ผ่านมาสำหรับค่านัสเซลล์นัมเบอร์ (Nusselt number) ในด้านเซลล์นั้นมักจะได้จากการคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนด้านในท่อของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองจนได้พัฒนาสมการที่ใช้ในการทำนายสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนด้านเซลล์และด้านขดท่อของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนขึ้น โดยตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ ระยะห่างระหว่างขดท่อ อุณหภูมิของน้ำมัน และมีทิศทางการไหลแบบสวนทางกัน และจากการทดลองยังพบว่าเมื่ออุณหภูมิขาเข้าของน้ำมันเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนลดต่ำลง และจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะห่างระหว่างขดท่อเพิ่มมากขึ้น โดยระยะห่างระหว่างขดท่อจะส่งผลต่อค่านัสเซลล์นัมเบอร์ (Nusselt number) อย่างเห็นได้ชัดเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้น

M.R. Salimpour [10] ได้ศึกษาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเซลล์และขดท่อ (Shell and helically coiled tube heat exchanger) ซึ่งปัจจัยที่ทำการศึกษาคือ ระยะห่างระหว่างขดท่อ ทิศทางการไหล อุณหภูมิของของไหล และอัตราการไหล ซึ่งจากการทดลองจะได้ความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งด้านเซลล์และด้านท่อ ดังนี้

$$\text{ด้านท่อ} \quad Nu_i = 0.152 De^{0.432} Pr^{1.06} \gamma^{-0.277}$$

$$\text{ด้านเซลล์} \quad Nu_o = 19.64 Re_o^{0.513} Pr^{0.129} \gamma^{0.938}$$

โดยสามารถนำทั้งสองความสัมพันธ์ไปใช้ในการทำนายหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนทั้งด้านในและด้านนอกของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อขดได้ และยังพบว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนด้านเซลล์ของขดท่อจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อระยะห่างระหว่างขดท่อมีค่าเพิ่มมากขึ้น

P. Naphon และคณะ [11] ได้รวบรวมงานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับอัตราการไหลและลักษณะการถ่ายเทความร้อนในท่อโค้ง ประสิทธิภาพของการถ่ายเทความร้อนสามารถพัฒนาขึ้นจากเทคนิคการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน โดยทั่วไปเทคนิคในการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิดคือ เทคนิคแอคทีฟ (Active) และพาสซีฟ (Passive) โดยเทคนิคแอคทีฟนั้นต้องการพลังงานจากภายนอกเช่น พลังงานไฟฟ้า เสียงหรือการสั่นของพื้นผิว เป็นต้น ส่วนเทคนิคพาสซีฟต้องการรูปแบบพื้นผิวที่มีลักษณะพิเศษ ท่อโค้งถือว่าเป็นส่วนหนึ่งของเทคนิคการถ่ายเทความร้อนแบบพาสซีฟและเป็นรูปแบบท่อที่มีการใช้อย่างกว้างขวางสำหรับการประยุกต์ใช้ในการถ่ายเทความร้อน และยังเป็นกรรวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทความร้อนและลักษณะของของไหลหนึ่งเฟสและสองเฟสภายในท่อโค้ง โดยท่อโค้งได้ถูกจำแนกออกเป็น 3 ประเภทหลักๆ ดังนี้ ขดท่อแบบ Helically ขดท่อแบบ Spirally และขดท่อแบบอื่นๆ โดยจากการรวบรวมสามารถสรุปได้ดังนี้

- สำหรับขดท่อแบบ Helically นั้นได้มีการศึกษาเชิงทฤษฎีและทำการทดลอง พบว่ามีการศึกษาอย่างกว้างขวางเกี่ยวกับลักษณะการถ่ายเทความร้อนของของไหลหนึ่งเฟส และลักษณะการไหลของของไหลหนึ่งเฟสและสองเฟส ส่วนลักษณะการถ่ายเทความร้อนของของไหลสองเฟสนั้นยังมีการศึกษาอยู่น้อย

- สำหรับขดท่อแบบ Spirally ถึงแม้ว่าจะมีการตีพิมพ์งานวิจัยไม่มากนัก แต่มีหนึ่งงานวิจัยเกี่ยวกับการเสนอความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในท่อที่ได้รับการตีพิมพ์และยังไม่มีงานวิจัยเกี่ยวกับลักษณะการไหลและความดันลดในท่อรูปแบบนี้ที่ได้รับการตีพิมพ์

- สำหรับขดท่อแบบอื่นๆ ได้มีการเสนอลักษณะการถ่ายเทความร้อนของของไหลหนึ่งเฟสและสองเฟส แต่มีเพียงหนึ่งงานวิจัยที่น่าเสนอเกี่ยวกับลักษณะการไหลของของไหลสองเฟส

และยังพบว่าม้งานวิจัยบางฉบับเท่านั้นที่น่าเสนอเกี่ยวกับผลกระทบของการรวมเทคนิคแอคทีฟและพาสซีฟ ในการเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนและความดันลด

P. Naphon [12] ได้ศึกษาประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนและความดันลดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อขดที่มีครีปและปราศจากครีป โดยเป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อขดวกไปมาทั้งหมด 13 รอบทำจากท่อตรงทองแดง และเป็นการถ่ายเทความร้อนระหว่างน้ำร้อนกับน้ำเย็นด้านในท่อและด้านเซลล์ตามลำดับ โดยตัวแปรที่ทำการศึกษาดังนี้ อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำเย็นและน้ำร้อนในช่วง 0.1-0.22 กิโลกรัมต่อวินาที และ 0.02-0.12 กิโลกรัมต่อวินาทีตามลำดับ อุณหภูมิขาเข้าของน้ำเย็นและน้ำร้อนในช่วง 15-25 องศาเซลเซียส และ 35-45 องศาเซลเซียสตามลำดับ ซึ่งจากการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

- คุณหมุมิขาออกของน้ำเย็นจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออัตราการไหลเชิงมวลของน้ำร้อนเพิ่มสูงขึ้น
- อัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออัตราการไหลเชิงมวลของน้ำร้อนและน้ำเย็นเพิ่มสูงขึ้น
- ค่าแฟคเตอร์แรงเสียดทานจะลดลงเมื่ออัตราการไหลเชิงมวลของน้ำร้อนเพิ่มสูงขึ้น
- อัตราการไหลเชิงมวลขาเข้าของน้ำร้อนและน้ำเย็น และคุณหมุมิขาเข้าของสายน้ำร้อน จะมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน

V. Kumar และคณะ [13] ได้ศึกษาเชิงตัวเลขของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อซ้อนภายในในชุดท่อ (Tube in tube helically heat exchanger) โดยเป็นการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างอากาศที่ถูกอัดด้วยความดันสูงอยู่ภายในท่อกับน้ำเย็นนอกท่อที่สภาวะบรรยากาศ มีการเปลี่ยนแปลงความดันภายในท่อระหว่าง 10 ถึง 30 บาร์ และมีค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Reynolds numbers) อยู่ในช่วง 20,000 ถึง 70,000 นอกจากนี้ยังมีการศึกษาตัวแปรด้านนอกท่อ คืออัตราการไหลเชิงมวลของน้ำในช่วง 200 ถึง 600 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และยังมีการศึกษาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของการไหลในทิศทางเดียวกันและไหลสวนทางกัน และศึกษาค่านัสเซลนัมเบอร์ (Nusselt number) และค่าแฟคเตอร์ความเสียดทาน (Friction factor) ของด้านในและด้านนอกท่อโดยเปรียบเทียบกับผลการทดลองจากงานวิจัยที่ผ่านมา โดยจากการวิจัยพบว่า การถ่ายเทความร้อนรวมจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลและความดันภายในท่อเพิ่มสูงขึ้น และค่าแฟคเตอร์ความเสียดทานภายในท่อนั้นก็มีค่าใกล้เคียงกับข้อมูลในงานวิจัยที่ผ่านมา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

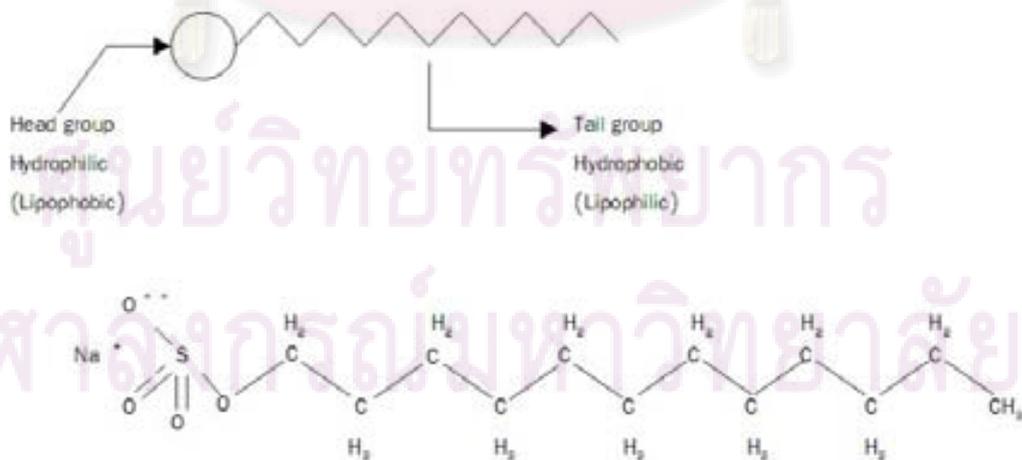
บทที่ 3

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 ผงซักฟอก (Detergent) [14]

ผงซักฟอกเป็นสินค้าอุปโภคบริโภคที่จำเป็นอย่างหนึ่งในชีวิตประจำวัน เพื่อชำระล้างสิ่งสกปรกออกจากเสื้อผ้า เครื่องนุ่งห่ม และภาชนะต่างๆ ตลอดจนเครื่องมือ เครื่องจักรกลโรงงาน แต่ที่ใช้นั้นมากคือ ใช้ซักล้างเสื้อผ้า เครื่องนุ่งห่ม ได้มีการผลิตผงซักฟอกขึ้นใช้เป็นครั้งแรกในประเทศเยอรมัน ในระยะสงครามโลกครั้งที่ 1 เนื่องจากในขณะนั้นไขว้และน้ำมันพืชซึ่งเป็นวัตถุดิบสำคัญในการผลิตสบู่เกิดขาดแคลน นักวิทยาศาสตร์จึงได้คิดค้นสารสังเคราะห์ขึ้นใหม่ ต่อมาจึงได้มีการค้นคว้าพัฒนาสูตรผงซักฟอกอย่างกว้างขวาง พร้อมกับความนิยมใช้ผงซักฟอกเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ประเทศไทยโดยบริษัท หลุยส์ทีเลียวโนเวนส์ จำกัด ได้นำเข้าผงซักฟอกยี่ห้อ "แพ็บ" จากต่างประเทศมาในช่วงหลังสงครามโลกครั้งที่ 2 เพื่อใช้แทนสบู่ในการซักเสื้อผ้า และชำระล้างสิ่งสกปรกอื่นๆ ปรากฏว่าเป็นที่นิยมของประชาชนโดยทั่วไป เพราะสามารถชำระล้างสิ่งสกปรกได้ดีกว่าสบู่ และสะดวกในการใช้มากกว่า บริษัทผู้ผลิตแพ็บคือ บริษัท คอลเกต ปาล์มโอสลิป จำกัด จึงได้ตั้งโรงงานผลิตและจำหน่ายผงซักฟอกในประเทศขึ้นในปี 2500 และ ต่อมาได้มีผู้ผลิตผงซักฟอกเกิดขึ้นอีกหลายบริษัท

ผงซักฟอกเป็นสารลดแรงตึงผิวชนิดหนึ่ง โดยมีองค์ประกอบที่สำคัญคือ Sodium Dodecyl Sulphate (SDS) ซึ่งโครงสร้างของสารลดแรงตึงผิวดังกล่าวมีลักษณะดังนี้



รูปที่ 3.1 โครงสร้างของสารลดแรงตึงผิว

ผงซักฟอกเป็นผลิตภัณฑ์เคมี ใช้วัตถุดิบแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับสูตรการผลิตของแต่ละโรงงาน และสารเคมี บางตัวอาจใช้แทนกันได้ วัตถุดิบที่ใช้ส่วนใหญ่ต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ส่วนประกอบของผงซักฟอกแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ ส่วนประกอบหลักและส่วนประกอบที่อาจมีได้

3.1.1 ส่วนประกอบหลัก

1. สารลดแรงตึงผิว

เป็นพวกสารอินทรีย์ ทำหน้าที่เป็นตัวละลายไขมัน ช่วยลดแรงตึงผิวของน้ำ ทำให้น้ำซึมเข้าไปสัมผัสกับสิ่งสกปรกต่างๆ ได้ จึงสามารถชำระล้างสิ่งสกปรกออกมาได้ทั้งในน้ำ กระด้างและน้ำธรรมชาติ สารนี้ต้องเป็นสารเคมีประเภทมีประจุลบ (Anionic) ประจุบวก (Cationic) หรือไม่มีประจุ (Nonionic) ประเภทใดประเภทหนึ่งหรือผสมกัน ในกรณีที่เป็นสารเคมีประเภทมีประจุลบ ต้องไม่เป็นแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนตที่มีโครงสร้างแบบกิ่ง (Branched alkylbenzene sulphonate) ตัวอย่างเช่น โซเดียมแอลคิลอะริลซัลโฟเนต (Sodium alkyl aryl sulphonate) ส่วนสารลดแรงตึงผิวประเภทมีประจุบวกเช่น เซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (Cetyl trimethyl ammonium bronide) และสารลดแรงตึงผิวประเภทไม่มีประจุ เช่นเอทิลินออกไซด์คอนเดนเสตของแอลคิลแฟตตีแอลกอฮอล์ (Ethylene oxide condonsatc of alkyl fatty alcohols) สารเหล่านี้เป็นองค์ประกอบสำคัญที่ทำหน้าที่ชำระล้างสิ่งสกปรก

2. สารลดความกระด้างของน้ำ

เช่น โซเดียม ไตรโพลีฟอสเฟต (Sodium tripolyphosphate, STPP) โซเดียม ไพโรฟอสเฟต (Sodium pyrophosphate) เกลือของกรดไนทริโลไตรแอซิติค (Nitrilotriacetic acid, NTA) เกลือของกรดเอทิลีนไดแอมีนเททราแอซิติค (Ethylenediaminetetracctic acid, EDTA) กรดซิตริกและอนุพันธ์ของกรดซิตริก (Citric acid and derivatives) ซีโอไลต์ (Zeolite) สารใดสารหนึ่งหรือผสมกัน สารพวกนี้ไม่ช่วยให้สิ่งสกปรกหลุดออกจากเสื้อผ้าหรือจากของใช้โดยตรง แต่ทำหน้าที่เสริมประสิทธิภาพของสารลดแรงตึงผิว โดยทำให้น้ำเป็นด่างเหมาะแก่การปฏิบัติงานของผงซักฟอก

สารลดความกระด้างมีหน้าที่ช่วยแก้ความกระด้างของน้ำ เนื่องจากความกระด้างของน้ำ (Ca^{2+} , Mg^{2+}) จะรบกวนการทำงานของสารลดแรงตึงผิวที่จะดึงสิ่งสกปรกออกจากผ้า นอกจากนี้ สารลดความกระด้าง ยังช่วยควบคุมสมดุลของค่าความเป็นกรดเป็นด่างให้อยู่ในระดับที่พอเหมาะ และคงที่ได้ด้วย สารลดความกระด้างมีหลายชนิดตัวอย่างเช่น สารโซเดียม ไตรโพลีฟอสเฟต สารทดแทนสารประกอบ STPP

2.1 สารโซเดียมไตรฟอสเฟต

สาร STPP มีสูตรโมเลกุล $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$ วัตถุประสงค์ที่ใช้ในการผลิตที่สำคัญคือ เทอร์มัลฟอสฟอริกแอซิด และโซดาแอชเข้มข้น ปฏิกิริยาของกรดฟอสฟอริกกับโซดาแอชเข้มข้น จะให้ของผสมระหว่างโมโนและไดโซเดียมออร์โทฟอสเฟต STPP ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Dehydration) ผสมระหว่างโมโน และไดโซเดียมออร์โทฟอสเฟตที่อุณหภูมิสูง ($500\text{ }^{\circ}\text{C}$) STPP ที่ผลิตได้ในประเทศไทยใช้อุตสาหกรรมผลิตผงซักฟอกเป็นส่วนใหญ่ นอกนั้น STPP สามารถที่ใช้ในระบบเตรียมน้ำประปา อุตสาหกรรมกระเบื้องเซรามิก สารช่วยถนอมอาหารทะเล อุตสาหกรรมสี เป็นต้น

สาร STPP ในผงซักฟอกจะลดความกระด้างโดยดึงอนุภาคแคลเซียม และแมกนีเซียมออกจากน้ำ แคลเซียมหรือแมกนีเซียมจะเข้าแทนที่โซเดียมในโมเลกุลของ STPP

สาร STPP เป็นสารลดความกระด้างที่ทำหน้าที่ได้ ประสิทธิภาพดีแต่สามารถก่อให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมได้ หลายประเทศมีความเห็นว่าฟอสเฟตอาจเป็นต้นเหตุทำให้เกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน (Eutrophication) ในแหล่งน้ำ ดังนั้นจึงได้ให้ความสนใจกับผงซักฟอกที่ไม่มีส่วนประกอบของฟอสเฟต โดยใช้สารอื่นทดแทนเป็นสารลดความกระด้าง

2.2 สารทดแทนสารประกอบ STPP

สารทดแทนสารประกอบ STPP มีหลายชนิด แต่มีเพียง 5 ชนิดเท่านั้นที่ใช้อยู่ในประเทศต่างๆ ในปัจจุบัน โดยใช้ในรูปของสารลดความกระด้างโดยตรงหรือเป็นสารร่วมในการลดความกระด้าง (Co-builder) ได้แก่

2.2.1 ไนทริโลไตรแอซิดิก

สารไนทริโลไตรแอซิดิกเป็นสารประกอบอินทรีย์ วัตถุประสงค์ที่ใช้ในการผลิตได้แก่ แอมโมเนีย ฟอรัมาลดีไฮด์ กรดไฮโดรไซยานิก อนุมูลความกระด้าง (Ca^{2+} , Mg^{2+}) ในน้ำจะถูกเปลี่ยนกับเกลือไตรโซเดียมของสาร NTA ทำให้ลดความกระด้างของน้ำลง ซึ่งจะทำหน้าที่ได้ดีในสภาวะน้ำที่เป็นด่าง ราคาของสาร NTA แพงกว่า STPP ประมาณร้อยละ 50 แต่ใช้ปริมาณน้อยกว่า

2.2.2 ซิเทรต

ซิเทรตเป็นเกลือของกรดซิตริก (Citric acid) เป็นสารประกอบอินทรีย์ ข้อเสียของสารซิเทรตในการใช้เป็นสารลดความกระด้าง คือประสิทธิภาพจะลดลงที่อุณหภูมิสูง นอกจากนี้ซิเทรตยังมีประสิทธิภาพต่ำในการลดความกระด้างที่เกิดจากอนุมูลแคลเซียมเมื่อเทียบกับความกระด้างที่เกิดจากอนุมูลแมกนีเซียม อย่างไรก็ตามซิเทรตยังใช้เป็นสารลดความกระด้างในหลายๆ ประเทศ โดยเป็นส่วนประกอบในผงซักฟอกที่ใช้ซักล้างที่อุณหภูมิต่ำ

โดยที่อเมริกามีการใช้ซีเทรตในน้ำยาซักฟอก สำหรับผงซักฟอกในประเทศไทยไม่นิยมใช้ สารประกอบนี้เพราะมีราคาแพง

ในด้านผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ไม่มีรายงานที่แสดงถึงความ เป็นพิษของซีเทรตต่อสุขภาพ และเนื่องจากเป็นสารที่ย่อยสลายทางชีวภาพได้ จึงสามารถถูก กำจัดในระบบบำบัดน้ำเสียได้ (ถ้ามี)

2.2.3 เกลือของกรดโพลีคาร์บอกซีลิก (Polycarboxylic acid, PCA)

โพลีคาร์บอกซีเลตเป็นเกลือโพลิเมอร์ของกรด ซึ่งได้แก่กรด อะคริลิก (Acrylic acid) กรดมาลีนิก (Maleic acid) สมบัติในการลดความกระด้างขึ้นอยู่กับขนาด ของโพลิเมอร์ กลไกในการลดความกระด้างของ PCA เป็นแบบ **Electrostatic binding** และ **Site binding** ในกลไกแรกอนุมูลประจุตรงข้าม จะถูกตรึงโดยสภาพประจุไฟฟ้ารอบ ๆ โมเลกุลของ โพลิเมอร์ ในขณะที่กลไกที่สองจะลดความกระด้างเนื่องจาก **Active site** ของอนุมูลโพลิเมอร์รวม กับอนุมูลประจุตรงข้าม โดยเฉพาะอนุมูลที่มีขนาดใหญ่กว่าจะรวมกันได้ดีขึ้น ($Ca^{2+} > Li^{+} > Na^{+} > K^{+}$)

PCA ใช้ในปริมาณต่ำเมื่อเทียบกับสารทดแทนอื่นโดยให้สมบัติ เท่ากัน ส่วนใหญ่นิยมใช้เป็นสารลดความกระด้างร่วม ทั้งนี้เนื่องจากราคาที่สูงและย่อยสลายทาง ชีวภาพได้ยาก สำหรับในเรื่องผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและความเป็นพิษนั้นยังไม่เป็นที่แน่ชัด เนื่องจากมีข้อมูลการวิจัย ไม่พอที่จะสรุปได้

2.2.4 ฟอสฟอเนต

ฟอสฟอเนตเป็นเกลืออยู่ในกลุ่มของกรดฟอสฟอนิก (Phosphonic acids) ซึ่งมีสารฟอสฟอรัสและไนโตรเจน มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ มีสมบัติและราคา แพงเช่นเดียวกับ PCA ย่อยสลายยาก ปัจจุบันมักใช้เป็นสารร่วมลดความกระด้าง รายงานในเรื่อง ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและความเป็นพิษยังมีอยู่น้อยเช่นเดียวกัน

2.2.5 ซีโอไลต์

สารซีโอไลต์เป็นผลึกอนินทรีย์ของอะลูมิเนียมซิลิเกต ซึ่งมีพื้นที่ผิว ภายใต้อากาศเมื่อเทียบกับพื้นที่ผิวภายนอกสังเคราะห์ขึ้น โดยเลียนแบบดินขาว (Kaolin clay) ซึ่งเป็นสารที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ ประกอบด้วย 1 โมลของไฮดรอกไซด์ 1 โมลของอะลูมินา 2 โมเลกุลของ ซิลิกาและ 4.5 โมลของน้ำ สารซีโอไลต์สามารถลดความกระด้างของน้ำโดยวิธีการแลกเปลี่ยน ประจุเช่นเดียวกับสาร STPP โดยที่แคลเซียม (Ca^{2+}) และแมกนีเซียม (Mg^{2+}) จะแลกเปลี่ยนประจุ กับไฮดรอกไซด์ในสารทั้งสอง

ได้มีการศึกษาทางด้านประสิทธิภาพของการลดความกระด้าง ในน้ำระหว่างซีโอไลต์และ STPP พบว่าเวลาที่ใช้ในการลดปริมาณแคลเซียมในน้ำอุณหภูมิห้องของ ซีโอไลต์นานกว่า STPP ประมาณ 3 เท่า กล่าวคือซีโอไลต์ใช้เวลา 3 นาที ในขณะที่ STPP ใช้เวลา

1 นาที ซีโอไลต์เมื่อเทียบกับสารทดแทนอื่น ๆ ในปริมาณเดียวกันจะมีความสามารถในการลดความกระด้างได้ต่ำกว่า และจะลดความกระด้างที่เกิดจากอนุมูลแคลเซียมได้ดีกว่าที่เกิดจากอนุมูลแมกนีเซียม ขนาดของซีโอไลต์มีผลต่อประสิทธิภาพการลดความกระด้างเช่นกัน ซีโอไลต์ควรมีขนาดเล็กกว่า 10 ไมโครเมตร เพื่อที่จะให้เกิดการแลกเปลี่ยนประจุได้เร็วขึ้นและลอดผ่านเส้นใยของเยื่อผิวได้ จึงจะทำให้ผงซักฟอกมีประสิทธิภาพผลสูง

สำหรับการใช้สารลดความกระด้างในประเทศไทย ได้มีการนำซีโอไลต์มาใช้ทดแทน STPP ในสูตรบางส่วน

3. สารรักษาระดับความเป็นด่าง (alkaline builder)

เป็นสารที่รักษาระดับความเป็นด่างให้คงที่ตลอดช่วงการใช้งาน ได้แก่ โซเดียมซิลิเกต (Sodium silicate) โซเดียมคาร์บอเนต (Sodium carbonate) โซเดียมเซสควิคาร์บอเนต (Sodium sesquicarbonate) สารใดสารหนึ่ง หรือผสมกัน ช่วยให้ผงซักฟอกไม่กัดภาชนะที่ใช้ซักกันสนิม และช่วยเสริมสร้างประสิทธิภาพของสารลดแรงตึงผิว

4. สารป้องกันคราบกลับคืน (Anti soil redeposition agent)

เช่น โซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Sodium carboxymethyl cellulose) เป็นตัวกันไม่ให้เกิดตะกอนขึ้นในระหว่างองค์ประกอบต่างๆ

5. สารเพิ่มความสดใส (Optical brightening agent of optical brightener)

เป็นสารที่มีสมบัติดูดแสงอัลตราไวโอเล็ตไว้ ทำให้เกิดการเรืองแสงสะท้อนเข้าตาและทำให้เสื้อผ้าแลดูขาวนวลใช้กันมากได้แก่ Stibene derivative

3.1.2 ส่วนประกอบที่อาจมีได้

1. โซเดียมซัลเฟต (Sodium sulphate)

มักจะเติมลงไปเพื่อเพิ่มปริมาณ เพราะโดยปกติเป็นสารที่เกิดขึ้นจากการสังเคราะห์อยู่แล้ว และเป็นสารป้องกันการจับตัวเป็นก้อนของผงซักฟอก (Processing acid)

2. สารเพิ่มฟอง (Suds booster)

เป็นสารซึ่งเมื่อใช้ร่วมกับสารลดแรงตึงผิวจะทำให้เกิดฟองมากขึ้น ใช้เติมในผงซักฟอกชนิดซักด้วยมือ หรือ สารลดฟอง (Suds depressor) เป็นสารซึ่งเมื่อใช้ร่วมกับสารลดแรงตึงผิวจะทำให้ฟองลดลง ใช้เติมลงในผงซักฟอกชนิดซักฟอกด้วยเครื่องซักผ้า

3. สารฟอก สารฟอกต้นตอ และสารคงสภาพของสารฟอกต้นตอ

สารฟอก (Oxygen bleach) หมายถึง สารที่อาศัยปฏิกิริยาของแอกซิเจนออกซิเจน (Nascent oxygen) ในการฟอก และสารฟอกต้นตอ (Bleach precursor หมายถึงสารซึ่งเมื่อละลายในน้ำจะเกิดสารฟอกขึ้น รวมทั้งสารคงสภาพของสารฟอกต้นตอ (Stabilizer for bleach precursor) หมายถึงสารซึ่งเมื่อผสมกับสารฟอกต้นตอแล้วทำให้สารฟอกต้นตอสลายตัว

ซ้าลง ทำหน้าที่ออกซิไดซ์สารประกอบบางชนิดซึ่งลดการสะท้อนกลับของแสง ดังนั้นทำให้ผ้าดูขาวและสดใสขึ้น

4. สารช่วยการละลาย (Hydro trope)

เป็นสารที่ทำให้ผงซักฟอกละลายน้ำได้ดีขึ้น

5. สารกันหมอง (Anti-ranishing agent)

เป็นสารที่ช่วยให้สิ่งซักล้างส่วนที่เป็นโลหะไม่หมองคล้ำ

6. แอนติออกซิแดนต์ (Anti-oxidant)

เป็นสารที่ทำให้ส่วนประกอบบางอย่างของผงซักฟอกมีปฏิกิริยากับออกซิเจน

ซ้าลง

7. เอนไซม์ (Enzyme)

เป็นสารอินทรีย์ที่มีสมบัติช่วยย่อยโมเลกุลของโปรตีนหรือแป้งหรือไขมันให้เป็นหน่วยย่อยๆ ได้ ปัจจุบันนิยมใช้แพร่หลายมากขึ้น เพราะมีประสิทธิภาพในการชำระล้างสามารถย่อยโปรตีนของเหงื่อไคล คราบโลหิต ปกติใช้ Proteases และ Amylases ซึ่งไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

8. น้ำหอม

เพื่อให้กลิ่นหอมน่าใช้

9. สี

เพื่อให้ผลิตภัณฑ์ดูสวยงาม

10. สารกันการจับตัวเป็นก้อน

11. สารช่วยขยับสิ่งสกปรก (Soil releasing agent)

เป็นสารที่ช่วยให้สิ่งสกปรกที่ติดเนื้อผ้าหลุดออกง่ายขึ้น

12. สารต้านจุลินทรีย์ (Anti-microbial compound)

เป็นสารที่ช่วยยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์

13. สารช่วยคงสภาพผิวหนัง (Mildness additive)

เป็นสารที่ช่วยให้ผงซักฟอกไม่ทำอันตรายผิวหนัง

14. สารคงสภาพการเก็บรักษา (Storage stabilizer)

เป็นสารที่ช่วยให้ผงซักฟอกเก็บไว้ได้นานโดยไม่เสื่อมสภาพ

15. สารช่วยให้ผ้านุ่ม (Fabric softening agent)

เป็นสารที่ช่วยทำให้ผ้านุ่มขึ้นหลังจากซักแล้ว

16. สารต้านไฟฟ้าสถิต (Anti-static agent)

เป็นสารที่ช่วยลดประจุไฟฟ้าสถิตที่เกิดขึ้นบนเนื้อผ้า

17. สารต้านการกัดกร่อน (Anti-corrosion)

เป็นสารที่ช่วยลดการกัดกร่อนส่วนที่เป็นโลหะของเสื้อผ้า ช่วยป้องกันการสึกหรอของส่วนประกอบของเครื่องซักผ้า

18. สารกันความคิน

เป็นสารที่ช่วยป้องกันไม่ให้สิ่งสกปรกกลับเข้าไปเกาะกับเนื้อผ้าที่สะอาดแล้ว เช่น โซเดียมคาร์บอเนตซีเมทิลเซลลูโลส

19. น้ำ

20. สารประกอบอื่นๆ อาจมีได้ และสามารถทดสอบได้

เช่น โซเดียมไฮโดรฟอสเฟต (Sodium hydro phosphate) โซเดียมออร์โทฟอสเฟต (Sodium orthophosphate) หรือ โซเดียมเมทาฟอสเฟต (Sodium met phosphate) ที่มีสมบัติเหมือน STPP ทำหน้าที่เป็น บัฟเฟอร์

3.2 กรรวิธีการผลิตผงซักฟอก

สารตั้งต้นในการผลิตผงซักฟอกมี 2 ชนิด คือ

3.2.1 Branched alkyl benzene (BAB)

สารตั้งต้นชนิดนี้เป็นปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมมาก เพราะทำให้เกิดฟองและสลายตัวยาวนาน เกิดน้ำเสียและทำลายสิ่งมีชีวิตในน้ำ

3.2.2 Linear alkyl benzene (LAB)

สารตั้งต้นชนิดนี้สามารถแก้ปัญหของ BAB ได้ แต่มีค่าใช้จ่ายสูงกว่า BAB ประมาณร้อยละ 10 - 25

ปัจจุบันโรงงานผลิตผงซักฟอกทั้งหมดภายในประเทศ ผลิตผงซักฟอกโดยใช้กรรมวิธีผลิตแบบ LAB เพื่อให้ ตรงตามมาตรฐานผงซักฟอกที่กำหนดให้ใช้สารลดแรงตึงผิวประเภท LAB เพื่อแก้ปัญหามลพิษตั้งแต่ปลายปี 2528 ซึ่งมีกรรมวิธีผลิตเป็นลำดับขั้นตอน (รูปที่ 3.2) ดังนี้

1. Sulphonation - sulphation ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการกลั่นน้ำมันปิโตรเลียมมาทำปฏิกิริยากับโซเดียมหรือซัลเฟอร์ไดออกไซด์

2. Neutralization คือนำวัตถุดิบที่ได้จากขั้นที่ 1 มาทำให้เป็นกลางด้วยสารละลายโซดาไฟ (caustic soda) เพื่อเปลี่ยนกรดซัลโฟนิก (Sulphonic acid) ให้เป็นเกลือโซเดียม (Sodium salt) ซึ่งเป็นสารช่วยลดแรงตึงผิวของน้ำ ในขั้นนี้ยังช่วยกำจัดกรดซัลฟิวริก (Sulphuric acid) ให้หมดไปด้วย เพราะกรดซัลฟิวริกจะเป็นอันตรายต่อเส้นใยของผ้าและ ผิวหนังของคน

3. Crutching คือนำวัตถุดิบในขั้นที่ 2 มาผสมกับสารลดความกระด้างของน้ำ เช่น STPP ซีโอไลต์ ซิลิเกต และสารเติมแต่งอื่นอีกหลายชนิดตามสูตรของแต่ละโรงงาน เพื่อช่วยให้การ

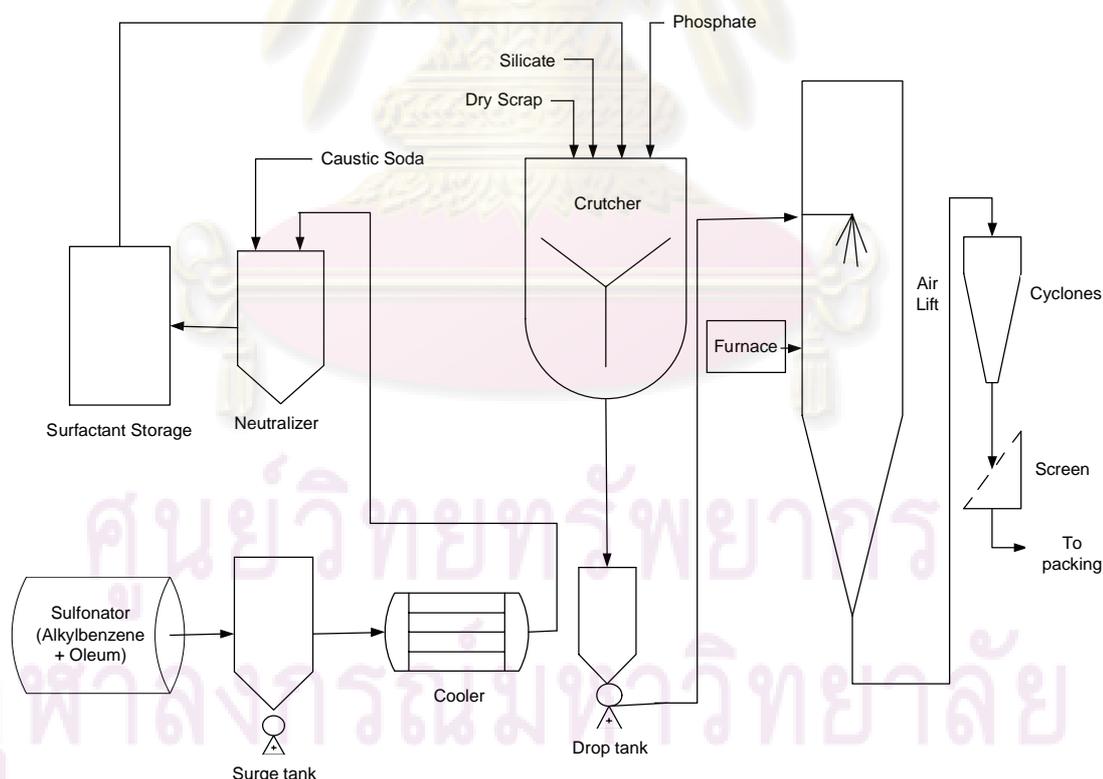
ซัฟฟอกมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น สารผสมที่ได้จะมีลักษณะเป็นของเหลวข้นๆ คล้ายแป้งเปียก (Paste) เก็บไว้ในถังซึ่งอยู่ในระดับต่ำ (Drop tank)

4. สูบ (Pump) สารผสมที่มีลักษณะเป็นของเหลวข้นๆ ขึ้นไปยังหอสูง (Spray tower) เพื่อนำไปฉีดพ่น (Spraying) ให้เป็นเม็ดด้วยความดันสูง ซึ่งปกติหอสูงจะมีความสูงประมาณ 80 ฟุต เมื่อสารผสมที่ถูกฉีดออกมาปะทะกับลมร้อนก็จะกลายเป็นเม็ดผงซัฟฟอกเล็กๆ มีลักษณะแห้ง (Dried granules) และนำเม็ดผงซัฟฟอกที่มีขนาดใหญ่เกินความต้องการไปหลอมตัวเป็นของเหลวใหม่ในขั้นที่ 3 ก่อนส่งกลับขึ้นมายังหอสูงเพื่อฉีดเป็นเม็ดให้ได้ขนาดตามความต้องการต่อไป

5. เม็ดผงซัฟฟอกเล็กๆ ที่ได้จะเคลื่อนไปยังไซโคลน โดยการดันขึ้นไปของลมเย็น เพื่อไล่ความชื้น และแยกเม็ดผงซัฟฟอกให้ได้ตามขนาดที่ต้องการโดยผ่านตะแกรง

6. นำเม็ดผงซัฟฟอกที่ได้ขนาดไปผ่านการฉีดน้ำหอมเพื่อช่วยให้ผ้าหรือสิ่งชำระล้างมีกลิ่นหอม

7. ตรวจสอบคุณภาพและนำไปบรรจุใส่กล่องหรือซองให้ได้ขนาดและน้ำหนักต่างๆ ตามที่ต้องการแล้วบรรจุใส่หีบเพื่อรอการจำหน่าย



รูปที่ 3.2 กรรมวิธีการผลิตผงซัฟฟอก

3.3 การถ่ายเทความร้อน (Heat transfer) [15-18]

การไหลของความร้อน เรียกว่า การถ่ายเทความร้อน (Heat transfer) แบ่งออกได้เป็น 3 รูปแบบใหญ่ๆ ดังต่อไปนี้

3.3.1 การนำความร้อน (Heat conduction)

3.3.2 การพาความร้อน (Heat convection)

3.3.3 การแผ่รังสีความร้อน (Heat radiation)

ไม่ว่าการถ่ายเทความร้อนในรูปแบบใดข้างต้น การถ่ายเทความร้อนจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อมีผลต่างของอุณหภูมิเท่านั้น โดยความร้อนจะไหลจากที่มีอุณหภูมิสูงไปยังที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ปรัชญาการนำความร้อนจะเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิภายในวัตถุชิ้นหนึ่งมีค่าไม่เท่ากันทุกจุด หรือเมื่อนำวัตถุสองชิ้นที่มีอุณหภูมิแตกต่างกันมาสัมผัสกัน ปัจจัยสำคัญที่มีส่วนในการกำหนดอัตราการนำความร้อนก็คือ ผลต่างของอุณหภูมิ มิติและรูปร่างของวัตถุ รวมถึงคุณสมบัติของวัตถุ ยิ่งผลต่างของอุณหภูมิมียิ่งสูงขึ้นเท่าไร อัตราการนำความร้อนก็จะสูงขึ้นเท่านั้น

ในกรณีการนำความร้อน ถ้าอุณหภูมิที่ทุกๆ จุดของวัตถุที่นำความร้อนมีค่าคงที่โดยไม่แปรเปลี่ยนตามเวลา เรียกว่าการนำความร้อนในสภาวะคงตัว (Steady-state Heat conduction) ในกรณีนี้ ปริมาณความร้อนที่ไหลผ่านพื้นที่หนึ่งหน่วยของวัตถุในหนึ่งหน่วยเวลาจะมีค่าคงที่ ในทางตรงข้าม ถ้าอุณหภูมิของวัตถุทั้งชิ้นหรืออุณหภูมิของวัตถุส่วนหนึ่งมีการแปรเปลี่ยนค่าตามเวลา อัตราการนำความร้อนของวัตถุย่อมเปลี่ยนแปลงค่าตามเวลาด้วย ในกรณีนี้เราเรียกว่า การนำความร้อนในสภาวะไม่คงตัว (Unsteady-state Heat conduction) โดยทั่วไปการนำความร้อนที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน สามารถถือได้ว่าเป็นการนำความร้อนในสภาวะคงตัว

การถ่ายเทความร้อนแบบการพาเป็นลักษณะเฉพาะของของไหล เพราะจะเกิดขึ้นในก๊าซและของเหลวเท่านั้น ในการพาความร้อนโมเลกุลของก๊าซหรือของเหลวจะเคลื่อนที่ไปยังผิวถ่ายเทความร้อนไม่ขาดสาย และทำการแลกเปลี่ยนความร้อนที่ผิวนั้น ด้วยเหตุนี้จึงการเคลื่อนที่ของโมเลกุลกระจัดกระเจิงขึ้นเท่าไร อัตราการพาความร้อนก็จะสูงขึ้นเท่านั้น เพราะจำนวนของโมเลกุลที่เคลื่อนที่ไปสัมผัสกับผิวถ่ายเทความร้อนมีเพิ่มขึ้น

เพื่อเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อน มีอยู่บ่อยๆ ที่ทำการกวนของไหลด้วยแรงกลบ้าง หมุนเวียนของไหลด้วยเครื่องสูบบ้าง หรือขับเคลื่อนของไหลด้วยกรรมวิธีพิเศษบ้าง การทำเช่นนี้เรียกว่าการพาโดยบังคับ (Forced convection) ในทางตรงกันข้ามการพาความร้อนที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของของไหลอย่างธรรมชาติ เนื่องจากแรงลอยตัว (Buoyant force) ที่เกิดจากการขยายตัวของของไหลด้วยความร้อน เราเรียกว่าการพาอย่างธรรมชาติ (Natural convection) หรือการพาอย่างอิสระ (Free convection)

การแผ่รังสีความร้อนจะเกิดขึ้นระหว่างผิว 2 แห่งที่มีอุณหภูมิต่างกันและถูกกั้นกลางด้วยตัวกลางที่ยอมให้รังสีความร้อนวิ่งผ่านได้ อากาศที่บริสุทธิ์และสุญญากาศจะยอมให้รังสีความร้อนวิ่งผ่านได้ แต่ของเหลวส่วนใหญ่จะไม่ยอมให้รังสีความร้อนวิ่งผ่าน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำ และส่วนใหญ่ของก๊าซที่สันดาปได้จะมีคุณสมบัติที่ยอมให้รังสีที่มีความยาวคลื่นเฉพาะบางช่วงเท่านั้นวิ่งผ่าน

เมื่อรังสีความร้อนแผ่ไปถึงผิวของวัตถุ รังสีส่วนหนึ่งจะถูกสะท้อนกลับจากผิววัตถุ รังสีส่วนหนึ่งจะถูกดูดกลืนเป็นความร้อนและไปเพิ่มอุณหภูมิของวัตถุที่รับรังสีความร้อน และในบางครั้งรังสีอีกส่วนหนึ่งจะวิ่งทะลุวัตถุนั้นโดยไม่เปลี่ยนแปลงเป็นความร้อน

3.3.1 การนำความร้อน (Heat conduction)

ในกรณีผนังราบ (Plane wall) เมื่อพิจารณาค่าอุณหภูมิที่ถ่ายเทจากด้านในของวัตถุหนึ่งสู่ด้านนอก กรณีนี้แสดงว่ามีการถ่ายเทพลังงานจากขอบเขตที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่ขอบเขตที่มีอุณหภูมิต่ำ ลักษณะเช่นนี้เรากล่าวได้ว่าพลังงานถ่ายเทด้วยวิธีการนำ นั่นแสดงว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าอุณหภูมิ

$$\frac{q}{A} \propto \frac{dT}{dx}$$

เมื่อแทนด้วยสัดส่วนที่เป็นค่าคงที่ หรือเป็นการกระจายอุณหภูมิในผนังราบ (Plane wall) แบบมิติเดียว (One-dimensional temperature distribution) หรือกล่าวเป็นนัยหนึ่งว่าอุณหภูมิ $T(x)$ แปรผันกับระยะทางตามแกน x เท่านั้น สมการอัตรา (Rates equation) สำหรับการนำความร้อน หรือที่มีชื่อเรียกว่า สมการฟูเรียร์ (Fourier's law) จึงสามารถเขียนได้ดังนี้

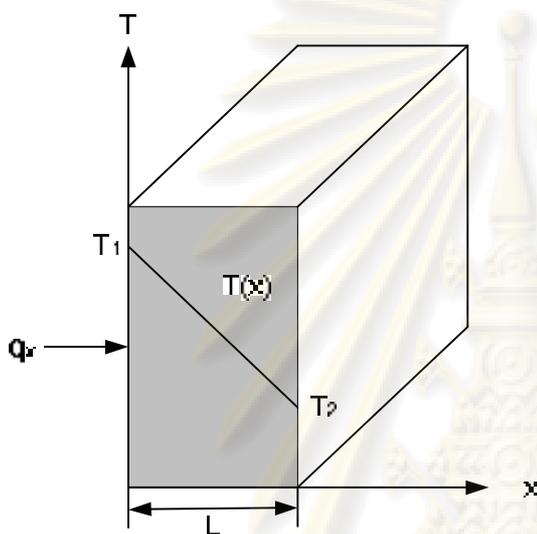
$$q_x = -kA \frac{dT}{dx} \quad (3.1)$$

โดยที่ q คืออัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อน (หน่วย W) ค่า $\frac{dT}{dx}$ คือค่าอุณหภูมิในทิศทางที่ความร้อนไหล (Temperature gradient) ค่าคงที่ k มีค่าเป็นบวก เรียกว่าสภาพการนำความร้อนของวัสดุ (Thermal Conductivity; $W/m.K$) ค่า A คือพื้นที่ที่ตั้งฉากกับทิศทางการถ่ายเท (Area; m^2) เครื่องหมายลบในสมการนี้เป็นเพราะความร้อนจะต้องถ่ายเทในทิศทางที่อุณหภูมิลดลงเสมอ ถ้าระบบอยู่ในสภาวะคงตัว (สม่ำเสมอ) การกระจายอุณหภูมิในผนังจะเป็นสมการเส้นตรง (Linear) ดังรูปที่ 3.3 และการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ตามทิศทาง x เขียนได้เป็น

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

ดังนั้นอัตราการถ่ายเทความร้อน มีค่าเท่ากับ

$$q_x = -kA \frac{T_2 - T_1}{L} \quad (3.2)$$



รูปที่ 3.3 การนำความร้อนแบบมิติเดียวผ่านผนัง

ในกรณีระบบทรงกระบอก การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมักจะเกิดในทิศทางตามรัศมีเท่านั้น ดังนั้นจึงคิดได้ว่าเป็นการนำความร้อนในมิติเดียว นอกจากนั้นแล้วภายใต้สภาวะคงตัวและไม่มีการกำเนิดความร้อนภายในตัวกลาง ตัวอย่างระบบทรงกระบอกที่พบบ่อยได้แก่การนำความร้อนผ่านผนังท่อ รูปทรงกระบอกกลวงซึ่งผิวในและนอกของทรงกระบอกสัมผัสกับของไหลที่มีอุณหภูมิต่างกัน ถ้าทรงกระบอกมีความยาวมากเมื่อเทียบกับความหนาของผนัง การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นในแนวรัศมีและประมาณได้ว่าเป็นการนำความร้อนมิติเดียวตามรัศมี ในกรณีนี้เมื่อเป็นสภาวะคงตัว และไม่มีการกำเนิดความร้อนภายในตัวกลาง สมการสำหรับพิกัดทรงกระบอกมิติเดียวคือ

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(kr \frac{dT}{dr} \right) = 0 \quad (3.3)$$

ค่า k ในสมการที่ 3.3 อาจไม่ใช่ค่าคงที่ก็ได้ และถ้าพิจารณากฎของฟูเรียร์สำหรับพิกัดทรงกระบอก อัตราการนำความร้อนผ่านผิวของทรงกระบอกเขียนได้เป็น

$$q_r = -kA \frac{dT}{dr} = -k(2\pi rL) \frac{dT}{dr} \quad (3.4)$$

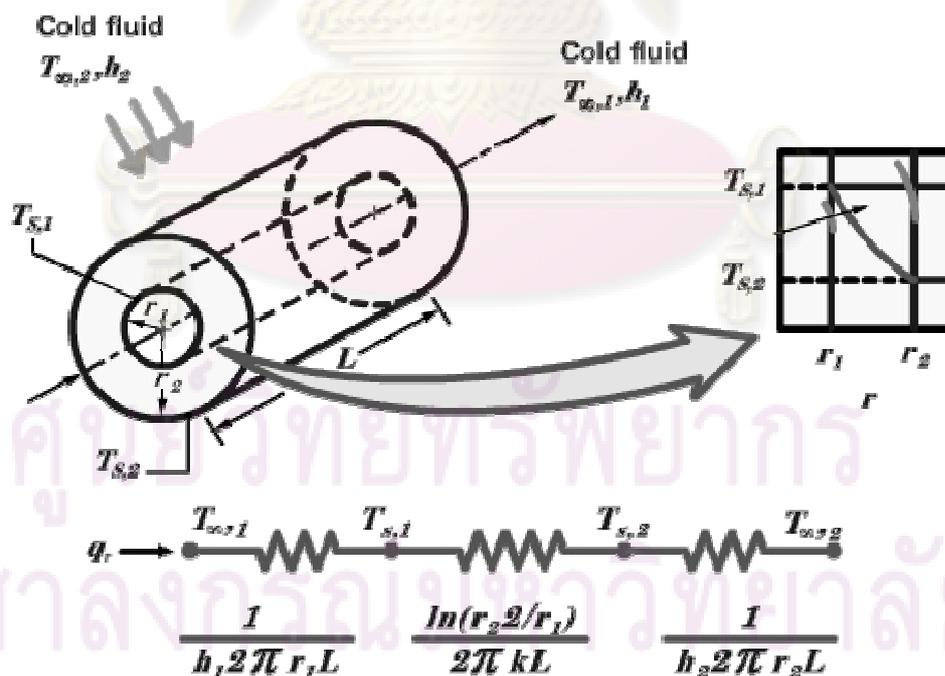
โดยที่ $A = 2\pi rL$ คือพื้นที่ใดๆ ในผิวทรงกระบอกที่ตั้งฉากกับทิศทางการถ่ายเทความร้อนจากสมการที่ 3.3 และ 3.4 เห็นว่าอัตราการนำความร้อนนั้นมีค่าคงที่ในทิศทาง r

การกระจายอุณหภูมิในทรงกระบอกสามารถหาได้โดยการแก้สมการที่ 3.3 และใช้เงื่อนไขขอบเขตที่เหมาะสม สมมติว่า k เป็นค่าคงที่ สมการที่ 3.3 สามารถอินทิเกรตสองครั้งได้

$$T = C_1 \ln(r) + C_2 \quad (3.5)$$

สมมติว่ารู้อุณหภูมิที่ผิวทั้งสองด้านของทรงกระบอก เงื่อนไขขอบเขตสำหรับหา C_1 และ C_2 คือ

$$\begin{array}{ll} \text{ที่} & r = r_1 & T = T_{s,1} \\ \text{และที่} & r = r_2 & T = T_{s,2} \end{array}$$



รูปที่ 3.4

ทรงกระบอกกึ่งกลางซึ่งมีการพาความร้อนที่ผิว

แทนค่าลงในสมการที่ 3.5 จะได้

$$T_{s,1} = C_1 \ln(r_1) + C_2$$

และ

$$T_{s,2} = C_1 \ln(r_2) + C_2$$

แก้สมการทั้งสองเพื่อหาค่า C_1 และ C_2 แทนค่ากลับลงในสมการที่ 3.5 ได้

$$T = \frac{T_{s,1} - T_{s,2}}{\ln(r_1 / r_2)} \ln\left(\frac{r}{r_2}\right) + T_{s,2} \quad (3.6)$$

เห็นได้ว่าการกระจายอุณหภูมิของการนำความร้อนตามรัศมีของทรงกระบอกกลวงนั้นเป็นลักษณะ **Logarithmic** ไม่ใช่เส้นตรงดังในกรณีผนังราบ การแทนสมการที่ 3.6 ลงในกฎฟูเรียร์จะได้

$$q_r = \frac{2\pi Lk(T_{s,1} - T_{s,2})}{\ln(r_2 / r_1)} \quad (3.7)$$

ในกรณีนี้เนื่องจากอัตราการนำความร้อนเป็นค่าคงที่จึงเขียนเป็นวงจรมีได้ และค่าความต้านทานความร้อนจะอยู่ในรูป

$$R_{cond} = \frac{\ln(r_2 / r_1)}{2\pi Lk} \quad (3.8)$$

3.3.2 การพาความร้อน (Heat convection)

เมื่อทำการศึกษาเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนโดยการพา จะพบว่าทั้งของไหลที่ไหลอยู่ในสภาพการไหลแบบชั้นๆ และทั้งการไหลแบบปั่นป่วน จะมีชั้นขอบเขตต่างๆ ซึ่งแน่นอนอยู่รอบๆ ผิวถ่ายเทความร้อน เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนผ่านชั้นขอบเขตนี้เป็นการนำความร้อนผ่านชั้นของของไหลที่อยู่นิ่ง การถ่ายเทความร้อนโดยการพาจะขึ้นกับการนำความร้อนของของไหลและสภาพการไหล

ได้มีงานวิจัยจำนวนมากเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนโดยการพา ในปัจจุบันสมการที่ใช้คำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อน โดยการพาจะอยู่ในรูป

$$q = hA\Delta T \quad (3.9)$$

ในที่นี้ h (W/m^2K) คือสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพา ซึ่งมีค่าเท่ากับอัตราการไหลของความร้อนจากพื้นที่หนึ่งตารางเมตร เนื่องจากผลต่างของอุณหภูมิหนึ่งองศาเซลเซียส ค่า A

(Area; m^2) คือพื้นที่ถ่ายเทความร้อน และ ΔT (K) คือผลต่างของอุณหภูมิระหว่างผิวทั้งสองด้านของชั้นขอบเขต สมการที่ 3.9 มีชื่อเรียกโดยทั่วไปว่า **Newton's law of cooling** เป็นสมการที่รวบรวมผลทั้งหมดที่ทำให้เกิดการพาความร้อน สำหรับในสภาวะที่ซับซ้อนต้องการค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากการทดลอง ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบางครั้ง เรียกว่าการนำผ่านฟิล์ม เพราะว่าความสัมพันธ์ดังกล่าวเป็นกระบวนการนำความร้อนในชั้นบางๆ ของของไหลที่บริเวณผิวของผนัง

- การวิเคราะห์เชิงมิติของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนผ่านฟิล์ม

ปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนผ่านฟิล์มมีอาทิเช่น คุณสมบัติของไหล สภาพการไหล รูปร่างของพื้นที่ถ่ายเทความร้อน เป็นต้น ในบางกรณีเราอาจอนุพันธ์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยเหล่านี้กับสัมประสิทธิ์ของฟิล์มได้โดยอาศัยทฤษฎี แต่ในกรณีที่ไม่สามารถทำได้โดยอาศัยทฤษฎี เรายังสามารถทำการวิเคราะห์เชิงมิติ(Dimension analysis) เพื่อหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างกลุ่มตัวแปรไร้มิติกลุ่มต่างๆ ได้ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกลุ่มตัวแปรไร้มิติต่างๆ

ชื่อเรียก	สูตร	สัญลักษณ์
Nusselt number	$\frac{hD}{k}$	Nu
Reynolds number	$\frac{Dv\rho}{\mu}$	Re
Prandtl number	$\frac{C_p\mu}{k}$	Pr
Grashof number	$\frac{gD^3\rho^2\beta\Delta T}{\mu^2}$	Gr

เนื่องจากกลุ่มไร้มิติเหล่านี้ไม่มีหน่วย ดังนั้นค่าของมันจะเท่ากันเสมอไม่ว่าจะใช้ในหน่วยระบบอะไร ตราบใดที่ตัวแปรทุกตัวใช้ค่าในระบบหน่วยเดียวกันอย่างถูกต้อง
 หนึ่งในกรณีการถ่ายเทความร้อนไม่เกิดการเปลี่ยนวัฏภาคของของไหลสมการความสัมพันธ์ต่อไปนี้มักจะเป็นจริง

$$Nu = C Re^a Pr^b Gr^d \quad (3.10)$$

โดยที่ค่า C, a, b, d เป็นค่าที่ค้นหาจากการทดลอง เนื่องจากค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Re) เป็นตัวแปรที่บ่งบอกระดับมากน้อยของการผสมในการไหล ในกรณีการไหลแบบปั่นป่วน ($Turbulent flow$) ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ จะมีอิทธิพลสำคัญมาก แต่ในกรณีของการพาอย่างอิสระ ความเร็วของการไหลจะน้อยมาก ดังนั้นค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์จะหมดความสำคัญไป แต่ค่าแกร์ชอฟนัมเบอร์ (Gr) ซึ่งเป็นผลของการขยายตัวเชิงปริมาตรของของไหล จะกลับมีความสำคัญขึ้น โดยสามารถสรุปเป็นความสัมพันธ์กับลักษณะการพาความร้อนได้ดังนี้

$$\text{การพาความร้อนแบบบังคับ (Forced Convection):} \quad Nu = C Re^a Pr^b \quad (3.11)$$

$$\text{การพาความร้อนแบบอิสระ (Free Convection):} \quad Nu = C Pr^b Gr^d \quad (3.12)$$

และค่าพรีนัมเบอร์ (Pr) จะขึ้นกับประเภทของของไหลเป็นหลัก ซึ่งจะพบว่าค่าพรีนัมเบอร์ของก๊าซจะแทบไม่ขึ้นกับอุณหภูมิและความดัน แต่ค่าพรีนัมเบอร์ของของเหลวจะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิก่อนข้างมาก ในกรณีของการไหลแบบปั่นป่วน ถ้าค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เพิ่มขึ้น การผสมจะเกิดดีขึ้น ดังนั้นความหนาของฟิล์มจะน้อยลง ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเพิ่มสูงขึ้นนั่นคือ ถ้าความเร็วเชิงเส้นหรือค่าความหนาแน่นมีค่าเพิ่มมากขึ้น หรือถ้าค่าความหนืดมีค่าน้อยลง ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจะมีค่าเพิ่มขึ้น ถ้าเพิ่มเส้นผ่านศูนย์กลางให้มากขึ้น ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์จะมีค่าเพิ่มขึ้นก็จริง แต่ค่านัสเซลนัมเบอร์ (Nu) ก็มีตัวเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ด้วย ซึ่งมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนมากกว่า ดังนั้นโดยทั่วไปถ้าเส้นผ่านศูนย์กลางมีค่ามากขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจะมีค่าลดลง

3.3.3 การแผ่รังสีความร้อน (Heat radiation)

การแผ่รังสีความร้อนเป็นปรากฏการณ์คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเหมือนกับรังสีแสง ความเร็วของรังสีในสุญญากาศคือ $300,000 \text{ km/s}$ แต่สิ่งที่แตกต่างกันคือ ความยาวคลื่นของรังสีความร้อนและของรังสีแสง สรุปแล้วการแผ่รังสีความร้อนแตกต่างกับการนำความร้อนและการพาความร้อนในแง่ที่ว่า การแผ่รังสีความร้อนไม่ต้องอาศัยวัสดุตัวกลาง แต่เกิดขึ้นโดยการแผ่กระจายและการดูดกลืนรังสีความร้อน

ของแข็งที่มีอุณหภูมิสูงจะแผ่กระจายรังสีความร้อนที่มีความยาวคลื่นตั้งแต่สั้นมากๆ จนถึงยาวมากๆ และความเข้มของรังสีความร้อนก็มีค่าแตกต่างกันมาก ขึ้นกับความยาวคลื่นนั้นๆ วัตถุที่เรียกว่าวัตถุดำสมบูรณ์ คือวัตถุในอุดมคติที่ดูดกลืนรังสีความร้อนทุกความยาว

คลื่นทั้งหมดโดยไม่มี การสะท้อนกลับเลย อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีสามารถ คำนวณได้ตามสมการซึ่งเรียกว่า **Stefan-Boltzmann Law**

$$q = A\sigma T_s^4 \quad (3.13)$$

แต่ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ส่งออกมาจากพื้นผิวที่แท้จริงจะมีค่าน้อยกว่านี้ และเป็นไปตาม สมการ

$$q = A\varepsilon\sigma T_s^4 \quad (3.14)$$

โดยที่ ε คือคุณสมบัติของการแผ่รังสีความร้อนตัวหนึ่งซึ่งมีชื่อเรียกว่า **emissivity** เป็นตัวบอก ประสิทธิภาพในการแผ่รังสีความร้อนของพื้นผิวโดยเปรียบเทียบกับวัตถุดำ

สมการที่ 3.14 นั้นใช้สำหรับหาอัตราการแผ่รังสีความร้อนโดยพื้นผิวหนึ่งๆ เท่านั้น การหาอัตราการแผ่รังสีความร้อนสุทธิระหว่างพื้นผิวต่างๆ นั้นเป็นเรื่องที่ซับซ้อนกว่ามาก อย่างไรก็ตาม ก็ดีกรณีพิเศษที่พบบ่อยในทางปฏิบัตินั้นมักเกี่ยวข้องกับอัตราการแลกเปลี่ยนสุทธิระหว่างพื้นผิว เล็กๆ กับพื้นผิวนานกว่ามากซึ่งครอบคลุมพื้นที่ผิวเล็กๆ ไว้หมด ถ้าสมมุติว่าพื้นผิวและ สิ่งแวดล้อมนั้นแยกกันโดยก๊าซซึ่งไม่มีผลต่อการแผ่รังสีความร้อน อัตราการส่งถ่ายรังสีความร้อน สุทธิระหว่างพื้นผิวและสิ่งแวดล้อมสามารถคำนวณได้จาก

$$q = A\varepsilon\sigma(T_s^4 - T_{sur}^4) \quad (3.15)$$

3.4 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (Overall heat transfer coefficient)

เรื่องที่สำคัญเป็นอันดับแรกในการวิเคราะห์อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนในเชิงความร้อน ก็คือการหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมระหว่างของไหลสองชนิดนั้นได้นิยามความหมาย ของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมระหว่างของไหลร้อนที่มีอุณหภูมิเป็น T_h กับของไหลเย็นที่มี อุณหภูมิเป็น T_c เมื่อจะทำการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทความร้อนรวมของเครื่อง แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อซ้อน (ท่อคู่) ดังแสดงในรูปที่ 3.5 การนำมาประยุกต์ใช้นี้ของไหลเย็น ไหลภายในท่อที่มีขนาดเล็กกว่า ในขณะที่ของไหลร้อนไหลอยู่ในพื้นที่ๆ เป็นวงแหวนระหว่างท่อ ทั้งสอง การถ่ายเทความร้อนรวมที่ได้รับจากโครงข่ายของความร้อน ดังรูปที่ 3.5 โดยสัมประสิทธิ์ การถ่ายเทความร้อนรวม (U) ได้ให้คำจำกัดความด้วยความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$q = UA\Delta T_{overall} \quad (3.16)$$

และ

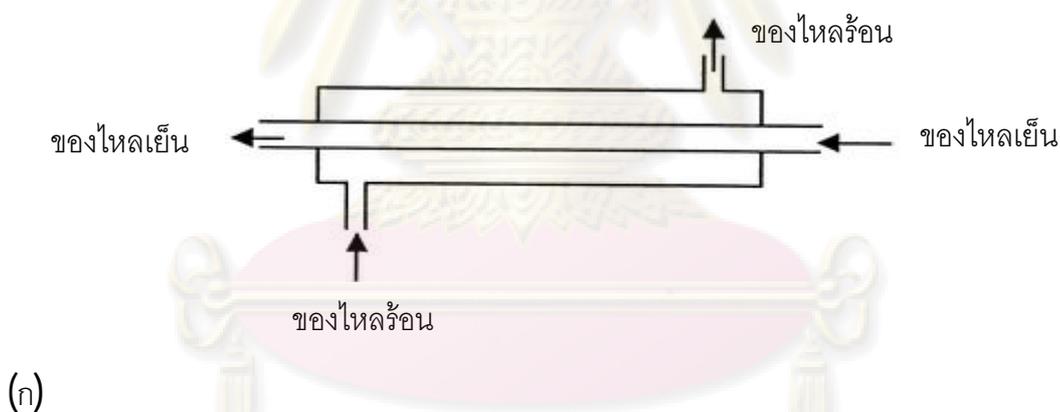
$$q = \frac{T_h - T_c}{\frac{1}{h_i A_i} + \frac{\ln(r_o/r_i)}{2\pi kL} + \frac{1}{h_o A_o}} \quad (3.17)$$

ซึ่งตัวกำกับล่าง i และ o แสดงถึงพื้นที่ผิวด้านในและด้านนอกของท่อเล็ก ด้านในมีขนาดของพื้นที่เล็กกว่า สัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทความร้อนรวมอาจคิดได้ทั้งบนพื้นฐานของพื้นที่ด้านในหรือพื้นที่ด้านนอกของท่อดังกล่าว ซึ่งผู้ออกแบบต้องระมัดระวังโดยคำนวณดังนี้

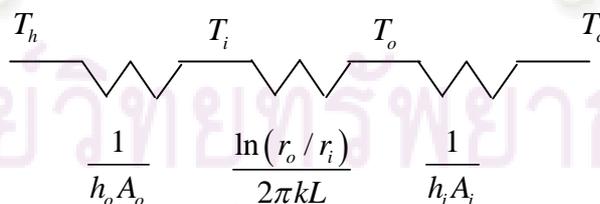
$$U_i = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{A_i \ln(r_o/r_i)}{2\pi kL} + \frac{A_i}{h_o A_o}} \quad (3.18ก)$$

หรือ

$$U_o = \frac{1}{\frac{A_o}{A_i h_i} + \frac{A_o \ln(r_o/r_i)}{2\pi kL} + \frac{1}{h_o}} \quad (3.18ข)$$



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.5 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อซ้อน

(ก) รายละเอียดของระบบ

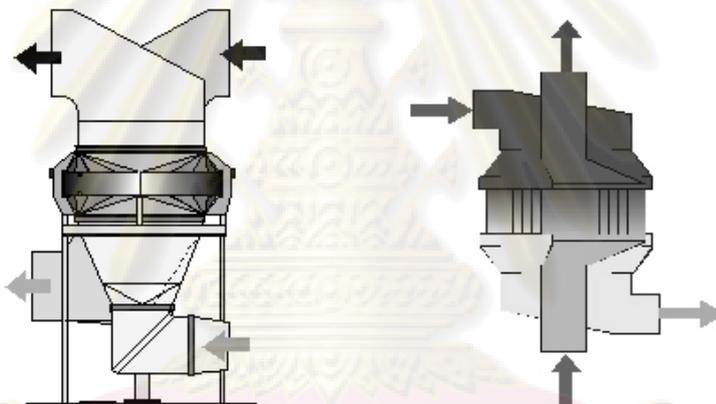
(ข) โคร่งข่ายของค่าความต้านทานความร้อนสำหรับการถ่ายเทความร้อน

3.5 การแบ่งประเภทของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

ในงานทางวิศวกรรมหลายประเภทต้องอาศัยกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างของไหลที่มีอุณหภูมิแตกต่างกัน อุปกรณ์ที่ใช้ในการถ่ายเทความร้อนนี้ เรียกว่าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger) ซึ่งการแบ่งประเภทเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตามสภาวะของของไหลที่ใช้ นั้น จะแบ่งออกเป็น 2 ประเภทดังนี้

3.5.1 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบรีเจนเนอเรเตอร์ (Regenerative heat exchanger)

ของไหลที่มีอุณหภูมิสูงกว่า (ของไหลร้อน) จะส่งความร้อนให้กับตัวกลางที่มีคุณสมบัติในการเก็บความร้อนได้ดี และของไหลที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า (ของไหลเย็น) จะมารับความร้อนจากตัวกลางดังกล่าวอีกทอดหนึ่ง ตัวอย่างของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนประเภทนี้ ได้แก่ ระบบอุ่นอากาศ (Air Preheated) ก่อนเข้าหม้อไอน้ำในโรงจักรพลังไอน้ำ เป็นต้น



รูปที่ 3.6 ตัวอย่างลักษณะการทำงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบรีเจนเนอเรเตอร์

3.5.2 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบรีคูเพอเรเตอร์ (Recuperative heat exchanger)

ของไหลร้อนและของไหลเย็นจะแยกออกจากกันด้วยผนังซึ่งเป็นของแข็ง ดังนั้นในบางครั้งจึงเรียกว่า Surface heat exchanger โดยมากแล้วเครื่องแบบนี้จะเป็นท่อสวมอยู่ภายในของไหลชนิดหนึ่งไหลภายในท่อและอีกชนิดหนึ่งไหลภายนอกท่อ ซึ่งตัวอย่างได้แก่ เครื่องควบแน่น (Condenser) ในโรงจักรพลังไอน้ำ และหม้อระบายความร้อนน้ำมันหล่อลื่น (Oil Cooler) ของเครื่องยนต์ขนาดใหญ่ เป็นต้น



รูปที่ 3.7 ตัวอย่างลักษณะการทำงาน of เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบรีคูเปอร์เรเตอร์

เนื่องจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้ในอุตสาหกรรมเคมีเกือบทั้งหมดเป็นแบบรีคูเปอร์เรเตอร์ ลักษณะการถ่ายเทความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบรีคูเปอร์เรเตอร์อาจแบ่งได้ตามทิศทางการไหลของของไหลเป็น 3 ประเภทคือ แบบไหลขนาน (Parallel flow) แบบไหลสวนทาง (Counter flow) และแบบไหลตั้งฉาก (Cross flow) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

- เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลขนาน ของไหลร้อนกับของของไหลเย็นจะไหลในทิศทางเดียวกันในขณะที่เกิดการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังกัน อุณหภูมิของของไหลร้อนจะค่อยๆ ลดลง ในขณะที่เดียวกันกับที่อุณหภูมิของของไหลเย็นเพิ่มขึ้นตามลำดับ

- เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลสวนทางกัน ของไหลร้อนและของไหลเย็นมีทิศทางการไหลที่ตรงข้ามกันอุณหภูมิของของไหลร้อนจะค่อยๆ ลดลงในทิศทางหนึ่ง ในขณะที่เดียวกันกับที่อุณหภูมิของของไหลเย็นเพิ่มขึ้นในทิศทางตรงกันข้าม

- เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลตั้งฉาก การคำนวณการถ่ายเทความร้อนอย่างละเอียดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบนี้ จะมีความสลับซับซ้อนกว่าของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลสวนทางหรือแบบไหลขนาน

3.6 วิธีการวิเคราะห์เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

ในการออกแบบหรือในการหาสมรรถนะการทำงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เราจำเป็นต้องพิจารณาความสัมพันธ์ของการถ่ายเทความร้อนกับตัวแปรต่างๆ เช่น อุณหภูมิของของไหลที่ทางเข้าและทางออก ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม และพื้นที่ผิวทั้งหมดในการถ่ายเทความร้อน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีวิธีการวิเคราะห์เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

วิธีที่นิยมใช้ในการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน มี 2 วิธีหลักๆ คือ

3.6.1 Log-Mean Temperature Difference method (LMTD)

3.6.2 The effective-NTU method

เมื่อเราได้พิจารณาวิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสองวิธีซึ่งได้แก่วิธี

LMTD และวิธี NTU พบว่าวิธีทั้งสองสามารถใช้หาผลลัพธ์ได้เช่นเดียวกัน โดยการใช้วิธี LMTD นั้น เราจำเป็นต้องรู้คุณสมบัติของของไหลทั้งสองที่ทางเข้าและทางออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้นำไปใช้ในการหา Log-Mean Temperature Difference (ΔT_m) ปัญหาที่กำหนดคุณสมบัติดังกล่าวมาให้นี้มีชื่อเรียกว่าปัญหาการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ที่เรียกเช่นนี้ เพราะเป็นปัญหาที่เกี่ยวข้องกับการเลือกชนิดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน รวมทั้งการคำนวณพื้นที่ผิวของเครื่องเพื่อให้ได้มาซึ่งคุณสมบัติและอัตราการไหลตามที่กำหนด ตัวอย่างเช่น เรารู้อัตราการไหลของของไหลเย็นและร้อน คุณสมบัติของของไหลเย็นและร้อนที่เข้าสู่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแล้วต้องการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่จะทำให้ได้คุณสมบัติของของไหลเย็นออกจากเครื่องตามต้องการ ในกรณีนี้เราสามารถคำนวณหาอัตราการถ่ายเทความร้อน และคุณสมบัติของของไหลร้อนที่ออกจากเครื่อง จากนั้นก็สามารถคำนวณหา ΔT_m เมื่อได้ค่าเหล่านี้มาก็สามารถนำไปคำนวณหาพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนได้ สำหรับอีกวิธีหนึ่งคือวิธี NTU การคำนวณหาพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนทำได้โดยเริ่มจากการคำนวณ Effectiveness และ Cr จากนั้นก็สามารถใช้กราฟหรือสมการที่เหมาะสมเพื่อหาค่า NTU ซึ่งสามารถนำไปใช้หาพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนได้จากนิยามของวิธี NTU

ในการศึกษานี้จะกล่าวถึงเฉพาะวิธีที่เลือกใช้ในการวิจัยออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนนี้ คือวิธี LMTD โดยจะมีสมมุติฐานในการวิเคราะห์ดังนี้

- ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมระหว่างของไหลทั้งสองกระแสที่แลกเปลี่ยนความร้อนจะมีค่าคงที่ตลอดในอุปกรณ์
- การทำงานของอุปกรณ์อยู่ในสภาพคงตัว (Steady-state Heat conduction) นั่นคืออัตราการไหลมีค่าคงที่ และคุณสมบัติต่างๆ มีค่าคงที่
- ความเร็วและคุณสมบัติของของไหลในอุปกรณ์จะมีค่าสม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัดในการไหลของไหล
- ค่าความจุความร้อนของของไหลมีค่าคงที่
- ไม่มีการนำความร้อนตามแนวแกนในของไหล

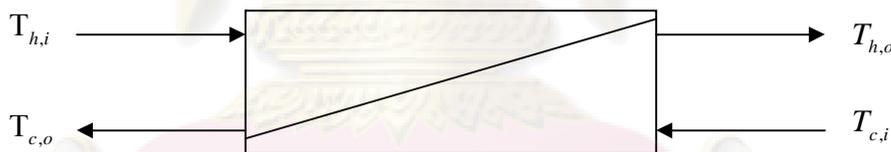
3.6.1 วิธีความแตกต่างของค่าอุณหภูมิสื่อเคลื่อน (Log - Mean Temperature Difference method, LMTD)

พิจารณาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดท่อคู่ การไหลของของไหลนั้นเป็นไปได้ทั้งการไหลแบบขนานกันหรือสวนทางกัน สมมติว่าการคำนวณการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่เป็นแบบท่อคู่ ประกอบด้วยสมการดังนี้

$$q = UA\Delta T_{lm} \quad (3.19)$$

ซึ่งเมื่อพิจารณาแล้วพบว่าค่าอุณหภูมิที่แตกต่างกันระหว่างการเปลี่ยนแปลงของไหลร้อนกับของไหลเย็นในระหว่างที่ไหลเข้ากับไหลออก และเราต้องหาค่าเฉลี่ยเพื่อนำไปใช้กับสมการที่ 3.19 สำหรับในกรณีที่เป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่จัดการไหลให้เป็นแบบสวนทางกัน ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_{h,i} - T_{c,o}) - (T_{h,o} - T_{c,i})}{\ln \left[\frac{(T_{h,i} - T_{c,o})}{(T_{h,o} - T_{c,i})} \right]} \quad (3.20)$$



รูปที่ 3.8 โครงข่ายการแลกเปลี่ยนความร้อนแบบสวนทางกัน

อุณหภูมิที่แตกต่างกันนี้เรียกว่า ค่าแตกต่างของอุณหภูมิสื่อเคลื่อน (Log-Mean Temperature Difference method, LMTD) รายละเอียดที่ปรากฏคือ ค่าอุณหภูมิที่แตกต่างกันที่ปลายด้านหนึ่งของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนนั้นมีค่าน้อยกว่าค่าอุณหภูมิที่แตกต่างกันที่ปลายอีกด้านหนึ่ง หากด้วยค่าลึกลับธรรมชาติของอัตราส่วนอุณหภูมิที่แตกต่างกันทั้งสองนี้ สำหรับผลที่ได้จากความสัมพันธ์ดังกล่าวข้างต้นนั้นเป็นค่าสัมพันธ์ที่ได้ ซึ่งสามารถนำไปใช้คำนวณหาค่า LMTD ในกรณีการไหลแบบขนานกัน

3.7 วัสดุสำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน [15]

ในการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน สิ่งที่จะต้องคำนึงถึงเป็นสิ่งแรกคือ การเลือกใช้วัสดุ วัสดุที่เหมาะสมที่สุดสำหรับความดัน อุณหภูมิ ตลอดจนคุณสมบัติเชิงกายภาพ และคุณสมบัติเชิงเคมีของของไหลที่ใช้แลกเปลี่ยนความร้อน

ในการทำงานเดียวกันกับวัสดุที่ใช้สร้างอุปกรณ์เคมีอื่นๆ เราสามารถแบ่งวัสดุที่ใช้สร้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนอย่างกว้างๆ เป็นวัสดุประเภทโลหะ และวัสดุประเภทโลหะ นอกจากนี้วัสดุประเภทโลหะยังแบ่งออกเป็นวัสดุเหล็ก และวัสดุประเภทไม่ใช่เหล็ก ซึ่งจะเลียงการอธิบายถึงวัสดุต่างๆไป แต่จะกล่าวถึงเฉพาะวัสดุหลักที่ใช้สร้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน และคุณสมบัติของวัสดุเหล่านี้อย่างสั้นๆ

3.7.1 วัสดุประเภทเหล็ก (Ferrous Materials)

1. เหล็กเหนียวคาร์บอน (Carbon Steel)

เหล็กเหนียวคาร์บอนมีความแข็งแรงสูงเมื่อเทียบกับราคา และอาจถือได้ว่าความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูงจนถึง 350°C จะเกือบเท่ากับที่อุณหภูมิห้อง เหล็กเหนียวคาร์บอนสามารถทนต่อการกัดกร่อนเชิงเคมีโดยต่างได้ค่อนข้างดี แต่ถูกกัดกร่อนโดยกรดได้ง่ายดายมาก ดังนั้นจึงนิยมใช้กันกว้างขวางที่สุดสำหรับสภาวะที่ไม่ต้องการคุณสมบัติทนการกัดกร่อน ถ้ามีคาร์บอนเกินกว่า 0.35% คุณสมบัติในการเชื่อมจะเลวลงดังนั้นเหล็กเหนียวคาร์บอนส่วนใหญ่ที่ใช้กับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจึงเป็นเหล็กเหนียวคาร์บอนต่ำซึ่งมีคาร์บอนน้อยกว่า 0.30%

2. เหล็กเหนียวผสมน้อย (Low Alloy Steels)

เหล็กเหนียวคาร์บอนนี้จะใส่โครเมียม (Cr) โมลิบดีนัม (Mo) เป็นต้น เข้าไปเล็กน้อยเพื่อเพิ่มความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูงและเพื่อใช้เป็นเหล็กเหนียวทนการกัดกร่อนในบรรยากาศไฮโดรเจนที่อุณหภูมิสูงและความดันสูง

2.1 เหล็กเหนียว C-0.5 Mo

เนื่องจากเหล็กเหนียว C-0.5 Mo จะเกิดการแปรรูปเป็นกราไฟต์ได้ง่าย ถ้าใช้งานที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานาน ดังนั้นในกรณีที่ต้องการใช้อุณหภูมิสูง ควรใช้เหล็กเหนียว Cr-Mo- แทน แต่ในกรณีที่ต้องการคุณสมบัติ Anti-Creep ที่อุณหภูมิ $400-480^{\circ}\text{C}$ ก็ให้ใช้เหล็กเหนียว C-0.5 Mo เนื่องจากธาตุผสมมีปริมาณค่อนข้างน้อย เหล็กเหนียว C-0.5 Mo จึงมีคุณสมบัติการเชื่อมที่ดี โดยอุณหภูมิที่ต้องอุ่นให้ร้อนคือ $100-200^{\circ}\text{C}$

2.2 เหล็กเหนียว Cr-Mo

การเติม Cr เข้าด้วย จะมีผลดีในการเพิ่ม Creep Strength และยังมีผล

ในการเพิ่มคุณสมบัติทนการกัดกร่อนด้วย ดังนั้นจึงใช้เหล็กเหนียว Cr-Mo ในกรณีที่ต้องการคุณสมบัติ Anti-Creep คุณสมบัติทนความร้อน และคุณสมบัติทนการกัดกร่อนที่ 450-600 °C ของที่ใช้กัน อาทิเช่น เหล็กเหนียว 1Cr-0.5 Mo เป็นต้น ในแง่ของคุณสมบัติการเชื่อม ทั้งส่วนที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนและโลหะที่เชื่อมติดสามารถเกิดการแข็งตัวได้เอง เนื่องจากการเชื่อม ดังนั้นจึงอาจมีอันตรายจากการแตกร้าวได้ ด้วยเหตุนี้จึงมีความจำเป็นต้องอุ่นให้ร้อน 150-350 °C แล้วแต่ประเภทของเหล็กเหนียวเวลาเชื่อม

3.7.2 เหล็กไร้สนิม (Stainless Steel)

1. Martensitic Stainless Steel

ตัวอย่างของ Martensitic Stainless Steel คือเหล็กเหนียว 13% Cr เหล็กเหนียวชนิดนี้มีคุณสมบัติทนการกัดกร่อนของกำมะถัน Sulphurous Acid Gas ไฮโดรเจนซัลไฟด์ และ Naphthenic Acid โครงสร้างแบบ Martensitic มีคุณสมบัติแข็งตัวได้เอง เนื่องจาก Heat treatment ดังนั้นจึงเกิดแรงเค้นของการแปรสภาพ และแตกร้าวได้ง่าย เนื่องจากผลกระทบจากความร้อนที่ได้รับในเวลาเชื่อมโดยทั่วไปต้องอุ่นให้ร้อน 200-400 °C และทำ Heat treatment ที่ 700-800 °C ทันทีหลังจากการเชื่อม

2. Ferritic stainless Steel

เหล็กเหนียวชนิดนี้มี Cr มากกว่า 15% และมีคุณสมบัติทนการกัดกร่อนของกรดที่มีคุณสมบัติออกซิไดซ์ได้อย่างดีเลิศ เนื่องจากโดยทั่วไปเป็นโครงสร้างแบบ Ferrite จึงไม่มีคุณสมบัติแข็งตัวได้เอง เนื่องจากการเชื่อมหรือ Quenching แต่ความเหนียวจะมีน้อยที่อุณหภูมิ ต่ำ และแข็งเปราะและแตกร้าวได้ง่ายถ้าเชื่อมแผ่นหนา ดังนั้นจึงจำเป็นต้องอุ่นให้ร้อน 70-100 °C ในเวลาเชื่อม นอกจากนี้ยังต้องระวังคุณสมบัติแข็งเปราะที่ 475 °C เป็นพิเศษด้วย ถ้าเติม 0.1-0.3% Al เข้าใน 13Cr โครงสร้างจะกลายเป็นแบบ Ferrite ดังนั้นคุณสมบัติแข็งตัวได้เองในเวลาเชื่อมจึงหมดไป และคุณสมบัติแข็งเปราะที่ 475 °C ก็มีน้อยลงเพราะปริมาณ Cr มีน้อย จึงใช้จนถึง 550 °C สำหรับโครงสร้างที่เชื่อมได้

3. Austenitic Stainless Steel

เหล็กเหนียวไร้สนิมชนิดนี้มี 18Cr-8Ni เป็นตัวแทน และมีโครงสร้างแบบ Austenite ที่มีเสถียรภาพสูง เนื่องจากมีคุณสมบัติทนการกัดกร่อนได้ดีเลิศ จึงนิยมใช้กัน กว้างขวางที่มากที่สุด ตามมาตรฐาน JIS มีรายละเอียดระบุสำหรับแผ่นเหล็กเหนียว ท่อนเหล็กเหนียว แบนด์เหล็กเหนียว และท่อเหล็กเหนียวโลหะผสมสำหรับหม้อไอน้ำและเครื่องแลกเปลี่ยน ความร้อน

4. เหล็กเหนียวสำหรับอุณหภูมิต่ำ

4.1 เหล็กเหนียว Ni ต่ำ

เหล็กเหนียว 2.5% Ni, 3.5% Ni, 9% Ni เป็นต้น สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิต่ำจนถึง -50 ถึง -196 °C เหล็กเหนียว Ni ต่ำเหล่านี้มีรายละเอียดระบุไว้เป็นวัสดุเหล็กเหนียวอุณหภูมิต่ำ โดย ASTM

4.2 Austenitic Stainless Steel

SUS 27, SUS 28 สามารถใช้ได้กับของที่อุณหภูมิต่ำจนถึง -273 °C เนื่องจาก Austenitic Stainless Steel มีโครงสร้างผลึกแบบ Face-centered Cubical Lattices จึงไม่เกิดการแข็งเปราะที่อุณหภูมิต่ำ แต่ถ้าโครงสร้าง Austenite ไม่มีเสถียรภาพ Austenitic Stainless Steel จะเกิดการแยกตัวของ ใต้่างย หรือมีโครงสร้าง Ferrite ผสมอยู่ด้วย โครงสร้าง Austenite ที่ Meta-stable (กึ่งเสถียรภาพ) เพราะมีการแปรรูปมาก จะเกิดการแข็งเปราะที่อุณหภูมิต่ำได้่างย นอกจากนี้โครงสร้าง นี้ ยังก่อให้เกิดการแยกตัวของซิกม่าเฟส และการแยกตัวของสารประกอบคาร์ไบด์ที่ผิวร่วมของเม็ดผลึกเป็นต้นได้่างย ซึ่งเป็นสิ่งที่มิพึงปรารถนาอย่างยิ่ง

3.7.3 วัสดุที่ไม่ใช่เหล็ก (Non-Ferrous Materials)

1. ทองแดงและโลหะผสมของทองแดง

ทองแดงถูกกัดกร่อนได้โดยโลหะหลอมเหลว (Molten metal) แอมโมเนียของเกลือโลหะและสารละลายน้ำที่มีคลอไรด์ไอออน แต่มีคุณสมบัติทนการกัดกร่อนจากบรรยากาศ, น้ำจืด, น้ำทะเล เป็นต้น ตลอดจนสารละลายหลายชนิดของกรดที่ไม่มีคุณสมบัติออกซิไดซ์ นอกจากนี้ค่าความนำความร้อนสูงมาก และแปรรูปโดยการโก่งงอและดึงรีดได้่างย ดังนั้นจึงนิยมใช้กันอย่างกว้างขวางเป็นท่อถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เป็นต้น

ทองเหลือง (Brass) คือโลหะผสมของทองแดงที่มีสังกะสี (Zn) 5-40% Naval Brass ซึ่งมี 39% Zn และ 1% Sn (ดีบุก) มีคุณสมบัติทนการกัดกร่อนของน้ำทะเลได้ดีเลิศ Admiralty ก็เป็นโลหะผสมของทองแดงซึ่งมี 29% Zn และ 1% Sn ซึ่งมีคุณสมบัติทนการกัดกร่อนของน้ำทะเลได้ยิ่งดีเลิศขึ้น Aluminum Black เป็นโลหะผสมของ 78% Cu, 20% Zn และ 2% Al ซึ่งนอกจากมีคุณสมบัติทนการกัดกร่อนของน้ำทะเล น้ำเกลือและอื่นๆ ดีเลิศแล้วยังมีคุณสมบัติเชิงกลดีเลิศอีกด้วย

Cuprous Nickle เป็นโลหะผสมของทองแดงและนิกเกิลซึ่งใช้เป็นท่อถ่ายเทความร้อน

ทองสัมฤทธิ์ เป็นโลหะผสมทองแดงที่มี 5-35% Sn Phosphorus Bronze คือทองสัมฤทธิ์ที่เติมฟอสฟอรัส ซึ่งมีคุณสมบัติทนกรด คุณสมบัติยึดหยุ่น และคุณสมบัติทนการสึกกร่อนที่ดีที่สุด

2. อะลูมิเนียมและโลหะผสมของอะลูมิเนียม

เมื่อปล่อยทิ้งไว้ในบรรยากาศ อะลูมิเนียมจะเกิดฟิล์มออกไซด์ที่โปร่งใสและเนื้อละเอียดที่ติดได้ง่ายฟิล์มออกไซด์นี้มีคุณสมบัติทนการกัดกร่อนของบรรยากาศต่างๆ ยกเว้นของกรดฮาโลเจน และของด่าง แต่คุณสมบัติทนการกัดกร่อนนี้จะเปลี่ยนแปลงอย่างมากตามชนิดของสารเจือปนหรือโลหะที่เติมเข้าไป ความแข็งแรงมีน้อยก็จริง แต่น้ำหนักเบาและมีคุณสมบัติดีแต่ดีจึงแปรรูปได้ง่ายเนื่องจากโครงสร้างของผลึกเป็นแบบ **Face-Centered Cubical Lattice** ดังนั้นจึงไม่ต้องห่วงเรื่องการเกิดการแข็งเปราะที่อุณหภูมิต่ำและมีคุณสมบัติที่ดีเลิศสำหรับใช้เป็นวัสดุอุณหภูมิต่ำ

3. นิกเกิลและโลหะผสมของนิกเกิล

นิกเกิลสามารถทนต่างโดยเฉพาะอย่างยิ่งโซดาไฟ ได้อย่างสมบูรณ์และยังทนก๊าซคลอรีน และกรดเกลือเป็นต้นได้อย่างดีด้วย แต่ทนกรดที่มีคุณสมบัติออกซิไดซ์และเกลือของกรด ที่มีคุณสมบัติออกซิไดซ์ไม่ได้ดี นิกเกิลสามารถทนการกระทำต่างๆ ที่อุณหภูมิสูงได้ดี แต่ไม่สามารถทนก๊าซที่มีกำมะถันปนอยู่ โลหะผสมของนิกเกิลสำหรับทนการกัดกร่อนได้แก่ **Monel Metal, Hastelloy, Inconel** เป็นต้น

3.7.4 วัสดุโลหะ (Non-metallic Materials)

ยกเว้นปะเก็นแล้ว จะแทบไม่ใช้วัสดุโลหะกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน แต่ทว่ามีการใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ทำด้วยกราฟไฟท์ที่ซึมผ่านไม่ได้ กับของไหลที่ไม่สามารถใช้วัสดุโลหะได้ กราไฟท์ที่ซึมผ่านไม่ได้นี้มีคุณสมบัติทนการกัดกร่อนดีเลิศ และค่าสภาพการนำความร้อนสูง เนื่องจากสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนมีค่าน้อย จึงทน **Thermal shock** ได้ดี ดังนั้นจึงเหมาะที่จะใช้ในอุตสาหกรรมผลิตสารเคมีจำพวกกรดเกลือ กรดกำมะถัน เป็นต้น แต่ความแข็งแรงและโครงสร้างไม่อำนวยให้ใช้งานที่อุณหภูมิสูงความดันสูง

วัสดุพวยไยหิน ยาง และพลาสติกใช้ทำปะเก็นได้ นอกจากนี้พวยยางและยางสังเคราะห์ ยังใช้เป็นวัสดุบุ ได้ถ้าเลือกลักษณะคุณสมบัติให้เหมาะสมกับกรด

บทที่ 4

การออกแบบและคำนวณ

ขั้นตอนการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโดยใช้วิธี **LMTD [16]** มีดังนี้

1. เลือกชนิดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน และระบุข้อมูลจำเพาะของอุปกรณ์
2. กำหนดคุณสมบัติของของไหล เพื่อให้ได้ตามจุดประสงค์
3. หาผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยเชิงล็อกการิทึม
4. หาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม
5. คำนวณหาพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน และขนาดของเครื่อง
6. วิเคราะห์ผลที่ได้ดูว่า ขนาด ราคา ตรงตามต้องการหรือไม่
7. ถ้าผลจากข้อ 6. บ่งว่าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนไม่ตรงกับที่ต้องการ ข้อมูลเฉพาะในข้อที่ 2. ต้องเปลี่ยนแปลง เลือกข้อมูลเฉพาะใหม่และทำข้อ 3. ถึงข้อ 7. ซ้ำ จนกว่าผลการออกแบบจะตรงกับความต้องการ

ซึ่งแต่ละขั้นตอนมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. เลือกชนิดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อขด (Coiled Tube Heat Exchanger) เป็นรูปแบบที่มีการประยุกต์ใช้กันอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ เนื่องจากข้อดีหลายประการดังนี้

- 1.1 ช่วยเพิ่มพื้นที่ในการถ่ายเทความร้อน ยกตัวอย่างเช่นเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อตรง
- 1.2 ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน เนื่องจากการโค้งงอของท่อ ทำให้เกิดการกระจายตัวของอุณหภูมิได้ดีขึ้น
- 1.3 ช่วยลดขนาดเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนประเภทอื่นที่ขนาดเซลล์เท่ากันนั้น เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อขดจะให้พื้นที่ในการถ่ายเทความร้อนมากกว่า ดังนั้นที่ความต้องการการถ่ายเทความร้อนเท่ากัน ขนาดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อขดก็จะมีขนาดเล็กกว่า
- 1.4 มีค่าบำรุงรักษาต่ำ

โดยกำหนดทิศทางการไหลแบบสวนทางกัน (Counter-current flow) ซึ่งน้ำไหลภายในชุดท่อ ส่วนอากาศร้อนไหลภายในเซลล์ และเลือกใช้เซลล์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.20 เมตร และชุดท่อทองแดงขนาด 0.50 นิ้ว

2. การกำหนดคุณสมบัติของของไหล

กำหนดให้	ค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ของอากาศทิ้ง	มีค่าเท่ากับ	1.7×10^5
	อุณหภูมิของอากาศทิ้ง	มีค่าเท่ากับ	98 องศาเซลเซียส
	ปริมาณฝุ่นผงซักฟอกเจือปนในอากาศทิ้ง	มีค่าเท่ากับ	0.875 กรัมต่อวินาที
	อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำ	มีค่าเท่ากับ	0.02 กิโลกรัมต่อวินาที
	อุณหภูมิของน้ำ	มีค่าเท่ากับ	อุณหภูมิห้อง (ประมาณ 30 องศาเซลเซียส)

- หาอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศร้อน (\dot{m}_g)

จาก
$$Re = \frac{Dv\rho}{\mu}$$

เปิดตารางคุณสมบัติของอากาศที่อุณหภูมิ 98 องศาเซลเซียส

พบว่า ความหนาแน่นของอากาศ มีค่าเท่ากับ 0.9425 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

ความหนืดของอากาศ มีค่าเท่ากับ 217.46371×10^{-7} กิโลกรัมต่อเมตร-วินาที

ดังนั้น
$$v = \frac{(1.7 \times 10^5)(217.4637 \times 10^{-7} \text{ kg/m}\cdot\text{s})}{(0.2\text{m})(0.9425 \text{ kg/m}^3)} = 19.612 \text{ m/s}$$

จาก
$$\dot{m}_g = \rho Q_g = \rho v \left(\frac{\pi D^2}{4} \right)$$

ดังนั้น
$$\dot{m}_g = (0.9425 \text{ kg/m}^3)(19.612 \text{ m/s}) \left(\frac{\pi (0.2\text{m})^2}{4} \right) = 0.5807 \text{ kg/s}$$

จะได้ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศร้อน (\dot{m}_g) เท่ากับ 0.5807 kg/s

- หาอัตราการถ่ายเทความร้อนของอากาศร้อน (\dot{Q}_g)

จาก
$$\dot{Q}_g = \dot{m}_g C_{p,g} \Delta T$$

สมมติ อุณหภูมิอากาศขาออก ($T_{g,o}$) มีค่าเท่ากับ 35 °C

เปิดตารางคุณสมบัติของอากาศที่อุณหภูมิเฉลี่ย ($T_{g,avg} = 66.5^\circ\text{C}$)

พบว่า ค่าความจุความร้อนของอากาศ ($C_{p,g}$) มีค่าเท่ากับ 1.0086 kJ/kg.K

$$\text{ดังนั้น } \dot{Q}_g = (0.5964 \text{ kg/s})(1.0086 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K})(371.15 - 308.15) \text{ K} = 36.9869 \text{ kW}$$

จะได้ อัตราการถ่ายเทความร้อนของอากาศร้อน เท่ากับ **36.9869** กิโลวัตต์

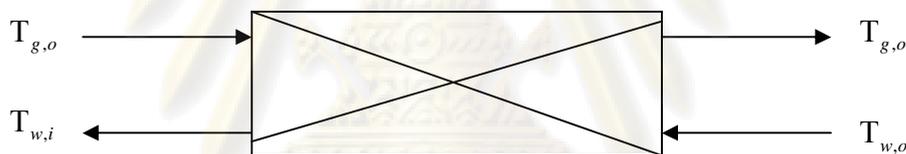
3. ผลต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยเชิงลอการิทึม

เมื่อทราบข้อมูลทั้งหมดจากข้อ 1 สามารถคำนวณหาอัตราการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นได้ และทำการกำหนดทิศทางการไหลระหว่างอากาศร้อนกับน้ำ เป็นลักษณะการไหลแบบสวนทางกัน จากนั้นคำนวณผลต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยเชิงลอการิทึม (Logarithmic Mean Temperature Difference)

$$\text{จาก } \Delta T_{lm} = \frac{(\Delta T_2 - \Delta T_1)}{\ln\left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right)}$$

$$\Delta T_1 = T_{g,o} - T_{w,i}$$

$$\Delta T_2 = T_{w,o} - T_{g,i}$$



สมมติ อุณหภูมิขาออกของน้ำ มีค่าเท่ากับ **80** องศาเซลเซียส

$$\text{ดังนั้น } \Delta T_1 = 35 - 30 = 5^\circ \text{C}$$

$$\Delta T_2 = 98 - 80 = 18^\circ \text{C}$$

$$\text{จะได้ } \Delta T_{lm} = 9.643^\circ \text{C}$$

4. กำหนดพื้นที่ในการถ่ายเทความร้อน

ซึ่งการคำนวณหาพื้นที่การถ่ายเทความร้อนนั้นจะต้องคำนวณจากอัตราการแลกเปลี่ยนความร้อน ผลต่างของอุณหภูมิ และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน สามารถหาได้ดังนี้

- หาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในท่อ (h)

เปิดตารางคุณสมบัติของน้ำ ที่อุณหภูมิเฉลี่ย ($T_{w,avg} = 55^\circ \text{C}$)

พบว่า ความหนาแน่นของน้ำ	มีค่าเท่ากับ	985.35 kg/m^3
ความหนืดของน้ำ	มีค่าเท่ากับ	$5.087 \times 10^{-4} \text{ kg/m} \cdot \text{s}$
สัมประสิทธิ์การนำความร้อน	มีค่าเท่ากับ	$0.6495 \text{ W/m} \cdot ^\circ \text{C}$

ค่าพรีนัมเบอร์ (Pr) มีค่าเท่ากับ 3.271

โดยสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในท่อ [17] แสดงได้ดังนี้

ในกรณีการไหลแบบชั้นๆ หรือแบบราบเรียบ

$$\frac{h_i D}{k} = 1.86 (\text{Re})^{1/3} (\text{Pr})^{1/3} (D/L)^{1/3} (\mu/\mu_w)^{0.14}$$

ในกรณีการไหลแบบปั่นป่วนหรืออลวน

$$\frac{h_i D}{k} = 0.027 (\text{Re})^{0.8} (\text{Pr})^{1/3} (\mu/\mu_w)^{0.14}$$

ซึ่งเมื่อพิจารณาค่า Reynolds number ที่ไหลภายในท่อ

จะได้ ค่า Reynolds number (Re) = 5,296.46 จึงมีสภาพการไหลแบบปั่นป่วน

ดังนั้นสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจึงหาได้จาก

$$\frac{h_i D}{k} = 0.027 (\text{Re})^{0.8} (\text{Pr})^{1/3} (\mu/\mu_w)^{0.14}$$

ดังนั้น สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในท่อ (h_i) = 2,625.79 W/m² · K

- หาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนนอกท่อ (h_o) [10]

จาก

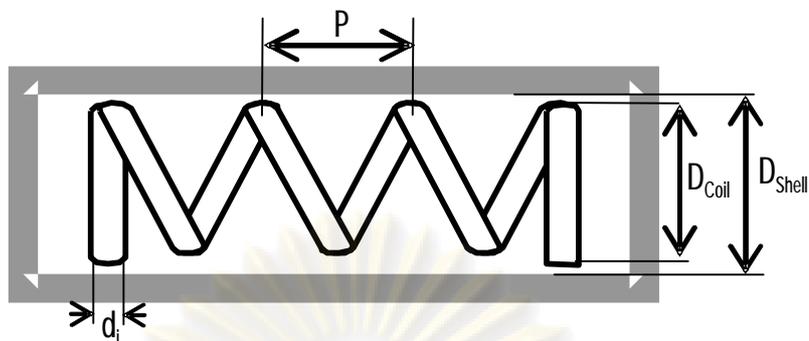
$$\frac{h_o D_h}{k} = 0.22 (\text{Re})^{0.66} (\text{Pr})^{1/3} (\mu/\mu_w)^{0.14}$$

$$\text{Re} = \frac{D_h v_o \rho}{\mu}$$

$$D_h = \frac{D_{shell}^2 - \pi D_{coil} d_0 \gamma^{-1}}{D_{shell} + \pi D_{coil} d_0 \gamma^{-1}}$$

$$\gamma = \frac{P}{\pi D_{coil}}$$

สมการข้างต้นอ้างอิงจากงานวิจัยของ Salimpour ซึ่งมีลักษณะดังภาพ



รูปที่ 4.1 ลักษณะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อชุด

กำหนดให้ เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของชุดท่อ (D_{coil}) มีค่าเท่ากับ 0.1 m

เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของเชลล์ มีค่าเท่ากับ 0.2 m

ท่อทองแดงขนาด ? in มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 10.85 mm

มีความหนา 1.4 mm

และปรับเปลี่ยนมุมระยะห่างระหว่างชุดท่อดังนี้ 25, 35, 45 และ 55 องศา

ซึ่งผลการคำนวณที่ใช้ในการหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายนอกท่อแสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการคำนวณที่เกี่ยวข้องเนื่องกับการสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายนอกท่อ

มุม	ระยะห่างของชุดท่อ (เมตร)	D_{coil}	γ	D_h	Re_o	h_o
25	0.0443	0.1	0.1411	0.1773	137,272.12	79.0965
35	0.0631	0.1	0.2007	0.1835	142,085.79	78.1750
45	0.0828	0.1	0.2637	0.1872	144,951.86	77.6460
55	0.1041	0.1	0.3314	0.1897	146,877.77	77.2983

- หาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (U)

จาก
$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_o} + R_w + R_s + \frac{S_w}{k}$$

ดังนั้น จะสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ} \quad R_w &= 5.3 \times 10^{-4} \quad (m^2 \cdot K/W) \\ R_g &= 3.5 \times 10^{-4} \quad (m^2 \cdot K/W) \\ S_w &= 1 \text{ มิลลิเมตร (ความหนาของผนังท่อ)} \end{aligned}$$

เมื่อเลือกใช้ท่อทองแดงจะได้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน $(k) = 386 \text{ (} W/m^2 \cdot K \text{)}$

และจาก
$$Q = UA\Delta T_{lm}$$

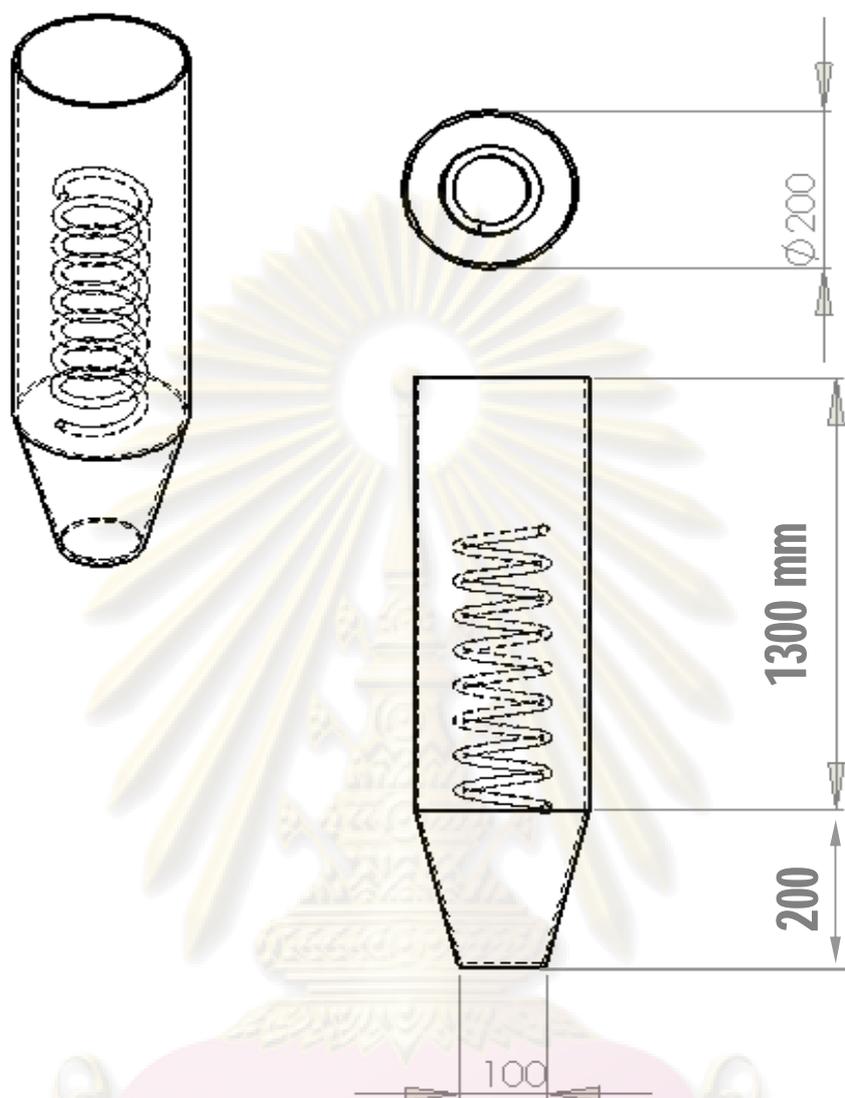
จะสามารถหาค่าพื้นที่การถ่ายเทความร้อนและความยาวของท่อได้ดังนี้

ตารางที่ 4.2 ผลการคำนวณหาพื้นที่การถ่ายเทความร้อน

$U_o \text{ (} W/m^2 \cdot K \text{)}$	$L_{tube} \text{ (} m \text{)}$
71.9049	2.8951
71.1426	2.9262
70.7042	2.9443
70.4158	2.9563

ซึ่งเมื่อพิจารณาจากพื้นที่การถ่ายเทความร้อนแล้วพบว่าพื้นที่การถ่ายเทความร้อนมีค่าใกล้เคียงกันต่างกันเพียงเล็กน้อย จึงสามารถนำผลการทดลองที่ได้มาเปรียบเทียบผลกันได้ โดยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนต้นแบบที่ใช้ในการทดลองมีลักษณะดังรูปที่ 4.2

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.2 แบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อชุด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

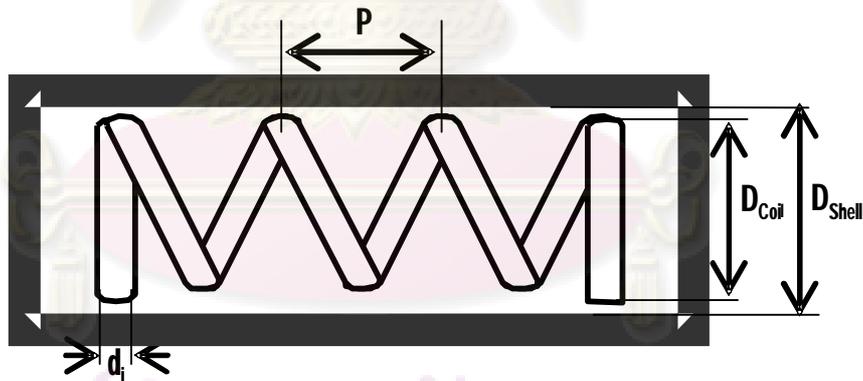
การวิเคราะห์ความสัมพันธ์

5.1 ความสัมพันธ์ของตัวแปรไร้มิติ

ชนิดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อชุดแสดงดังรูปที่ 5.1 ซึ่งจากรูป D_{Shell} คือเส้นผ่านศูนย์กลางด้านในของเชลล์, D_{Coil} คือเส้นผ่านศูนย์กลางของของท่อ, d_i คือเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อด้านในและ P คือระยะห่างระหว่างท่อ โดยมีตัวแปรไร้มิติ (Dimensionless parameters) ที่เกี่ยวข้องกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อชุด คือตัวแปรไร้มิติของระยะห่างท่อ(มุมของท่อ), ϕ ซึ่งมีสมการดังนี้

$$\phi = P / \pi D_{Coil} \quad (5.1)$$

นอกจากนี้ยังมีตัวแปรไร้มิติที่มีความสำคัญกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อชุดอีกคือ



รูปที่ 5.1 โครงสร้างของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อชุด

ด้านนอกท่อ ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Re_o), ค่าพรันด์เทิลนัมเบอร์ (Pr_o), ค่านัสเซิลนัมเบอร์ (Nu_o) และค่าอัตราส่วนของปริมาณฝุ่นผงชักฟอกต่ออัตราการไหลของอากาศร้อน (β) ซึ่งมีสมการดังนี้

$$Re_o = \frac{\rho_o v_o D_h}{\mu_o} \quad (5.2)$$

$$Pr_o = \frac{C_{p,o}\mu_o}{k_o} \quad (5.3)$$

$$Nu_o = \frac{h_o D_h}{k_o} \quad (5.4)$$

$$\beta = \frac{m_{particles}}{m_h} \quad (5.5)$$

เมื่อ

$$D_h = \frac{D_{Shell} - \pi D_{Coil} d_o^2 \phi^{-1}}{D_{Shell} - \pi D_{Coil} d_o \phi^{-1}} \quad (5.6)$$

ด้านนอกท่อของสภาวะนี้จำเป็นต้องใช้ D_h (Hydraulic radius) ตามแต่รูปทรงทางเรขาคณิตของท่อซึ่งก็คืออัตราส่วนระหว่างพื้นที่ตั้งฉากการไหลต่อเส้นรอบรูปที่เปียกของการไหล

ด้านในท่อ ค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ (Re_i), ค่าพริ้นด์เทิลนัมเบอร์ (Pr_i) และค่านัสเซลนัมเบอร์ (Nu_i) ซึ่งมีสมการดังนี้

$$Re_i = \frac{\rho_i v_i d_i}{\mu_i} \quad (5.7)$$

$$Pr_i = \frac{C_{p,i}\mu_i}{k_i} \quad (5.8)$$

$$Nu_i = \frac{h_i d_i}{k_i} \quad (5.9)$$

5.2 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของข้อมูล

เพื่อนำไปสู่การหาค่าความสัมพันธ์ของตัวแปรที่มีความถูกต้องแม่นยำ จึงมีความจำเป็นต้องทำการศึกษาและวิเคราะห์ความสัมพันธ์ ดังนี้

อัตราการถ่ายเทความร้อนของน้ำ

$$\dot{Q}_c = \dot{m}_c C_{p,c} (T_{c,o} - T_{c,i}) \quad (5.10)$$

อัตราการถ่ายเทความร้อนของอากาศร้อน

$$\dot{Q}_h = \dot{m}_h C_{p,h} (T_{h,o} - T_{h,i}) \quad (5.11)$$

อัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ย

$$\dot{Q}_{avg} = \frac{|\dot{Q}_h| + |\dot{Q}_c|}{2} \quad (5.12)$$

และเมื่อจัดให้อยู่ในรูปความสัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (U_o) จะได้

$$\dot{Q}_{avg} = U_o A_o \Delta T_{lm} \quad (5.13)$$

หรือ

$$\frac{1}{U_o A_o} = \frac{\Delta T_{lm}}{\dot{Q}_{avg}} \quad (5.14)$$

โดย ΔT_{lm} หรือผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยเชิงลอการิทึม (Log Mean Temperature Difference; LMTD) ของลักษณะการไหลแบบสวนทางกัน สามารถหาได้จาก

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_a - \Delta T_b}{\ln(\Delta T_a / \Delta T_b)} \quad (5.15)$$

เมื่อ

$$\Delta T_a = T_{h,i} - T_{c,o} \quad (5.16)$$

และ

$$\Delta T_b = T_{h,o} - T_{c,i} \quad (5.17)$$

เมื่อพิจารณาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมในรูปของความต้านทานการถ่ายเทความร้อนรวมจะประกอบไปด้วยความต้านทานการพาความร้อนที่ผิวท่อด้านนอก ความต้านทานการนำความร้อนของผิวท่อ และความต้านทานการพาความร้อนที่ผิวท่อด้านใน สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\frac{1}{U_o A_o} = \frac{1}{h_o A_o} + \frac{\ln(d_o / d_i)}{2\pi k L} + \frac{1}{h_i A_i} \quad (5.18)$$

โดยจะพิจารณาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ผิวท่อด้านใน ในรูปสมการ

$$h_i = C_i \text{Re}_i^{m_i} \text{Pr}_i^{n_i} \varphi_i^{a_i} \frac{k_i}{d_i} \quad (5.19)$$

เมื่อ C_i , m_i , n_i และ a_i เป็นค่าคงที่

โดยสมการที่ 5.19 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปตัวแปรไร้มิติคือ ค่าตัวเลขนัมเบอร์ ได้ดังนี้

$$Nu_i = C_i \text{Re}_i^{m_i} \text{Pr}_i^{n_i} \varphi_i^{a_i} \quad (5.20)$$

หรือ

$$Nu_i = \frac{h_i d_i}{k_i} \quad (5.21)$$

และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ผิวท่อด้านนอก จะมีลักษณะสมการดังนี้

$$h_o = C_o \text{Re}_o^{m_o} \text{Pr}_o^{n_o} \varphi_o^{a_o} \beta^b \frac{k_o}{D_h} \quad (5.22)$$

เมื่อ C_o , m_o , n_o , a_o และ b เป็นค่าคงที่

สมการที่ 5.22 สามารถเขียนในรูปตัวแปรไร้มิติคือค่าตัวเลขนัมเบอร์ ดังนี้

$$Nu_o = C_o \text{Re}_o^{m_o} \text{Pr}_o^{n_o} \varphi_o^{a_o} \beta^b \quad (5.23)$$

หรือ

$$Nu_o = \frac{h_o D_h}{k_o} \quad (5.24)$$

เมื่อแทนค่าสมการที่ 5.19 และสมการที่ 5.22 ลงในสมการที่ 5.18 จะได้

$$\frac{1}{U_o A_o} = \frac{1}{A_o (C_o \text{Re}_o^{m_o} \text{Pr}_o^{n_o} \varphi_o^{a_o} \beta^b (k_o / D_h))} + \frac{\ln(d_o / d_i)}{2\pi k L} + \frac{1}{A_i (C_i \text{Re}_i^{m_i} \text{Pr}_i^{n_i} \varphi_i^{a_i} (k_i / d_i))} \quad (5.25)$$

โดยค่า $1/U_o A_o$ สามารถหาได้จากสมการที่ 5.14 และค่าคงที่ $C_j, C_o, m_j, m_o, n_j, n_o, a_j, a_o$ และ b ในสมการที่ 5.25 เป็นค่าคงที่ที่ต้องอาศัยการทดลองในการหา โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least square analysis) ซึ่งมีสมการดังนี้

$$E(C_o, C_i, m_i, m_o, n_i, n_o, a_i, a_o, b) = \frac{1}{NP} \sum_{j=1}^{NP} \left[\left(\frac{1}{U_o A_o} \right)_j - \left(\frac{1}{A_o (C_o \text{Re}_o^{m_o} \text{Pr}_o^{n_o} \varphi^{a_o} \beta^b (k_o / D_h))} + \frac{\ln(d_o / d_i)}{2\pi kL} + \frac{1}{A_i (C_i \text{Re}_i^{m_i} \text{Pr}_i^{n_i} \varphi^{a_i} (k_i / d_i))} \right)_j \right]^2 \quad (5.26)$$

ซึ่งผลลัพธ์ของความสัมพันธ์ที่ได้พัฒนาขึ้นนี้ จะแสดงในบทที่ 7 โดยความสัมพันธ์ที่พัฒนาขึ้น จะมีความสำคัญต่อการทำนายการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อขดที่เป็นการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างสายน้ำกับสายอากาศร้อนที่มีฝุ่นผงซักฟอกเจือปน ซึ่งจะช่วยในการทำนายการถ่ายเทความร้อนของระบบให้มีความถูกต้องแม่นยำมากยิ่งขึ้น และใช้ในการคำนวณการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงการทดลองแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างน้ำกับอากาศที่มีฝุ่นผงซักฟอกเจือปน ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองทั้งหมด 400 การทดลอง โดยอาศัยวิธี HSS (Hammersley Sequence Sampling) เป็นวิธีในการสุ่มตัวอย่างหรือสุ่มการทดลองทั้ง 400 การทดลอง โดยวิธีนี้จัดได้ว่าเป็นวิธีที่มีการกระจายการสุ่มตัวอย่างได้ครอบคลุมสภาวะที่ทำการทดลองอย่างทั่วถึงกว่าวิธีสุ่มตัวอย่างทั่วไป (Pseudo-random number sequence) [19] โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อขดเป็นอุปกรณ์ต้นแบบ โดยมีอุปกรณ์และวิธีการทดลองต่างๆ ดังนี้

6.1 อุปกรณ์

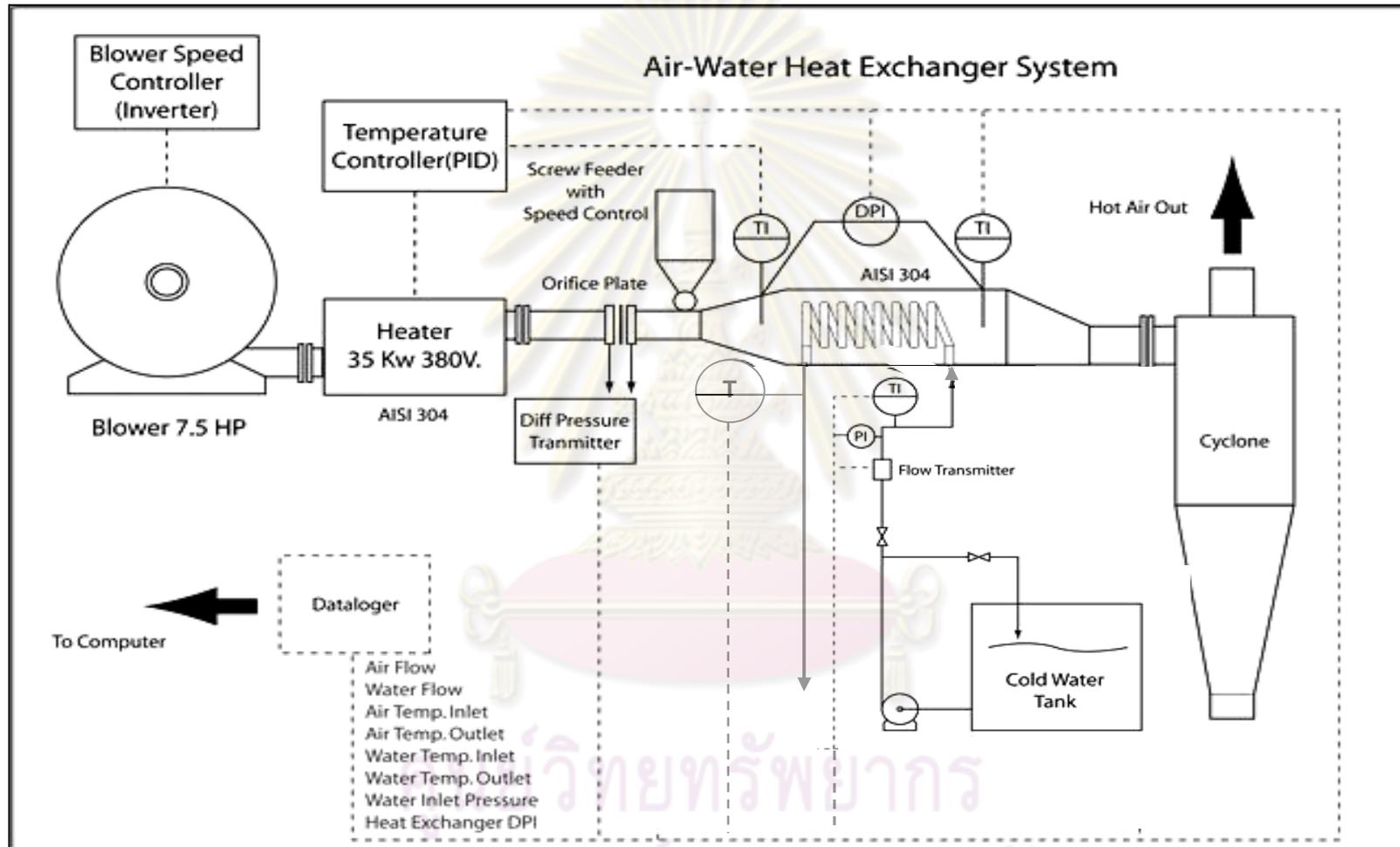
โดยอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองแลกเปลี่ยนความร้อน ประกอบไปด้วย

6.1.1 วัสดุุดิบ

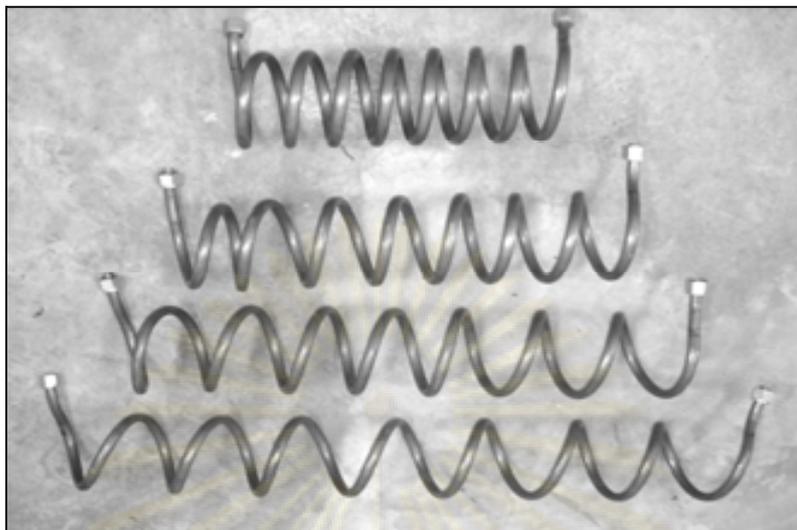
ฝุ่นผงซักฟอก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 43 ไมโครเมตร จากบริเวณปล่องทางออกของหออบแห้งแบบพ่นฝอย

6.1.2 ชุดอุปกรณ์ทดลอง

โดยมีส่วนประกอบหลักดังต่อไปนี้คือเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อขด, เครื่องเป่าลม, เครื่องทำความร้อน, ไซโคลน, ถังพักน้ำ, ชุดป้อนฝุ่นผงซักฟอก, บัมพ์น้ำ และระบบบันทึกข้อมูลอัตโนมัติ โดยในส่วนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะประกอบไปด้วยขดท่อทองแดงขนาด 0.5 นิ้ว และส่วนของเชลล์ ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.2 เมตร ยาว 1.50 เมตร หุ้มด้วยฉนวนใยแก้ว แผนภาพชุดอุปกรณ์ทดลองแสดงดังรูปที่ 6.1 ซึ่งระบบของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อขด (Coiled tube heat exchanger) ที่เลือกใช้คือน้ำ (อุณหภูมิห้อง) ไหลในขดท่อ (Coiled tube side) ส่วนอากาศร้อนไหลในเชลล์ (Shell side) โดยมีลักษณะการไหลแบบสวนทางกัน ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงมุมของขดท่อที่ 25 องศา (ระยะห่าง 4.43 ซม.), 35 องศา (ระยะห่าง 6.31 ซม.), 45 องศา (ระยะห่าง 8.28 ซม.) และ 55 องศา (ระยะห่าง 10.41 ซม.) ดังรูปที่ 6.2 ตามลำดับ



รูปที่ 6.1 แผนภาพชุดอุปกรณ์ทดลองต้นแบบ



รูปที่ 6.2 ขดท่อที่ม้วนต่างๆ

6.2 วิธีการทดลอง

ในงานวิจัยนี้เป็นศึกษาการแลกเปลี่ยนความร้อนโดยอาศัยการทดลอง ซึ่งมีขั้นตอนการทดลองดังนี้

6.2.1 ติดตั้งขดท่อทองแดง (ที่ม้วน 25, 35, 45 และ 55 องศา) เข้าสู่บริเวณที่จะทำการทดสอบแลกเปลี่ยนความร้อน

6.2.2 ปรับอัตราการไหลของน้ำจากถังพักน้ำ เพื่อเตรียมป้อนเข้าสู่บริเวณที่จะทำการทดสอบแลกเปลี่ยนความร้อน

6.2.3 ปรับอุณหภูมิและอัตราการไหลของอากาศตามต้องการ

6.2.4 รอจนกระทั่งข้อ 6.2.3 เข้าสู่สภาวะคงตัว (Steady state) จึงป้อนฝุ่นผงซักฟอกตามปริมาณที่ทำการศึกษาเข้าสู่ระบบแลกเปลี่ยนความร้อน

6.2.5 รอจนกระทั่งข้อ 6.2.4 เข้าสู่สภาวะคงตัวอีกครั้งหนึ่ง จึงเริ่มทำการเก็บข้อมูล

6.2.6 เมื่อทำการทดลองครบตามต้องการแล้ว จึงเปลี่ยนมุมของขดท่อ และทำซ้ำข้อ 6.21 ถึงข้อ 6.25 จนครบขดท่อทั้ง 4 รูปแบบที่ใช้ในการศึกษา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 7

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากผลการทดลองทั้ง 400 ค่าของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อชุดที่ใช้ในงานวิจัยสามารถนำมาใช้หาความสัมพันธ์ที่ใช้ในการทำนายการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อชุดที่เป็นการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างสายนํ้ากับสายอากาศร้อนที่มีฝุ่นผงซักฟอกเจือปนได้ดังนี้

ด้านในท่อ

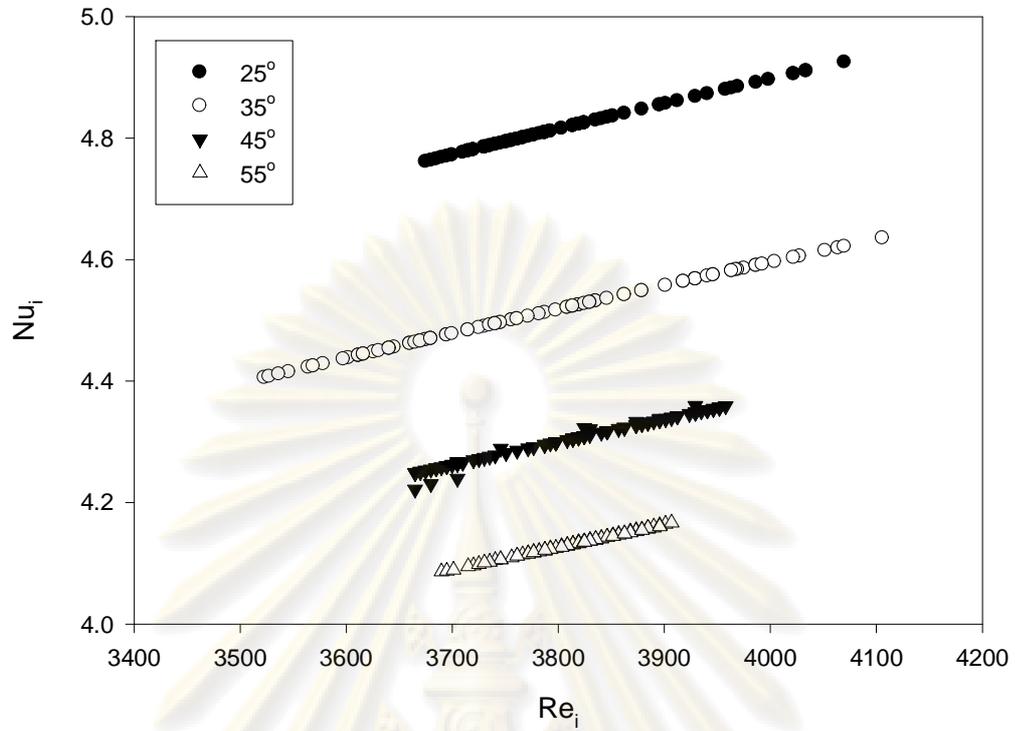
$$Nu_i = 0.134 Re_i^{0.440} Pr_i^{0.097} \phi^{-0.181} \quad (7.1)$$

ด้านนอกท่อ

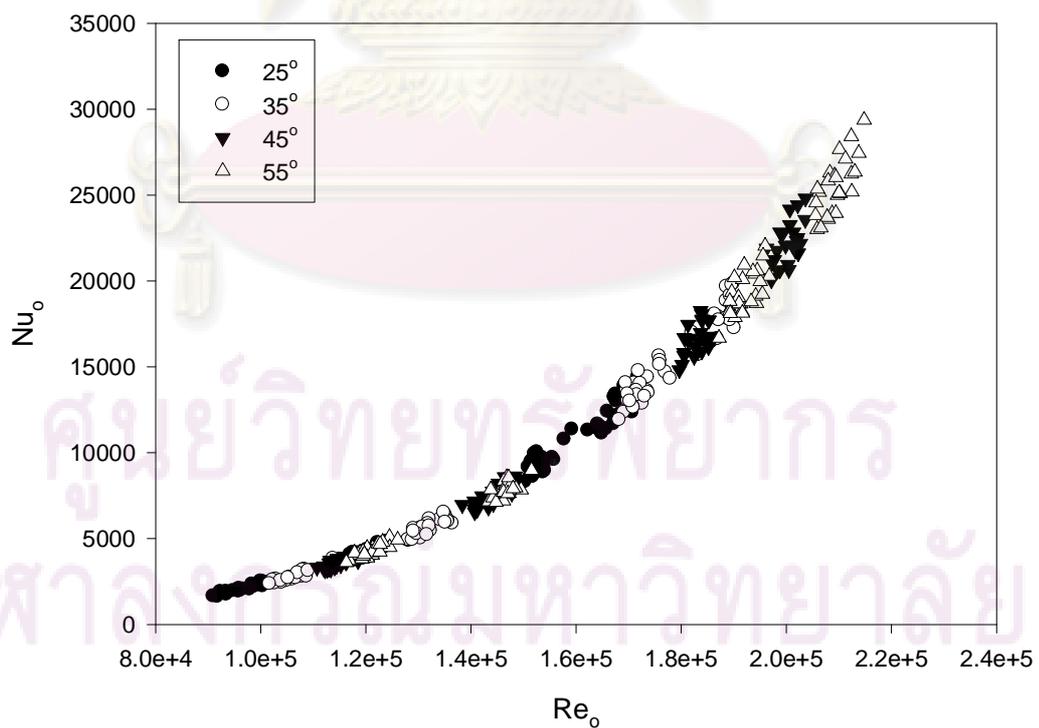
$$Nu_o = 0.608 Re_o^{3.083} Pr_o^{3.949} \phi^{0.029} \beta^{-0.217} \quad (7.2)$$

เมื่อนำความสัมพันธ์ตามสมการที่ 7.1 มาพล็อตกราฟดังรูปที่ 7.1 ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขไนล์เชิลนัมเบอร์และค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ด้านในท่อที่มุมระยะห่างของชุดท่อ 25, 35, 45 และ 55 องศา จากกราฟพบว่าค่าตัวเลขไนล์เชิลนัมเบอร์ด้านในท่อจะปรับตัวสูงขึ้นเมื่อค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เพิ่มขึ้น แต่เมื่อมุมระยะห่างระหว่างชุดท่อ เพิ่มสูงขึ้นกลับทำให้ค่าตัวเลขไนล์เชิลนัมเบอร์ด้านในท่อมีค่าลดต่ำลง เนื่องมาจากเมื่อมุมระยะห่างของชุดท่อเพิ่มสูงขึ้นจะทำให้ชุดท่อมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับท่อตรงมากยิ่งขึ้น เลยทำให้สูญเสียคุณลักษณะของการเป็นชุดท่อในแลกเปลี่ยนความร้อนไป ดังนั้นเมื่อมุมระยะห่างของชุดท่อเพิ่มมากขึ้นค่าตัวเลขไนล์เชิลนัมเบอร์ด้านในท่อจึงมีค่าลดต่ำลงและค่าตัวเลขไนล์เชิลนัมเบอร์ยังแปรผันตรงกับค่าพรีนัมเบอร์

และจากสมการที่ 7.2 เมื่อนำมาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขไนล์เชิลนัมเบอร์และค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ด้านนอกท่อที่มุมระยะห่างของชุดท่อ 25, 35, 45 และ 55 องศา ดังกราฟรูปที่ 7.2 พบว่าค่าตัวเลขไนล์เชิลนัมเบอร์ด้านนอกท่อจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เพิ่มมากขึ้น และยังพบว่ามุมระยะห่างระหว่างชุดท่อมีผลกระทบต่อค่าตัวเลขไนล์เชิลนัมเบอร์ด้านนอกท่อ เนื่องจากลักษณะการไหลของของไหลที่ใช้ในงานวิจัยนั้น มีช่วงการไหลอยู่ในช่วงที่สูงนั่นเอง (ลักษณะการไหลแบบปั่นป่วน) และเมื่ออัตราส่วนของฝุ่นต่อความเร็วอากาศร้อนเพิ่มสูงขึ้นยังส่งผลให้ค่าตัวเลขไนล์เชิลนัมเบอร์ลดต่ำลง เนื่องจากเกิดความต้านทานความร้อน บริเวณผิวท่อจนเป็นฉนวนป้องกันการถ่ายเทความร้อนที่บริเวณผิวท่อด้านนอก



รูปที่ 7.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขนัมเบอร์กับค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ด้านในท่อ

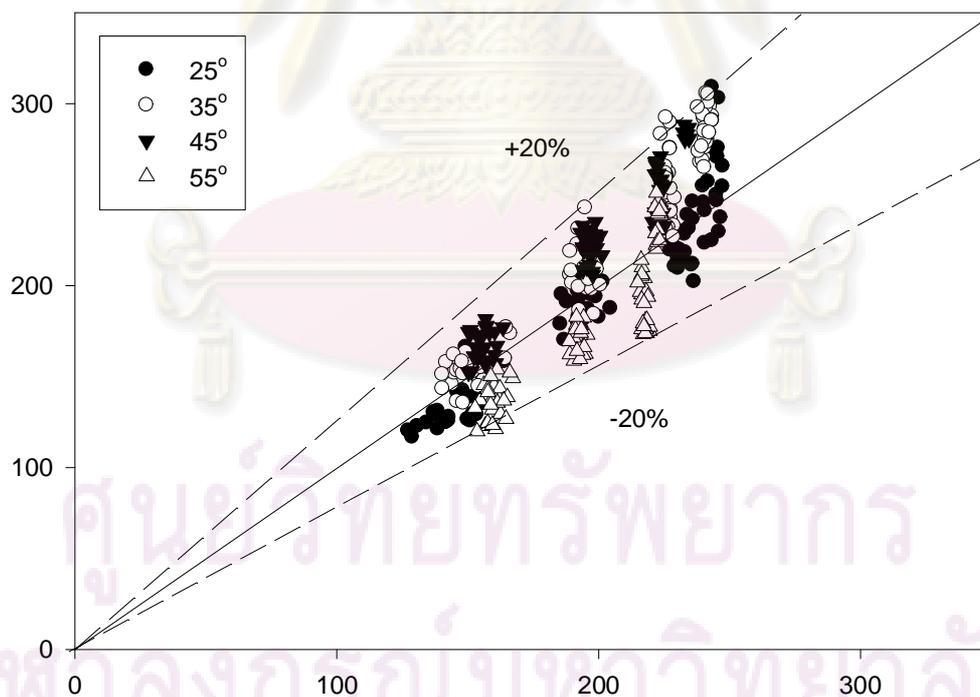


รูปที่ 7.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขนัมเบอร์กับค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ด้านนอกท่อ

ซึ่งเมื่อนำความสัมพันธ์ของค่านี้สเกลนัมเบอร์ตามสมการที่ 7.1 และ 7.2 มาแทนในสมการที่ 5.25 จะได้สมการที่ใช้ในการทำนายหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อชุด ดังนี้

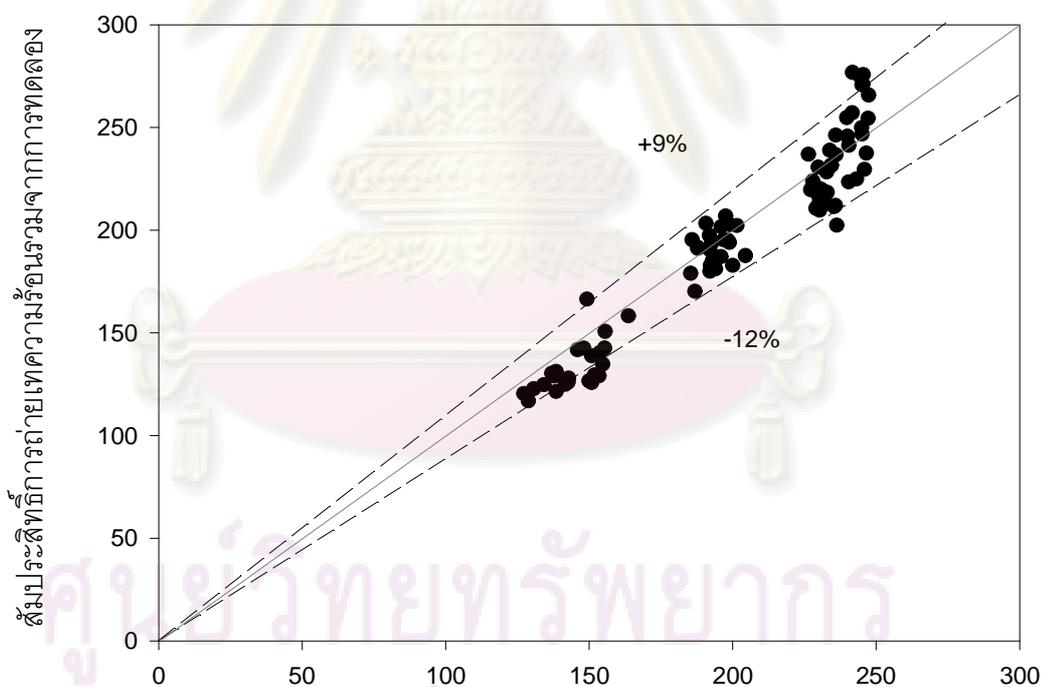
$$\frac{1}{U_o A_o} = \frac{1}{A_o (0.608 Re_o^{3.083} Pr_o^{3.949} \phi^{0.029} \beta^{-0.217} (k_o / D_h))} + \frac{\ln(d_o / d_i)}{2\pi kL} + \frac{1}{A_i (0.134 Re_i^{0.440} Pr_i^{0.097} \phi^{-0.181} (k_i / d_i))} \quad (7.3)$$

สมการที่ 7.3 สามารถนำไปใช้ในการทำนายความสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อชุดได้ และเมื่อนำผลจากสมการที่ 7.3 ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการทำนายและผลจากสมการที่ 5.14 ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการทดลองที่มุมระยะห่างของชุดท่อทั้งสี่แบบ (ที่มุมระยะห่างของชุดท่อ 25, 35, 45 และ 55 องศา) มาพล็อตกราฟจะได้ความสัมพันธ์ดังรูปที่ 7.3

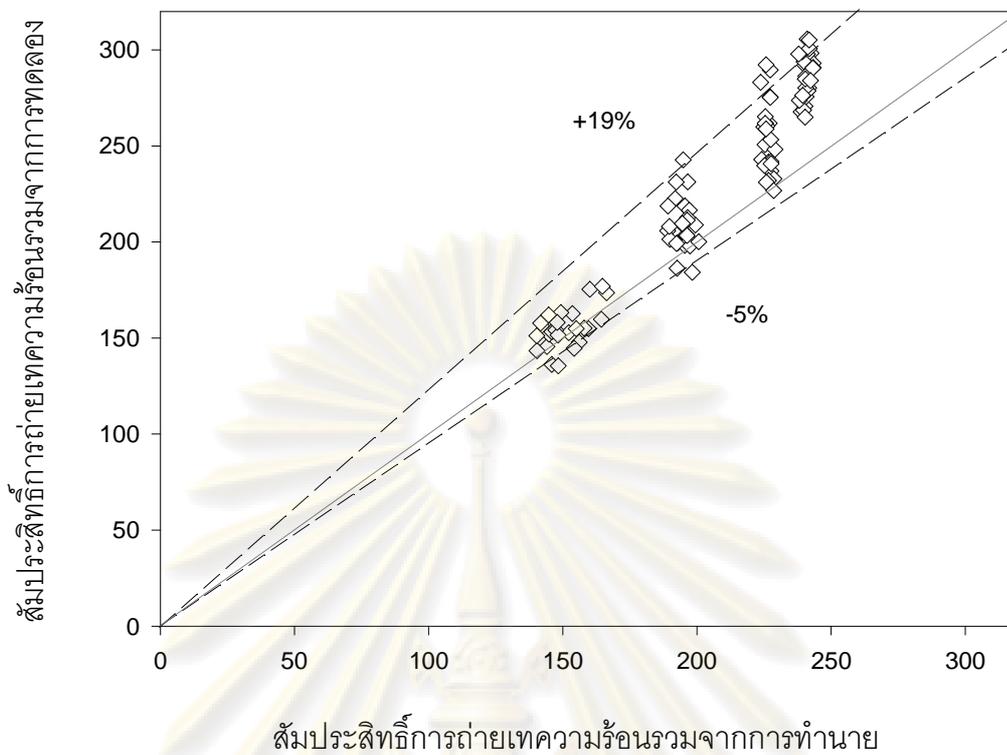


รูปที่ 7.3 เปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจากการทดลองและจากการทำนายที่มุมระยะห่างของชุดท่อ 25, 35, 45 และ 55 องศา

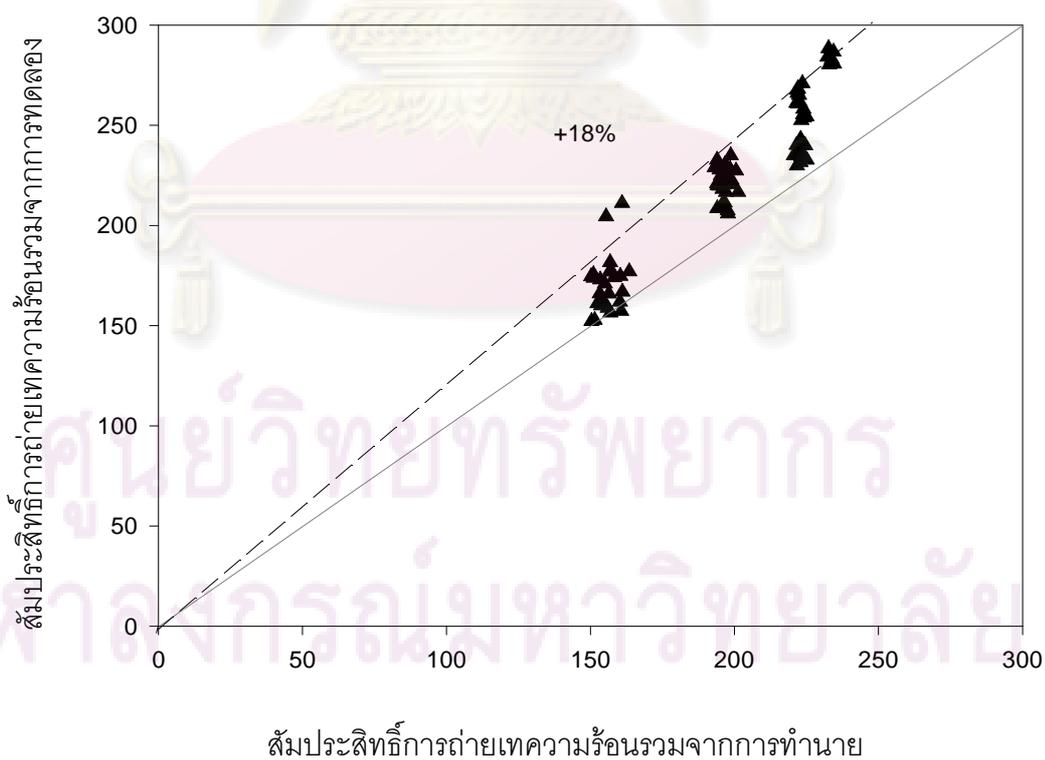
จากกราฟรูปที่ 7.3 ซึ่งเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจากการทดลองและจากการทำนายที่มุมระยะห่างของขดท่อต่างๆ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจากการทำนายและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจากการทดลองมีข้อมูลที่ค่อนข้างจะสอดคล้องกัน โดยมีค่าความผิดพลาดอยู่ในช่วง $\pm 20\%$ โดยเมื่อพิจารณาความแม่นยำในการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของแต่ละขดท่อ พบว่าความผิดพลาดของการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่มุมระยะห่างของขดท่อ 25 องศา มีค่าความผิดพลาดอยู่ในช่วง $+9\%$ ถึง -12% ที่มุมระยะห่างของขดท่อ 35 องศา มีค่าความผิดพลาดอยู่ในช่วง $+19\%$ ถึง -5% ที่มุมระยะห่างของขดท่อ 45 องศา มีค่าความผิดพลาดอยู่ในช่วง $+18\%$ และที่มุมระยะห่างของขดท่อ 55 องศา มีค่าความผิดพลาดอยู่ในช่วง $+9\%$ ถึง -21% ซึ่งกราฟเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจากการทำนายและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจากการทดลองของมุมระยะห่างของขดท่อ 25, 35, 45 และ 55 องศา แสดงดังรูปที่ 7.4-7.7 ตามลำดับ



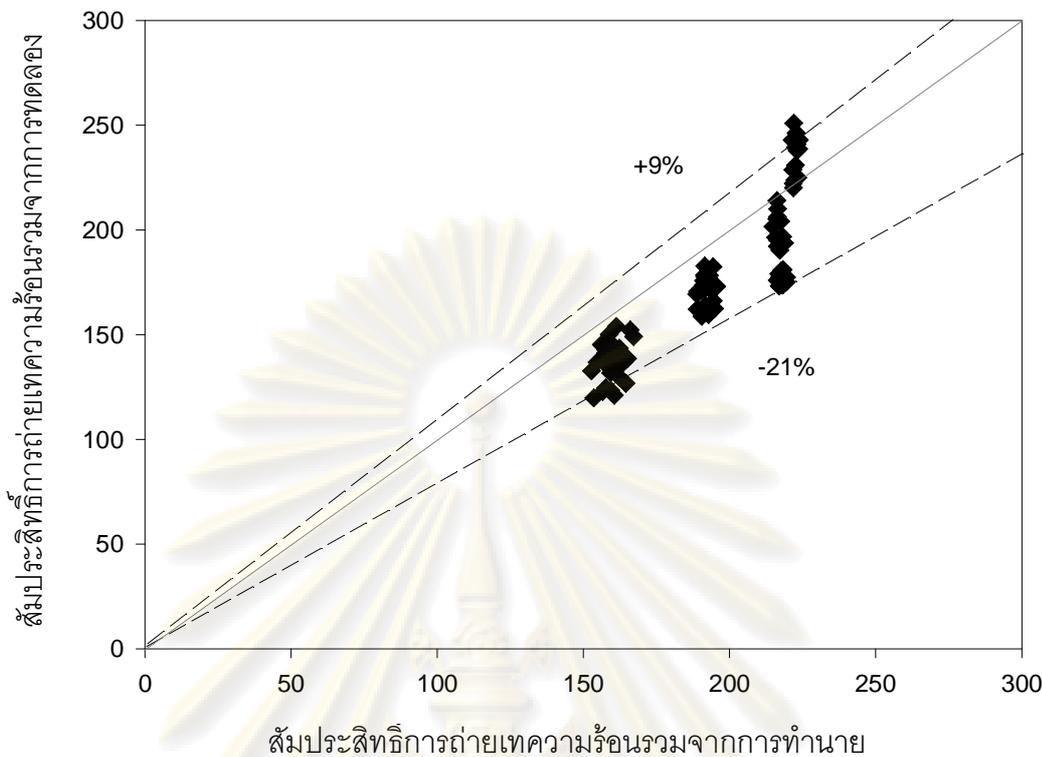
รูปที่ 7.4 เปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจากการทดลองและจากการทำนายที่มุมระยะห่างของขดท่อ 25 องศา



รูปที่ 7.5 เปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจากการทดลองและจากการทำนาย
ที่มีระยะห่างของขดท่อ 35 องศา



รูปที่ 7.6 เปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจากการทดลองและจากการทำนาย
ที่มีระยะห่างของขดท่อ 45 องศา



รูปที่ 7.7 เปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจากการทดลองและจากการทำนาย ที่มุมระยะห่างของชุดท่อ 55 องศา

แสดงให้เห็นว่าสมการที่ 7.3 สามารถนำไปใช้ในการทำนายหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อชุด ซึ่งเป็นการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างน้ำกับอากาศร้อนที่มีฝุ่นผงซัฟฟอกเจือปนได้ถูกต้องและแม่นยำมากกว่าการใช้สมการการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทั่วไป โดยชุดท่อที่มุม 45 องศา จะให้ผลการทำนายที่แม่นยำมากที่สุด และชุดท่อที่มุม 55 องศาจะให้ผลการทำนายที่แม่นยำต่ำที่สุด

จากกราฟรูปที่ 7.8 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบระหว่างผลต่างของอุณหภูมิของน้ำที่ได้จากการแลกเปลี่ยนความร้อน อุณหภูมิขาเข้าของอากาศร้อนและอัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงมวลของฝุ่นผงซัฟฟอกต่ออัตราการไหลเชิงมวลของอากาศร้อน พบว่าเมื่ออุณหภูมิอากาศร้อนที่เข้าสู่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพิ่มสูงขึ้น จะส่งผลให้น้ำที่ออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย ซึ่งเป็นผลมาจากอัตราการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีค่าเพิ่มสูงขึ้น และยังพบว่าเมื่ออัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงมวลของฝุ่นผงซัฟฟอกต่ออัตราการไหลเชิงมวลของอากาศร้อนเพิ่มสูงขึ้น จะทำให้อุณหภูมิของน้ำที่ได้จากการแลกเปลี่ยนความร้อนมีค่าลดต่ำลง

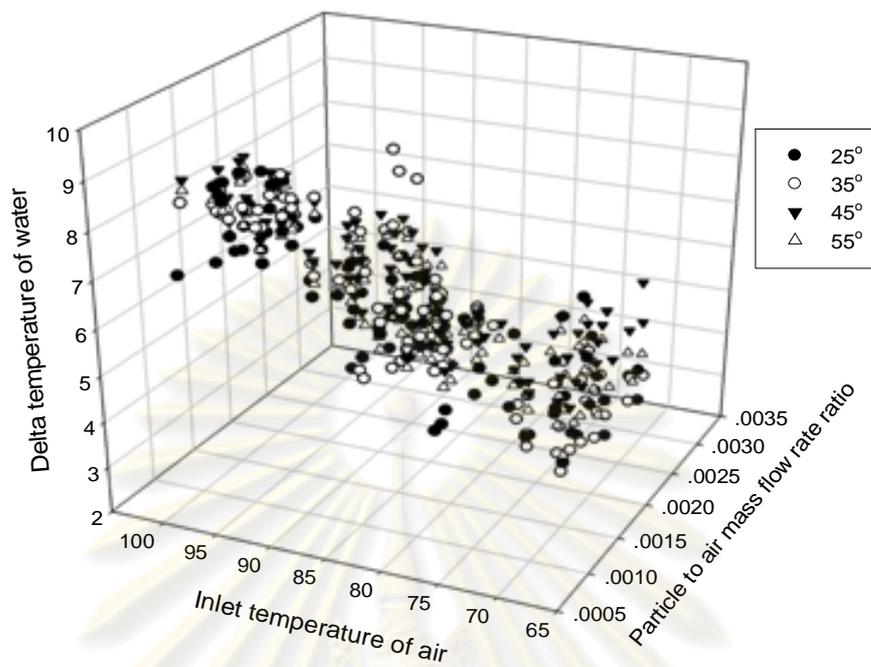
เมื่อพิจารณาความดันลดด้านอากาศ พบว่าเมื่อมุมระยะห่างของชุดท่อเพิ่มสูงขึ้น จะทำให้ความดันลดของอากาศในระบบจะมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากเมื่อมุมระยะห่างของชุดท่อเพิ่ม

สูงขึ้น จะทำให้ระยะทางของขดท่อที่ขัดขวางการไหลของอากาศร้อนเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้เมื่ออัตราส่วนของอัตราการไหลเชิงมวลของฝุ่นผงซึ่กฟอกต่ออัตราการไหลเชิงมวลของอากาศเพิ่มสูงขึ้น จะส่งผลให้ความดันลดของอากาศในระบบมีค่ามากขึ้น ซึ่งเมื่อนำความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของอากาศขาเข้า ความดันลดของอากาศและอัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงมวลของฝุ่นผงซึ่กฟอกต่ออัตราการไหลเชิงมวลของอากาศมาพล็อตกราฟจะได้กราฟดังรูปที่ 7.9

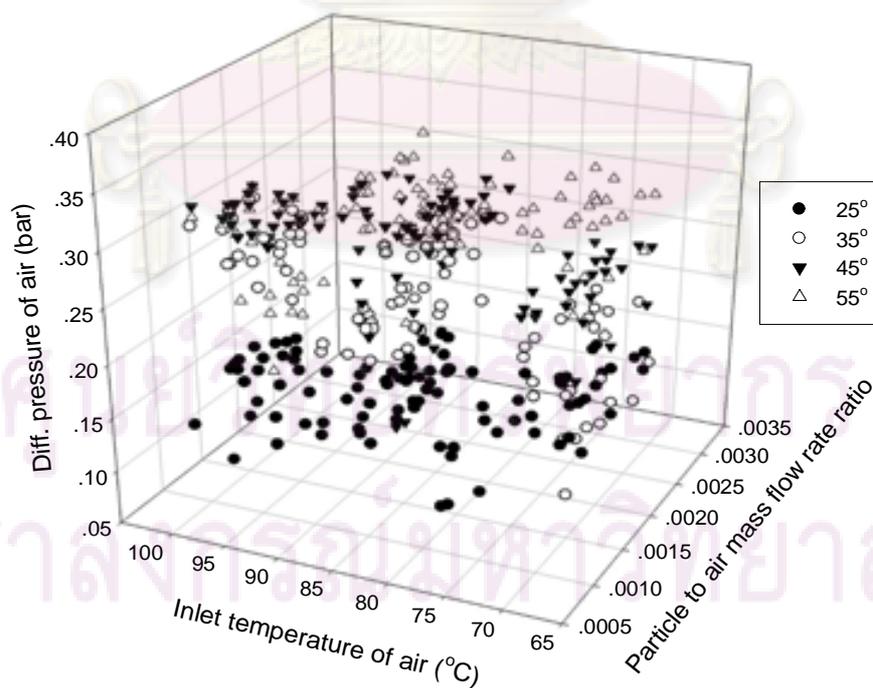
และเมื่อพิจารณาความดันลดด้านในท่อ พบว่าเมื่อมุมระยะห่างของขดท่อเพิ่มสูงขึ้น กลับทำให้ความดันลดด้านในท่อมมีค่าลดลง เนื่องจากเมื่อมุมระยะห่างของขดท่อเพิ่มมากขึ้น ทำให้ท่อที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อนมีลักษณะใกล้เคียงกับท่อตรงมากยิ่งขึ้น ซึ่งโดยทั่วไปแล้วท่อที่มีลักษณะเป็นขดจะมีความดันลดสูงกว่าท่อที่เป็นเส้นตรง ดังนั้นเมื่อมุมระยะห่างของขดท่อเพิ่มมากขึ้น จึงทำให้ความดันลดด้านในท่อมมีค่าลดลง

และเมื่อพิจารณากราฟรูปที่ 7.10 เพื่อหามุมระยะห่างของขดท่อที่มีความเหมาะสมกับระบบมากที่สุด พบว่ามุมระยะห่างของขดท่อที่ 45 องศา เป็นมุมที่มีความเหมาะสมที่สุด ซึ่งเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของสมการที่ 7.1 และสมการที่ 7.2 ประกอบก็พบว่าให้ผลที่สอดคล้องกัน เนื่องจากตามสมการที่ 7.1 เมื่อมุมระยะห่างของขดท่อด้านในท่อเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ด้านในท่อลดต่ำลง แต่จากสมการที่ 7.2 พบว่ามุมระยะห่างของขดท่อด้านนอกท่อเพิ่มสูงขึ้นกลับทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ด้านนอกท่อเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งจากความสัมพันธ์ข้างต้นจะให้ผลที่มีความขัดแย้งกันอยู่ ดังนั้นเมื่อนำทั้งสองสมการมาพิจารณาควบคู่กันแล้วผลลัพธ์ที่ได้จากทั้งสองสมการจะให้ผลที่สามารถชดเชยซึ่งกันและกันได้ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่ามุม 45 องศาเป็นมุมของขดท่อที่มีความเหมาะสมที่สุดและยังมีความดันลดด้านในท่อน้อยกว่าขดท่อที่มุม 25 และ 35 องศา

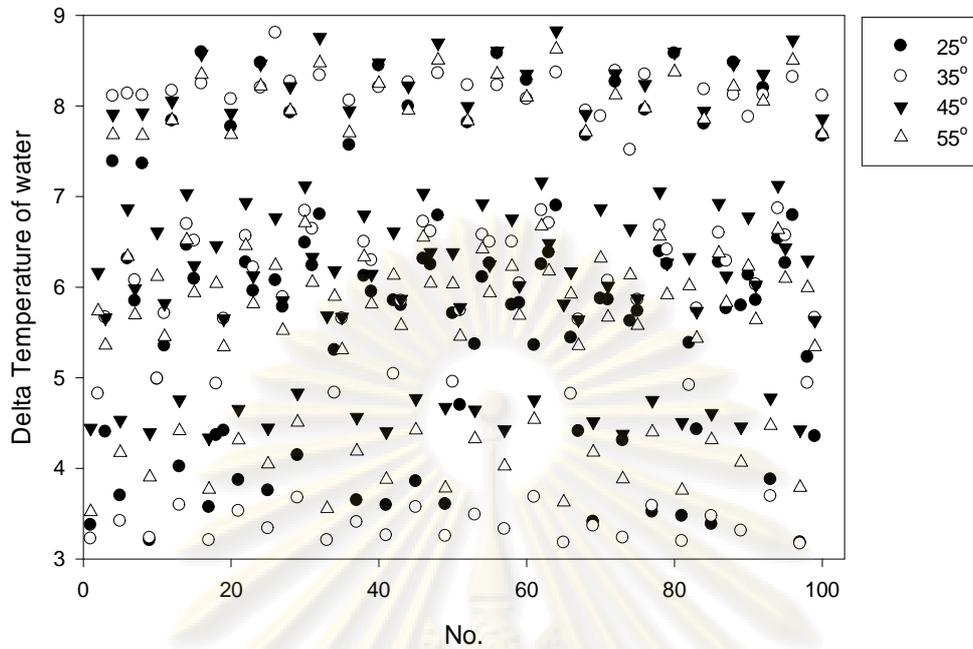
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 7.8 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของอากาศขาเข้า ผลต่างอุณหภูมิของน้ำที่ได้จากการแลกเปลี่ยนความร้อนและอัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงมวลของฝุ่นผงซักฟอกต่ออัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ



รูปที่ 7.9 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของอากาศขาเข้า ความดันลดของอากาศและอัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงมวลของฝุ่นผงซักฟอกต่ออัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ



รูปที่ 7.10 เปรียบเทียบที่มุมระยะห่างของชุดท่อต่างๆ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 8

สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาหาวิธีการที่มีประสิทธิภาพในการนำกลับความร้อนจากหอบแห้งแบบพ่นฝอย และหาความสัมพันธ์ของตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการแลกเปลี่ยนความร้อน เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม โดยได้ทำการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพในการนำกลับความร้อน เพื่อเป็นอุปกรณ์ต้นแบบในการทดลอง ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อขดเป็นอุปกรณ์ในการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างน้ำกับอากาศร้อนที่มีฝุ่นผงซักฟอกเจือปน ซึ่งจากผลการทดลองทั้ง 400 ค่านั้นสามารถนำมาใช้ในการหาความสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้องกับการแลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งก็คือค่าประสิทธิภาพด้านในท่อและด้านนอกท่อของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อขด ซึ่งจากความสัมพันธ์ที่ถูกพัฒนาขึ้นนี้พบว่าเมื่อมุมระยะห่างของขดท่อเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนด้านในท่อมีค่าลดลง เนื่องจากยิ่งขดท่อทองแดงที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อนมีมุมระยะห่างของขดท่อเพิ่มมากขึ้นเท่าใด ย่อมส่งผลให้มีลักษณะใกล้เคียงกับท่อตรงมากยิ่งขึ้น จนทำให้สูญเสียคุณสมบัติที่สำคัญในการถ่ายเทความร้อนของขดท่อลงไป และมุมระยะห่างของขดท่อนี้จะมีผลน้อยมากต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนด้านนอกท่อ เนื่องจากลักษณะการไหลด้านนอกท่อมีลักษณะการไหลที่ และยังพบว่าเมื่ออัตราส่วนของฝุ่นต่อความเร็วอากาศร้อนเพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพด้านนอกท่อลดต่ำลง เนื่องจากเกิดความต้านทานความร้อนบริเวณผิวท่อจนเป็นฉนวนป้องกันการถ่ายเทความร้อนที่บริเวณผิวท่อด้านนอก จนทำให้ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของระบบลดลง เมื่อพิจารณาความดันลดในด้านอากาศ พบว่าเมื่อมุมระยะห่างของขดท่อเพิ่มสูงขึ้น จะทำให้ความดันลดของอากาศในระบบจะมีค่าสูงขึ้น และเมื่ออัตราส่วนของอัตราการไหลเชิงมวลของฝุ่นผงซักฟอกต่ออัตราการไหลเชิงมวลของอากาศเพิ่มสูงขึ้น จะส่งผลให้ความดันลดของอากาศในระบบมีค่ามากขึ้นได้อีกด้วย และเมื่อพิจารณาความดันลดด้านในท่อพบว่าเมื่อมุมระยะห่างของขดท่อเพิ่มสูงขึ้นจะทำให้ความดันลดด้านในท่อมีค่าลดต่ำลง นอกจากนี้ยังพบว่ามุมระยะห่างของขดท่อที่ 45 องศาเป็นมุมที่มีความเหมาะสมที่สุดที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างน้ำกับอากาศร้อนที่มีฝุ่นผงซักฟอกเจือปนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อขด

จากงานวิจัยนี้สามารถหาวิธีการที่มีประสิทธิภาพในการนำพลังงานกลับมาใช้ใหม่ โดยเป็นการนำกลับความร้อนจากสายอากาศขาออกของหอบบแห้งแบบพ่นฝอย กล่าวคือจะได้กระบวนการที่มีประสิทธิภาพในการนำกลับความร้อนจากสายอากาศขาออก ลดการใช้พลังงาน และลดปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้น ซึ่งสามารถนำงานวิจัยนี้ไปประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมต่างๆ ที่มีการปล่อยความร้อนทิ้งสู่บรรยากาศ



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

- [1] ปิยะภัทร คุ่มปรีดี. ศึกษาและพัฒนาอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับเตาเผาเซรามิค.
วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544.
- [2] แมคพายเวอร์. เครื่องอุณหอากาศและอีโคโนไมเซอร์. Technology Journal 25. (กุมภาพันธ์-
มีนาคม 2542) : 135-138.
- [3] วรวิมล มั่นสกุล. การศึกษาและพัฒนาอุปกรณ์อุณหอากาศด้วยไอเสียสำหรับเตาเผา
อุตสาหกรรม. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สาขาวิชา
วิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544.
- [4] สมเกียรติ บุญนง. การศึกษาพารามิเตอร์และการจำลองระบบการนำความร้อนที่สูญเสีย
ออกจากเตาหลอมซิลิกากลับมาใช้โดยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดท่อสองชั้น.
วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2540.
- [5] อนูรักษ์ จิตระวีวรรณ, สมนึก โตศักดิ์สิทธิ์ และประสิทธิ์ พิพัฒน์พันเลิศ. การใช้พลังงานในโรง
หล่อเหล็ก. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สาขาวิชา
วิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2534.
- [6] A.nuntaphan, T.Kiatsiriroat. Thermal behavior of spiral fin and tube heat
exchanger having fly ash deposit. Experimental thermal and fluid science, 31.
1103-1109. 2007.
- [7] D.G. Prabhanjan., G.S.V. Raghavan, T.J. Rennie. Comparison of heat transfer rates
between a straight tube heat exchanger and a helically coiled heat exchanger.
International communications of heat and mass transfer, 29. 185-191. 2002.
- [8] M.A. Akhavan-Behabadi., M.R. Salimpour, V.A. Pazouki. Pressure drop increase of
forced convective condensation inside horizontal coiled wire inserted tubes.
International communications of heat and mass transfer, 35. 1220-1226. 2008.
- [9] M.R. Salimpour. Heat transfer characteristics of a temperature-dependent fluid in
shell and coiled tube heat exchangers. International communications of heat and
mass transfer, 35. 1190-1195. 2008.
- [10] M.R. Salimpour. Heat transfer coefficient of shell and coiled tube heat exchangers.
Experimental thermal and fluid science, 2008.

- [11] Paisarn Naphon., Somchai Wongwises. A review of flow and heat transfer characteristics in curved tubes. Renewable & sustainable energy reviews, 10. 463-490. 2006.
- [12] Paisarn Naphon. Thermal performance and pressure drop of the helical-coil heat exchangers with and without helically crimped fins. International communications of heat and mass transfer, 34. 321-330. 2007.
- [13] Vimal Kumar., Burhanuddin Faizee, Monisha Mridha., K.D.P. Nigam. Numerical studies of a tube-in-tube helically coiled heat exchanger. Chemical engineering and processing, 2008.
- [14] อารัมภรัตน์ รัชดานุรักษ์. ผงซักฟอก. วารสารจารย์พา 50, กันยายน-ตุลาคม 2542.
- [15] วิวัฒน์ ตันทะพานิชกุล. อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนในอุตสาหกรรม. ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: บริษัท ส.เอเชียเพรส(1989) จำกัด, 2536
- [16] ศูนย์อบรมและวิจัยปิโตรเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน. กรุงเทพฯ, 2537.
- [17] Jack P. holman. การถ่ายเทความร้อน. ๓๓๓๓๓๓ สำนักพิมพ์ที่อป จำกัด, 2547.
- [18] David P. Dewitt. Fundamentals of heat and mass transfer. 6thed. Asia: John Wiley & Sons, 2007.
- [19] Chirdpong Preechakul., Soorathep Kheawhom. Modified genetic algorithm with sampling techniques for chemical engineering optimization. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2009.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก
เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนต้นแบบ



รูปที่ ก-1 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนต้นแบบ



รูปที่ ก-2 การวางขดท่อภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนต้นแบบ

ภาคผนวก ข
วัตถุติดและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง



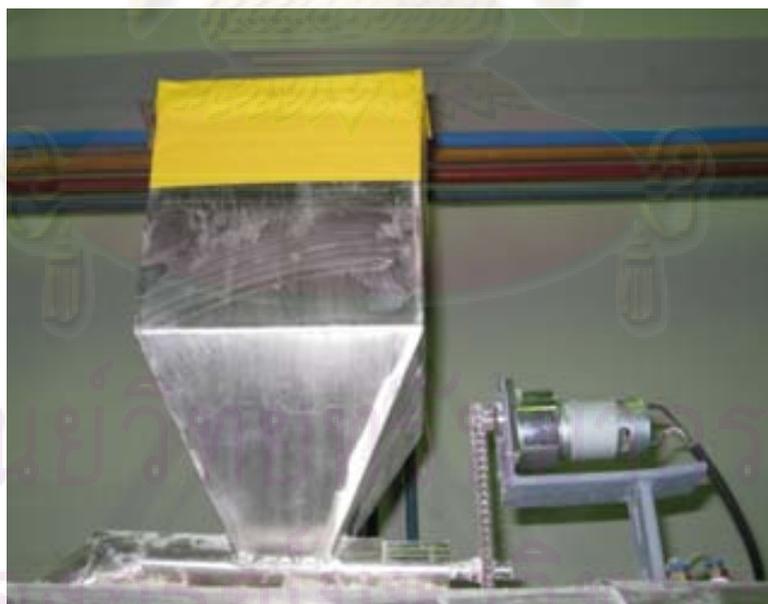
รูปที่ ข-1 ฝุ่นผงซักฟอก



รูปที่ ข-2 เครื่องเป่าลม (Blower)



รูปที่ ข-3 เครื่องทำความร้อน (Heater)



รูปที่ ข-4 อุปกรณ์ป้อนฝุ่น



รูปที่ ข-5 เครื่องบันทึกข้อมูลอัตโนมัติ (Data logger)



รูปที่ ข.6 ถังพักน้ำเย็น



รูปที่ ข-7 อุปกรณ์ดักฝุ่น (Cyclone)



รูปที่ ข-8 ชุดท่อที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ข-9 บริเวณที่ทำการทดสอบ (Test section)



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค

เครื่องมือวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาค

สำหรับเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาค ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้ฝุ่นผงซักฟอกจากบริเวณทางออกของท่ออบแห้งแบบพ่นฝอยเป็นอนุภาคที่ใช้ในการทดลอง โดยเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาค มีชื่อเรียกว่า **MASTERSIZER รุ่น S long bed Ver.2.19** ดังรูปที่ ค-1 ซึ่งตั้งอยู่ที่ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งมีส่วนประกอบดังนี้

1. ส่วนป้อนตัวอย่างอนุภาคที่ต้องการวัดการกระจายขนาด (Small volume sample presentation unit)
2. ส่วนกำเนิดแสงและวัดการกระเจิงของแสงบนอนุภาค (Optical measurement unit)
3. ส่วนประมวลผลและแสดงผล (Computer system)
4. ส่วนคำนวณผลด้วยคอมพิวเตอร์ (Malvern operating software)



รูปที่ ค-1 เครื่องวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาค (MASTERSIZER รุ่น S long bed Ver.2.19)

โดยการเตรียมตัวอย่างอนุภาคที่จะใช้ในการวิเคราะห์หาการกระจายขนาดของอนุภาคนั้น จะใช้วิธีวิเคราะห์เป็ยก โดยในงานวิจัยนี้จะใช้เฮกเซน (Hexane) เป็นตัวกลางใส่ในบีกเกอร์ที่เตรียมไว้แล้วจึงทำการเปิดเครื่องปฏิบัติตามขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1

- 1) เปิดสวิตซ์ที่ส่วนประมวลผลและแสดงผลด้วยคอมพิวเตอร์ โดยใช้โปรแกรมซอฟต์แวร์ที่มีชื่อว่า **Malvern mastersizer**
- 2) เปิดสวิตซ์ที่ส่วนกำเนิดแสงและวัดการตกกระทบของแสงบนอนุภาค

ขั้นตอนที่ 2

- 1) เติมตัวกลางลงใน **chamber** รูปกรวยให้สูงเกินกว่าท่อโลหะ **chamber** ประมาณ 1 นิ้ว
- 2) เปิดสวิตซ์ในส่วนป้อนตัวอย่างของอนุภาคใส่อากาศในท่อออกให้หมดแล้วปิด หลังจากนั้นเปิดสวิตซ์อีกครั้ง เพื่อใส่อากาศออกให้หมด

ขั้นตอนที่ 3

- 1) เมื่อคอมพิวเตอร์แสดงผลบนหน้าจอเป็น **"Malvern mastersizer"** แสดงว่าส่วนประมวลผลพร้อมที่จะคำนวณ
- 2) เลือกคำสั่ง **Set up** บนหน้าจอคอมพิวเตอร์ด้วยการ **Click mouse button** เพื่อทำการตั้งค่าตัวเลือกต่างๆ แล้วเลือกคำสั่ง **Start** ด้วยการ **Click mouse button** อีกครั้งเพื่อทำการวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคในตัวอย่างนั้นด้วยโปรแกรมซอฟต์แวร์ที่มีชื่อว่า **Malvern mastersizer**

หมายเหตุ ถ้าไม่ต้องการ **Set up** ใหม่ก็ให้ข้ามขั้นตอนที่ 3 ไปเลย เครื่องจะใช้ข้อมูล **Set up** ที่เก็บไว้ล่าสุด

ขั้นตอนที่ 4

- 1) เลือกคำสั่ง **#Runs** บนหน้าจอคอมพิวเตอร์ด้วยการ **Click mouse button** แล้วจึงเลือกจำนวนครั้งที่จะให้ **run** ขึ้นในตัวอย่างหนึ่ง ๆ
- 2) กดปุ่ม **F12** เพื่อเก็บค่าตัวเลือกที่ต้องการไว้ในหน่วยความจำ
- 3) เลือกคำสั่ง **Set up analysis** บนจอคอมพิวเตอร์ด้วยการ **Click mouse button** เครื่องจะทำการ **Set up analysis** และพร้อมที่จะทำงาน
- 4) นำตัวอย่างของอนุภาคผสมกับน้ำกลั่นในบีกเกอร์ที่เตรียมไว้ก่อนให้ทั่ว แล้วจึงค่อยๆ เทลงใน **Recirculator** จนถึงระดับที่ต้องการ ซึ่งบนหน้าจอจะแสดงข้อความ **Instrument ready**

- 5) กดปุ่ม **Ctrl** พร้อมกับปุ่ม **S** เครื่องจะทำการวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคทันที

หมายเหตุ ในการเปลี่ยนตัวอย่างของอนุภาคทุกครั้งต้องมีการทำความสะอาดส่วนป้อนตัวอย่างของอนุภาคก่อนทุกครั้ง และกดปุ่ม **Ctrl** พร้อมกับปุ่ม **C** เพื่อให้ระบบคอมพิวเตอร์ทำการ **Clear** ข้อมูลโดยอัตโนมัติ



ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ง
ผลการวิเคราะห์หาการกระจายขนาดของอนุภาค

จากผลการวิเคราะห์หาการกระจายขนาดอนุภาคฝุ่นผงซักฟอก โดยใช้เครื่องมือในภาคผนวก ค จะได้ผลดังแสดงในรูปที่ ง-1 - ง-6 โดยได้สรุปผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคฝุ่นผงซักฟอกแสดงดังตารางที่ ง-1

ตารางที่ ง-1 สรุปผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคฝุ่นผงซักฟอก

ครั้งที่	ขนาดของอนุภาคเฉลี่ย (μm)
1	46.73
2	48.23
3	44.01
4	39.00
5	39.42
6	38.67
เฉลี่ย	42.68

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



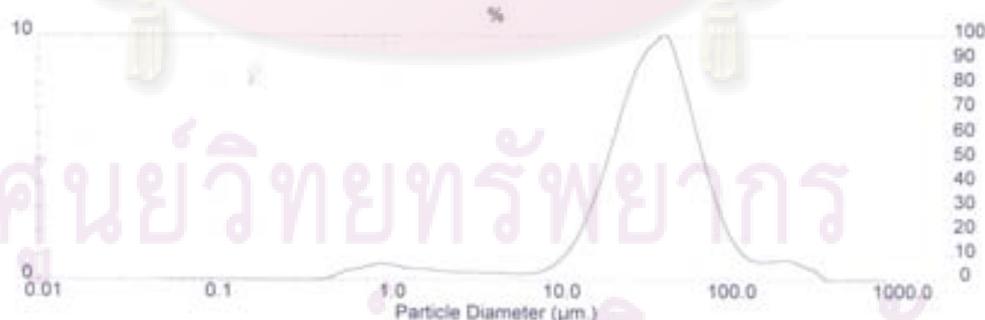
Result: Analysis Report

Sample Details		
Sample ID: Detergent 1	Run Number: 8	Measured: 8 Sep 2008 10:19PM
Sample File: CHULA10	Record Number: 529	Analysed: 8 Sep 2008 10:32PM
Sample Path: C:\SIZERS\DATA\		Result Source: Analysed
Sample Notes: Wet Analysis System Dispersing Medium : Hexane Ultrasonic : no		

System Details			
Range Lens: 300RF mm	Beam Length: 2.40 mm	Sampler: MS1	Obscuration: 12.5 %
Presentation: 3NHE	[Particle R.I. = (1.5330, 0.1000);	Dispersant R.I. = 1.4000]	Residual: 1.026 %
Analysis Model: Polydisperse			
Modifications: None			

Result Statistics			
Distribution Type: Volume	Concentration = 0.0271 %Vol	Density = 1.000 g / cub. cm	Specific S.A. = 0.4980 sq m / g
Mean Diameters:	D [v, 0.1] = 13.07 um	D [v, 0.5] = 37.00 um	D [v, 0.9] = 82.26 um
D [4, 3] = 46.73 um	D [3, 2] = 12.05 um	Span = 1.870E+00	Uniformity = 6.776E-01

Size Low (um)	In %	Size High (um)	Under%	Size Low (um)	In %	Size High (um)	Under%
0.05	0.00	0.06	0.00	6.63	0.29	7.72	7.29
0.06	0.00	0.07	0.00	7.72	0.38	9.00	7.68
0.07	0.00	0.08	0.00	9.00	0.62	10.48	8.29
0.08	0.00	0.09	0.00	10.48	1.04	12.21	9.33
0.09	0.00	0.11	0.00	12.21	1.71	14.22	11.04
0.11	0.00	0.13	0.00	14.22	2.67	16.57	13.71
0.13	0.00	0.15	0.00	16.57	3.92	19.31	17.63
0.15	0.00	0.17	0.00	19.31	5.40	22.49	23.03
0.17	0.00	0.20	0.00	22.49	6.93	26.20	29.06
0.20	0.00	0.23	0.00	26.20	8.29	30.53	38.25
0.23	0.00	0.27	0.00	30.53	9.25	35.56	47.51
0.27	0.00	0.31	0.00	35.56	9.76	41.43	57.27
0.31	0.00	0.36	0.00	41.43	9.94	48.27	67.20
0.36	0.00	0.42	0.00	48.27	8.69	56.23	75.89
0.42	0.06	0.49	0.06	56.23	7.00	65.51	82.89
0.49	0.21	0.58	0.27	65.51	5.18	76.32	88.07
0.58	0.40	0.67	0.67	76.32	3.53	88.91	91.61
0.67	0.48	0.78	1.15	88.91	2.23	103.58	93.83
0.78	0.61	0.91	1.76	103.58	1.35	120.67	95.18
0.91	0.67	1.06	2.43	120.67	0.89	140.58	96.07
1.06	0.62	1.24	3.05	140.58	0.74	163.77	96.81
1.24	0.51	1.44	3.56	163.77	0.77	190.80	97.59
1.44	0.46	1.68	4.01	190.80	0.82	222.28	98.40
1.68	0.45	1.95	4.47	222.28	0.75	258.95	99.16
1.95	0.38	2.28	4.85	258.95	0.53	301.68	99.69
2.28	0.35	2.65	5.20	301.68	0.31	351.46	100.00
2.65	0.33	3.09	5.53	351.46	0.00	409.45	100.00
3.09	0.32	3.60	5.85	409.45	0.00	477.01	100.00
3.60	0.31	4.19	6.16	477.01	0.00	555.71	100.00
4.19	0.30	4.88	6.46	555.71	0.00	647.41	100.00
4.88	0.28	5.69	6.74	647.41	0.00	754.23	100.00
5.69	0.27	6.63	7.01	754.23	0.00	878.67	100.00



รูปที่ ง-1 ผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคฝุ่นผงซักฟอกครั้งที่ 1



ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ภาควิชาเคมี วิทยาลัยวิทยาศาสตร์
 อาคารเฉลิมพระเกียรติ ภาควิชาเคมี ชั้น 62 อ.พญาไท แขวงปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330 โทร 2188026-32, 2188101 โทรสาร 2188021
 Scientific and Technological Research Equipment Centre Chulalongkorn University
 Building 2-3 Chula Soi 62 Phaya-Thai Rd. Pathomwan Bangkok 10330 Tel. 2188026-32, 2188101 Fax. 2188021

Result: Analysis Report

Sample Details		
Sample ID: Detergent 1	Run Number: 9	Measured: 8 Sep 2008 10:19PM
Sample File: CHULA10	Record Number: 530	Analysed: 8 Sep 2008 10:33PM
Sample Path: C:\SIZERS\DATA\		Result Source: Analysed
Sample Notes: Wet Analysis System		
Dispersing Medium: Hexane		
Ultrasonic: no		

System Details			
Range Lens: 300RF mm	Beam Length: 2.40 mm	Sampler: MS1	Obscuration: 12.9 %
Presentation: 3NHE	[Particle R.I. = (1.5330, 0.1000);	Dispersant R.I. = 1.4000]	Residual: 0.668 %
Analysis Model: Polydisperse			
Modifications: None			

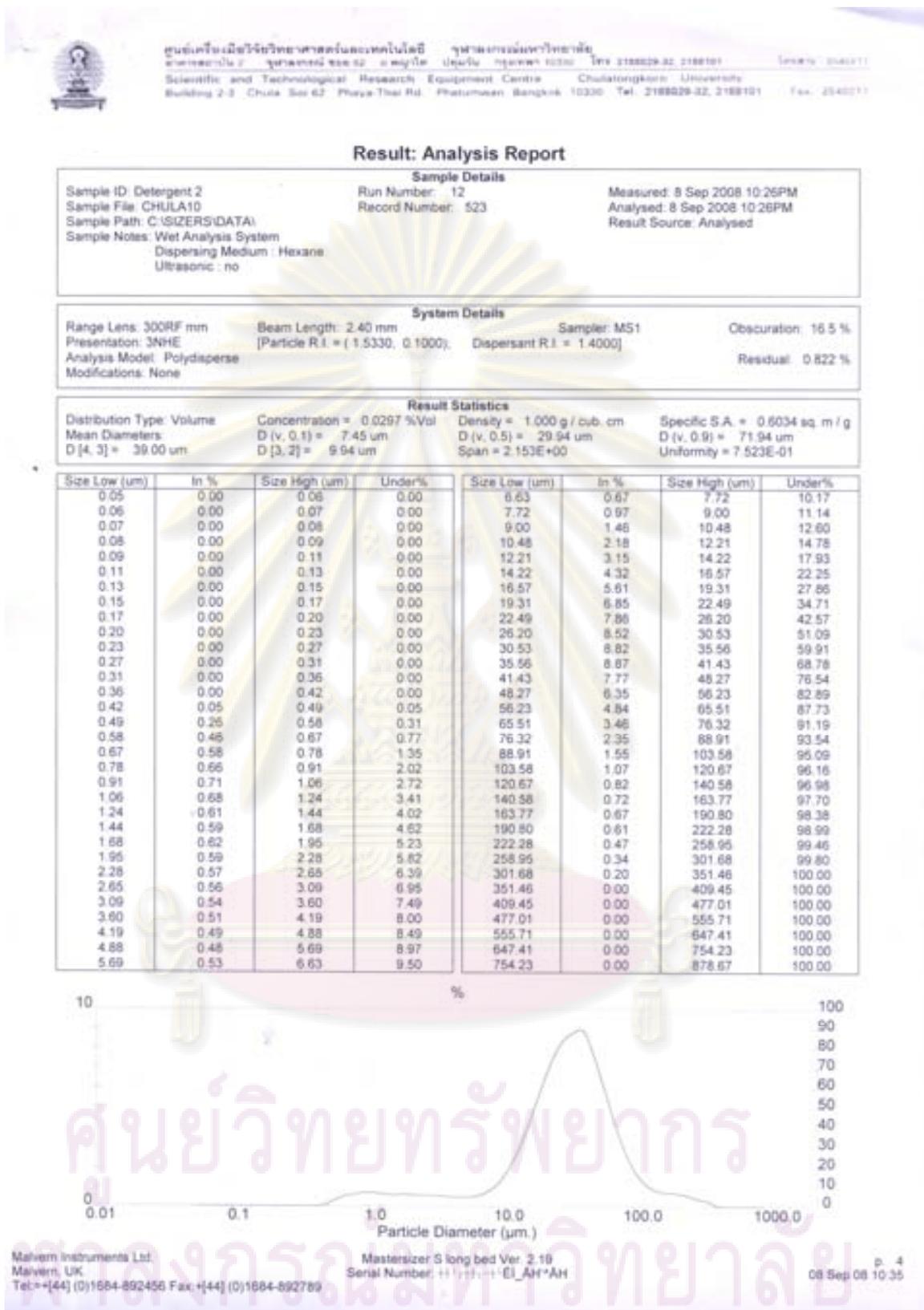
Result Statistics			
Distribution Type: Volume	Concentration = 0.0278 %Vol	Density = 1.000 g / cub. cm	Specific S.A. = 0.5015 sq. m / g
Mean Diameter:	D (v, 0.1) = 12.75 um	D (v, 0.5) = 37.08 um	D (v, 0.9) = 84.90 um
D [4, 3] = 48.23 um	D [3, 2] = 11.96 um	Span = 1.946E+00	Uniformity = 7.200E-01

Size Low (um)	In %	Size High (um)	Under%	Size Low (um)	In %	Size High (um)	Under%
0.05	0.00	0.06	0.00	6.63	0.30	7.72	7.48
0.06	0.00	0.07	0.00	7.72	0.40	9.00	7.88
0.07	0.00	0.08	0.00	9.00	0.64	10.48	8.52
0.08	0.00	0.09	0.00	10.48	1.07	12.21	9.58
0.09	0.00	0.11	0.00	12.21	1.74	14.22	11.33
0.11	0.00	0.13	0.00	14.22	2.70	16.57	14.03
0.13	0.00	0.15	0.00	16.57	3.94	19.31	17.97
0.15	0.00	0.17	0.00	19.31	5.38	22.49	23.34
0.17	0.00	0.20	0.00	22.49	6.86	26.20	30.20
0.20	0.00	0.23	0.00	26.20	8.15	30.53	38.35
0.23	0.00	0.27	0.00	30.53	9.07	35.56	47.43
0.27	0.00	0.31	0.00	35.56	9.66	41.43	56.99
0.31	0.00	0.36	0.00	41.43	9.74	48.27	66.73
0.36	0.00	0.42	0.00	48.27	8.54	56.23	75.27
0.42	0.06	0.49	0.06	56.23	6.91	65.51	82.18
0.49	0.22	0.58	0.28	65.51	5.17	76.32	87.35
0.58	0.41	0.67	0.69	76.32	3.58	88.91	90.93
0.67	0.49	0.78	1.18	88.91	2.30	103.58	93.24
0.78	0.60	0.91	1.78	103.58	1.42	120.67	94.66
0.91	0.65	1.06	2.43	120.67	0.92	140.58	95.58
1.06	0.61	1.24	3.04	140.58	0.73	163.77	96.31
1.24	0.51	1.44	3.55	163.77	0.73	190.80	97.04
1.44	0.46	1.68	4.01	190.80	0.80	222.28	97.84
1.68	0.46	1.95	4.47	222.28	0.82	258.95	98.67
1.95	0.40	2.28	4.87	258.95	0.71	301.68	99.37
2.28	0.37	2.65	5.24	301.68	0.44	351.46	99.82
2.65	0.36	3.09	5.60	351.46	0.18	409.45	100.00
3.09	0.35	3.60	5.94	409.45	0.00	477.01	100.00
3.60	0.33	4.19	6.28	477.01	0.00	555.71	100.00
4.19	0.32	4.88	6.60	555.71	0.00	647.41	100.00
4.88	0.30	5.69	6.90	647.41	0.00	754.23	100.00
5.69	0.28	6.63	7.18	754.23	0.00	878.67	100.00



Malvern Instruments Ltd. Mastersizer S long bed Ver. 2.19 p. :
 Malvern, UK Serial Number: → EL_AH*AH 08 Sep 08 10:3

รูปที่ ง-2 ผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคฝุ่นผงซักฟอกครั้งที่ 2



รูปที่ ง-4 ผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคฝุ่นผงซักฟอกครั้งที่ 4



Result: Analysis Report

Sample Details		
Sample ID: Detergent 2	Run Number: 13	Measured: 8 Sep 2008 10:26PM
Sample File: CHULA10	Record Number: 524	Analysed: 8 Sep 2008 10:26PM
Sample Path: C:\SIZERS\DATA\		Result Source: Analysed
Sample Notes: Wet Analysis System		
Dispersing Medium: Hexane		
Ultrasonic: no		

System Details			
Range Lens: 300RF mm	Beam Length: 2.40 mm	Sampler: MS1	Obscuration: 16.6 %
Presentation: 3NHE	[Particle R.I. = (1.5330, 0.1000);	Dispersant R.I. = 1.4000]	Residual: 0.819 %
Analysis Model: Polydisperse			
Modifications: None			

Result Statistics			
Distribution Type: Volume	Concentration = 0.0299 %Vol	Density = 1.000 g / cub. cm	Specific S.A. = 0.6028 sq. m / g
Mean Diameters:	D (v, 0.1) = 7.45 um	D (v, 0.5) = 29.99 um	D (v, 0.9) = 72.90 um
D [4, 3] = 39.42 um	D [3, 2] = 9.95 um	Span = 2.182E+00	Uniformity = 7.653E-01

Size Low (um)	In %	Size High (um)	Under%	Size Low (um)	In %	Size High (um)	Under%
0.05	0.00	0.06	0.00	6.63	0.68	7.72	10.18
0.06	0.00	0.07	0.00	7.72	0.97	9.00	11.15
0.07	0.00	0.08	0.00	9.00	1.46	10.48	12.61
0.08	0.00	0.09	0.00	10.48	2.19	12.21	14.80
0.09	0.00	0.11	0.00	12.21	3.16	14.22	17.96
0.11	0.00	0.13	0.00	14.22	4.33	16.57	22.30
0.13	0.00	0.15	0.00	16.57	5.60	19.31	27.90
0.15	0.00	0.17	0.00	19.31	6.82	22.49	34.72
0.17	0.00	0.20	0.00	22.49	7.81	26.20	42.53
0.20	0.00	0.23	0.00	26.20	8.47	30.53	51.00
0.23	0.00	0.27	0.00	30.53	8.76	35.56	59.76
0.27	0.00	0.31	0.00	35.56	8.83	41.43	68.59
0.31	0.00	0.36	0.00	41.43	7.74	48.27	76.33
0.36	0.00	0.42	0.00	48.27	6.32	56.23	82.65
0.42	0.05	0.49	0.05	56.23	4.62	65.51	87.47
0.49	0.27	0.58	0.32	65.51	3.44	76.32	90.90
0.58	0.47	0.67	0.79	76.32	2.33	88.91	93.24
0.67	0.59	0.78	1.38	88.91	1.56	103.58	94.80
0.78	0.66	0.91	2.04	103.58	1.10	120.67	95.89
0.91	0.69	1.06	2.73	120.67	0.86	140.58	96.76
1.06	0.66	1.24	3.39	140.58	0.77	163.77	97.52
1.24	0.61	1.44	4.00	163.77	0.72	190.80	98.25
1.44	0.59	1.68	4.58	190.80	0.66	222.28	98.90
1.68	0.61	1.95	5.19	222.28	0.54	258.95	99.44
1.95	0.58	2.28	5.77	258.95	0.37	301.68	99.81
2.28	0.57	2.65	6.35	301.68	0.19	351.46	100.00
2.65	0.57	3.09	6.91	351.46	0.00	409.45	100.00
3.09	0.55	3.60	7.46	409.45	0.00	477.01	100.00
3.60	0.52	4.19	7.98	477.01	0.00	555.71	100.00
4.19	0.50	4.88	8.47	555.71	0.00	647.41	100.00
4.88	0.49	5.69	8.96	647.41	0.00	754.23	100.00
5.69	0.53	6.63	9.50	754.23	0.00	878.67	100.00



รูปที่ ง-5 ผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคฝุ่นผงซักฟอกครั้งที่ 5

ภาคผนวก จ
สภาวะที่ใช้ในการทดลอง

ตัวแปรที่ทำการควบคุม มีดังนี้

1. อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำ เท่ากับ 0.02 กิโลกรัมต่อวินาที
2. อุณหภูมิของน้ำ เท่ากับ อุณหภูมิห้อง

โดยได้ทำการปรับเปลี่ยนสภาวะที่ใช้ในการทดลองตามตารางที่ จ-1

ตารางที่ จ-1 ช่วงของสภาวะในการทดลองแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างน้ำกับอากาศร้อน

ตัวแปร	หน่วย	ค่า
อัตราการไหลเชิงมวล	กิโลกรัมต่อวินาที	0.3 - 0.6
อากาศร้อน อุณหภูมิขาเข้า	องศาเซลเซียส	70 - 100
ปริมาณฝุ่น	กรัมต่อวินาที	0.5 - 1.0

โดยค่าสภาวะในการทดลองตามตารางที่ จ-1 นั้น สามารถแบ่งออกเป็นการทดลองได้ทั้งหมด 100 การทดลองดังตารางที่ จ-2 ซึ่งมีชุดท่ทั้งหมด 4 รูปแบบ ที่จะต้องทำการศึกษา ทำให้จะได้ผลการทดลองทั้งหมด 400 ค่า ดังแสดงในภาคผนวก ฉ

ตารางที่ จ-2 สภาวะที่ดำเนินการทดลอง

การทดลองที่	ความเร็วของอากาศ (m/s)	อุณหภูมิของอากาศ (°C)	ปริมาณฝุ่นผงชักฟอก (g/s)
1	9.87	70	0.50
2	13.15	85	0.67
3	16.44	78	0.83
4	19.73	93	0.56
5	9.87	74	0.72
6	13.15	89	0.89
7	16.44	81	0.61
8	19.73	93	0.78
9	9.87	72	0.94

การทดลองที่	ความเร็วของอากาศ (m/s)	อุณหภูมิของอากาศ (°C)	ปริมาณฝุ่นผงชักฟอก (g/s)
10	13.15	87	0.52
11	16.44	79	0.69
12	19.73	94	0.85
13	9.87	76	0.57
14	13.15	91	0.74
15	16.44	83	0.91
16	19.73	98	0.63
17	9.87	71	0.80
18	13.15	86	0.96
19	16.44	78	0.54
20	19.73	93	0.70
21	9.87	75	0.87
22	13.15	90	0.59
23	16.44	82	0.76
24	19.73	97	0.93
25	9.87	73	0.65
26	13.15	88	0.81
27	16.44	80	0.98
28	19.73	95	0.51
29	9.87	77	0.67
30	13.15	92	0.84
31	16.44	84	0.56
32	19.73	99	0.73
33	9.87	70	0.90
34	13.15	85	0.62
35	16.44	78	0.78

การทดลองที่	ความเร็วของอากาศ (m/s)	อุณหภูมิของอากาศ (°C)	ปริมาณฝุ่นผงชักฟอก (g/s)
36	19.73	93	0.95
37	9.87	74	0.52
38	13.15	89	0.69
39	16.44	82	0.86
40	19.73	97	0.58
41	9.87	72	0.75
42	13.15	87	0.91
43	16.44	80	0.64
44	19.73	95	0.80
45	9.87	76	0.97
46	13.15	91	0.54
47	16.44	84	0.71
48	19.73	99	0.88
49	9.87	71	0.60
50	13.15	86	0.77
51	16.44	79	0.93
52	19.73	94	0.65
53	9.87	75	0.82
54	13.15	90	0.99
55	16.44	83	0.51
56	19.73	98	0.68
57	9.87	73	0.85
58	13.15	88	0.57
59	16.44	81	0.73
60	19.73	96	0.90
61	9.87	77	0.62

การทดลองที่	ความเร็วของอากาศ (m/s)	อุณหภูมิของอากาศ (°C)	ปริมาณฝุ่นผงชักฟอก (g/s)
62	13.15	92	0.79
63	16.44	85	0.96
64	19.73	100	0.53
65	9.87	70	0.70
66	13.15	85	0.86
67	16.44	78	0.59
68	19.73	93	0.80
69	9.87	74	0.92
70	13.15	89	0.64
71	16.44	81	0.81
72	19.73	96	0.98
73	9.87	72	0.55
74	13.15	87	0.72
75	16.44	80	0.88
76	19.73	95	0.60
77	9.87	76	0.77
78	13.15	91	0.94
79	16.44	83	0.66
80	19.73	98	0.82
81	9.87	71	0.99
82	13.15	86	0.50
83	16.44	79	0.67
84	19.73	94	0.84
85	9.87	75	0.56
86	13.15	90	0.72
87	16.44	82	0.89

การทดลองที่	ความเร็วของอากาศ (m/s)	อุณหภูมิของอากาศ (°C)	ปริมาณฝุ่นผงชักฟอก (g/s)
88	19.73	97	0.61
89	9.87	73	0.78
90	13.15	88	0.95
91	16.44	81	0.52
92	19.73	96	0.69
93	9.87	77	0.85
94	13.15	92	0.58
95	16.44	84	0.74
96	19.73	99	0.91
97	9.87	71	0.63
98	13.15	86	0.80
99	16.44	78	0.97
100	19.73	93	0.54

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ช
ผลการทดลอง

ผลการทดลองเกี่ยวกับการแลกเปลี่ยนความร้อนที่มุมของชุดท่อ 25, 35, 45 และ 55 องศา แสดงผลดังตารางที่ ช-1-ช-4 ตามลำดับ

ตารางที่ ช-1 ผลการทดลองที่มุมของชุดท่อ 25 องศา

การทดลองที่	ความเร็ว อากาศ (m/s)	อุณหภูมิอากาศ (°C)		อุณหภูมิน้ำ (°C)		ความดันลด (bar)	
		ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก	อากาศ	น้ำ
1	10.1003	70.2500	68.2500	30.7677	34.1419	0.1433	0.4003
2	13.3950	85.0000	81.4600	31.5670	37.0020	0.1871	0.2002
3	16.6459	78.5000	75.5389	32.5556	36.9583	0.0699	0.2748
4	20.0490	92.7500	89.2521	32.3208	39.7083	0.1276	0.2210
5	10.0305	74.0000	72.0000	32.8715	36.5701	0.1241	0.3903
6	13.3850	89.0000	85.4349	32.1873	38.5016	0.1240	0.2225
7	16.5094	80.8077	78.4041	35.1053	40.9521	0.1869	0.1959
8	20.0215	92.7500	88.8667	31.9458	39.3083	0.1250	0.2213
9	9.5702	72.1379	70.1379	33.0362	36.2397	0.1304	0.3896
10	13.2661	87.5000	83.8640	32.3920	37.3780	0.1275	0.2219
11	16.5576	79.2500	76.5055	33.4845	38.8364	0.1279	0.2201
12	20.1427	94.2500	90.4563	32.6188	40.4563	0.1854	0.2203
13	10.3888	76.2500	74.2500	33.1375	37.1575	0.1345	0.3877
14	13.3255	91.2500	87.9237	32.5921	39.0553	0.1449	0.2214
15	16.6869	83.0000	80.1179	32.1036	38.1929	0.2038	0.2060
16	19.8267	98.0000	92.0708	30.8875	39.4792	0.1801	0.2076
17	10.3771	71.0000	69.0000	33.1851	36.7561	0.1593	0.3863
18	13.3610	86.0000	82.8783	32.8870	37.2522	0.1332	0.2204
19	17.0122	78.4135	75.4385	32.6000	37.0154	0.0940	0.2729
20	19.8747	92.7500	89.4121	32.2308	40.0011	0.1928	0.2021
21	9.8099	74.7500	72.7500	33.2231	37.0923	0.1492	0.3858

การทดลองที่	ความเร็ว อากาศ (m/s)	อุณหภูมิอากาศ (°C)		อุณหภูมิน้ำ (°C)		ความดันลด (bar)	
		ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก	อากาศ	น้ำ
22	13.5963	89.7500	86.5579	33.0053	39.2763	0.1466	0.2208
23	16.8191	82.2238	79.2674	35.3674	41.3256	0.1865	0.1936
24	20.0763	97.2500	91.9708	31.4917	39.9667	0.1801	0.2109
25	10.4327	73.2500	71.2500	33.3710	37.1258	0.1656	0.3825
26	13.6234	88.2500	84.7961	33.1678	39.2417	0.1408	0.2187
27	16.6079	80.0000	77.4784	33.6612	39.4425	0.1325	0.2038
28	19.9792	95.0000	91.2069	32.5529	40.4793	0.1858	0.2199
29	10.3825	77.0000	75.0000	33.4912	37.6353	0.1621	0.3798
30	13.5869	92.0000	88.4500	33.4500	39.9389	0.1390	0.2171
31	16.7580	83.7500	80.8786	32.0590	38.2974	0.1950	0.2058
32	19.8297	99.5000	95.4109	32.0531	38.8547	0.0795	0.2841
33	9.6705	70.2500	68.2500	33.6546	36.6444	0.1507	0.3804
34	13.8283	85.2500	81.8947	33.6421	38.9474	0.1349	0.2177
35	16.5420	77.9688	75.0788	32.2370	36.5480	0.1456	0.2317
36	19.2732	93.0500	90.0040	32.7640	40.3320	0.1552	0.2246
37	10.2096	74.0000	72.0000	33.6775	37.3242	0.1512	0.3809
38	13.7998	89.0000	85.6400	33.8782	40.0000	0.1319	0.2171
39	16.6018	82.2500	79.4308	36.2038	42.1538	0.1904	0.1857
40	20.1822	96.5000	91.9500	31.5818	40.0273	0.1880	0.2104
41	10.2394	71.7500	69.7500	33.8645	37.4581	0.1474	0.3777
42	13.6291	86.7500	83.8220	34.1146	39.9683	0.1265	0.2160
43	16.3117	80.0000	77.4842	33.8579	39.6579	0.1316	0.2015
44	20.0954	94.9741	91.1276	32.5241	40.5172	0.1837	0.2176
45	9.6737	76.2500	74.2500	33.9063	37.7625	0.1309	0.3761
46	13.6235	91.2500	87.5708	34.3333	40.6458	0.1276	0.2148
47	16.9319	83.7500	80.9938	32.1208	38.3708	0.1933	0.2060
48	20.0437	99.5000	95.2667	31.9500	38.7400	0.1085	0.2823
49	10.2351	71.0000	69.0000	33.9531	37.5575	0.1579	0.3689

การทดลองที่	ความเร็ว อากาศ (m/s)	อุณหภูมิอากาศ (°C)		อุณหภูมิน้ำ (°C)		ความดันลด (bar)	
		ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก	อากาศ	น้ำ
50	13.7597	86.0000	82.8846	34.6138	40.3231	0.1308	0.2158
51	16.5961	79.2500	76.4902	33.3459	38.0443	0.1260	0.2670
52	20.0373	93.5313	90.3500	32.6167	40.4333	0.1723	0.2210
53	10.2435	74.7650	72.7650	34.0380	39.4070	0.1464	0.3331
54	13.7763	89.7826	86.7348	35.2565	41.3652	0.1360	0.2137
55	16.7766	83.0000	80.2000	32.2517	38.5138	0.1989	0.2010
56	19.3898	98.0000	92.3042	31.0750	39.6542	0.1828	0.2078
57	16.5230	73.2813	70.9703	33.5890	37.0020	0.1298	0.2002
58	13.6099	88.2500	84.8286	35.5393	41.3429	0.1250	0.2126
59	16.1167	80.7500	78.3063	34.9438	40.7688	0.1880	0.1969
60	20.2017	95.7500	91.1526	31.6544	39.9386	0.1869	0.2116
61	10.2073	77.0000	75.0000	34.1623	39.5217	0.1414	0.3200
62	13.6824	92.0000	88.5546	35.7306	41.9815	0.1268	0.2121
63	16.7690	85.2500	81.9545	32.2318	38.6136	0.1880	0.2041
64	20.4371	100.2500	96.1467	32.0200	38.9200	0.1334	0.2807
65	9.5664	70.2500	68.2500	34.1750	37.1528	0.1233	0.3232
66	13.6457	85.2500	82.0043	36.0239	41.4652	0.1264	0.2115
67	16.8540	78.4741	75.5517	32.7345	37.1448	0.0887	0.2723
68	19.5293	92.7500	89.7536	32.6893	40.3643	0.1520	0.2235
69	10.1642	74.0000	72.0000	34.2267	37.6376	0.1244	0.3271
70	13.6976	89.0000	85.7944	36.2876	42.1596	0.1250	0.2109
71	16.9560	80.8693	78.4864	34.7136	40.5750	0.1866	0.1984
72	20.1795	95.7500	91.1931	31.6310	39.8966	0.1837	0.2124
73	10.2189	71.7500	69.7500	34.2990	38.6059	0.1250	0.3290
74	13.7149	86.7500	83.9548	36.5857	42.2119	0.1265	0.2100
75	16.4168	80.0000	77.5308	34.0692	39.8051	0.1751	0.2005
76	19.8255	95.0000	91.0016	32.4639	40.4213	0.1870	0.2172
77	9.5899	76.2500	74.2500	34.3333	37.8521	0.1250	0.3294

การทดลองที่	ความเร็ว อากาศ (m/s)	อุณหภูมิอากาศ (°C)		อุณหภูมิน้ำ (°C)		ความดันลด (bar)	
		ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก	อากาศ	น้ำ
		78	13.6490	90.9773	87.4591	32.9205	39.3136
79	16.6486	83.0000	80.2000	32.8258	39.0806	0.1880	0.1925
80	20.1217	98.0000	92.4110	31.1824	39.7615	0.1845	0.2089
81	10.2373	71.0000	69.0000	34.3692	37.8436	0.1234	0.3310
82	13.6702	86.0000	83.1137	36.6513	42.0350	0.1255	0.2094
83	16.5526	79.2500	76.4739	33.1848	37.6141	0.1216	0.2704
84	19.4101	94.2500	90.5575	32.6175	40.4200	0.1660	0.2217
85	9.6832	74.7629	72.7629	34.4603	37.8448	0.1218	0.3262
86	13.6601	89.7500	86.5892	32.8432	39.1189	0.1250	0.2178
87	16.5917	82.2500	79.5680	36.9680	42.7320	0.2031	0.1827
88	20.1275	97.2500	91.8630	31.4407	39.9185	0.1880	0.2101
89	10.2332	73.2500	71.2500	34.5232	40.3203	0.1250	0.3298
90	13.6844	88.2500	84.6679	32.8755	39.0075	0.1250	0.2159
91	16.6302	80.7708	78.4667	34.3111	40.1667	0.1810	0.2002
92	19.4108	95.7500	91.5962	32.1808	40.3769	0.1880	0.2153
93	10.2347	77.0000	75.0000	34.6259	38.5027	0.1242	0.3348
94	13.6351	92.0000	88.5625	32.8125	39.3500	0.1095	0.2176
95	16.7676	83.7500	81.0077	32.1308	38.3949	0.1880	0.2053
96	20.2028	99.0931	95.1862	31.9596	38.7521	0.1211	0.2817
97	9.5507	71.7500	69.7500	34.4833	37.6667	0.0940	0.3440
98	13.7149	86.0000	82.8603	33.8048	39.0333	0.1260	0.2118
99	16.4656	78.5000	75.6415	33.0390	37.3927	0.1114	0.2711
100	19.5370	92.7500	89.6759	32.7241	40.3931	0.1532	0.2231

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-2 ผลการทดลองที่มุมของชุดท่อ 35 องศา

การทดลองที่	ความเร็ว อากาศ (m/s)	อุณหภูมิอากาศ (°C)		อุณหภูมิน้ำ (°C)		ความดันลด (bar)	
		ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก	อากาศ	น้ำ
1	10.2820	70.2500	67.3190	30.8643	34.0881	0.0910	0.2769
2	13.4082	85.2500	81.6520	33.1160	37.9400	0.1930	0.2604
3	16.6043	78.5000	74.8267	30.9667	36.6333	0.2489	0.2031
4	19.8644	92.7500	89.0077	33.6385	41.7462	0.3082	0.1765
5	9.9952	74.0000	71.2208	32.0542	35.4708	0.1381	0.2723
6	13.2850	89.0000	85.2941	33.1471	41.2824	0.2139	0.2005
7	16.7043	80.7500	77.7900	32.3150	38.3900	0.3130	0.1908
8	19.8501	92.7500	89.1778	33.7889	41.9056	0.2992	0.1758
9	9.7084	71.7500	69.5105	33.0368	36.2684	0.1880	0.2608
10	13.3479	86.7500	83.4000	33.2167	38.2056	0.2265	0.2593
11	16.7690	79.2500	75.9455	31.8182	37.5273	0.3130	0.1980
12	20.0060	94.2500	90.0500	34.4333	42.6000	0.3130	0.1732
13	9.7023	76.2500	73.1381	32.6000	36.1952	0.1880	0.2698
14	13.3649	90.5395	86.8842	33.1895	39.8842	0.1946	0.1929
15	16.7083	83.0000	79.7389	32.8222	39.3333	0.3130	0.1813
16	20.0581	98.0000	93.6333	35.2000	43.4444	0.3061	0.1857
17	10.2740	71.0000	68.4310	31.5241	34.7310	0.1250	0.2750
18	13.6633	86.0000	82.3444	33.1074	38.0407	0.2277	0.2593
19	16.8165	78.5000	74.7700	30.9633	36.6133	0.2737	0.2029
20	19.8250	92.7500	89.0867	33.8200	41.8933	0.3047	0.1757
21	9.7691	74.7500	72.0750	32.4667	35.9958	0.1880	0.2700
22	13.3544	89.7500	86.1688	33.2125	39.7750	0.1880	0.1923
23	16.7431	82.2222	78.7926	32.4185	38.6333	0.3107	0.1887
24	19.8708	96.5000	92.6889	34.2889	42.4889	0.2717	0.1892
25	9.9335	73.2500	70.2727	31.9455	35.2818	0.1479	0.2727
26	13.3672	88.2500	84.3667	33.1238	41.9286	0.2240	0.2297
27	16.6998	80.0000	76.9471	31.9353	37.8235	0.3130	0.1969

การทดลองที่	ความเร็ว อากาศ (m/s)	อุณหภูมิอากาศ (°C)		อุณหภูมิน้ำ (°C)		ความดันลด (bar)	
		ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก	อากาศ	น้ำ
28	19.9591	95.0000	90.9500	34.5333	42.8000	0.2975	0.1721
29	9.7474	77.0000	74.0100	32.7550	36.4300	0.1880	0.2658
30	13.2804	92.0000	88.0625	33.2875	40.1292	0.1880	0.1929
31	16.7949	83.7500	80.7632	32.9474	39.5895	0.3130	0.1803
32	19.8751	98.7500	94.6600	35.4933	43.8300	0.3130	0.1849
33	10.3373	70.2500	67.3000	30.9333	34.1400	0.1126	0.2765
34	13.5080	85.2250	81.4733	33.0767	37.9100	0.1943	0.2598
35	16.9276	78.5000	74.7515	30.9364	36.5909	0.2961	0.2029
36	19.8656	92.7500	89.2250	34.0583	42.1167	0.3078	0.1760
37	10.0641	74.0000	71.1872	32.1231	35.5282	0.1686	0.2724
38	13.3521	89.0000	85.2250	33.2100	39.7100	0.2006	0.1903
39	16.7249	82.2500	78.8241	32.5897	38.8862	0.3044	0.1856
40	19.6116	97.2122	92.8576	34.3633	42.5669	0.2795	0.1889
41	9.6700	71.7500	69.5318	33.0864	36.3455	0.1880	0.2611
42	13.3739	86.7500	83.3667	33.1625	38.2042	0.2484	0.2592
43	16.6668	80.0000	76.9609	32.0043	37.8522	0.3130	0.1957
44	19.9592	95.0000	90.8750	34.5917	42.8500	0.2768	0.1718
45	9.8003	76.2500	73.1714	32.6667	36.2381	0.1880	0.2695
46	13.3551	91.2500	87.0579	33.1474	39.8684	0.2013	0.1942
47	16.8165	83.7500	80.6233	33.0667	39.6800	0.3130	0.1796
48	19.8593	98.7500	94.6450	35.6250	43.9850	0.3130	0.1848
49	10.3499	71.0000	68.3300	31.1733	34.4267	0.1250	0.2752
50	13.5891	86.0000	82.4567	33.0833	38.0367	0.2006	0.2594
51	16.7792	79.2500	75.9700	31.6733	37.4167	0.3130	0.1979
52	19.9181	94.2500	90.1091	34.2455	42.4727	0.3017	0.1737
53	9.5629	74.7500	72.0548	32.4065	35.8935	0.1839	0.2709
54	13.3583	89.7500	86.1000	33.2143	39.7905	0.1910	0.1937
55	16.7448	83.0000	79.7792	32.7667	39.2625	0.3130	0.1821

การทดลองที่	ความเร็ว อากาศ (m/s)	อุณหภูมิอากาศ (°C)		อุณหภูมิน้ำ (°C)		ความดันลด (bar)	
		ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก	อากาศ	น้ำ
56	19.5353	98.0000	93.5915	35.1262	43.3518	0.3108	0.1858
57	9.9183	73.2500	70.2464	31.8679	35.1964	0.1295	0.2737
58	13.3633	88.2500	84.3800	33.1160	39.6160	0.2258	0.2448
59	16.7482	80.7500	77.8696	32.3130	38.3522	0.3076	0.1925
60	19.8188	95.7500	91.8333	33.8167	41.8917	0.2510	0.1902
61	9.7444	77.0000	73.9828	32.7897	36.4724	0.1880	0.2652
62	13.2736	92.0000	88.0040	33.2520	40.1000	0.1880	0.1933
63	16.8166	85.2500	81.6250	33.2800	39.9850	0.3037	0.1800
64	19.7461	99.8333	95.4556	36.1444	44.5111	0.3130	0.1831
65	10.4122	70.2500	67.2950	31.0750	34.2550	0.1250	0.2749
66	13.5531	85.1875	81.3625	33.0125	37.8333	0.2011	0.2598
67	16.8306	78.3750	74.8875	31.1375	36.7792	0.3078	0.2015
68	19.8874	92.7500	88.9200	34.0600	42.0067	0.3130	0.1775
69	9.9140	74.0000	71.1588	32.1353	35.5000	0.1806	0.2716
70	13.3791	89.0000	85.0556	33.0815	40.9667	0.2253	0.2111
71	16.7563	80.7500	77.8783	32.1565	38.2261	0.3076	0.1941
72	20.1571	96.0084	91.7021	33.0836	41.4697	0.2187	0.1973
73	9.8894	71.7857	69.2214	31.6952	34.9286	0.1265	0.2735
74	13.3463	86.7500	83.3923	33.0731	40.5885	0.2268	0.2657
75	16.7500	80.0000	77.0111	32.0667	37.9259	0.3107	0.1955
76	20.0372	95.0000	91.0455	34.8000	43.1455	0.2848	0.1716
77	9.7883	76.2500	73.0769	32.7385	36.3231	0.1904	0.2673
78	13.3290	91.2500	87.0471	33.2235	39.9000	0.1880	0.1924
79	16.7778	83.0000	79.6778	32.6815	39.0963	0.3107	0.1825
80	19.8672	98.3594	93.7650	31.5690	37.8690	0.2852	0.1815
81	9.8549	71.0000	68.3958	31.5167	34.7125	0.1250	0.2745
82	13.5038	86.0000	82.3778	33.0722	37.9889	0.2020	0.2594
83	16.9829	79.2500	75.7448	31.3138	37.0759	0.3130	0.2002

การทดลองที่	ความเร็ว อากาศ (m/s)	อุณหภูมิอากาศ (°C)		อุณหภูมิน้ำ (°C)		ความดันลด (bar)	
		ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก	อากาศ	น้ำ
84	19.8411	93.5000	90.0000	34.2381	42.4190	0.2864	0.1747
85	9.9759	74.7500	72.1182	32.3091	35.7818	0.1737	0.2714
86	13.2891	89.7500	86.1333	33.1556	39.7556	0.1997	0.1917
87	16.7361	82.2500	78.8296	32.6333	38.9222	0.3015	0.1840
88	19.9539	97.2500	92.7556	34.7556	42.8778	0.2786	0.1860
89	9.7524	73.2500	70.4115	32.9423	36.2538	0.1880	0.2630
90	13.3376	88.1667	84.3111	33.1259	41.0037	0.2090	0.2666
91	16.7828	80.7500	77.9429	32.1524	38.1810	0.3130	0.1946
92	19.8432	95.7500	91.7852	33.6426	41.7648	0.2533	0.1910
93	9.6856	77.0000	74.0280	32.8720	36.5640	0.1880	0.2647
94	13.3810	92.0000	88.0000	33.2364	40.1045	0.1880	0.1930
95	16.8540	83.7500	80.6476	33.1619	39.7333	0.3012	0.1792
96	19.8280	98.7500	94.5559	35.6881	44.0068	0.3120	0.1841
97	9.8866	71.0000	68.3282	31.5692	34.7385	0.1250	0.2739
98	13.5315	86.0000	82.3148	33.0148	37.9556	0.1927	0.2596
99	17.0098	78.1000	74.9433	31.3167	36.9767	0.3130	0.2007
100	19.8501	93.1000	89.3000	34.0800	42.1933	0.3130	0.1743

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-3 ผลการทดลองที่มุมของชุดท่อ 45 องศา

การทดลองที่	ความเร็ว อากาศ (m/s)	อุณหภูมิอากาศ (°C)		อุณหภูมิน้ำ (°C)		ความดันลด (bar)	
		ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก	อากาศ	น้ำ
1	9.5767	70.2500	67.9241	35.3690	39.8138	0.1902	0.1506
2	13.7469	85.2500	81.4455	31.9500	38.1136	0.1250	0.2069
3	16.4971	77.7500	74.9762	33.3333	38.9952	0.3250	0.1882
4	19.9180	92.7500	89.0000	34.2000	42.1091	0.3130	0.1871
5	9.8865	74.0000	71.1324	32.4471	36.9794	0.2380	0.1996
6	13.6700	89.0000	85.0778	32.6889	39.5556	0.2992	0.1867
7	16.8073	80.7500	77.8542	33.8250	39.8083	0.3393	0.1890
8	19.7685	92.7500	88.9857	34.2517	42.1755	0.3126	0.1871
9	9.8716	71.7857	69.3333	32.2952	36.6905	0.2450	0.1960
10	13.8328	86.7500	83.0567	32.0700	38.6800	0.2510	0.1907
11	16.7336	79.2500	75.9643	33.5071	39.3286	0.3445	0.1895
12	19.7503	93.5000	89.0600	33.7733	41.8267	0.3089	0.1837
13	9.9666	76.2500	73.0833	32.6889	37.4444	0.2265	0.1969
14	13.6202	91.2500	86.9467	32.9467	39.9800	0.3130	0.1880
15	16.6459	83.0000	79.6000	34.0889	40.3278	0.3165	0.1871
16	19.8590	98.0000	92.5095	33.0873	41.6619	0.3150	0.1877
17	9.8627	71.0000	68.4900	32.3400	36.6767	0.2468	0.1942
18	13.8422	86.0000	82.2708	32.0583	38.5167	0.2379	0.1924
19	16.4376	77.7500	75.0333	33.3852	39.0370	0.3200	0.1890
20	19.9156	92.7500	88.9700	34.2750	42.1950	0.3130	0.1868
21	9.8256	74.7500	72.2653	32.6163	37.2673	0.2343	0.1980
22	13.6300	89.7500	86.1071	33.0286	39.9643	0.3130	0.1873
23	16.7340	82.2500	78.8974	33.9051	40.0308	0.3227	0.1881
24	19.8535	96.5000	91.4855	33.3527	41.8164	0.3176	0.1857
25	9.9357	73.2500	70.3829	32.4343	36.8800	0.2438	0.1998
26	13.6702	88.2500	84.3278	32.5444	39.3111	0.2751	0.1875
27	16.7563	80.0000	76.7087	33.6348	39.4870	0.3267	0.1897

การทดลองที่	ความเร็ว อากาศ (m/s)	อุณหภูมิอากาศ (°C)		อุณหภูมิน้ำ (°C)		ความดันลด (bar)	
		ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก	อากาศ	น้ำ
28	19.8375	95.0000	89.9800	33.7333	41.9467	0.3130	0.1847
29	9.9784	77.0000	74.1571	32.8036	37.6357	0.2330	0.2017
30	13.6872	92.0000	87.8727	33.2591	40.3773	0.3130	0.1882
31	16.7156	83.7500	80.4217	34.0826	40.4130	0.3130	0.1877
32	19.9392	98.7500	93.4095	32.9476	41.7048	0.3190	0.1885
33	9.6787	70.2500	67.7634	35.2146	40.8976	0.1957	0.1583
34	13.8735	85.2500	81.3750	31.8375	38.0208	0.1276	0.2063
35	16.4605	77.7500	75.0550	33.4150	39.0850	0.3256	0.1890
36	19.7847	92.7500	88.9326	34.2721	42.2209	0.3116	0.1869
37	9.9634	74.0000	71.3692	32.5000	37.0641	0.2429	0.1997
38	13.6872	89.0000	85.1409	32.7182	39.5136	0.3045	0.1895
39	16.7739	82.2500	78.8571	33.9500	40.0929	0.3310	0.1884
40	19.8592	96.5000	91.5016	33.2590	41.7361	0.3161	0.1863
41	9.8379	71.7500	69.3209	32.2837	36.6884	0.2495	0.1978
42	13.7273	86.7500	83.1783	32.1130	38.7217	0.2510	0.1900
43	16.7605	80.0000	76.8875	33.5542	39.4208	0.3209	0.1896
44	19.8875	95.0000	89.8833	33.7267	41.9467	0.3109	0.1837
45	9.9974	76.2500	73.1484	32.6645	37.4355	0.2368	0.1981
46	13.3850	91.2500	86.9500	33.0045	40.0409	0.3060	0.1881
47	16.7136	83.7500	80.6083	34.1125	40.4958	0.3156	0.1874
48	19.9097	98.7500	93.3118	32.9109	41.6064	0.3182	0.1896
49	10.0063	71.0000	68.4826	33.1478	37.8217	0.2291	0.1855
50	13.6632	86.0000	82.0741	31.8185	38.2000	0.2137	0.1979
51	16.7329	79.2500	76.0000	33.5647	39.3412	0.3464	0.1885
52	19.7253	93.6667	89.3722	33.9278	41.9222	0.3130	0.1851
53	9.8507	74.7857	72.2857	32.6000	37.2444	0.2230	0.1987
54	13.7327	89.7500	86.0625	32.9667	39.8875	0.3078	0.1900
55	16.7533	83.0000	79.7231	34.0308	40.2808	0.3348	0.1877

การทดลองที่	ความเร็ว อากาศ (m/s)	อุณหภูมิอากาศ (°C)		อุณหภูมิน้ำ (°C)		ความดันลด (bar)	
		ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก	อากาศ	น้ำ
56	19.8047	98.0000	92.5339	33.1403	41.7468	0.3140	0.1877
57	9.8569	73.2500	70.3682	32.3295	36.7568	0.2424	0.2000
58	13.4670	88.2393	84.0843	32.3671	39.1200	0.2599	0.1882
59	16.7778	80.7500	77.8370	33.8407	39.8593	0.3340	0.1896
60	19.8366	95.7500	90.7071	33.4643	41.8143	0.3130	0.1846
61	9.8642	77.0000	74.0054	32.7378	37.4946	0.2238	0.2026
62	13.6389	92.0000	87.8278	33.0833	40.2444	0.3130	0.1878
63	16.7812	84.5000	81.5500	34.2500	40.7333	0.3130	0.1869
64	19.8662	99.5000	94.1914	32.8983	41.7276	0.3304	0.1888
65	9.7914	70.2500	67.7048	35.1619	40.9762	0.1910	0.1565
66	13.9670	85.2500	81.2333	31.7958	37.9667	0.1723	0.2048
67	16.4406	77.7500	75.0588	33.4441	39.0853	0.3445	0.1903
68	19.7493	92.7500	88.8385	34.1538	42.0615	0.3082	0.1867
69	9.9157	74.0000	71.3600	32.4950	37.0100	0.2384	0.1993
70	13.7774	89.0000	84.9095	32.5714	39.4381	0.2805	0.1870
71	16.7456	80.7500	77.9211	33.8105	39.8211	0.3296	0.1888
72	19.8551	95.7500	90.7405	33.4811	41.8378	0.3130	0.1847
73	9.9337	71.8198	69.4349	32.3349	36.7116	0.2495	0.2007
74	13.6702	86.7500	83.2389	32.2222	38.8667	0.2510	0.1897
75	16.8471	80.0000	76.9593	33.7074	39.5778	0.3293	0.1892
76	19.8383	95.0000	89.9479	33.7521	41.9896	0.3078	0.1830
77	9.8801	76.2500	73.1520	32.6840	37.4360	0.2308	0.1984
78	13.6125	91.2500	86.9308	33.0154	40.0692	0.3130	0.1885
79	16.7542	83.0000	79.6667	34.0133	40.2800	0.3214	0.1884
80	19.8734	98.0000	92.4438	33.1438	41.7375	0.3131	0.1868
81	10.0497	71.0000	68.3750	32.4500	36.9583	0.2405	0.1888
82	13.6032	86.0000	82.1571	31.8786	38.2071	0.2240	0.1999
83	16.4043	79.2500	76.0400	33.5400	39.2733	0.3487	0.1898

การทดลองที่	ความเร็ว อากาศ (m/s)	อุณหภูมิอากาศ (°C)		อุณหภูมิน้ำ (°C)		ความดันลด (bar)	
		ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก	อากาศ	น้ำ
84	19.8500	93.5000	89.3000	34.0750	42.0167	0.3027	0.1858
85	9.8804	74.7500	72.1595	32.5357	37.1429	0.2315	0.1997
86	13.7250	89.7500	85.9792	32.7875	39.7125	0.3053	0.1895
87	16.7094	82.2159	78.7955	33.9727	40.0955	0.3330	0.1876
88	19.8968	96.5000	91.5400	33.2050	41.6700	0.3319	0.1867
89	9.9964	73.2500	70.2273	32.3091	36.7673	0.2407	0.2002
90	13.6702	88.2500	84.0524	32.2476	39.0238	0.2599	0.1886
91	16.7775	80.7500	77.9636	33.7864	39.8091	0.3330	0.1894
92	19.7949	95.7500	90.7000	33.6745	42.0235	0.3106	0.1832
93	9.9250	77.0000	73.8238	32.7381	37.5143	0.2390	0.2032
94	13.6270	92.0000	87.5769	33.0154	40.1385	0.3130	0.1888
95	16.7220	83.7500	80.8176	34.2176	40.6529	0.3130	0.1869
96	19.9270	98.7500	93.4410	32.8974	41.6282	0.3227	0.1892
97	9.9584	71.0000	68.5286	32.4250	36.8500	0.2465	0.1907
98	13.6552	86.0000	82.2120	31.8480	38.1480	0.1956	0.2013
99	16.4404	77.7500	75.0483	33.4552	39.0897	0.3369	0.1902
100	19.7730	92.7500	88.8706	34.2529	42.1118	0.3057	0.1858

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-4 ผลการทดลองที่มุมของชุดท่อ 55 องศา

การทดลองที่	ความเร็ว อากาศ (m/s)	อุณหภูมิอากาศ (°C)		อุณหภูมิน้ำ (°C)		ความดันลด (bar)	
		ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก	อากาศ	น้ำ
1	10.0638	70.2500	68.0481	33.0926	36.6130	0.2521	0.2036
2	13.5486	85.2500	82.5100	33.3800	39.1150	0.2164	0.2178
3	16.8281	77.7500	76.0103	34.3586	39.7172	0.3521	0.2031
4	20.0842	92.7500	89.5406	31.9188	39.6000	0.1959	0.2152
5	10.0275	74.0000	72.0613	33.7613	37.9355	0.2990	0.1872
6	13.4246	89.0000	86.0875	34.0188	40.3563	0.3327	0.2047
7	16.7370	80.7500	78.7250	33.8833	39.5750	0.3130	0.2061
8	19.8604	92.7500	89.7889	32.0944	39.7667	0.2265	0.2142
9	9.9309	71.7742	70.1000	33.5645	37.4677	0.2930	0.1900
10	13.2672	86.7500	84.1769	33.7000	39.8154	0.3130	0.2033
11	16.7649	79.2500	76.9238	33.7048	39.1571	0.3190	0.2075
12	19.7932	93.7273	90.7697	32.4121	40.2545	0.2529	0.2105
13	10.0302	76.2500	73.9137	34.1027	38.5164	0.3045	0.1850
14	13.4296	90.5000	87.8048	34.0857	40.6048	0.3160	0.2040
15	16.8095	83.0000	80.6524	34.1762	40.1143	0.3130	0.2038
16	19.8989	98.0000	93.7717	32.3217	40.6674	0.3103	0.2062
17	10.0185	71.0000	69.0111	33.3500	37.1167	0.2958	0.1918
18	13.3967	86.0000	83.2923	33.7231	39.7615	0.3178	0.2037
19	16.7605	77.7500	75.9800	34.3200	39.6600	0.3760	0.2030
20	19.9904	92.7500	89.6583	32.0583	39.7417	0.2353	0.2133
21	10.0680	74.7500	72.9706	33.9353	38.2471	0.2984	0.1859
22	13.4296	89.7500	87.0857	34.0929	40.5500	0.3175	0.2039
23	16.7541	82.2500	79.6800	34.0133	39.8267	0.3130	0.2054
24	19.9435	96.5000	92.6833	32.0500	40.2667	0.3130	0.2064
25	10.0570	73.2500	71.0882	33.7000	37.7471	0.3057	0.1880
26	13.3514	88.2500	85.2704	33.9926	40.2296	0.3433	0.2043
27	16.8145	80.0000	77.7474	33.6842	39.2053	0.3130	0.2073

การทดลองที่	ความเร็ว อากาศ (m/s)	อุณหภูมิอากาศ (°C)		อุณหภูมิน้ำ (°C)		ความดันลด (bar)	
		ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก	อากาศ	น้ำ
28	19.8813	95.0000	91.6441	32.4304	40.3775	0.2577	0.2108
29	10.1023	77.0000	74.8346	34.2400	38.7469	0.3097	0.1850
30	13.3850	92.0000	88.9952	34.1905	40.9000	0.3130	0.2038
31	16.7917	83.7500	81.6750	34.2750	40.3250	0.3130	0.2033
32	19.8751	98.7500	94.6724	32.3648	40.8371	0.3142	0.2045
33	10.0656	70.2500	67.9643	33.0982	36.6536	0.2521	0.2010
34	13.1712	85.2500	82.3733	33.5600	39.4567	0.3130	0.2044
35	16.6793	77.7500	75.9533	34.3400	39.6467	0.3382	0.2031
36	19.8682	92.7500	89.6823	32.1000	39.8016	0.2419	0.2130
37	9.9985	74.0000	72.1179	33.8500	38.0393	0.2997	0.1865
38	13.4296	89.0000	86.1143	34.0286	40.3619	0.3370	0.2045
39	16.7760	82.2500	79.7583	34.0042	39.8167	0.3130	0.2053
40	19.9000	96.5500	92.6067	31.9133	40.1600	0.3130	0.2065
41	9.9913	71.7500	70.1194	33.6129	37.4903	0.2970	0.1898
42	13.3038	86.7500	84.2750	33.7625	39.8917	0.3156	0.2032
43	16.8290	80.0000	77.7600	33.7467	39.3200	0.3193	0.2074
44	19.8945	95.0000	91.6375	32.4900	40.4400	0.2681	0.2106
45	10.1486	76.2500	73.9389	34.1500	38.5722	0.3096	0.1850
46	13.3227	91.2500	88.0571	34.1357	40.6857	0.3130	0.2041
47	16.7549	83.7500	81.6765	34.2588	40.3000	0.3167	0.2026
48	19.9003	98.7500	94.5648	32.3803	40.8845	0.3174	0.2039
49	10.0639	71.0000	69.0299	33.2784	37.0588	0.2702	0.1932
50	13.1947	86.0000	83.2292	33.6292	39.6625	0.3235	0.2031
51	16.7708	79.2500	76.8889	33.6556	39.1111	0.3130	0.2073
52	19.7563	94.2500	90.7750	32.3417	40.1750	0.2510	0.2110
53	9.8179	74.7500	73.0381	33.9381	38.2619	0.2923	0.1859
54	13.3940	89.7500	87.0619	34.0714	40.4905	0.3250	0.2036
55	16.8006	83.0000	80.6786	34.2286	40.1643	0.3130	0.2035

การทดลองที่	ความเร็ว อากาศ (m/s)	อุณหภูมิอากาศ (°C)		อุณหภูมิน้ำ (°C)		ความดันลด (bar)	
		ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก	อากาศ	น้ำ
		56	19.8409	98.0000	93.6732	32.2732	40.6232
57	10.0411	73.2500	70.9241	33.5724	37.5966	0.3002	0.1886
58	13.3470	88.2500	85.1455	33.7909	40.0182	0.3245	0.2032
59	16.6708	80.7500	78.8319	33.8979	39.5851	0.3184	0.2063
60	19.8411	95.7500	91.9262	32.0667	40.1619	0.3086	0.2076
61	10.1836	77.0000	74.9000	34.3571	38.8952	0.3130	0.1840
62	13.4581	92.0000	88.9867	34.2133	40.8867	0.3130	0.2031
63	16.7371	85.1563	82.5688	34.1750	40.3500	0.3130	0.2037
64	19.9438	99.5134	95.3589	32.4571	41.0821	0.3209	0.2011
65	10.1912	70.2500	68.0526	33.1947	36.8211	0.2575	0.1961
66	13.2752	85.1667	82.3222	33.5889	39.5111	0.3165	0.2042
67	16.7259	77.7500	75.9474	34.3421	39.6947	0.3462	0.2023
68	19.9278	92.8232	89.8488	32.1585	39.8683	0.2464	0.2123
69	9.9115	74.0000	71.9333	33.8357	38.0119	0.3071	0.1865
70	13.4060	89.0000	86.0706	33.9824	40.3000	0.3426	0.2049
71	16.6785	80.7500	78.7833	33.8521	39.5188	0.3196	0.2065
72	19.8447	95.7500	92.2771	32.4343	40.5543	0.3112	0.2083
73	10.0240	71.7500	70.0000	33.4882	37.3706	0.2838	0.1905
74	13.3316	86.7500	84.2619	33.7714	39.9048	0.3220	0.2024
75	16.7292	80.0000	77.8212	33.8121	39.3879	0.3206	0.2071
76	19.9887	95.0000	91.6016	32.5789	40.5528	0.3014	0.2100
77	10.0814	76.2500	73.9714	34.1824	38.5824	0.3075	0.1849
78	13.3895	90.9615	88.0385	34.1462	40.7077	0.3130	0.2039
79	16.7243	83.0000	80.7154	34.1795	40.0923	0.3130	0.2041
80	19.9106	98.0000	93.6353	32.1559	40.5294	0.3094	0.2061
81	10.0185	71.0000	69.1125	33.4438	37.2000	0.2898	0.1908
82	13.1838	86.0000	83.3667	33.7133	39.7267	0.3172	0.2038
83	16.7084	78.5000	76.6630	33.5963	39.0296	0.3130	0.2076

การทดลองที่	ความเร็ว อากาศ (m/s)	อุณหภูมิอากาศ (°C)		อุณหภูมิน้ำ (°C)		ความดันลด (bar)	
		ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก	อากาศ	น้ำ
84	19.8336	94.2500	90.7000	32.2217	40.0739	0.2483	0.2114
85	9.8974	74.7500	72.9618	33.8412	38.1559	0.3057	0.1858
86	13.3944	89.7500	87.0105	34.1368	40.5105	0.3196	0.2046
87	16.7812	82.2500	79.6222	34.0056	39.8333	0.3130	0.2048
88	19.8698	96.5395	92.6474	32.0868	40.3000	0.3048	0.2063
89	9.9250	73.2500	71.1150	33.7350	37.8000	0.3068	0.1886
90	13.4170	88.1176	85.2059	34.0059	40.2353	0.3538	0.2045
91	16.7667	80.7500	78.7067	33.7867	39.4267	0.3130	0.2075
92	19.9837	95.7500	92.3357	32.5571	40.6071	0.3041	0.2082
93	9.9119	77.0000	74.8953	34.3837	38.8558	0.3116	0.1841
94	13.4129	91.8750	88.7375	34.1500	40.7833	0.3156	0.2038
95	16.7649	83.7500	81.6381	34.2190	40.3143	0.3130	0.2038
96	19.9651	98.7500	94.4869	32.3597	40.8625	0.3220	0.2019
97	10.0240	71.0000	69.0765	33.4647	37.2529	0.3094	0.1919
98	13.2511	85.9400	82.9400	33.5480	39.5400	0.3155	0.2041
99	16.7136	77.7500	75.9417	34.3833	39.7250	0.3655	0.2023
100	19.8604	92.7500	89.7556	32.2444	39.9333	0.2475	0.2114

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ช

การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม

จากผลการทดลองในภาคผนวก ช สามารถนำมาใช้ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (Overall heat transfer coefficient) ของการถ่ายเทความร้อนในระบบนี้ได้ โดยค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนได้ถูกจำแนกออกเป็น 2 ส่วนดังนี้

1. ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากการทดลอง
2. ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ได้จากการทำนาย โดยความสัมพันธ์ของสมการที่ได้พัฒนาขึ้น

ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากการทดลองและจากการทำนายของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ระยะห่างมุมของขดท่อ 25, 35, 45 และ 55 องศา ซึ่งแสดงดังตารางที่ ช-1- ช-4 ตามลำดับ โดยมีตัวอย่างการคำนวณดังนี้

ตัวอย่าง การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากการทดลองกรณี การทดลองที่ 1 ในตารางที่ ช-2 (มุมระยะห่างของขดท่อ 35 องศา) โดยการคำนวณจะใช้ความสัมพันธ์ของสมการตามบทที่ 5 ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

อัตราการถ่ายเทความร้อนของน้ำ

$$\dot{Q}_c = \dot{m}_c C_{p,c} (T_{c,o} - T_{c,i}) \quad (5.10)$$

เมื่อ

\dot{m}_c เท่ากับ 0.02 กิโลกรัมต่อวินาที

$T_{c,i}$ เท่ากับ 30.864 องศาเซลเซียส

$T_{c,o}$ เท่ากับ 34.088 องศาเซลเซียส

ที่อุณหภูมิเฉลี่ย 32.476 °C

ρ เท่ากับ 994.878 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

$C_{p,c}$ เท่ากับ 4.174 กิโลจูลต่อกิโลกรัม-องศาเซลเซียส

$$\dot{Q}_c = (0.02 \text{ kg/s})(4.174 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C})(34.088 - 30.864) ^\circ\text{C}$$

$$\therefore \dot{Q}_c = 269.124 \text{ J/s}$$

อัตราการถ่ายเทความร้อนของอากาศร้อน

$$\dot{Q}_h = \dot{m}_h C_{p,h} (T_{h,o} - T_{h,i}) \quad (5.11)$$

เมื่อ

v_h เท่ากับ 10.282 เมตรต่อวินาที

$T_{h,i}$ เท่ากับ 70.250 องศาเซลเซียส

$T_{h,o}$ เท่ากับ 67.319 องศาเซลเซียส

ที่อุณหภูมิเฉลี่ย 68.785 °C

ρ เท่ากับ 1.0269 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

$C_{p,h}$ เท่ากับ 1.0060 กิโลจูลต่อกิโลกรัม-องศาเซลเซียส

$$\dot{Q}_h = (10.282 \text{ m/s}) \left(\frac{\pi \times (0.2 \text{ m})^2}{4} \right) (1.0269 \text{ kg/m}^3) (1.006 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}) (70.250 - 67.319) ^\circ\text{C}$$

$$\therefore \dot{Q}_h = 978.104 \text{ J/s}$$

อัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ย

$$\dot{Q}_{avg} = \frac{|\dot{Q}_h| + |\dot{Q}_c|}{2} \quad (5.12)$$

$$\dot{Q}_{avg} = \frac{978.104 + 269.124}{2}$$

$$\therefore \dot{Q}_{avg} = 623.614 \text{ J/s}$$

และเมื่อจัดให้อยู่ในรูปความสัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (U) จะได้

$$\dot{Q}_{avg} = U_o A_o \Delta T_{lm} \quad (5.13)$$

หรือ $\frac{1}{U_o A_o} = \frac{\Delta T_{lm}}{\dot{Q}_{avg}} \quad (5.14)$

โดย ΔT_{lm} หรือผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยเชิงลอการิทึม (Log Mean Temperature Difference; LMTD) ของลักษณะการไหลแบบสวนทางกัน สามารถหาได้จาก

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_a - \Delta T_b}{\ln(\Delta T_a / \Delta T_b)} \quad (5.15)$$

เมื่อ $\Delta T_a = T_{h,i} - T_{c,o} = 70.25 - 34.088 = 39.386^\circ C$

และ $\Delta T_b = T_{h,o} - T_{c,i} = 67.319 - 30.864 = 33.231^\circ C$

$$\therefore \Delta T_{lm} = \frac{39.386 - 33.231}{\ln(39.386/33.231)} = 36.221^\circ C$$

และเมื่อแทนค่าลงในสมการที่ 5.14 จะได้

$$\therefore U_{o,experiment} = 173.572 \text{ w/m}^2 \cdot K$$

ตัวอย่าง การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจากการทำนาย

กรณี การทดลองที่ 1 ในตารางที่ ซ-2 (มุมระยะห่างของขดท่อ 35 องศา)

โดยการคำนวณจะใช้ความสัมพันธ์ของสมการตามบทที่ 5 และบทที่ 7 ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

เมื่อพิจารณาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจากสมการ

$$\frac{1}{U_o A_o} = \frac{1}{h_o A_o} + \frac{\ln(d_o / d_i)}{2\pi k L} + \frac{1}{h_i A_i} \quad (5.18)$$

$$Nu_i = \frac{h_i d_i}{k_i} \quad (5.21)$$

ซึ่งจากการความสัมพันธ์ของค่านัสเซลันัมเบอร์ด้านในท่อที่พัฒนาขึ้น

$$Nu_i = 0.134 Re_i^{0.440} Pr_i^{0.097} \phi^{-0.181} \quad (7.1)$$

จะได้

$$h_i = 0.134 Re_i^{0.440} Pr_i^{0.097} \phi^{-0.181} \left(\frac{k_i}{d_i} \right)$$

$$h_i = 0.134 (3,522.818)^{0.440} (0.0051)^{0.097} (0.1004)^{-0.181} \left(\frac{0.6233}{0.0095} \right)$$

$$\therefore h_i = 290.593 \text{ w/m}^2 \cdot K$$

และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ผิวท่อด้านนอก จะมีลักษณะสมการดังนี้

$$Nu_o = \frac{h_o D_h}{k_o} \quad (5.24)$$

ซึ่งจากการความสัมพันธ์ของค่านัสเซลันัมเบอร์ด้านนอกท่อที่พัฒนาขึ้น

$$Nu_o = 0.608 Re_o^{3.083} Pr_o^{3.949} \phi^{0.029} \beta^{-0.217} \quad (7.2)$$

จะได้

$$h_o = 0.608 Re_o^{3.083} Pr_o^{3.949} \phi^{0.029} \beta^{-0.217} \left(\frac{k_o}{D_h} \right)$$

$$h_o = 0.608 (113,776)^{3.083} (0.00074)^{3.949} (0.1004)^{0.029} (0.00151)^{-0.217} \left(\frac{0.0185}{0.1465} \right)$$

$$\therefore h_o = 485.361 \text{ w/m}^2 \cdot K$$

เมื่อแทนค่าลงในสมการที่ 5.25 จะได้

$$U_{o, predicted} = 166.3 \text{ w/m}^2 \cdot K$$

ตารางที่ ๗-1 เปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจากการทดลองและจากการทำนายที่มุมระยะห่างของชุดท่อ 25 องศา

การทดลองที่	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ($\text{w/m}^2 \cdot K$)	
	การทดลอง	การทำนาย
1	153.4816	128.9328
2	186.4187	194.1267
3	229.8733	230.5496
4	247.2565	254.3148
5	142.6770	125.7952
6	185.9180	195.1955
7	235.4346	211.3444
8	244.4263	274.7552
9	130.7464	122.6454
10	192.0600	190.2675
11	232.7727	228.2419
12	245.3825	270.7918
13	150.9242	125.6921

การทดลองที่	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ($w/m^2 \cdot K$)	
	การทดลอง	การทำนาย
14	185.3957	178.8746
15	227.2427	219.5827
16	241.8131	362.4529
17	153.7234	140.1939
18	186.8855	170.0522
19	236.0065	236.5302
20	245.0949	246.6919
21	134.2786	124.5824
22	194.0555	181.0153
23	235.9568	246.0746
24	241.7897	337.5848
25	154.7853	134.5710
26	191.9698	197.3744
27	230.1010	216.2264
28	247.4210	265.6521
29	150.0077	126.4626
30	187.8585	191.0073
31	231.2222	217.3381
32	240.0518	245.5685
33	137.0037	130.2148
34	201.5371	202.0523
35	234.3678	237.5678
36	240.4862	223.3365
37	151.9754	129.3800
38	196.8687	195.1209
39	233.9057	238.7382
40	245.7424	302.9005
41	150.8901	138.6911
42	193.0894	181.0955

การทดลองที่	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ($w/m^2 \cdot K$)	
	การทดลอง	การทำนาย
43	231.8298	214.2715
44	245.1120	270.5968
45	127.2891	120.2881
46	196.0568	201.4564
47	230.6648	212.5919
48	239.8120	254.6409
49	155.4398	142.4783
50	198.3980	194.8972
51	229.6930	220.4469
52	246.6099	237.3915
53	163.7143	158.1508
54	192.3276	182.6926
55	232.9788	218.2560
56	239.3259	344.3523
57	141.4765	149.3478
58	199.0712	202.5245
59	230.3611	209.5414
60	243.2449	309.0016
61	146.0043	141.6311
62	192.7198	193.5770
63	226.4351	236.8237
64	244.9871	249.7529
65	138.5564	131.0463
66	197.5944	206.7679
67	234.4543	231.5286
68	243.1902	224.7937
69	142.8596	127.7819
70	198.8902	193.8746
71	235.8303	211.8956

การทดลองที่	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ($w/m^2 \cdot K$)	
	การทดลอง	การทำนาย
72	242.5949	306.1023
73	155.6105	150.6022
74	200.0281	182.6551
75	230.0434	212.4949
76	245.4997	275.6110
77	128.8520	116.7254
78	187.8657	191.4977
79	230.9720	219.6908
80	242.0432	349.7920
81	148.1890	142.3433
82	204.5186	187.5162
83	231.5771	216.7900
84	241.6754	257.0396
85	138.5566	121.2625
86	192.1489	179.7658
87	234.4175	231.3489
88	244.1288	342.3506
89	149.2489	166.2790
90	190.7391	203.2095
91	236.3464	202.2745
92	241.8345	276.6964
93	141.6857	124.7980
94	193.0652	185.0916
95	229.0480	210.4596
96	240.5357	241.1965
97	137.8044	128.8167
98	195.9828	187.0070
99	227.9884	223.7744
100	245.9428	229.4270

ตารางที่ ๗-2 เปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจากการทดลองและจากการทำนายที่มุมระยะห่างของชุดท่อ 35 องศา

การทดลองที่	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ($w/m^2 \cdot K$)	
	การทดลอง	การทำนาย
1	166.2977	173.5717
2	197.3787	200.4507
3	223.7218	283.1222
4	241.6366	280.2505
5	152.2007	152.7489
6	191.8741	222.5955
7	227.5886	236.9510
8	240.2316	270.6493
9	145.9089	136.2884
10	198.2368	184.2137
11	226.9012	261.8020
12	241.0860	305.6213
13	146.8522	157.9500
14	192.6900	199.3892
15	225.3554	250.7099
16	242.5374	298.2382
17	159.5167	154.8399
18	195.9333	203.8498
19	227.3190	289.5614
20	240.6483	275.6142
21	144.0648	145.5530
22	195.4442	198.2102
23	226.0367	260.3560
24	238.8353	267.7636
25	153.5735	162.6876
26	194.8239	242.7665
27	224.1446	242.9098

การทดลองที่	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ($w/m^2 \cdot K$)	
	การทดลอง	การทำนาย
28	243.3292	293.0538
29	144.8715	151.9330
30	189.0858	205.8256
31	228.6618	232.8561
32	241.3514	278.6787
33	160.0949	175.3393
34	199.3874	208.8616
35	225.7400	292.2254
36	239.6952	268.6938
37	157.8934	155.1617
38	194.5254	209.1338
39	225.5705	261.7537
40	240.1534	292.0673
41	148.3212	135.4853
42	192.5999	186.3244
43	226.6620	241.5322
44	241.1372	297.7676
45	141.7579	157.7511
46	195.4897	218.7235
47	227.5802	241.8444
48	240.5561	280.2318
49	164.3441	159.7399
50	197.3894	197.9133
51	224.8666	259.8782
52	241.8508	300.5846
53	140.3731	143.3634
54	189.8985	201.3292
55	229.0661	248.1509
56	239.9131	293.8282

การทดลองที่	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ($w/m^2 \cdot K$)	
	การทดลอง	การทำนาย
57	149.2908	163.2331
58	197.1616	216.5112
59	226.6310	231.9767
60	238.1782	273.7035
61	145.9181	153.2232
62	189.6900	208.0408
63	225.4739	265.2379
64	243.3203	290.7841
65	164.7441	176.9040
66	196.4683	212.6218
67	227.2265	275.5297
68	240.5912	286.3829
69	147.3827	154.1627
70	196.5226	231.2431
71	225.8459	231.0595
72	237.9007	297.8671
73	156.1106	147.7643
74	196.3457	211.3071
75	225.2164	239.7149
76	243.2024	290.5144
77	144.7474	161.9725
78	189.2027	218.7149
79	227.4828	253.2906
80	252.4789	257.2356
81	148.2447	151.4815
82	200.6236	200.1123
83	227.2982	275.2605
84	240.3115	264.9870
85	154.2092	144.6629

การทดลองที่	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ($w/m^2 \cdot K$)	
	การทดลอง	การทำนาย
86	192.3788	199.1677
87	225.4037	261.7065
88	241.7890	305.1418
89	147.9290	158.1236
90	192.2461	231.1269
91	228.6091	226.7170
92	239.4004	276.3403
93	140.3263	151.1326
94	194.5043	209.5908
95	227.6208	240.7649
96	240.3679	284.7781
97	154.9916	154.8604
98	196.2662	203.3515
99	225.7135	258.8209
100	242.3020	283.9716

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๗-3 เปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจากการทดลองและจากการทำนายที่มุมระยะห่างของชุดท่อ 45 องศา

การทดลองที่	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ($w/m^2 \cdot K$)	
	การทดลอง	การทำนาย
1	160.3433	174.6842
2	198.9353	222.7349
3	221.5412	240.1217
4	234.5290	280.6145
5	154.9884	170.9038
6	194.6639	219.8041
7	224.5826	239.9041
8	232.9259	280.2853
9	153.7018	160.0170
10	201.2760	216.6657
11	223.6108	270.9314
12	231.6600	314.9939
13	157.0139	177.8538
14	194.7778	227.8446
15	221.4906	261.1014
16	231.1695	348.8011
17	156.4276	165.9552
18	196.4655	220.3753
19	223.5974	235.7255
20	233.7732	282.9483
21	150.3397	152.2010
22	197.7143	205.8598
23	222.7528	261.4717
24	230.4333	332.2877
25	158.2348	174.0419
26	195.5654	221.6945
27	221.7440	267.5744

การทดลองที่	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ($w/m^2 \cdot K$)	
	การทดลอง	การทำนาย
28	233.7488	342.1866
29	154.4995	162.2350
30	194.1196	219.9264
31	224.1373	253.8515
32	230.5049	337.7262
33	155.4474	204.4581
34	200.5425	227.3352
35	221.7846	234.9075
36	232.2869	284.0844
37	160.2249	161.8629
38	197.0615	216.5976
39	222.4176	265.0325
40	232.2043	331.0270
41	155.9858	158.8072
42	195.5575	210.0629
43	223.8315	255.3485
44	232.1252	348.6769
45	151.0163	175.5441
46	195.2781	225.0215
47	222.9554	243.1505
48	229.5269	341.8337
49	163.4617	176.9953
50	196.4430	225.3912
51	222.0412	268.2496
52	232.8126	305.1279
53	151.4823	152.8166
54	194.0347	208.5254
55	225.0015	254.4452
56	230.8189	347.3197

การทดลองที่	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ($w/m^2 \cdot K$)	
	การทดลอง	การทำนาย
57	153.4216	172.9837
58	196.6475	228.6115
59	223.5306	241.2560
60	230.7988	338.1675
61	153.2560	166.0054
62	193.9436	220.9345
63	221.7044	229.8362
64	231.2675	330.6735
65	160.9522	211.1244
66	198.6814	234.9530
67	223.1723	234.2123
68	232.6440	288.3173
69	152.4244	161.0647
70	198.4945	228.0512
71	222.8492	235.1378
72	230.5270	336.6552
73	160.6823	157.2704
74	197.6280	207.5156
75	223.2311	252.5374
76	233.6385	344.4913
77	151.0824	173.7645
78	193.1208	228.9347
79	223.9626	258.1133
80	230.3764	353.2363
81	156.8993	176.8555
82	199.1949	220.5183
83	222.0742	260.7214
84	232.4153	302.2850
85	156.9218	156.4638

การทดลองที่	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ($w/m^2 \cdot K$)	
	การทดลอง	การทำนาย
86	196.5540	211.3769
87	221.9216	266.1130
88	231.9659	328.8942
89	156.8022	181.5602
90	193.9589	232.7639
91	225.1037	232.7107
92	232.1775	339.2887
93	150.2437	174.5443
94	196.7304	230.6223
95	222.9353	231.5707
96	229.4032	335.2671
97	161.1022	166.8673
98	195.8695	218.1787
99	220.5910	234.9076
100	234.3684	286.6419

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๗-4 เปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจากการทดลองและจากการทำนายที่มุมระยะห่างของชุดท่อ 55 องศา

การทดลองที่	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ($w/m^2 \cdot K$)	
	การทดลอง	การทำนาย
1	167.1934	149.0595
2	195.6059	172.9341
3	218.3288	173.7997
4	223.1827	237.9021
5	159.3095	131.7578
6	191.1472	173.7517
7	217.8002	180.5485
8	221.8306	222.2212
9	156.6541	122.7971
10	194.8964	162.4001
11	217.4806	204.0065
12	221.8799	220.1012
13	160.0635	144.9153
14	191.9703	161.2101
15	216.3631	195.1977
16	222.1094	275.3024
17	161.3599	139.2032
18	191.5236	171.6573
19	219.4230	175.0269
20	222.5511	230.8353
21	157.5911	124.4876
22	193.9762	161.8762
23	216.4769	210.0266
24	220.9144	258.5327
25	162.2970	143.4618
26	191.5160	177.7550
27	215.7554	196.4901

การทดลองที่	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ($w/m^2 \cdot K$)	
	การทดลอง	การทำนาย
28	223.6369	238.6613
29	158.9408	136.8946
30	189.0938	170.6497
31	218.0701	176.7805
32	222.0404	264.6101
33	161.2636	153.8627
34	193.1017	178.1786
35	217.9777	175.9543
36	221.6648	228.7532
37	162.5222	129.4533
38	192.8329	172.6251
39	216.2221	205.2559
40	222.4872	264.4484
41	160.6142	121.0808
42	190.5225	158.6846
43	218.1722	196.7241
44	222.5630	239.4331
45	156.1657	145.2353
46	192.5511	178.7992
47	216.9056	176.2645
48	221.3400	270.9496
49	165.0924	138.6061
50	191.1409	172.3277
51	216.3724	206.1873
52	222.8114	246.2835
53	153.5721	119.8074
54	188.9579	162.1521
55	218.8124	193.7081
56	222.1820	279.7804

การทดลองที่	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ($w/m^2 \cdot K$)	
	การทดลอง	การทำนาย
57	158.8299	150.1785
58	194.3121	182.3595
59	216.9924	173.2570
60	221.3558	260.5352
61	161.3096	135.5745
62	190.4474	171.3648
63	214.8773	201.6157
64	223.3872	267.4414
65	166.0514	152.1760
66	191.4532	178.4124
67	219.4780	177.3076
68	222.3760	223.8458
69	154.7110	136.8597
70	193.1221	173.9886
71	216.3484	175.9681
72	221.4656	243.0134
73	164.5711	126.6880
74	192.8288	159.5626
75	216.4164	192.2220
76	223.8825	242.9271
77	157.5716	142.9998
78	188.7827	169.4022
79	217.2149	190.3427
80	221.3582	282.2651
81	158.7334	134.4281
82	194.4540	166.1233
83	217.7008	173.8305
84	222.0048	250.9248
85	159.4081	123.3120

การทดลองที่	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ($w/m^2 \cdot K$)	
	การทดลอง	การทำนาย
86	191.6884	164.0971
87	216.2025	214.0507
88	222.2943	261.8542
89	157.6875	141.3340
90	191.1424	175.8523
91	218.3628	180.9130
92	223.1128	240.8855
93	152.7775	132.7162
94	193.3607	175.9136
95	216.8655	179.1056
96	221.4832	275.6828
97	163.7940	136.7923
98	191.5140	182.7354
99	217.2355	177.6575
100	223.3485	224.9198

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาววัชรารวรรณ วิชยานุวัตติ เกิดเมื่อวันที่ 17 เมษายน พุทธศักราช 2528 จังหวัดปราจีนบุรี สำเร็จการศึกษาปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เมื่อปีการศึกษา 2549 เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2550



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย