

ผลของความชื้นต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ
ท่อขดในระบบอากาศที่มีอนุภาค



นาย มীনกร พุนดี

ศูนย์วิทยุทรัพยากร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECT OF HUMIDITY ON HEAT TRANSFER COEFFICIENT OF COILED TUBE HEAT
EXCHANGER IN PARTICULATE AIR FLOW SYSTEM



Mr. Meenakorn Poondee

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

Chulalongkorn University

Academic Year 2009

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ผลของความชื้นต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของ
เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อขดในระบบอากาศที่
มีอนุภาค

โดย

นายมินกร พุนดี

สาขาวิชา

วิศวกรรมเคมี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

อาจารย์ ดร. สุรเทพ เขียวหอม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

รองศาสตราจารย์ ดร. ชัยฤทธิ์ สัตยาประเสริฐ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารบัณฑิต

..... คนบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศนรินทร์วงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มนต์รี วงศ์ศรี)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(อาจารย์ ดร. สุรเทพ เขียวหอม)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(รองศาสตราจารย์ ดร. ชัยฤทธิ์ สัตยาประเสริฐ)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บรรเจิด จงสมจิตร)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วรพล เกียรติกิตติพงษ์)

มีนกร พุนดี : ผลของความชื้นต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยน
 ความร้อนแบบท่อชุดในระบบอากาศที่มีอนุภาค. (EFFECT OF HUMIDITY ON HEAT
 TRANSFER COEFFICIENT OF COILED TUBE HEAT EXCHANGER IN
 PARTICULATE AIR FLOW SYSTEM) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : อ. ดร. สุรเทพ
 เทียวหอม, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม : รศ. ดร. ชัยฤทธิ์ สัตยาประเสริฐ, 120 หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของความชื้นที่มีต่อประสิทธิภาพการถ่ายโอนความร้อนของ
 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อชุด โดยมีการถ่ายโอนความร้อนจากอากาศร้อนที่มีฝุ่นผง
 ชักฟอกปนอยู่ไปยังน้ำเย็นที่ไหลภายในท่อชุดโดยรูปแบบการไหลเป็นแบบไหลสวนทางกัน ตัวแปร
 ที่พิจารณาในการศึกษาค้างนี้คือ มุมระยะห่างระหว่างชุดท่อทั้งหมด 4 แบบและอัตราส่วนระหว่าง
 อัตราการไหลเชิงมวลของฝุ่นผงชัฟฟอกต่ออัตราการไหลเชิงมวลของอากาศร้อน โดยทำการ
 ทดลองเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม จากการทดลองพบว่าเมื่อความชื้นของ
 อากาศเพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมมีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อมุมระยะห่างระหว่าง
 ชุดท่อและอัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงมวลของฝุ่นผงชัฟฟอกต่ออัตราการไหลเชิงมวลของ
 อากาศร้อนเพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมมีค่าลดลง นอกจากนี้ในงานวิจัยนี้ยัง
 ได้สร้างความสัมพันธ์อย่างง่ายระหว่างตัวแปรที่เกี่ยวข้องได้แก่ เรย์โนลด์นัมเบอร์ทั้งในท่อและใน
 เซลล์ ฟรันด์นัมเบอร์ทั้งในท่อและในเซลล์ นัสเซลนัมเบอร์ทั้งในท่อและในเซลล์ มุมระยะห่าง
 ระหว่างชุดท่อ อัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงมวลของฝุ่นผงชัฟฟอกต่ออัตราการไหลเชิงมวล
 ของอากาศร้อนและความชื้นของอากาศ เพื่อให้ทำนายการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยน
 ความร้อนแบบท่อชุดในสภาวะซึ่งสายอากาศร้อนมีฝุ่นผงชัฟฟอกปนอยู่เมื่อความชื้นใน
 สายอากาศร้อนเปลี่ยนแปลงไปได้

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมเคมี
 สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี
 ปีการศึกษา 2552

ลายมือชื่อนิสิต มีนกร พุนดี
 ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก สุรเทพ เทียวหอม
 ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

5070600421 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORDS : HEAT TRANSFER COEFFICIENT / HEAT EXCHANGER

MEENAKORN POONDEE: EFFECT OF HUMIDITY ON HEAT TRANSFER
COEFFICIENT OF COILED TUBE HEAT EXCHANGER IN PARTICULATE AIR
FLOW SYSTEM. THESIS ADVISOR : SOORATHEP KHEAWHOM, Ph.D.,
THESIS CO-ADVISOR : ASSOC.PROF. CHAIRIT SATAYAPRASERT, Dr.Ing.,
120 pp.

In this study, the effect of humidity on heat transfer of coiled tube heat exchanger is investigated. The cold water stream flowing inside the coiled tube was heated by a hot air stream containing detergent particles in a counter-current flow configuration. Four coiled tubes with different coil pitches, and the ratio of mass flow rate of detergent particles to mass flow rate of hot air are experimentally investigated in order to determine heat transfer coefficient. The results show that increasing humidity also increases the heat transfer coefficient but increasing coil pitches and the ratio of mass flow rate of detergent particles to mass flow rate of hot air decreases the heat transfer coefficient. Moreover, the new empirical correlation between parameters including tube-side and shell-side Reynolds number, tube-side and shell-side Prandtl number, tube-side and shell-side Nusselts number, coil pitches, the ratio of mass flow rate of detergent particles to mass flow rate of hot air and humidity of air are developed to predict heat transfer between coiled tube and shell of heat exchanger in particulate air flow system.

Department : ...Chemical Engineering.....

Field of Study : ...Chemical Engineering.....

Academic Year : ...2009.....

Student's Signature Meenakorn Poondee

Advisor's Signature Soorathep Kheawhom

Co-Advisor's Signature Chairit Satayaprasert

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ อ.ดร.สุรเทพ เขียวหอม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร. ชัยฤทธิ์ สัตยาประเสริฐ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ผศ.ดร.มนตรี วงศ์ศรี ประธานกรรมการ ผศ.ดร.บวรเจ็ด จงสมจิตร และ ผศ.ดร. วรพล เกียรติกิตติพงษ์ กรรมการ ที่ช่วยให้คำปรึกษา และ คำแนะนำต่างๆที่เป็นประโยชน์ ช่วยให้งานวิจัยสามารถเสร็จสมบูรณ์ได้

ขอขอบพระคุณพี่ๆเพื่อนๆ นิสิตปริญญาโททุกท่าน ขอขอบพระคุณพี่เจ้าหน้าที่ห้อง แลป ที่คอยช่วยเหลือและให้กำลังใจมาตลอดเวลา

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดาและมารดาและครอบครัว ที่คอยช่วยเหลือและ สนับสนุนในทุกๆด้าน จนสามารถสำเร็จการศึกษา ประโยชน์อันใดที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์นี้ ขอ มอบเป็นกตัญญูบูชาแด่บิดา มารดา ครูบาอาจารย์และผู้มีพระคุณทุกท่าน

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญภาพ.....	ฎ
คำอธิบายสัญลักษณ์ย่อ.....	ฏ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.5 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	2
2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน.....	3
2.2 ตัวอย่างของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน.....	3
2.3 การนำพลังงานที่เหลือจากการใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่.....	7
2.4 การจำแนกความร้อนทิ้ง.....	7
2.5 การถ่ายเทความร้อน.....	9
2.6 ผงซักฟอก.....	11
2.7 กระบวนการผลิตผงซักฟอก.....	17
2.8 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	19

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่	หน้า
3. วิธีการทดลอง.....	22
3.1 อุปกรณ์การทดลอง.....	22
3.2 ขั้นตอนการทดลอง.....	23
3.3 วิธีคำนวณผลการทดลอง.....	25
3.4 ความสัมพันธ์ของตัวแปรไร้หน่วย.....	26
4. ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	29
5. สรุปผลการทดลอง.....	41
รายการอ้างอิง.....	42
ภาคผนวก.....	44
ภาคผนวก ก สภาวะที่ใช้ในการทดลอง.....	45
ภาคผนวก ข ผลการทดลอง.....	50
ภาคผนวก ค ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม.....	83
ภาคผนวก ง เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อชุด.....	115
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	120

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	แหล่งและระดับอุณหภูมิของความร้อนทั้งอุณหภูมิสูง.....	8
2.2	แหล่งและระดับอุณหภูมิของความร้อนทั้งอุณหภูมิปานกลาง.....	8
3.1	ค่าสภาวะที่ดำเนินการทดลองแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างน้ำกับอากาศร้อน..	28
ก-1	สภาวะที่ใช้ในการทดลอง.....	45
ข-1	ผลการทดลองที่มุมของชุดท่อ 25 องศา ในระบบที่ไม่มีการเพิ่มความชื้น.....	50
ข-2	ผลการทดลองที่มุมของชุดท่อ 25 องศา ในระบบที่มีการเพิ่มความชื้น.....	55
ข-3	ผลการทดลองที่มุมของชุดท่อ 35 องศา ในระบบที่ไม่มีการเพิ่มความชื้น.....	59
ข-4	ผลการทดลองที่มุมของชุดท่อ 35 องศา ในระบบที่มีการเพิ่มความชื้น.....	63
ข-5	ผลการทดลองที่มุมของชุดท่อ 45 องศา ในระบบที่ไม่มีการเพิ่มความชื้น.....	67
ข-6	ผลการทดลองที่มุมของชุดท่อ 45 องศา ในระบบที่มีการเพิ่มความชื้น.....	71
ข-7	ผลการทดลองที่มุมของชุดท่อ 55 องศา ในระบบที่ไม่มีการเพิ่มความชื้น.....	75
ข-8	ผลการทดลองที่มุมของชุดท่อ 55 องศา ในระบบที่มีการเพิ่มความชื้น.....	79
ค-1	เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่มุมชุดท่อ 25 องศา ในระบบที่มีการเพิ่มความชื้น.....	83
ค-2	เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่มุมของชุดท่อ 35 องศา ในระบบที่มีการเพิ่มความชื้น.....	87
ค-3	เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่มุมของชุดท่อ 45 องศา ในระบบที่มีการเพิ่มความชื้น.....	91
ค-4	เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่มุมของชุดท่อ 55 องศา ในระบบที่มีการเพิ่มความชื้น.....	95
ค-5	เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่มุมของชุดท่อ 25 องศา ในระบบที่ไม่มีการเพิ่มความชื้น.....	99
ค-6	เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่มุมของชุดท่อ 35 องศา ในระบบที่ไม่มีการเพิ่มความชื้น.....	103
ค-7	เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่มุมของชุดท่อ 45 องศา ในระบบที่ไม่มีการเพิ่มความชื้น.....	107

ตารางที่		หน้า
ค-8	เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่มุมของข้อต่อ 55 องศา ในระบบที่ไม่มีการเพิ่มความชื้น.....	111



ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อคู่.....	4
2.2	ทิศทางการไหลในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อคู่.....	5
2.3	เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ.....	5
2.4	การนำความร้อนผ่านผนังอยู่นิ่ง.....	9
2.5	การพาความร้อนระหว่างพื้นผิวกับของไหล.....	10
2.6	โครงสร้างของสารลดแรงตึงผิว.....	11
2.7	กระบวนการผลิตผงซักฟอกอย่างง่าย.....	18
3.1	แสดงชุดการทดลอง.....	22
3.2	ตัวอย่างของชุดท่อทองแดง.....	23
3.3	โครงสร้างของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อชุด.....	26
4.1	ความสัมพันธ์ของค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์กับค่าตัวเลขนัมเบอร์ภายในท่อ.....	29
4.2	ความสัมพันธ์ของค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์กับค่าตัวเลขนัมเบอร์ภายนอกท่อ.....	30
4.3	เปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจากการทดลองและการ ทำนายที่มุมระยะห่างระหว่างชุดท่อ 25 องศาในระบบที่มีการเพิ่มความชื้น.....	31
4.4	เปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจากการทดลองและการ ทำนายที่มุมระยะห่างระหว่างชุดท่อ 35 องศาในระบบที่มีการเพิ่มความชื้น.....	31
4.5	เปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจากการทดลองและการ ทำนายที่มุมระยะห่างระหว่างชุดท่อ 45 องศาในระบบที่มีการเพิ่มความชื้น.....	32
4.6	เปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจากการทดลองและการ ทำนายที่มุมระยะห่างระหว่างชุดท่อ 55 องศาในระบบที่มีการเพิ่มความชื้น.....	32
4.7	เปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจากการทดลองและการ ทำนายที่มุมระยะห่างระหว่างชุดท่อ 25 องศาในระบบที่ไม่มีการเพิ่มความชื้น...	33
4.8	เปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจากการทดลองและการ ทำนายที่มุมระยะห่างระหว่างชุดท่อ 35 องศาในระบบที่ไม่มีการเพิ่มความชื้น...	33
4.9	เปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจากการทดลองและการ ทำนายที่มุมระยะห่างระหว่างชุดท่อ 45 องศาในระบบที่ไม่มีการเพิ่มความชื้น...	34

ภาพที่		หน้า
4.10	เปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจากการทดลองและการ ทำนายที่มุมระยะห่างระหว่างชุดท่อ 55 องศาในระบบที่ไม่มีการเพิ่มความชื้น...	34
4.11	แสดงผลของอัตราส่วนของอัตราการไหลเชิงมวลของฝุ่นผงซักฟอกต่ออากาศ ร้อนที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของระบบที่มีการเพิ่ม ความชื้น.....	35
4.12	แสดงผลของอัตราส่วนของอัตราการไหลเชิงมวลของฝุ่นผงซักฟอกต่ออากาศ ร้อนที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของระบบที่ไม่มีการเพิ่ม ความชื้น.....	35
4.13	เปรียบเทียบผลของความชื้นที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของ ท่อที่มุมระยะห่างระหว่างชุดท่อเท่ากับ 25 องศา.....	36
4.14	เปรียบเทียบผลของความชื้นที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของ ท่อที่มุมระยะห่างระหว่างชุดท่อเท่ากับ 35 องศา.....	36
4.15	เปรียบเทียบผลของความชื้นที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของ ท่อที่มุมระยะห่างระหว่างชุดท่อเท่ากับ 45 องศา.....	37
4.16	เปรียบเทียบผลของความชื้นที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของ ท่อที่มุมระยะห่างระหว่างชุดท่อเท่ากับ 55 องศา.....	37
4.17	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอากาศร้อน อัตราส่วน ของอัตราการไหลเชิงมวลของฝุ่นผงซักฟอกต่ออากาศร้อนและผลต่างอุณหภูมิ ของน้ำขาเข้าและขาออกในระบบที่มีการเพิ่มความชื้น.....	39
4.18	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอากาศร้อน อัตราส่วน ของอัตราการไหลเชิงมวลของฝุ่นผงซักฟอกต่ออากาศร้อนและผลต่างอุณหภูมิ ของน้ำขาเข้าและขาออกในระบบที่ไม่มีการเพิ่มความชื้น.....	39
4.19	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของอากาศร้อนกับความดันลดของ อากาศร้อนในระบบที่มีการเพิ่มความชื้น.....	40
4.20	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของอากาศร้อนกับความดันลดของ อากาศร้อนในระบบที่ไม่มีการเพิ่มความชื้น.....	40
ง-1	เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อชุด.....	115
ง-2	ชุดบ่อนฝุ่นผงซักฟอก.....	115

ภาพที่		หน้า
ง-3	ลักษณะการวางท่อขดในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน.....	116
ง-4	ไซโคลน.....	116
ง-5	โมดูลที่ใช้ในการควบคุมเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน.....	117
ง-6	เครื่องเป่าลม.....	117
ง-7	เครื่องทำความร้อน (Heater).....	118
ง-8	ถังเก็บน้ำ.....	118
ง-9	ส่วนป้อนความชื้น.....	119



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

A	พื้นที่ผิวของการถ่ายเทความร้อน
A_i	พื้นที่ผิวของการถ่ายเทความร้อนด้านในท่อ
A_o	พื้นที่ผิวของการถ่ายเทความร้อนนอกท่อ
C_p	ความจุความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่
$C_{p,c}$	ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ
$C_{p,h}$	ความจุความร้อนจำเพาะของอากาศร้อน
D	เส้นผ่านศูนย์กลาง
D_c	เส้นผ่านศูนย์กลางของขดท่อ
D_h	เส้นผ่านศูนย์กลางของเซลล์ที่ของไหลไหลผ่าน
D_s	เส้นผ่านศูนย์กลางของเซลล์
d_i	เส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อถ่ายเทความร้อน
h	สัมประสิทธิ์การพาความร้อน
h_i	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในท่อ
h_o	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนนอกท่อ
k	สัมประสิทธิ์การนำความร้อน
k_i	สัมประสิทธิ์การนำความร้อนในท่อ
k_o	สัมประสิทธิ์การนำความร้อนนอกท่อ
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	ความหนาแน่นของผนังท่อ
T	อุณหภูมิ
$T_{c,i}$	อุณหภูมิของน้ำขาเข้า
$T_{c,o}$	อุณหภูมิของน้ำขาออก
$T_{h,i}$	อุณหภูมิของอากาศร้อนขาเข้า
$T_{h,o}$	อุณหภูมิของอากาศร้อนขาออก
T_s	อุณหภูมิสัมบูรณ์ (Absolute temperature; K)
T_{sur}	อุณหภูมิสัมบูรณ์ของสิ่งแวดล้อม
U	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม
ΔT	ผลต่างอุณหภูมิ
ΔT_{lm}	ผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยเชิงลอการิทึม
ρ	ความหนาแน่น
μ	ความหนืด
σ	Stefen-Boltamann constant ($\sigma = 5.67 \times 10^{-8} W / m^2 \cdot K$)
ε	ค่า emissivity ของพื้นผิว
φ, γ	ตัวแปรไร้มิติของระยะห่างขดท่อ (มุมของขดท่อ)
Re_o	ค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ด้านนอกท่อ
Pr_o	ค่าพรันด์เทิลนัมเบอร์ด้านนอกท่อ
Nu_o	ค่านัสเซลนัมเบอร์ด้านนอกท่อ
β	ค่าอัตราส่วนของปริมาณฟุ้งงซึกฟอกต่ออัตราการไหลของอากาศร้อน
Re_i	ค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ด้านในท่อ
Pr_i	ค่าพรันด์เทิลนัมเบอร์ด้านในท่อ
Nu_i	ค่านัสเซลนัมเบอร์ด้านในท่อ
Hu	ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ปัญหาภาวะโลกร้อนกลายเป็นเรื่องที่มีผู้คนให้ความสนใจเป็นอย่างมากในช่วงที่ผ่านมา ซึ่งปัจจัยหนึ่งส่งผลให้เกิดภาวะโลกร้อนขึ้นคือ การใช้พลังงานโดยเฉพาะอย่างยิ่งในโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งมีการใช้เชื้อเพลิงในจำนวนมากรวมถึงยังมีการปล่อยมลภาวะออกสู่สิ่งแวดล้อม ดังนั้นจึงมีแนวคิดในการแก้ปัญหาเหล่านี้เช่น การลดใช้พลังงานเนื่องจากในสถานการณ์ปัจจุบันเชื้อเพลิงเป็นทรัพยากรธรรมชาติที่ใช้แล้วหมดไป มีแนวโน้มลดลงและไม่สามารถสร้างทดแทนขึ้นได้ทันกับความต้องการของผู้บริโภค นอกจากนี้ยังมีราคาสูงและมีความผันแปรของราคาเป็นอย่างมากหรือการนำพลังงานที่ปล่อยทิ้งไปกลับมาใช้ใหม่

การลดการใช้พลังงานโดยการนำความร้อนสูญเสียมาใช้ จึงได้กลายเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่มีความน่าสนใจ เนื่องจากอากาศร้อนที่ปล่อยทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่มีอุณหภูมิสูงและมีปริมาณมากจึงสามารถนำมาใช้ให้เกิดประสิทธิภาพได้มากกว่าความร้อนสูญเสียประเภทอื่นๆ เพื่อช่วยให้เกิดผลดีทั้งในแง่เศรษฐศาสตร์และสิ่งแวดล้อม สำหรับอุตสาหกรรมผงซักฟอกเป็นอุตสาหกรรมที่ผลิตเพื่อสนองความต้องการในประเทศเป็นหลักมีการนำเข้าและส่งออกน้อย ในบรรดาผู้ผลิตผงซักฟอกรายใหญ่ 4 ราย ผลิตผงซักฟอกจำหน่ายอยู่ในท้องตลาดประมาณ 10 ปีห่อมีส่วนแบ่งการตลาดคิดเป็นร้อยละ 98 ของผลิตภัณฑ์ผงซักฟอกที่ผลิตและจำหน่ายอยู่ในปัจจุบัน โรงงานผงซักฟอกเป็นโรงงานที่ใช้เงินลงทุนสูงและใช้พลังงานสูง กระบวนการที่มีการใช้พลังงานมากที่สุดคือ กระบวนการอบแห้งซึ่งใช้ หอบแห้งแบบพ่นฝอย (Spray dryer) โดยพ่นสเลอรี่ให้เป็นฝอยผ่านสวนทางกับอากาศร้อนที่ได้จากการเผาน้ำมันเตา ทำให้สเลอรี่สูญเสียความชื้นที่เป็นองค์ประกอบส่วนหนึ่งและได้ผงพื้นฐานออกมา ความร้อนที่ออกจากหอบแห้งจะมีอุณหภูมิเฉลี่ยประมาณ 100 องศาเซลเซียส และมีปริมาณมากพอสำหรับนำความร้อนกลับใช้ใหม่ โดยใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนนำอากาศร้อนมาแลกเปลี่ยนความร้อนกับน้ำเพื่อเพิ่มอุณหภูมิของน้ำก่อนผสมกับวัตถุดิบ

โดยในงานวิจัยนี้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่เลือกใช้คือ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อขด เนื่องจากว่าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อขดมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนความร้อนที่ดีกว่าและช่วยลดขนาดเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเมื่อเทียบกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อตรง โดยตัวแปรที่จะทำการศึกษาคือ มุมระยะห่างของขดท่อซึ่งในการทดลองจะมีทั้งหมด

4 แบบคือ 25, 35, 45 และ 55 องศา ศึกษาผลของอัตราส่วนของปริมาณฝุ่นผงซักฟอกต่ออัตราการไหลของอากาศ และศึกษาผลของความชื้นในอากาศ เนื่องจากความชื้นของอากาศในแต่ละวันมีค่าไม่เท่ากัน ซึ่งอาจส่งผลต่อการแลกเปลี่ยนความร้อนโดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบที่มีอนุภาค

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 ศึกษาวิธีการในการนำความร้อนกลับมาใช้ใหม่
- 1.2.2 ศึกษาผลของความชื้นที่มีต่อตัวแปรต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการแลกเปลี่ยนความร้อน
- 1.2.3 หาสภาวะเหมาะสมในการทำงานของกระบวนการที่พัฒนาขึ้น

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 ศึกษาขอบข่ายแบบแผนของกระบวนการผลิตผงซักฟอก
- 1.3.2 ศึกษาผลของความชื้นในอากาศที่มีผลต่อการแลกเปลี่ยนความร้อน
- 1.3.3 หาความสัมพันธ์ของตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการแลกเปลี่ยนความร้อน เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 เข้าใจวิธีในการนำความร้อนที่สูญเสียไปมาใช้ใหม่ให้เกิดประโยชน์ ซึ่งจะช่วยลดการใช้ทรัพยากรพลังงานและลดปัญหาสิ่งแวดล้อม
- 1.4.2 สามารถนำผลการทดลองที่ได้ประยุกต์ใช้งานสำหรับอุปกรณ์อื่นๆได้
- 1.4.3 เข้าใจและนำความรู้ทางวิศวกรรมมาประยุกต์ใช้กับปัญหาที่เกิดขึ้นได้

1.5 วิธีการดำเนินงานวิจัย

- 1.5.1 ศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน
- 1.5.2 พัฒนาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนต้นแบบ
- 1.5.3 ออกแบบการทดลองและทำการทดลอง
- 1.5.4 นำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์ผลและนำมาคำนวณหาความสัมพันธ์ของตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการแลกเปลี่ยนความร้อนออกมา
- 1.5.5 สรุปผลงานวิจัยและเขียนรายงานการวิเคราะห์

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน [1]

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้ในอุตสาหกรรมหมายถึง เครื่องมือใดๆที่มีการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างของไหลที่มีระดับพลังงานความร้อน (อุณหภูมิ) แตกต่างกัน 2 ชนิดผ่านผนังกันระหว่างของไหลทั้งสอง ในการออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน สิ่งแรกที่จะต้องศึกษาคือ คุณสมบัติของของไหลที่ใช้ จากนั้นจึงทำการเลือกเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่เหมาะสมกับจุดประสงค์และเงื่อนไขของการใช้มากที่สุด

คุณสมบัติทางกายภาพของของไหล

คุณสมบัติของของไหลที่สำคัญที่จะต้องคำนึงถึงในการเลือกประเภทของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนคือ ความหนืด ความหนาแน่น ความจุความร้อนจำเพาะของของไหล ปริมาณสิ่งเจือปนหรืออนุภาคของแข็งที่มีอยู่ในของไหล ตลอดจนคุณสมบัติของสิ่งเจือปนเหล่านั้นเนื่องจากว่าสิ่งเจือปนอนุภาคของแข็งและตะกอนมักจะสะสมในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน จนเกิดการกีดขวางการไหลหรือเกาะเป็นคราบกับพื้นผิว ทำให้ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนความร้อนลดลง

คุณสมบัติทางเคมีของของไหล

การเกิดสนิมและการกัดเซาะผิวสัมผัสของการไหลเป็นปัญหาสำคัญที่จะต้องคำนึงถึงเสมอในการออกแบบอุปกรณ์ทางอุตสาหกรรมเคมี การเกิดสนิมเป็นผลของการเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่ของไหลกระทำต่อผิวสัมผัส ซึ่งโดยปกติแล้ว ผิวสัมผัสจะถูกกัดให้บางลงอย่างสม่ำเสมอ ส่วนการกัดเซาะเกิดจากการปะทะของของไหลกับผิวสัมผัส ดังนั้นวัสดุที่ใช้ทำเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจึงควรเป็นวัสดุที่ไม่เกิดสนิมง่ายหรือถูกกัดเซาะโดยของไหลที่ใช้

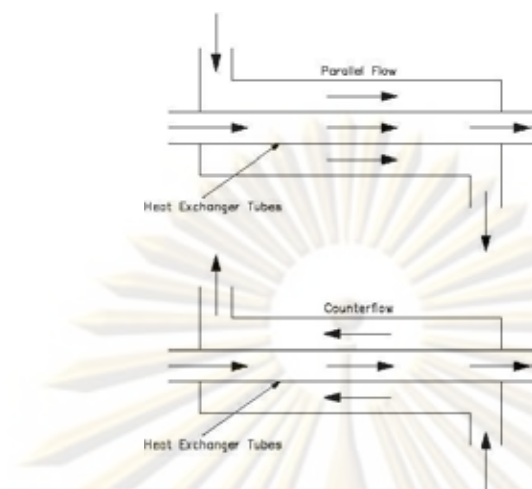
2.2 ตัวอย่างของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน [2]

การใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนขึ้นกับความต้องการนำไปใช้ในการถ่ายโอนความร้อนอย่างเหมาะสม จึงต้องมีการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบต่างๆจำนวนมากมาย เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนรูปแบบที่ง่ายที่สุด ประกอบด้วยท่อสองท่อใช้จุดศูนย์กลางร่วมกัน แต่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่างกัน เรียกว่า เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อคู่ (Double-pipe heat exchanger)



รูปที่ 2.1 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อคู่

ของไหลร้อนหรือของไหลเย็นในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนท่อคู่ไหลผ่านท่อขนาดเล็กกว่าขณะที่ของไหลเย็นหรือร้อนไหลผ่านช่องว่างของวงแหวนระหว่างสองท่อ การกำหนดให้มีของไหล ไหลในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน แบ่งออกเป็นสองแบบคือ ไหลแบบขนาน (Parallel flow) ของไหลร้อนและเย็นไหลเข้าไปในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ปลายท่อด้านเดียวกัน เคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกันและแบบการไหลสวนทาง (Counter flow) จะตรงกันข้ามแบบการไหลขนานของไหลร้อนและเย็นจะไหลเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ปลายท่อตรงข้ามกันและไหลในทิศทางตรงกันข้าม



รูปที่ 2.2 ทิศทางการไหลในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อคู่

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทั่วไปที่ใช้ในอุตสาหกรรมคือ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ (Shell and tube heat exchanger) ซึ่งประกอบด้วยท่อจำนวนมากถูกบรรจุในหนึ่งเปลือก (Shell) ท่อเหล่านี้ถูกวางขนานไปตามความยาวของเปลือก การถ่ายโอนความร้อนเกิดขึ้นเมื่อของไหลหนึ่งไหลอยู่ภายในท่อต่างๆ ขณะที่ของไหลอีกชนิดหนึ่งไหลอยู่นอกท่อเหล่านี้และไหลผ่านเปลือก ภายในเปลือกจะมีแผ่นกั้น (Baffles) วางไว้ทั่วไปในเปลือกเพื่อให้ของไหลภายในเปลือกไหลตัดกับท่อเพื่อเพิ่มการถ่ายโอนความร้อนและรักษาช่องว่างระหว่างท่อให้สม่ำเสมอ



รูปที่ 2.3 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนอีกชนิดหนึ่งที่นิยมใช้อย่างกว้างขวางคือ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเพลทและเฟรม (Plate and flame Heat exchanger) ซึ่งประกอบด้วยชุดของแผ่นแบนลูกฟูกเอียงให้ของไหลไหลผ่าน ใช้แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างของไหลร้อนและเย็นที่ความดันเดียวกัน ลำของของไหลเย็นถูกล้อมรอบด้วยลำของของไหลร้อนสองลำ ส่งผลให้การถ่ายโอนความร้อนมีประสิทธิภาพมาก

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดเพลทและเฟรม สามารถทำให้การถ่ายโอนความร้อนเพิ่มขึ้นได้ง่ายตามความต้องการด้วยติดแผ่นแบนเพิ่มเติมได้อีก เครื่องนี้เหมาะสำหรับใช้แลกเปลี่ยนความร้อนของของเหลวไปยังของเหลว ให้ลำของของเหลวร้อนและเย็นอยู่ที่ความดันเดียวกัน

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนหลายชนิดจะมีชื่อเฉพาะตามการใช้งาน เช่น เครื่องควบแน่น (Condenser) เป็นเครื่องซึ่งของไหลชนิดหนึ่งถูกทำให้เย็นและควบแน่นขณะที่ไหลผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน หม้อต้มไอน้ำ (Boiler) เป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนอีกชนิดหนึ่งซึ่งของไหลชนิดหนึ่งถูกดูดกลืนความร้อนและระเหยเป็นไอ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนอีกชนิดที่เรียกว่า สเปซ-เรดิเอเตอร์ (Space radiator) เป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ถ่ายโอนความร้อนจากของไหลร้อนไปยังที่ว่างรอบๆ โดยการแผ่รังสี

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อขด (Coiled tube heat exchanger) ซึ่งเป็นรูปแบบที่มีการประยุกต์กันอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ เนื่องจากมีข้อดีหลายประการคือ

1. ช่วยเพิ่มพื้นที่ในการถ่ายเทความร้อน ยกตัวอย่างเช่นเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อตรง
2. ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน เนื่องจากการโค้งงอของท่อทำให้เกิดการกระจายตัวของอุณหภูมิได้ดีขึ้น
3. ช่วยลดขนาดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนประเภทอื่นที่มีขนาดเซลล์เท่ากันนั้น เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อขดจะให้พื้นที่การถ่ายเทความร้อนที่มากกว่า ดังนั้นที่ความต้องการการถ่ายเทความร้อนเท่ากัน ขนาดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อขดจะมีขนาดเล็กกว่า
4. มีค่าบำรุงรักษาต่ำ

2.3 การนำพลังงานที่เหลือจากการใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่ [3]

พลังงานที่เหลือจากการใช้หรือความร้อนที่ปล่อยทิ้ง (Waste heat) หมายถึง พลังงานความร้อนที่มีอยู่ในก๊าซ น้ำ หรือของเหลวอื่นที่ปล่อยทิ้งจากระบบการใดระบบการหนึ่ง หรืออุปกรณ์ใดอุปกรณ์หนึ่ง โดยทั่วไปพลังงานที่เหลือนี้ไม่เหมาะสมสำหรับใช้ประโยชน์ในระบบการหรืออุปกรณ์นั้นๆ อีกแล้ว แต่ยังอาจใช้ประโยชน์ในงานอื่นได้ ตัวอย่างความร้อนที่ปล่อยทิ้งเช่น ไอเสียที่ปล่อยทิ้งจากเตาอบ เตาเผาชนิดต่างๆ ซึ่งตามปกติยังมีอุณหภูมิสูงสามารถนำมาใช้ประโยชน์อีกได้ เช่น ใช้อุ่นอากาศหรืออุ่นวัสดุที่จะป้อนเข้าเตา ใช้ผลิตไอน้ำเพื่อขับเคลื่อนไอน้ำ หรือใช้ผลิตไอน้ำป้อนให้แก่ระบบทำน้ำเย็น เป็นต้น

2.4 การจำแนกความร้อนทิ้ง

ความร้อนทิ้งมักจะจำแนกตามระดับอุณหภูมิของความร้อนทิ้งนั้นๆ เนื่องจากอุณหภูมิเป็นตัววัดระดับคุณภาพหรือคุณค่าของความร้อนทิ้งโดยตรง ความร้อนทิ้งที่มีอุณหภูมิสูงจะมีคุณภาพดีกว่าความร้อนทิ้งที่มีอุณหภูมิต่ำ การนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ จึงต้องเลือกให้เหมาะสมกับคุณภาพของความร้อนทิ้ง โดยปกติจะแบ่งความร้อนออกเป็น 3 กลุ่มคือ กลุ่มอุณหภูมิสูง กลุ่มอุณหภูมิต่ำ และกลุ่มอุณหภูมิต่ำ

ตารางที่ 2.1 แสดงแหล่งและระดับอุณหภูมิของความร้อนทิ้งอุณหภูมิสูง ซึ่งมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ ถึง $1600\text{ }^{\circ}\text{C}$ ความร้อนทิ้งเหล่านี้ถือว่ามีคุณภาพในการนำไปใช้ประโยชน์ในการผลิตกำลังงาน เช่น ใช้ความร้อนทิ้งนี้ในการผลิตไอน้ำความดันสูงเพื่อใช้ขับเคลื่อนไอน้ำ ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานทางกลได้ ในกรณีนี้มีความเป็นไปได้สูงที่จะใช้ระบบพลังงานเพื่อร่วมผลิตกำลังงาน (ไฟฟ้า) ร่วมกับความร้อนสำหรับกระบวนการผลิต

ความร้อนทิ้งในช่วง $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ถึง $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ จัดเป็นความร้อนทิ้งอุณหภูมิต่ำ ตารางที่ 2.2 ให้ตัวอย่างอุปกรณ์หรือกระบวนการที่เป็นแหล่งกำเนิดความร้อนทิ้งที่มีอุณหภูมิอยู่ในช่วงเหล่านี้ มีความเป็นไปได้ที่จะนำไปใช้ขับเคลื่อนไอน้ำสำหรับผลิตกำลังงาน

ตารางที่ 2.1 แหล่งและระดับอุณหภูมิของความร้อนทิ้งอุณหภูมิสูง

อุปกรณ์	อุณหภูมิ (°C)
Aluminum refining furnace	650-750
Zinc refining furnace	750-1100
Copper refining furnace	750-800
Steel heating furnace	900-1050
Copper reverberatory furnace	900-1100
Cement kiln	600-750
Glass melting furnace	1000-1550
Solid waste incinerator	650-1000
Fume incinerator	650-1450

ตารางที่ 2.2 แหล่งและระดับอุณหภูมิของความร้อนทิ้งอุณหภูมิปานกลาง

อุปกรณ์	อุณหภูมิ (°C)
Steam boiler exhaust	220-380
Gas turbine exhaust	380-540
Reciprocating engine exhaust	320-600
Heat treating furnace	420-650
Drying and baking oven	220-600
annealing furnace cooling system	420-650

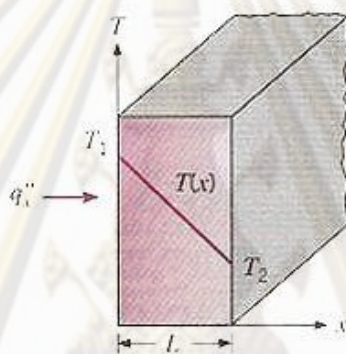
ความร้อนทิ้งที่มีอุณหภูมิต่ำ หมายถึง ความร้อนทิ้งที่มีอุณหภูมิในช่วง 35 °C ถึง 200 °C ความร้อนทิ้งกลุ่มนี้ไม่เหมาะสมที่จะใช้ประโยชน์ในด้านการผลิตกำลังงานหรือการผลิตไอน้ำ ส่วนใหญ่จึงมุ่งเน้นไปที่การใช้ประโยชน์ทางด้านความร้อนโดยตรงในการให้ความร้อนเบื้องต้น ตัวอย่างเช่น การอุ่นน้ำป้อนหม้อน้ำ การอุ่นของเหลวในกระบวนการผลิต เป็นต้น

2.5 การถ่ายเทความร้อน (Heat transfer) [4-5]

การถ่ายเทความร้อน คือ กระบวนการถ่ายเทพลังงานรูปแบบหนึ่งโดยอาศัยความแตกต่างของอุณหภูมิ โดยจะถ่ายเทความร้อนจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงกว่าไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ โดยการถ่ายเทความร้อนสามารถแบ่งออกเป็น 3 แบบคือ การนำความร้อน (Heat conduction) การพาความร้อน (Heat convection) และการแผ่รังสีความร้อน (Heat radiation)

2.5.1 การนำความร้อน (Heat conduction)

การนำความร้อนเป็นการถ่ายเทความร้อนผ่านตัวกลางที่อยู่นิ่งกับที่ เช่นของแข็ง เมื่อพิจารณาการถ่ายเทความร้อนดังรูปที่



รูปที่ 2.4 การนำความร้อนผ่านผนังอยู่นิ่ง

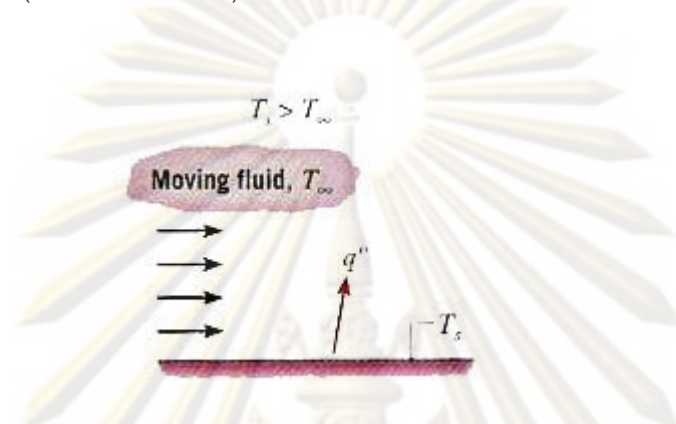
รูปที่เป็นการนำความร้อนแบบมิติเดียวผ่านผนัง โดยเป็นการถ่ายเทความร้อนจากด้านในไปยังด้านนอกของวัตถุ ซึ่งพบว่าค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนแปรผันตรงกับอุณหภูมิและแปรผกผันกับระยะทางตามแกน x ซึ่งสามารถเขียนได้เป็นสมการที่ 2.1

$$q_x = -kA \frac{dT}{dx} \quad (2.1)$$

สมการที่ 2.1 เรียกว่ากฎของฟูเรียร์ (Fourier's law) 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)

2.5.2 การพาความร้อน (Heat convection)

การพาความร้อนเป็นการเป็นการถ่ายเทความร้อนระหว่างพื้นผิวกับของไหลที่เคลื่อนที่อยู่ การพาความร้อนแบ่งออกเป็น 2 แบบคือ การพาความร้อนแบบบังคับ (forced convection) ซึ่งเป็นกระบวนการที่มีการใช้เครื่องมือในการขับเคลื่อนของไหล เช่นพัดลม แบบที่สองคือ การพาความร้อนแบบอิสระ (Free convection) เป็นการพาความร้อนแบบที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ



รูปที่ 2.5 การพาความร้อนระหว่างพื้นผิวกับของไหล

สมการที่ใช้เกี่ยวกับการพาความร้อนคือ

$$q = hA\Delta T \quad (2.2)$$

เมื่อ h (W/m^2K) คือสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพา ซึ่งมีค่าเท่ากับอัตราการไหลของความร้อนจากพื้นที่หนึ่งตารางเมตร เนื่องจากผลต่างของอุณหภูมิหนึ่งองศาเซลเซียส ค่า A (Area; m^2) คือพื้นที่ถ่ายเทความร้อน และ $\Delta T(K)$ คือผลต่างของอุณหภูมิตั้งสองด้านของชั้นขอบเขต สมการ(2.9) มีชื่อเรียกโดยทั่วไปว่า Newton's law of cooling เป็นสมการที่รวบรวมผลทั้งหมดที่ทำให้เกิดการพาความร้อน

2.5.3 การแผ่รังสีความร้อน (Heat radiation)

การแผ่รังสีความร้อนเป็นการถ่ายเทความร้อนโดยไม่ต้องอาศัยตัวกลางในการเคลื่อนที่ โดยในกรณีนี้จะอาศัยการแผ่รังสีในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ในทางเทอร์โมไดนามิกส์จะพิจารณาว่า ตัวแผ่ความร้อนที่เป็นวัตถุดำ (Black body) ซึ่งพลังงานถูกปล่อยออกของวัตถุเป็นสัดส่วนของอุณหภูมิสัมบูรณ์ยกกำลังสี่และเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพื้นผิว สมการที่ 3.3 เรียกว่ากฎของสเตฟาน-โบลต์ซมานน์ (Stefan-Boltzmann law)

$$q = A\sigma T_s^4 \quad (2.3)$$

โดยที่ T_s คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (Absolute temperature; K) ของพื้นผิว σ คือ Stefan-Boltzmann constant ($\sigma = 5.67 \times 10^{-8} W / m^2 \cdot K$) และ A คือพื้นที่ของพื้นผิว สมการที่ 2.3

เกี่ยวข้องกับการแผ่รังสีออกจากวัตถุดำเท่านั้น การแผ่รังสีที่เป็นการแลกเปลี่ยนระหว่างพื้นผิวกับสิ่งแวดล้อมสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2.4

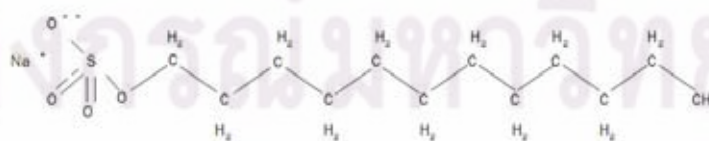
$$q = A\varepsilon\sigma(T_s^4 - T_{sur}^4) \quad (2.4)$$

โดย A คือพื้นที่ของพื้นผิว ε คือค่า emissivity ของพื้นผิว และ T_{sur} คืออุณหภูมิสมบูรณ์ของสิ่งแวดล้อม

2.6 ผงซักฟอก (Detergent) [6]

ผงซักฟอกเป็นสินค้าอุปโภคบริโภคที่จำเป็นอย่างหนึ่งในชีวิตประจำวัน เพื่อชำระล้างสิ่งสกปรกออกจากเสื้อผ้า เครื่องนุ่งห่ม และภาชนะต่างๆ ตลอดจนเครื่องมือ เครื่องจักรกลโรงงาน แต่ที่ใช้กันมากคือ ใช้ซักล้างเสื้อผ้า เครื่องนุ่งห่ม ได้มีการผลิตผงซักฟอกขึ้นใช้เป็นครั้งแรกในประเทศเยอรมันนี้ ในระยะสงครามโลกครั้งที่ 1 เนื่องจากในขณะนั้นไข้วและน้ำมันพืชซึ่งเป็นวัตถุดิบสำคัญในการผลิตสบู่เกิดขาดแคลน นักวิทยาศาสตร์จึงได้คิดค้นสารสังเคราะห์ขึ้นใหม่ ต่อมาจึงได้มีการค้นคว้าพัฒนาสูตรผงซักฟอกอย่างกว้างขวาง พร้อมกับความนิยมใช้ผงซักฟอกเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ประเทศไทยโดยบริษัท หลุยส์ทีเลียวโนเวนส์ จำกัด ได้นำเข้าผงซักฟอกยี่ห้อ "แฟ็บ" จากต่างประเทศมาในช่วงหลังสงครามโลกครั้งที่ 2 เพื่อใช้แทนสบู่ในการซักเสื้อผ้า และชำระล้างสิ่งสกปรกอื่นๆ ปรากฏว่าเป็นที่นิยมของประชาชนโดยทั่วไป เพราะสามารถชำระล้างสิ่งสกปรกได้ดีกว่าสบู่ และสะดวกในการใช้มากกว่า บริษัทผู้ผลิตแฟ็บ คือ บริษัท คอลเกต ปาล์มโอลีฟ จำกัด จึงได้ตั้งโรงงานผลิตและจำหน่ายผงซักฟอกในประเทศขึ้นในปี 2500 และ ต่อมาได้มีผู้ผลิตผงซักฟอกเกิดขึ้นอีกหลายบริษัท

ผงซักฟอกเป็นสารลดแรงตึงผิวชนิดหนึ่ง โดยมีองค์ประกอบที่สำคัญคือ Sodium Dodecyl Sulphate (SDS) ซึ่งโครงสร้างของสารลดแรงตึงผิวดังกล่าวมีลักษณะดังนี้



รูปที่ 2.6 โครงสร้างของสารลดแรงตึงผิว

ผงซักฟอกเป็นผลิตภัณฑ์เคมี ใช้วัตถุดิบแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับสูตรการผลิตของแต่ละโรงงาน และสารเคมี บางตัวอาจใช้แทนกันได้ วัตถุดิบที่ใช้ส่วนใหญ่ต้องนำเข้ามาจากต่างประเทศ ส่วนประกอบของผงซักฟอกแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ ส่วนประกอบหลักและส่วนประกอบที่อาจมีได้

2.6.1 ส่วนประกอบหลัก

1. สารลดแรงตึงผิว

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

2. สารลดความกระด้างของน้ำ

เช่น โซเดียม ไตรโพลีฟอสเฟต (Sodium tripolyphosphare, STPP) โซเดียม ไพโรฟอสเฟต (Sodium pyrophosphate) เกลือของกรดไนทริโลไตรแอซีติก (Nitrilotriacetic acid, NTA) เกลือของกรดเอทิลีนไดแอมีนเตตระแอซีติก (Ethylenediaminetetracctic acid, EDTA) กรดซิตริกและอนุพันธ์ของกรดซิตริก (Citric acid and derivatives) ซีโอไลต์ (Zeolite) สารใด สารหนึ่ง หรือผสมกัน สารพวกนี้ไม่ช่วยให้สิ่งสกปรกหลุดออกจากเสื้อผ้าหรือจากของใช้โดยตรง แต่ทำหน้าที่เสริมประสิทธิภาพของสารลดแรงตึงผิว โดยทำให้น้ำเป็นด่างเหมาะแก่การปฏิบัติงานของผงซักฟอก

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

2.1 สารโซเดียมไตรโพลีฟอสเฟต

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

สาร STPP ในผงซักฟอกจะลดความกระด้างโดยดึงอนุภาคแคลเซียม (Ca^{2+}) และแมกนีเซียม (Mg^{2+}) ออกจากน้ำ แคลเซียมหรือแมกนีเซียมจะเข้าแทนที่โซเดียมในโมเลกุลของ STPP

สาร STPP เป็นสารลดความกระด้างที่ทำหน้าที่ได้ ประสิทธิภาพดีแต่สามารถก่อให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมได้ หลายประเทศมีความเห็นว่าฟอสเฟต อาจเป็นต้นเหตุทำให้เกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน (Eutrophication) ในแหล่งน้ำ ดังนั้นจึงได้ให้ความสนใจกับผงซักฟอกที่ไม่มีส่วนประกอบของฟอสเฟต โดยใช้สารอื่นทดแทนเป็นสารลดความกระด้าง

2.2 สารทดแทนสารประกอบ STPP

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

2.2.1 ไนทริโลไตรแอซิดิก

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

2.2.2 ซิเทรต

ซิเทรตเป็นเกลือของกรดซิตริก (Citric acid) เป็นสารประกอบอินทรีย์ ข้อเสียของสารซิเทรตในการใช้เป็นสารลดความกระด้าง คือประสิทธิภาพจะลดลงที่อุณหภูมิสูง นอกจากนี้ ซิเทรตยังมีประสิทธิภาพต่ำในการลดความกระด้าง ที่เกิดจากอนุมูล

แคลเซียมเมื่อเทียบกับความกระด้างที่เกิดจากอนุมูลแมกนีเซียม อย่างไรก็ตาม ชิเทรตยังใช้เป็นสารลดความกระด้างในหลายๆ ประเทศ โดยเป็นส่วนประกอบในผงซักฟอกที่ใช้ซักล้างที่อุณหภูมิต่ำ โดยที่อเมริกามีการใช้ชิเทรตในน้ำยาซักฟอก สำหรับผงซักฟอกในประเทศไทย ไม่นิยมใช้สารประกอบนี้เพราะมีราคาแพง

ในด้านผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ไม่มีรายงานที่แสดงถึงความเป็นพิษของชิเทรตต่อสุขภาพ และเนื่องจากเป็นสารที่ย่อยสลายทางชีวภาพได้ จึงสามารถถูกกำจัดในระบบบำบัดน้ำเสียได้ (ถ้ามี)

2.2.3 เกล็ดของกรดโพลีคาร์บอกซีลิก (Polycarboxylic acid, PCA)

โพลีคาร์บอกซีเลตเป็นเกลือโพลิเมอร์ของกรด ซึ่งได้แก่ กรดอะคริลิก (Acrylic acid) กรดมาลลิก (Maleic acid) สมบัติในการลดความกระด้าง ขึ้นอยู่กับขนาดของโพลิเมอร์ กลไกในการลดความกระด้างของ PCA เป็นแบบ Electrostatic binding และ Site binding ในกลไกแรกอนุมูลประจุตรงข้าม จะถูกตรึงโดยสภาพประจุไฟฟ้ารอบ ๆ โมเลกุลของโพลิเมอร์ ในขณะที่กลไกที่สองจะลดความกระด้างเนื่องจาก Active site ของอนุมูลโพลิเมอร์ร่วมกับอนุมูลประจุตรงข้าม โดยเฉพาะอนุมูลที่มีขนาดใหญ่กว่า จะรวมกันได้ดีขึ้น ($Ca^{2+} > Li^+ > Na^+ > K^+$)

PCA ใช้ในปริมาณต่ำเมื่อเทียบกับสารทดแทนอื่นโดยให้สมบัติเท่ากับส่วนใหญ่ นิยมใช้เป็นสารลดความกระด้างร่วม ทั้งนี้เนื่องจากราคาที่สูงและย่อยสลายทางชีวภาพได้ยาก สำหรับในเรื่องผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและความเป็นพิษนั้นยังไม่เป็นที่แน่ชัด เนื่องจากมีข้อมูลการวิจัย ไม่พอที่จะสรุปได้

2.2.4 ฟอสฟอเนต

ฟอสฟอเนตเป็นเกลืออยู่ในกลุ่มของกรดฟอสฟอนิก (Phosphonic acids) ซึ่งมีสารฟอสฟอรัสและไนโตรเจน มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ มีสมบัติและราคาแพงเช่นเดียวกับ PCA ย่อยสลายยาก ปัจจุบันมักใช้เป็นสารร่วมลดความกระด้าง รายงานในเรื่องผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและความเป็นพิษยังมีอยู่น้อยเช่นเดียวกัน

2.2.5 ซีโอไลต์

สารซีโอไลต์เป็นผลึกอนินทรีย์ของอะลูมิโนซิลิเกต ซึ่งมีพื้นที่ผิวภายในสูงมากเมื่อเทียบกับพื้นที่ผิวภายนอกสังเคราะห์ขึ้น โดยเลียนแบบดินขาว (Kaolin clay) ซึ่งเป็นสารที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ ประกอบด้วย 1 โมลของไฮเดียม 1 โมลของอะลูมินา 2 โมเลกุลของซิลิกาและ 4.5 โมลของน้ำ สารซีโอไลต์สามารถลดความกระด้างของน้ำโดยวิธีการแลกเปลี่ยนประจุ เช่นเดียวกับสาร STPP โดยที่แคลเซียม (Ca^{2+}) และแมกนีเซียม (Mg^{2+}) จะแลกเปลี่ยนประจุกับไฮเดียมในสารทั้งสอง

ได้มีการศึกษาทางด้านประสิทธิภาพของการลดความกระด้างในน้ำระหว่างซีโอไลต์และ STPP พบว่าเวลาที่ใช้ในการลดปริมาณแคลเซียมในน้ำอุณหภูมิต่ำของซีโอไลต์นานกว่า STPP ประมาณ 3 เท่า กล่าวคือซีโอไลต์ใช้เวลา 3 นาที ในขณะที่ STPP ใช้เวลา 1 นาที ซีโอไลต์เมื่อเทียบกับสารทดแทนอื่นๆ 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 ช่วยให้ผงซักฟอกไม่กัดภาชนะที่ใช้ซัก กันสนิม และช่วยเสริมสร้างประสิทธิภาพของสารลดแรงตึงผิว

4. สารกันคราบดิน (Anti soil redeposition agent)

เช่น โซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Sodium carboxymethyl cellulose) เป็นตัวกันไม่ให้เกิดตะกอนขึ้นในระหว่างองค์ประกอบต่างๆ

5. สารเพิ่มความสดใส (Optical brightening agent of optical brightener)

เป็นสารที่มีสมบัติดูดแสงอัลตราไวโอเล็ตไว้ ทำให้เกิดการเรืองแสงสะท้อนเข้าตาและทำให้เสื้อผ้าแลดูขาวนวลนิ่มใช้กันมากได้แก่ Stibene derivative

2.6.2 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 สารที่อาศัยปฏิกิริยาของแอสเซนต์ ออกซิเจน (Nascent oxygen) ในการฟอก และสารฟอกต้นตอ (Bleach precursor หมายถึง สารซึ่งเมื่อละลายในน้ำจะเกิดสารฟอกขึ้น รวมทั้งสารคงสภาพของสารฟอกต้นตอ (Stabilizer for bleach precursor) หมายถึง สารซึ่งเมื่อผสมกับสารฟอกต้นตอแล้วทำให้สารฟอกต้นตอสลายตัวช้าลง ทำหน้าที่ออกซิไดซ์สารประกอบบางชนิดซึ่งลดการสะท้อนกลับของแสง ดังนั้นทำให้ผ้าดูขาวและสดใสขึ้น

4. สารช่วยการละลาย (Hydro trope)

เป็นสารที่ทำให้ผงซักฟอกละลายน้ำได้ดีขึ้น

5. สารกันหมอง (Anti-ranishing agent)

เป็นสารที่ช่วยให้สิ่งซักล้างส่วนที่เป็นโลหะไม่หมองคล้ำ

6. เอนไซม์ (Enzyme)

เป็นสารอินทรีย์ที่มีสมบัติช่วยย่อยโมเลกุลของโปรตีนหรือแป้งหรือไขมันให้เป็นหน่วยย่อยๆ ได้ ปัจจุบันนิยมใช้แพร่หลายมากขึ้น เพราะมีประสิทธิภาพในการชำระล้างสามารถย่อยโปรตีนของ เหงื่อไคล คราบโลหิต ปกติใช้ Proteases และ Amylases ซึ่งไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

7. น้ำหอม

เพื่อให้กลิ่นหอมน่าใช้

8. สี

เพื่อให้ผลิตภัณฑ์ดูสวยงาม

9. สารกันการจับตัวเป็นก้อน

10. สารช่วยขับสิ่งสกปรก (Soil releasing agent)

เป็นสารที่ช่วยให้สิ่งสกปรกที่ติดเนื้อผ้าหลุดออกง่ายขึ้น

11. สารต้านจุลินทรีย์ (Anti-microbial compound)

เป็นสารที่ช่วยยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์

12. สารช่วยคงสภาพผิวหนัง (Mildness additive)

เป็นสารที่ช่วยให้ผงซักฟอกไม่ทำอันตรายผิวหนัง

13. สารคงสภาพการเก็บรักษา (Storage stabilizer)

เป็นสารที่ช่วยให้ผงซักฟอกเก็บไว้ได้นานโดยไม่เสื่อมสภาพ

14. สารช่วยให้ผ้านุ่ม (Fabric softening agent)

เป็นสารที่ช่วยทำให้ผ้านุ่มขึ้นหลังจากซักแล้ว

15. สารต้านไฟฟ้าสถิต (Anti-static agent)

เป็นสารที่ช่วยลดประจุไฟฟ้าสถิตที่เกิดขึ้นบนเนื้อผ้า

16. สารต้านการกัดกร่อน (Anti-corrosion)

เป็นสารที่ช่วยลดการกัดกร่อนส่วนที่เป็นโลหะของเสื้อผ้า ช่วยป้องกันการสึกหรอของส่วนประกอบของเครื่องซักผ้า

17. สารกันความชื้น

เป็นสารที่ช่วยป้องกันไม่ให้อากาศชื้นเข้าไปเกาะกับเนื้อผ้าที่สะอาดแล้ว เช่น โซเดียมคาร์บอเนตซีเมทิลเซลลูโลส

18. สารประกอบอื่นๆ อาจมีได้ และสามารถทดสอบได้

เช่น โซเดียมไฮโดรฟอสเฟต (Sodium hydro phosphate) โซเดียมออร์โทฟอสเฟต (Sodium orthophosphate) หรือ โซเดียมเมทาฟอสเฟต (Sodium met phosphate)

2.7 กระบวนการผลิตผงซักฟอก [7]

การผลิตผงซักฟอกสามารถแบ่งออกเป็นกระบวนการย่อยได้ 5 กระบวนการ มีหน้าที่ต่าง ๆ ดังนี้

2.7.1 Raw material handling unit เป็นกระบวนการย่อยที่ทำหน้าที่จัดเก็บวัตถุดิบต่างๆ ทั้งของเหลวและของแข็งที่ใช้สำหรับกระบวนการผลิตผงซักฟอก เครื่องจักรหลักประกอบด้วยถังไซโล (Silo) ถังเก็บน้ำ ถังเก็บวัตถุดิบที่เป็นของเหลว Tipping unit และ Blower สำหรับลำเลียงวัตถุดิบเข้าสู่ถังกักเก็บ เป็นต้น

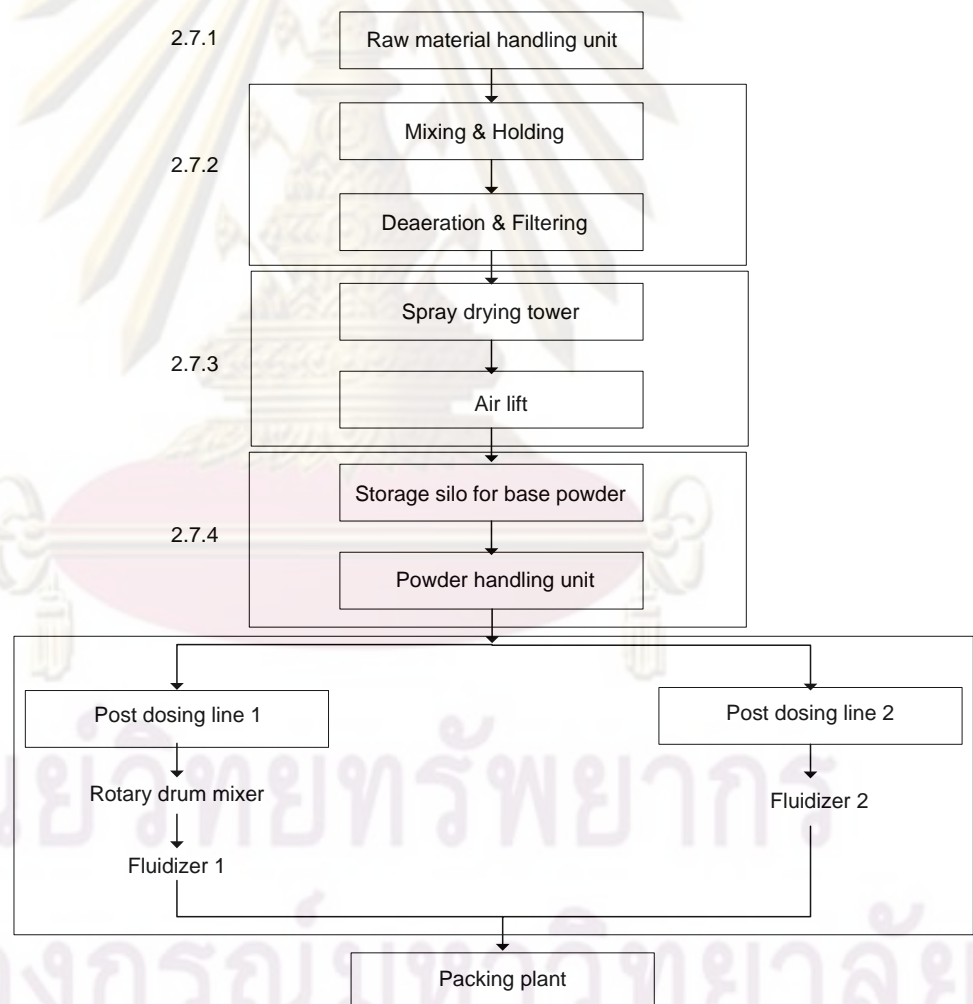
2.7.2 Slurry making unit กระบวนการย่อยที่ทำหน้าที่ซึ่งนำหนักของวัตถุดิบแต่ละชนิดก่อนการผสมในถังผสมหลัก และผลิตสเลอรีให้ได้ค่าความหนาแน่นตามสูตรที่กำหนดก่อนจะนำไปพ่นในเครื่องอบแห้งต่อไป เครื่องจักรหลักประกอบด้วย ชุดเครื่องซึ่งนำหนักวัตถุดิบถังผสมสเลอรีหลัก ถังพักสเลอรี (Holding tank) ถังพัก (Drop tank) Deaerator, High pressure pump, Low pressure pump, Rotary filter และ Magnetic filter เป็นต้น

2.7.3 Slurry drying tank กระบวนการย่อยที่นำสเลอรีจากกระบวนการผลิตสเลอรีมาทำให้แห้งเป็นผงพื้นฐาน โดยพ่นสเลอรีให้เป็นฝอยผ่านสวนทางกับอากาศร้อนที่ได้จากการเผาไหม้เตา ทำให้สเลอรีสูญเสียความชื้นที่เป็นองค์ประกอบส่วนหนึ่งและได้ผงพื้นฐานออกมา เครื่องจักรหลักประกอบด้วย เครื่องอบแห้ง และหน่วยผลิตอากาศร้อน (Peabody unit) เป็นต้น

2.7.4 Powder handling unit เป็นกระบวนการย่อยที่ใช้แยกผงพื้นฐานตามความหนาแน่น ซึ่งถูกกำหนดจากสูตรพร้อมทั้งจัดเก็บผงพื้นฐานที่ได้ในถังไซโล ก่อนผ่านสู่กระบวนการย่อยอื่น ๆ ต่อไป เครื่องจักรหลักประกอบด้วย Air lift ถังเก็บผงพื้นฐาน และสายพานลำเลียงต่าง ๆ เป็นต้น

2.7.5 Post dosing unit เป็นกระบวนการย่อยที่ทำหน้าที่ผสมสารเติมแต่ง (Additives) ที่ใช้เสริมคุณภาพและเพิ่มประสิทธิภาพของผงซักฟอกให้เหมาะสมกับความต้องการของผู้บริโภค ก่อนผ่านเข้าสู่การบรรจุหีบห่อต่อไป เครื่องจักรหลักประกอบด้วย Rotary drum mixer, Fluidizer ชุดเครื่องชั่งวัตถุดิบ และสายพานลำเลียงต่าง ๆ เป็นต้น

กระบวนการผลิตที่ได้อธิบายไว้ข้างต้น แสดงด้วยแผนภาพกระบวนการผลิต ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 กระบวนการผลิตผงซักฟอกอย่างง่าย

2.8 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

M.S. Abd-Elhady และคณะ [8] ได้ศึกษาเกี่ยวกับความเร็วต่ำสุดของก๊าซสำหรับ heat exchanger เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดตะกอนภายในท่อ ซึ่งได้ทดลองโดยใช้อนุภาคหลายๆขนาดและทดลองในความเร็วที่ต่างกัน พบว่า อนุภาคขนาดเล็กจะเกาะตัวลงบนพื้นผิวท่อก่อนจากนั้นอนุภาคใหญ่จึงเกาะตัวตาม และเพื่อป้องกันการเกิดตะกอนควรเพิ่มความเร็วของก๊าซให้มากกว่าความเร็วการไหลวิกฤต (critical flow velocity)

Atipoang และคณะ [9] ได้ศึกษาถึงผลการเกาะตัวของซี้ไถ้ต่อประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีครีบบางเกลียว ซึ่งปัจจัยที่ทำการศึกษาคือ ระยะห่างระหว่างครีบบ อัตราการไหลของอากาศ ฯลฯ ซึ่งจากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนลดลงเมื่อปริมาณซี้ไถ้เพิ่มมากขึ้นและการเกาะตัวของซี้ไถ้จะเป็นส่วนผกผันกับขนาดระยะห่างระหว่างครีบบ

Marner และคณะ [10] ได้ศึกษาการเกิดตะกอน (fouling) กับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน โดยเสนอว่าการเกิดตะกอนจะขึ้นกับชนิดของเชื้อเพลิงและกระบวนการเผาไหม้ โดยการเกิด fouling จะเป็นตัวลดอัตราการถ่ายเทความร้อน เพิ่มความดันสูญเสียและทำให้เกิดการกัดกร่อนในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน การเกิดตะกอนลดลงเมื่อเพิ่มความเร็วของก๊าซเพราะว่าที่ความเร็วสูงจะทำให้เกิดแรงเค้นเฉือน (shear stress) มากขึ้น

Suppoosirivong และคณะ [11] ได้ศึกษาการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมด้วยครีบบและตัวสร้างกระแสนวน โดยทำการทดลองที่สภาวะผิวของท่อเป็นฟลักซ์ความร้อนที่ผิวคงที่ ในการทดลองโดยการปรับใช้ความเร็วลมหลายๆค่าในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน โดยเปรียบเทียบผลของท่อที่มีครีบบรูปต่างๆและพิจารณาค่าความดันลดและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน จากการทดลองพบว่าการไหลหมุนวนทำให้ค่าความดันลดและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น และพบว่าท่อที่มีครีบบรูปทรงสามเหลี่ยมหน้าจั่ว ให้ผลการถ่ายเทความร้อนได้ดีที่สุด

มันสกุล [3] ได้ทำการศึกษาและออกแบบอุปกรณ์อุ่นอากาศรีคูเปอร์เรเตอร์ (recuperator) สำหรับเตาเผาสปริงแผ่น เพื่อนำก๊าซไอเสียบริเวณปล่องไอเสียของเตาเผามาอุ่นอากาศก่อนเข้าเตาเผา โดยการออกแบบอุปกรณ์อุ่นอากาศได้ใช้วิธีประสิทธิภาพเอ็นทียู (effectiveness-NTU) โดยศึกษาแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลผ่านสองครั้ง (Cross-flow two pass heat exchanger) ซึ่งเมื่อติดตั้งอุปกรณ์อุ่นอากาศก่อนเผาไหม้จากอุณหภูมิเฉลี่ย 48 เป็น 200 องศาเซลเซียส สามารถประหยัดน้ำมันเตาที่ใช้ในเตาเผาได้ประมาณ 9%

Welkey และคณะ [12] ได้ทำการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบกลุ่มโดยไม่ใช้ตัวซีพพอร์ทหรือบัฟเฟิลภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งจะออกแบบโดยผสมระหว่างท่อเปลือยกับครีปที่เรียงตัวตามแนวยาวของท่อ ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวซีพพอร์ทไปในตัว ซึ่งช่วยให้ประหยัดค่าใช้จ่ายลงและการถ่ายเทความร้อนจะมีมากขึ้น

Kun และคณะ [13] กล่าวถึงการสร้าง cross flow heat exchanger ซึ่งประกอบไปด้วยโครงสร้างด้านนอกและมีช่องจำนวนมากจะวางตามแนวนอนเรียงขนานกันไปเพื่อเป็นช่องทางให้ของไหลๆผ่าน ซึ่งจะมีความพิเศษเพิ่มเติมคือจะสร้างพื้นผิวให้มีสองแบบ แบบแรกเป็นแบบช่องธรรมดาและแบบที่สองจะเป็นช่องที่มีการใส่ครีปบิดเบี้ยว (distorted fin) เข้าไปเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อน

Leedham และคณะ [14] อธิบายถึงอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนผ่านกลุ่มท่อ (finned tube heat exchanger) ซึ่งสามารถใช้แลกเปลี่ยนความร้อนของของไหล เช่น แก๊สและของเหลวของไหลชนิดหนึ่งจะไหลผ่านภายในกลุ่มท่อและอีกชนิดหนึ่งจะไหลผ่านด้านนอกในท่อทิศทางตรงกันข้ามกัน ข้างในจะใส่ baffle ช่วยดัดแปลงการไหลให้ไหลรอบๆท่อและใส่ครีปเพื่อช่วยเพิ่มสมบัติในการถ่ายเทความร้อน

Donhowe และคณะ [15] ได้ศึกษาผลของการนำความร้อนจากก๊าซไอเสียกลับมาใช้ใหม่คือศึกษาอัตราการไหลและอุณหภูมิขาออกที่มีต่อการใช้พลังงานของหอบแห้งแบบพ่นฝอย (Spray dryer) โดยจะศึกษาการระเหยแห้งสารละลายโซเดียมซัลเฟต อากาศที่เข้าหอบแห้งจะร้อนขึ้นโดยการใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อที่นำความร้อนจากการไอเสียมาใช้ใหม่จากงานวิจัยพบว่า จะช่วยลดการใช้พลังงานไปได้ถึง 12-28 % และไม่มีปัญหาด้านตะกรันหรือการทำคามสะอาดเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

ปิยะภัทร คุ่มปรีดี [16] ได้ศึกษาและพัฒนาอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับเตาเผาเซรามิค ซึ่งเตาเผาเซรามิคมีพลังงานที่ถูกปล่อยทิ้งโดยเฉลี่ยราว 35-50% ในรูปของความร้อนที่ปล่อยทิ้งทางปล่องควันซึ่งมีอุณหภูมิประมาณ 600 - 800 องศาเซลเซียส 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 บาท

M.R. Salimpour [17] ได้ทำการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเซลล์และท่อชุดโดยเป็นการถ่ายโอนความร้อนจากสายน้ำมันที่ไหลภายในท่อชุดไปยังสายนํ้าเย็นที่ไหลภายในเซลล์ โดยข้อมูลที่จะทำการวัดคือ อุณหภูมิขาเข้าและขาออกของทั้งฝั่งในท่อและฝั่งเซลล์ ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการทดลองจะนำมาหาความสัมพันธ์ของตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการแลกเปลี่ยนความร้อนออกมาในรูปแบบสมการเพื่อใช้ทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนได้

วัชรารวรรณ วิทยานุกูวดี [18] ได้ศึกษาการนำกลับความร้อนจากอากาศขาออกของหออบแห้งแบบพ่นฝอยที่มีฝุ่นผงซึกฟอกเจือปนโดยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อชุด โดยได้ทำการทดลองทั้งหมด 400 ค่าเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนด้านในและด้านนอกท่อของผิวแลกเปลี่ยนความร้อน โดยเป็นความสัมพันธ์ของนัสเซลน์มเบอร์ ด้านในและนอกท่อโดยความสัมพันธ์ที่พัฒนาขึ้นจะสามารถนำไปใช้ทำนายการถ่ายเทความร้อนระหว่างชุดท่อและเซลล์ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนได้



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3 วิธีการทดลอง

ในการทดลองจะทำการทดลองแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างน้ำกับอากาศที่มีฝุ่นผง ซักฟอก ซึ่งในงานวิจัยจะทำการทดลองทั้งหมด 800 การทดลองในสภาวะที่แตกต่างกัน

3.1 อุปกรณ์การทดลอง

ชุดอุปกรณ์ทดลองแสดงดังรูปที่ 3.1 ประกอบด้วยเครื่องเป่าลม, เครื่องทำความร้อน, ส่วนป้อนความชื้น, โซโคลอน, ถังพักน้ำ, ชุดป้อนฝุ่นผงซักฟอก, ป้อนน้ำ, ระบบบันทึกข้อมูลอัตโนมัติ และในบริเวณส่วนแลกเปลี่ยนจะประกอบด้วย ส่วนของเซลล์จะมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.2 เมตร ยาว 1.5 เมตรหุ้มด้วยฉนวนใยแก้ว และส่วนขดท่อทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 นิ้ว ท่อขดที่ใช้ในการทดลองจะมีทั้งหมด 4 แบบคือ มุมขดท่อที่ 25 องศา (ระยะห่างระหว่างขดท่อ 4.42 เซนติเมตร), 35 องศา (ระยะห่างระหว่างขดท่อ 6.31 เซนติเมตร), 45 องศา (ระยะห่างระหว่างขดท่อ 8.28 เซนติเมตร) และ 55 องศา (ระยะห่างระหว่างขดท่อ 10.41 เซนติเมตร) ตัวอย่างท่อขดแสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.1 แสดงชุดการทดลอง



รูปที่ 3.2 ตัวอย่างของขดท่อทองแดง

3.2 ขั้นตอนการทดลอง

3.2.1 ติดตั้งขดท่อทองแดงเข้าสู่บริเวณที่จะทำการทดสอบการแลกเปลี่ยนความร้อน

3.2.2 ปรับอัตราการไหลของน้ำจากถังพักน้ำ เพื่อเตรียมป้อนเข้าสู่บริเวณที่จะทำการทดสอบการแลกเปลี่ยนความร้อน

3.2.3 ปรับอุณหภูมิและอัตราการไหลของอากาศตามที่ต้องการ

3.2.4 รอจนกระทั่งข้อ 3.2.3 เข้าสู่สภาวะคงตัว (Steady state) จึงป้อนฝุ่นผงชักฟอกตามปริมาณที่ทำการศึกษเข้าสู่ระบบแลกเปลี่ยนความร้อน

3.2.5 รอจนกระทั่งข้อ 3.2.4 เข้าสู่สภาวะคงตัวอีกครั้ง จึงเริ่มทำการเก็บข้อมูล

3.2.6 เมื่อทำการทดลองครบตามที่ต้องการแล้ว จึงเปลี่ยนมุมของขดท่อและทำซ้ำข้อ 3.2.1 ถึง 3.2.5 คนครบท่อทั้ง 4 แบบ

สำหรับการทดลองที่ทำการเพิ่มความชื้นของอากาศขึ้น จะทำการใส่แผ่นเหล็กที่ซึ่งผ้าไว้ โดยที่ปลายผ้าจะจุ่มน้ำอยู่ซึ่งอากาศจะไหลผ่านทำให้ความชื้นเพิ่มขึ้น รอกจนกระทั่งค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์คงที่จึงทำการทดลองเช่นเดียวกัน

ในการทดลองจะให้ความร้อนแก่อากาศจนมีความร้อนถึงประมาณ 100 องศาเซลเซียส และนำไปผสมกับผงซักฟอก จากนั้นจะทำการแลกเปลี่ยนความร้อนกับน้ำที่มีอุณหภูมิเท่ากับ อุณหภูมิห้อง โดยที่การไหลจะเป็นการไหลแบบสวนทาง (Counter flow) โดยค่าที่วัดได้คือ

1. อุณหภูมิขาเข้า-ออกของอากาศ
2. อุณหภูมิขาเข้า-ออกของน้ำ
3. ค่าความดันลดของสายน้ำและสายอากาศ
4. ความชื้นของอากาศ

เมื่อทำการแลกเปลี่ยนความร้อนแล้ว ในอากาศจะยังคงมีฝุ่นผงซักฟอกปนอยู่ซึ่งจะแยก ออกโดยใช้ไซโคลน ค่าสภาวะที่ใช้ในการทดลองแสดงได้ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ค่าสภาวะที่ดำเนินการทดลองแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างน้ำกับอากาศร้อน

ตัวแปร		หน่วย	ค่า
ด้าน น้ำ	อัตราการไหลเชิงมวล	กิโลกรัมต่อวินาที	0.02
	อุณหภูมิขาเข้า	องศาเซลเซียส	30
	มุมระยะห่างระหว่างขดท่อ	องศา	25,35,45 และ 55
ด้าน อากาศร้อน	ความเร็วของอากาศร้อน	เมตรต่อวินาที	9-20
	อุณหภูมิขาเข้า	องศาเซลเซียส	70-100
	ปริมาณฝุ่น	กรัมต่อวินาที	0.5-2.0
	ความชื้น	% Relative humidity	50-90

3.3 วิธีคำนวณผลการทดลอง [20]

ข้อมูลที่ได้จากการทดลองสามารถนำมาคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (Overall heat transfer coefficient, U_o) และสามารถนำไปใช้หาความสัมพันธ์ของตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการแลกเปลี่ยนความร้อนได้ดังนี้คือ

อัตราการถ่ายเทความร้อนของน้ำ

$$\dot{Q}_c = \dot{m}_c C_{p,c} (T_{c,o} - T_{c,i}) \quad (3.1)$$

อัตราการถ่ายเทความร้อนของอากาศร้อน

$$\dot{Q}_h = \dot{m}_h C_{p,h} (T_{h,o} - T_{h,i}) \quad (3.2)$$

อัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ย

$$\dot{Q}_{avg} = \frac{|\dot{Q}_h| + |\dot{Q}_c|}{2} \quad (3.3)$$

และเมื่อจัดให้อยู่ในรูปความสัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (U_o) จะได้

$$\dot{Q}_{avg} = U_o A_o \Delta T_{lm} \quad (3.4)$$

หรือ

$$\frac{1}{U_o A_o} = \frac{\Delta T_{lm}}{\dot{Q}_{avg}} \quad (3.5)$$

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

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_a - \Delta T_b}{\ln(\Delta T_a / \Delta T_b)} \quad (3.6)$$

สวนทางกัน สามารถหาได้จาก

เมื่อ $\Delta T_a = T_{h,i} - T_{c,o}$ (3.7)

และ $\Delta T_b = T_{h,o} - T_{c,i}$ (3.8)

เมื่อพิจารณาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมในรูปของความต้านทานการถ่ายเทความร้อนรวมจะประกอบไปด้วยความต้านทานการพาความร้อนที่ผิวท่อด้านนอก ความต้านทานการนำความร้อนที่ผิวท่อ และความต้านทานการพาความร้อนที่ผิวท่อด้านใน สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

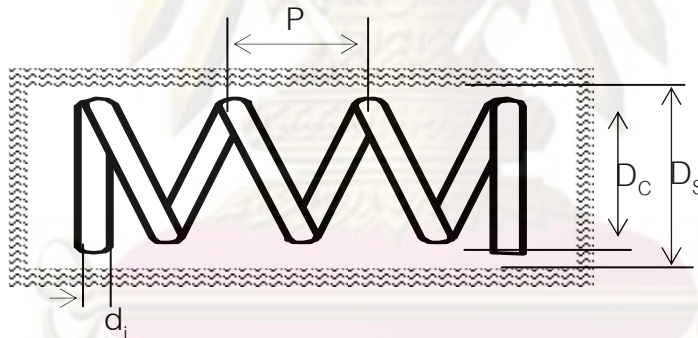
$$\frac{1}{U_o A_o} = \frac{1}{h_o A_o} + \frac{\ln(d_o / d_i)}{2\pi k L} + \frac{1}{h_i A_i} \quad (3.9)$$

3.4 ความสัมพันธ์ของตัวแปรไร้มิติ

ชนิดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อชุดแสดงดังรูปที่ 5.1 ซึ่งจากรูป D_s คือเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อด้านในของเซลล์, D_c คือเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อชุด, d_i คือเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อด้านในและ P คือระยะห่างระหว่างท่อ โดยมีตัวแปรไร้มิติ (Dimensionless parameters) ที่เกี่ยวข้องกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อชุด คือตัวแปรไร้มิติของระยะห่างท่อ (มุมของท่อ), ϕ ซึ่งมีสมการดังนี้

$$\phi = P / \pi D_c \quad (3.10)$$

นอกจากนี้ยังมีตัวแปรไร้มิติที่มีความสำคัญกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อชุด อีกคือ



รูปที่ 3.3 โครงสร้างของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อชุด

ด้านนอกท่อ ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Re_o), ค่าพรีนดท์เทิลนัมเบอร์ (Pr_o), ค่านัสเซิลนัมเบอร์ (Nu_o) และค่าอัตราส่วนของปริมาณฝุ่นผงที่ฟุ้งต่ออัตราการไหลของอากาศร้อน (β) ซึ่งมีสมการดังนี้

$$Re_o = \frac{\rho_o v_o D_h}{\mu_o} \quad (3.11)$$

$$Pr_o = \frac{C_{p,o} \mu_o}{k_o} \quad (3.12)$$

$$Nu_o = \frac{h_o D_h}{k_o} \quad (3.13)$$

$$\beta = \frac{m_{particles}}{m_h} \quad (3.14)$$

เมื่อ

$$D_h = \frac{D^2_s - \pi D_C d_o^2 \phi^{-1}}{D_s + \pi D_C d_o \phi^{-1}} \quad (3.15)$$

ด้านนอกท่อของสภาวะนี้จำเป็นต้องใช้ D_h (Hydraulic radius) ตามแต่รูปทรงทางเรขาคณิตของท่อซึ่งก็คืออัตราส่วนระหว่างพื้นที่ตั้งฉากการไหลต่อเส้นรอบรูปที่เปียกของการไหล

ด้านในท่อ ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Re_o), ค่าพรันด์เทิลนัมเบอร์ (Pr_o), ค่านัสเซลนัมเบอร์ (Nu_o) ซึ่งมีสมการดังนี้

$$Re_i = \frac{\rho_i v_i d_i}{\mu_i} \quad (3.16)$$

$$Pr_i = \frac{C_{p,i} \mu_i}{k_i} \quad (3.17)$$

$$Nu_i = \frac{h_i d_i}{k_i} \quad (3.18)$$

เมื่อพิจารณาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ผิวท่อด้านใน ในรูปสมการ

$$h_i = C_i Re_i^{m_i} Pr_i^{n_i} \phi_i^{a_i} \quad (3.19)$$

เมื่อ C_i, m_i, n_i และ a_i เป็นค่าคงที่

โดยสมการที่ 3.19 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบไร้หน่วยคือ ค่านัสเซลนัมเบอร์ ได้ดังนี้

$$Nu_i = C_i Re_i^{m_i} Pr_i^{n_i} \phi_i^{a_i} \quad (3.20)$$

หรือ

$$Nu_i = \frac{h_i d_i}{k_i} \quad (3.21)$$

และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ผิวท่อด้านนอก จะมีลักษณะสมการดังนี้

$$h_o = C_o Re_o^{m_o} Pr_o^{n_o} \phi_o^{a_o} \beta^b Hu^d \frac{k_o}{D_h} \quad (3.22)$$

เมื่อ C_o, m_o, n_o, a_o, b และ d เป็นค่าคงที่

สมการที่ 3.22 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบไร้หน่วยคือ ค่านัสเซลนัมเบอร์ ได้ดังนี้

$$Nu_o = C_o Re_o^{m_o} Pr_o^{n_o} \phi_o^{a_o} \beta^b Hu^d \quad (5.23)$$

หรือ

$$Nu_o = \frac{h_o D_h}{k_o} \quad (3.24)$$

เมื่อแทนที่ค่าสมการที่ 3.19 และสมการที่ 3.22 ลงในสมการที่ 3.9 จะได้

$$\frac{1}{U_o A_o} = \frac{1}{A_o (C_o \text{Re}_o^{m_o} \text{Pr}_o^{n_o} \varphi^{a_o} \beta^b \text{Hu}^d (k_o / D_h))} + \frac{\ln(d_o / d_i)}{2\pi k L} + \frac{1}{A_i (C_i \text{Re}_i^{m_i} \text{Pr}_i^{n_i} \varphi^{a_i} (k_i / d_i))} \quad (3.25)$$

โดยค่า $1/U_o A_o$ สามารถหาได้จากสมการที่ 3.25 และค่าคงที่ $C_i, C_o, m_i, m_o, n_i, n_o, a_i, a_o, b$ และ d ในสมการที่ 3.25 เป็นค่าคงที่ที่ต้องอาศัยการทดลองในการหา โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least square analysis) ซึ่งมีสมการดังนี้

$$E(C_o, C_i, m_i, m_o, n_i, n_o, a_i, a_o, b, d) = \frac{1}{NP} \sum_{j=1}^{NP} \left[\left(\frac{1}{U_o A_o} \right) - \left(\frac{1}{A_o (C_o \text{Re}_o^{m_o} \text{Pr}_o^{n_o} \varphi^{a_o} \beta^b \text{Hu}^d (k_o / D_h))} + \frac{\ln(d_o / d_i)}{2\pi k L} + \frac{1}{A_i (C_i \text{Re}_i^{m_i} \text{Pr}_i^{n_i} \varphi^{a_i} (k_i / d_i))} \right) \right]^2 \quad (3.26)$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากผลการทดลองทั้งหมด 800 สภาวะสามารถนำมาใช้หาความสัมพันธ์ที่ใช้ทำนายการถ่ายเทความร้อนได้ดังนี้

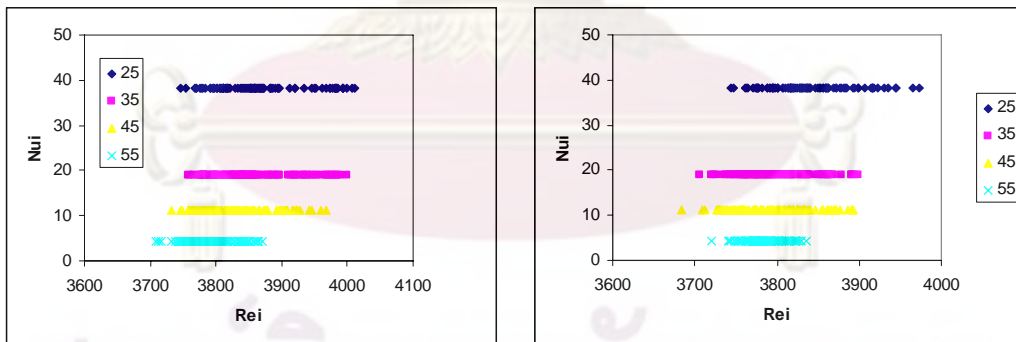
ด้านในท่อ

$$Nu_i = 0.4606 Re_i^{0.0066} Pr_i^{0.011} \phi^{-1.969} \quad (4.1)$$

ด้านนอกท่อ

$$Nu_o = 0.0007 Re_o^{1.2014} Pr_o^{4.3309} \phi^{0.005} \beta^{-0.2863} Hu^{0.0402} \quad (4.2)$$

เมื่อนำความสัมพันธ์ในสมการที่ 4.1 มาคำนวณและพล็อตกราฟดังรูปที่ 7.1 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของระหว่างค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ด้านในท่อขดกับค่าไนส์เซลนัมเบอร์ด้านในท่อขดทั้ง 4 แบบคือขนาดมุม 25, 35, 45 และ 55 องศา ทั้งในแบบที่เพิ่มความชื้นและไม่เพิ่มความชื้นอากาศให้แก่ระบบพบว่าทั้งสองแบบมีแนวโน้มที่คล้ายกันคือเมื่อมุมระยะห่างระหว่างขดท่อสูงขึ้น ค่าไนส์เซลนัมเบอร์มีค่าลดลง เนื่องจากเมื่อมุมระยะห่างระหว่างขดท่อมีค่าสูงขึ้น ท่อจะมีลักษณะคล้ายกับท่อตรงมากขึ้นซึ่งจะสูญเสียคุณสมบัติของท่อขดในการแลกเปลี่ยนความร้อน



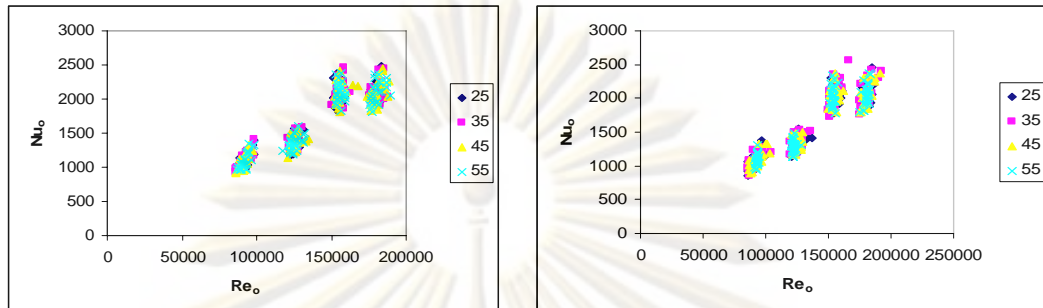
(ก)

(ข)

รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ของค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์กับค่าไนส์เซลนัมเบอร์ภายในท่อ (ก) ระบบมีการเพิ่มความชื้นของอากาศ (ข) ระบบไม่มีการเพิ่มความชื้นของอากาศ

ด้านนอกท่อนำความสัมพันธ์ที่ได้มาคือสมการ 4.2 มาพล็อตกราฟดังรูปที่ 7.2 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของระหว่างค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ด้านในท่อขดกับค่าไนส์เซลนัมเบอร์ด้านในท่อขดทั้ง 4 แบบคือขนาดมุม 25, 35, 45 และ 55 องศา ทั้งในแบบที่เพิ่มความชื้นและไม่เพิ่มความชื้นของ

อากาศพบว่าเมื่อเรย์โนลด์นัมเบอร์เพิ่มขึ้นค่าสเกลนัมเบอร์จะมีค่าสูงขึ้นและพบว่ามุมระยะห่างระหว่างขดท่อมีผลกระทบต่อค่าสเกลนัมเบอร์ภายนอกท่อ



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ของค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์กับค่าสเกลนัมเบอร์ภายนอกท่อ (ก) ระบบมีการเพิ่มความชื้นของอากาศ (ข) ระบบไม่มีการเพิ่มความชื้นของอากาศ

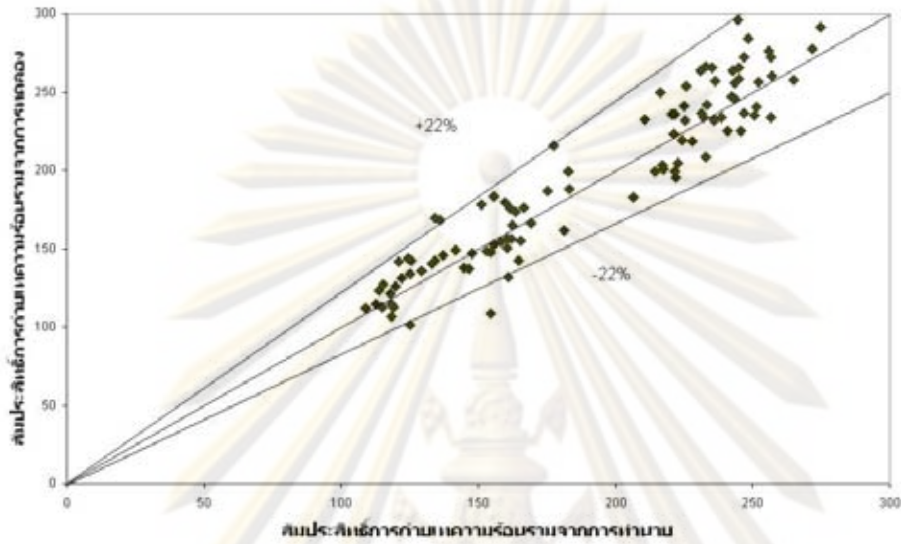
เมื่อนำความสัมพันธ์ในสมการ 4.1 และ 4.2 มาคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมได้ดังสมการ 4.3

$$\frac{1}{U_o A_o} = \frac{1}{A_o \left(0.0007 Re_o^{1.2014} Pr_o^{4.3309} \phi^{0.005} \beta^{-0.2863} Hu^{0.0402} (k_o / D_h) \right)} + \frac{\ln(d_o / d_i)}{2\pi k L} \quad (4.3)$$

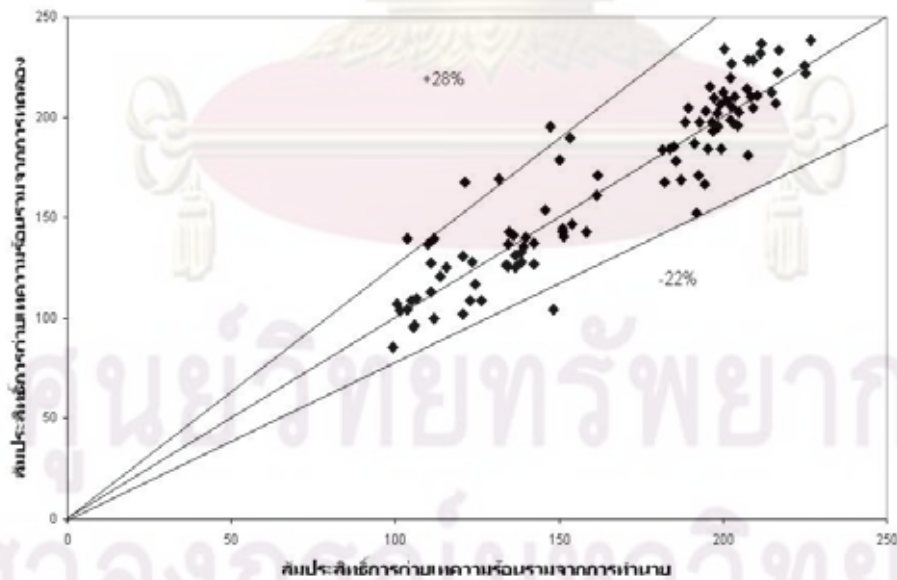
$$+ \frac{1}{A_i \left(0.4606 Re_i^{0.0066} Pr_i^{0.011} \phi^{-1.969} (k_i / d_i) \right)}$$

เมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่ได้จากสมการ 4.3 มาเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่ได้จากการทดลองจะแสดงดังรูปที่ 4.4 และ 4.10 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจากการทำนายและจากการทดลองมีค่าค่อนข้างสอดคล้องกันโดยมีค่าความผิดพลาดอยู่ในช่วง $\pm 30\%$ เมื่อพิจารณาในแต่ละขดท่อพบว่าความผิดพลาดของการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่มุมระยะห่างระหว่างขดท่อ 25 องศา มีค่าอยู่ในช่วง +22% ถึง -22% สำหรับแบบมีการเพิ่มความชื้นให้ระบบ และมีค่า +11% ถึง -12% สำหรับแบบที่ไม่มีการเพิ่มความชื้นให้ระบบ ที่มุมระยะห่างระหว่างขดท่อ 35 องศา มีค่าอยู่ในช่วง +28% ถึง -22% สำหรับแบบมีการเพิ่มความชื้นให้ระบบ และมีค่า +11% ถึง -16% สำหรับแบบที่ไม่มีการเพิ่มความชื้นให้ระบบ ที่มุมระยะห่างระหว่างขดท่อ 45 องศา มีค่าอยู่ในช่วง +19% ถึง -20% สำหรับแบบมีการเพิ่มความชื้นให้ระบบ และมีค่า +14% ถึง -18% สำหรับแบบที่ไม่มีการเพิ่มความชื้นให้ระบบ ที่มุมระยะห่างระหว่างขดท่อ 55 องศา มีค่าอยู่ในช่วง +12% ถึง -17%

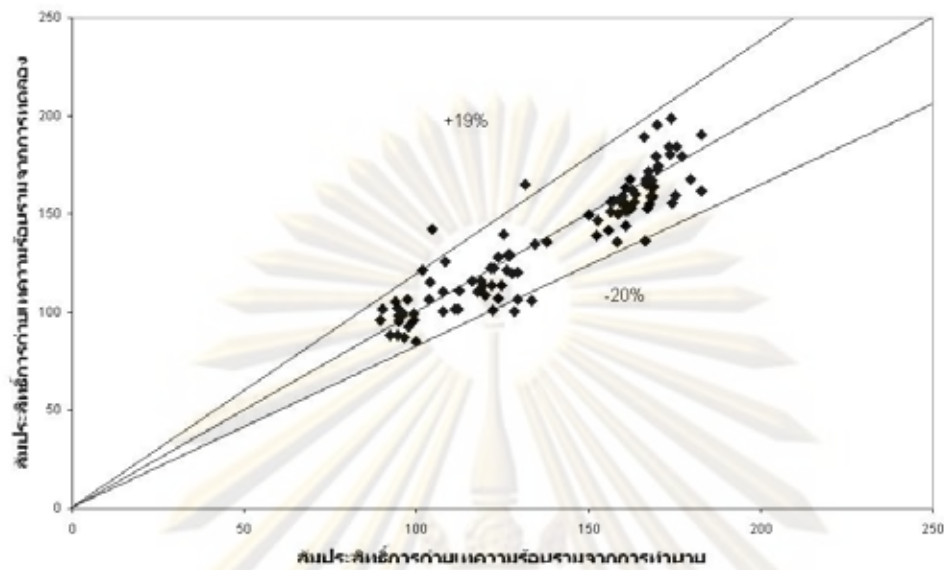
สำหรับแบบที่มีการเพิ่มความขึ้นให้ระบบ และมีค่า +21% ถึง -18% สำหรับแบบที่ไม่มีการเพิ่มความขึ้นให้ระบบ



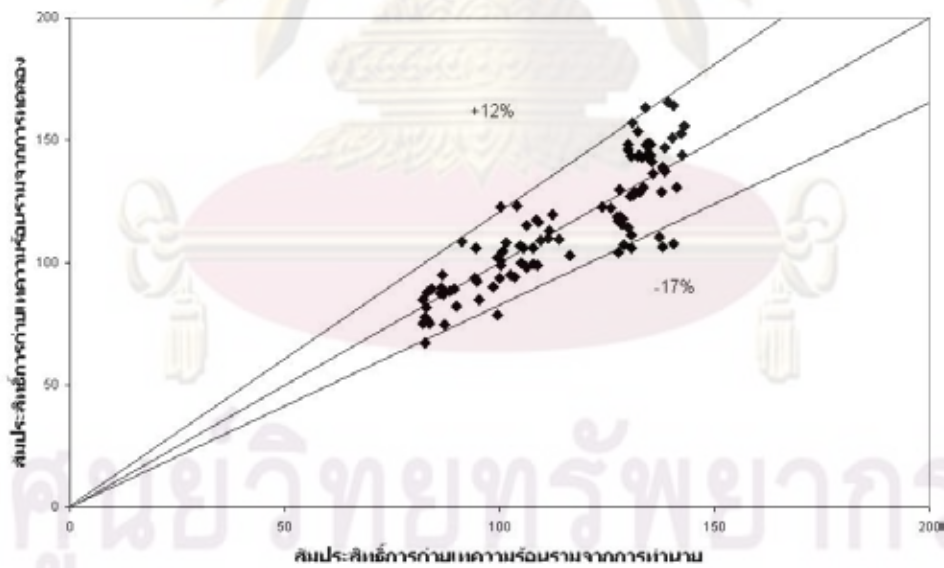
รูปที่ 4.3 เปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจากการทดลองและการทำนายที่มุมระยะห่างระหว่างขีดต่อ 25 องศาในระบบที่มีการเพิ่มความขึ้น



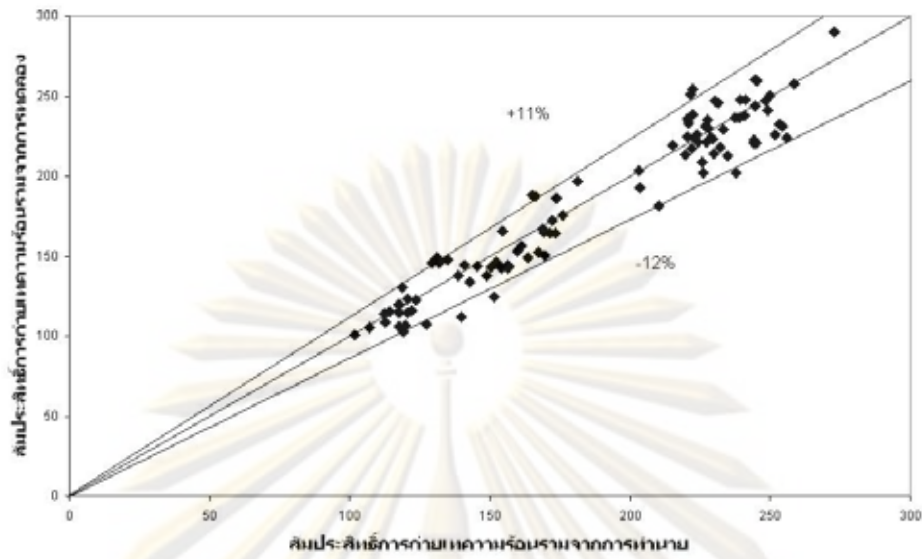
รูปที่ 4.4 เปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจากการทดลองและการทำนายที่มุมระยะห่างระหว่างขีดต่อ 35 องศาในระบบที่มีการเพิ่มความขึ้น



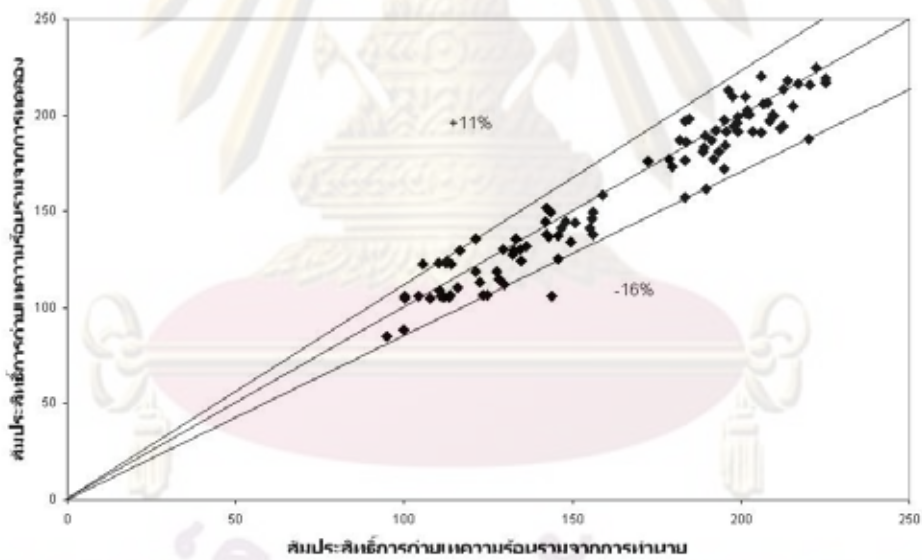
รูปที่ 4.5 เปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจากการทดลองและการทำนายที่มุมระยะห่างระหว่างขีดต่อ 45 องศาในระบบที่มีการเพิ่มความชื้น



รูปที่ 4.6 เปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจากการทดลองและการทำนายที่มุมระยะห่างระหว่างขีดต่อ 55 องศาในระบบที่มีการเพิ่มความชื้น

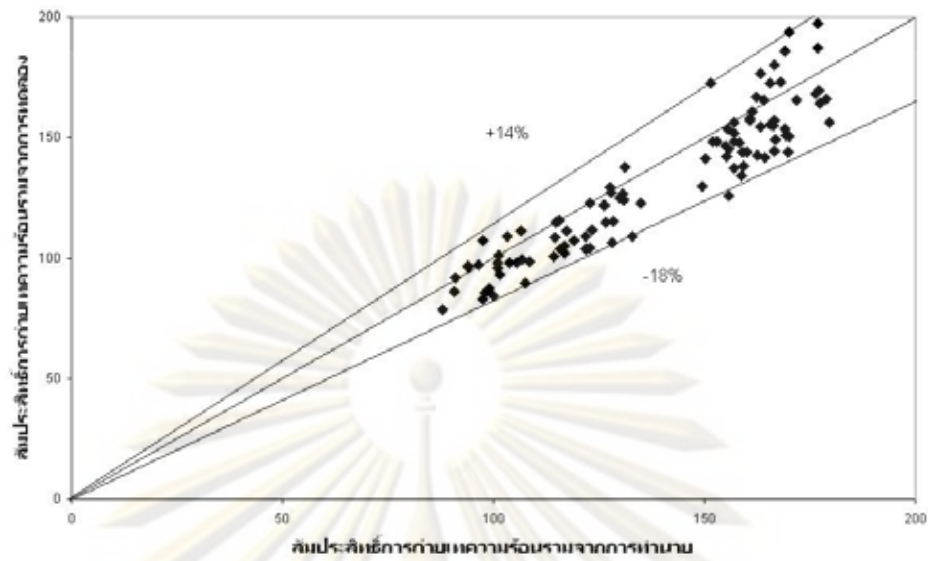


รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจากการทดลองและการทำนายที่มุม ระยะห่างระหว่างขีดต่อ 25 องศาในระบบที่ไม่มีการเพิ่มความชื้น

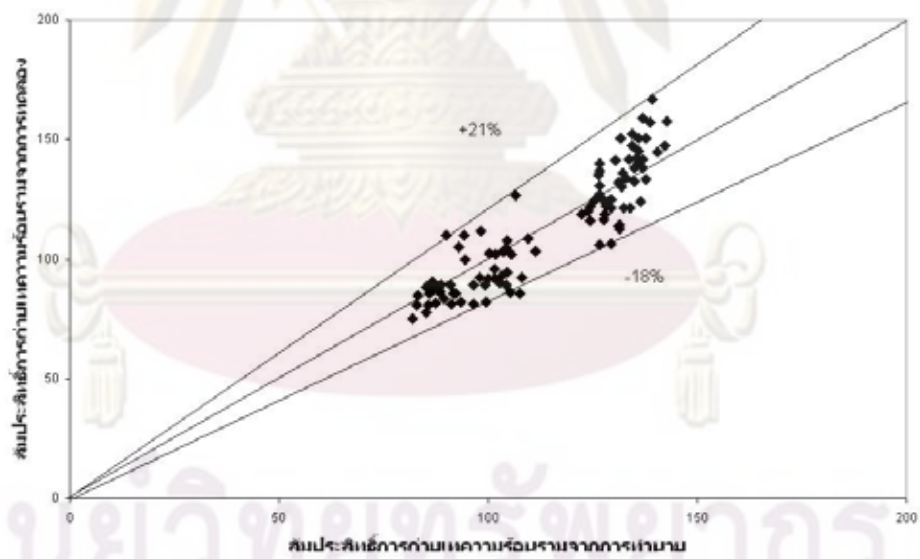


รูปที่ 4.8 เปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจากการทดลองและการทำนายที่มุม ระยะห่างระหว่างขีดต่อ 35 องศาในระบบที่ไม่มีการเพิ่มความชื้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

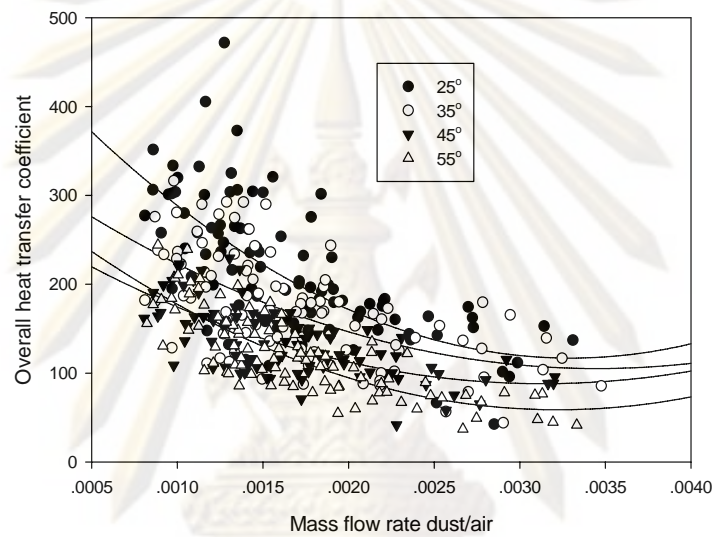


รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจากการทดลองและการทำนายที่มุมระยะห่างระหว่างจุดต่อ 45 องศาในระบบที่ไม่มีการเพิ่มความชื้น

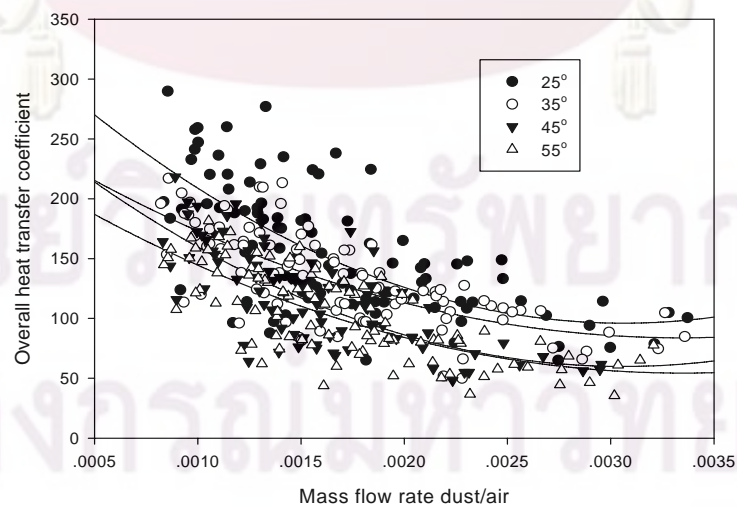


รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจากการทดลองและการทำนายที่มุมระยะห่างระหว่างจุดต่อ 55 องศาในระบบที่ไม่มีการเพิ่มความชื้น

รูปที่ 4.11 และ 4.12 เป็นการเปรียบเทียบผลของอัตราส่วนของอัตราการไหลเชิงมวลของฝุ่นผงซักฟอกต่ออากาศร้อนกับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของระบบที่มีการเพิ่มความชื้นและไม่มีการเพิ่มความชื้นตามลำดับ พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันทั้งสองแบบคือเมื่ออัตราการไหลเชิงมวลของฝุ่นผงซักฟอกต่ออากาศร้อนเพิ่มขึ้นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมมีค่าลดลงเนื่องจากฝุ่นผงซักฟอกจะเคลือบบริเวณพื้นผิวของขดท่อ บริเวณผิวท่อจะมีลักษณะเป็นฉนวนต้านการถ่ายเทความร้อน

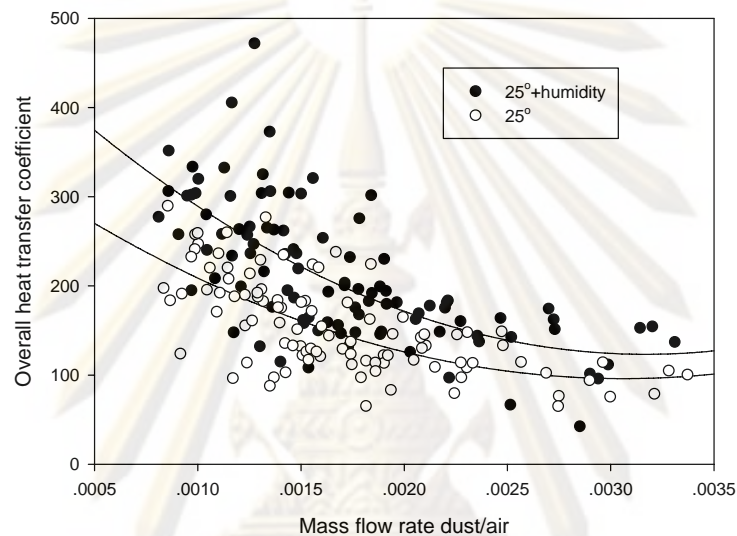


รูปที่ 4.11 แสดงผลของอัตราส่วนของอัตราการไหลเชิงมวลของฝุ่นผงซักฟอกต่ออากาศร้อนที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของระบบที่มีการเพิ่มความชื้น

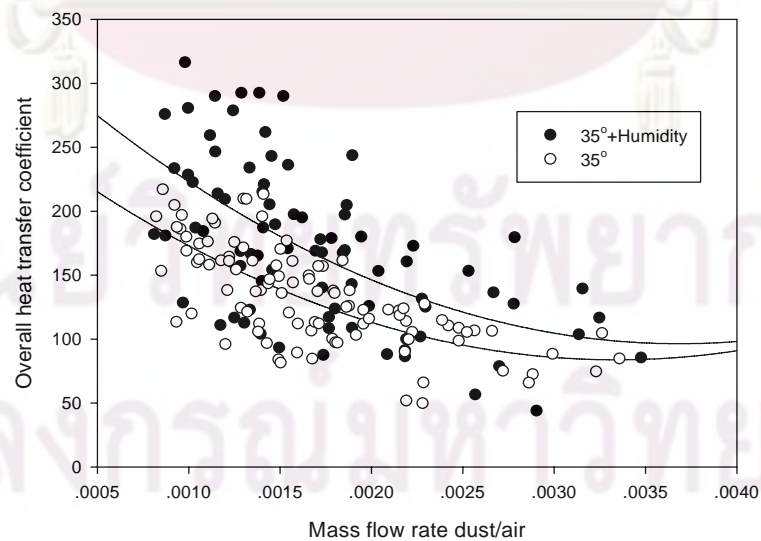


รูปที่ 4.12 แสดงผลของอัตราส่วนของอัตราการไหลเชิงมวลของฝุ่นผงซักฟอกต่ออากาศร้อนที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของระบบที่ไม่มีการเพิ่มความชื้น

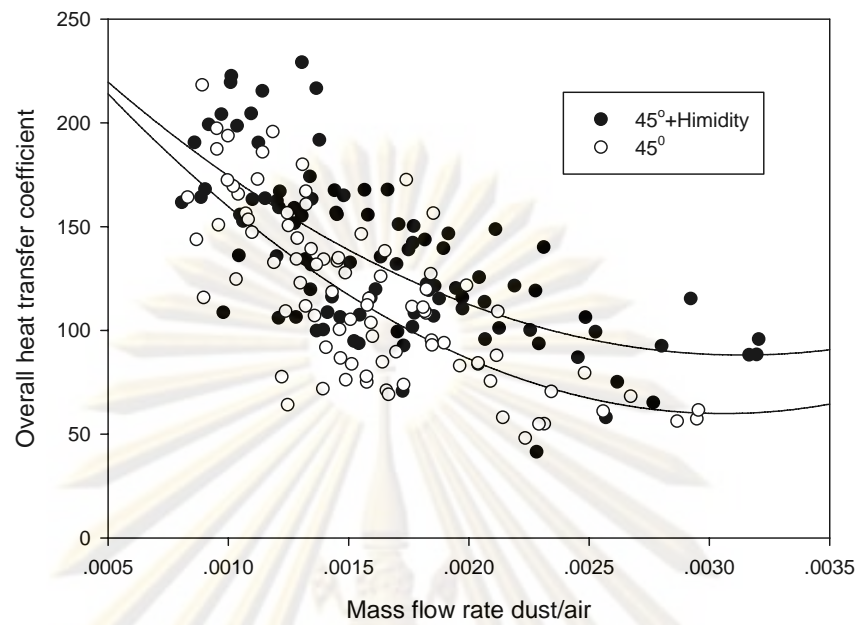
เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างระบบที่มีการเพิ่มความชื้นกับระบบที่ไม่มีการเพิ่มความชื้นของชุดท่อทั้ง 4 แบบ พบว่าระบบที่มีการเพิ่มความชื้นจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมเพิ่มขึ้น เนื่องจากความชื้นจะทำให้ฝุ่นผงชักฟอกจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อนตกลงบนผนังเซลล์ อากาศร้อนจึงมีฝุ่นผงชักฟอกน้อยลง ส่งผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนได้ดีขึ้น ดังกราฟแสดงรูปที่ 4.13-4.16



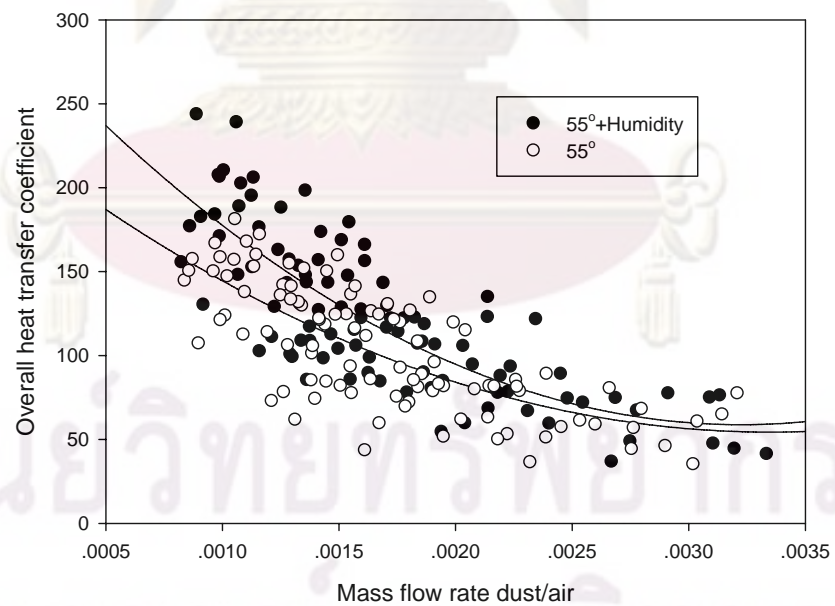
รูปที่ 4.13 เปรียบเทียบผลของความชื้นที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของท่อที่มุมระยะห่างระหว่างชุดท่อเท่ากับ 25 องศา



รูปที่ 4.14 เปรียบเทียบผลของความชื้นที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของท่อที่มุมระยะห่างระหว่างชุดท่อเท่ากับ 35 องศา



รูปที่ 4.15 เปรียบเทียบผลของความชื้นที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของท่อที่มุมระยะห่างระหว่างขดท่อเท่ากับ 45 องศา

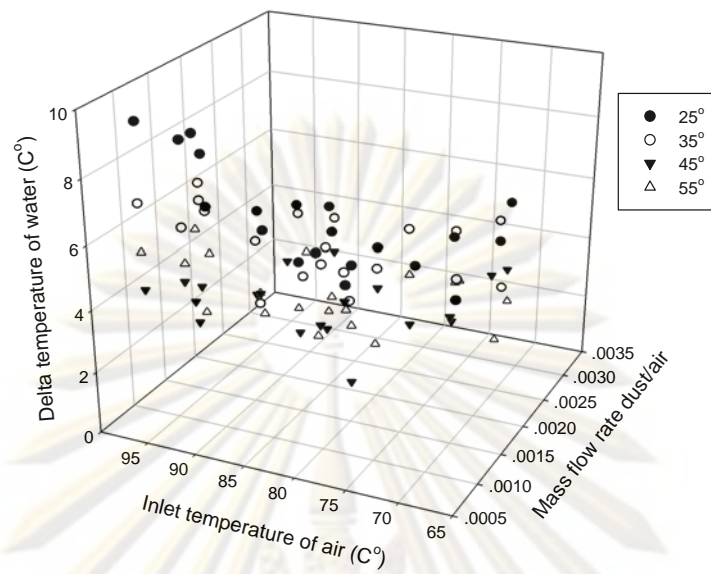


รูปที่ 4.16 เปรียบเทียบผลของความชื้นที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของท่อที่มุมระยะห่างระหว่างขดท่อเท่ากับ 55 องศา

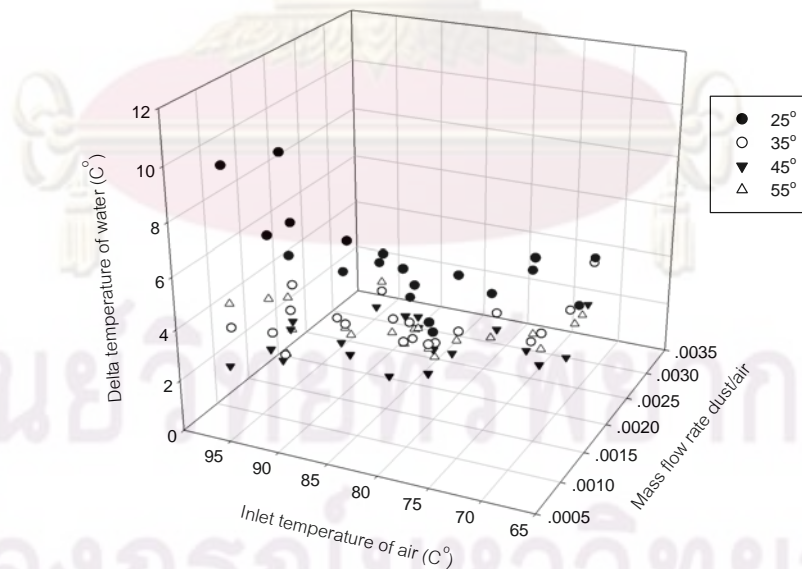
รูปที่ 4.17 และ 4.18 เป็นการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิอากาศของอากาศร้อนอัตราส่วนของอัตราการไหลเชิงมวลของฝุ่นผงซักฟอกต่ออากาศร้อนและผลต่างอุณหภูมิของน้ำขาเข้าและขาออก พบว่าเมื่ออุณหภูมิอากาศร้อนสูงขึ้นน้ำที่ออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นและพบว่าเมื่ออัตราการไหลเชิงมวลของฝุ่นผงซักฟอกต่ออากาศร้อนเพิ่มขึ้นผลต่างของอุณหภูมิของน้ำมีค่าลดลงเนื่องจากเกิดความต้านทานความร้อนมากขึ้น

เมื่อพิจารณาผลของความดันลดอากาศ พบว่าเมื่อมุมระยะห่างระหว่างชุดท่อเพิ่มมากขึ้น ค่าความดันลดจะมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากเมื่อมุมระยะห่างชุดท่อเพิ่มขึ้นจะมีระยะชุดท่อที่ยาวขึ้นซึ่งจะขัดขวางการไหลของอากาศร้อนมากขึ้นและพบว่าเมื่อความเร็วของอากาศร้อนเพิ่มขึ้น ค่าความดันลดของอากาศจะมีค่าสูงขึ้น ผลแสดงดังรูปที่ 4.19 และ 4.20 และแต่เมื่อพิจารณาความดันลดในท่อ พบว่าเมื่อมุมระยะห่างระหว่างชุดท่อเพิ่มขึ้น ค่าความดันลดจะมีค่าน้อยลง เนื่องจากเมื่อมุมระยะห่างของชุดท่อเพิ่มมากขึ้นท่อจะมีลักษณะคล้ายท่อตรงมากขึ้น

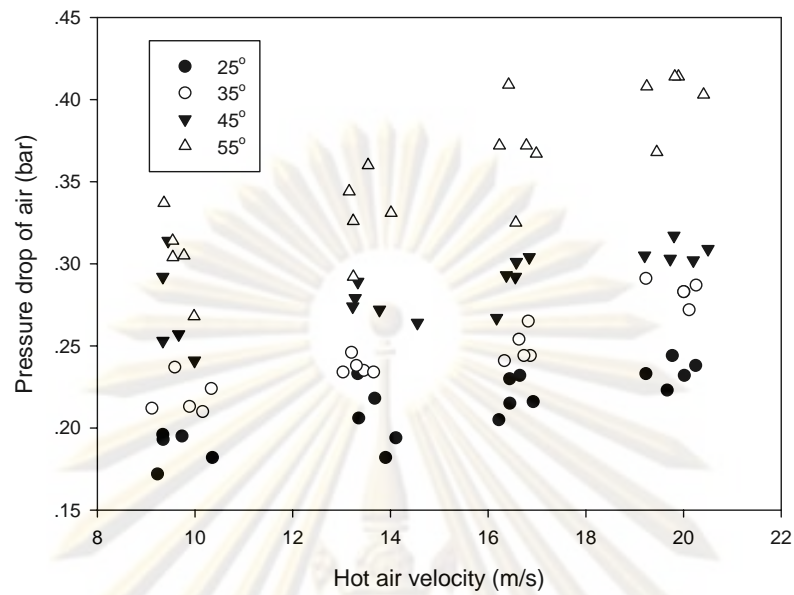
จากข้อมูลการทดลองทั้งหมด เมื่อนำมาพิจารณาหาชุดท่อที่เหมาะสมกับการแลกเปลี่ยนความร้อนมากที่สุด พบว่าท่อที่มุมระยะห่างของชุดท่อ 25 องศา มีความเหมาะสมที่สุดเนื่องจากมีความสามารถในการถ่ายเทความร้อนได้มากที่สุดและมีขนาดเล็กกว่าทำให้ประหยัดพื้นที่ได้มากขึ้น ถึงแม้ว่าจะมีค่าความดันลดในท่อมากกว่าท่อแบบอื่น แต่มีค่าต่างกันไม่มาก จึงสรุปว่าท่อที่มุมระยะห่างของชุดท่อ 25 องศา มีความเหมาะสมที่สุด



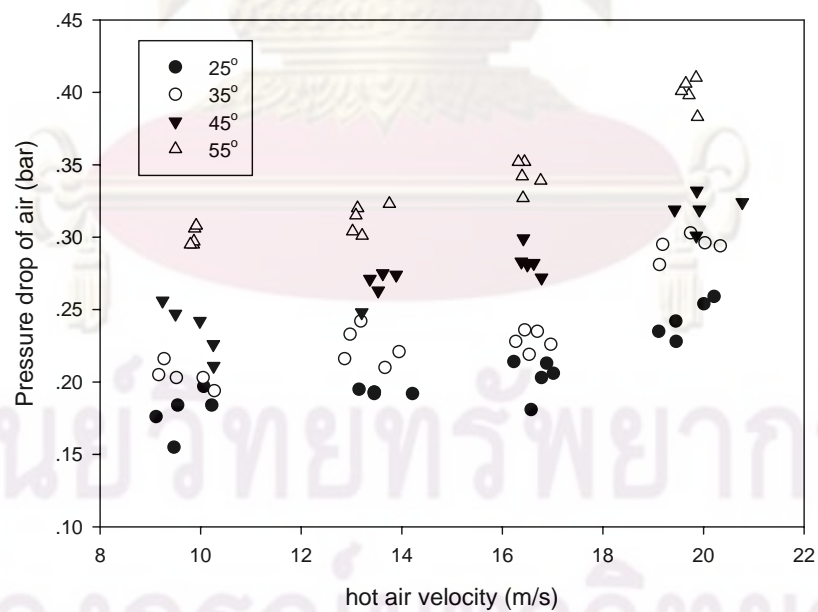
รูปที่ 4.17 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอากาศร้อน อัตราส่วนของอัตราไหลเชิงมวลของฝุ่นผงชั้กฟอกต่ออากาศร้อนและผลต่างอุณหภูมิของน้ำขาเข้าและขาออกในระบบที่มีการเพิ่มความชื้น



รูปที่ 4.18 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอากาศร้อน อัตราส่วนของอัตราไหลเชิงมวลของฝุ่นผงชั้กฟอกต่ออากาศร้อนและผลต่างอุณหภูมิของน้ำขาเข้าและขาออกในระบบที่ไม่มีการเพิ่มความชื้น



รูปที่ 4.19 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของอากาศร้อนกับความดันลดของอากาศร้อนในระบบที่มีการเพิ่มความชื้น



รูปที่ 4.20 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของอากาศร้อนกับความดันลดของอากาศร้อนในระบบที่ไม่มีการเพิ่มความชื้น

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของความชื้นที่มีต่อการแลกเปลี่ยนความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อขดโดยเป็นการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างน้ำกับอากาศที่มีอนุภาคของผงซักฟอกอยู่ ตัวแปรที่ทำการศึกษาเพิ่มเติมคือ มุมระยะห่างของขดท่อและอัตราส่วนของอัตราการไหลเชิงมวลของฝุ่นผงซักฟอกต่ออัตราการไหลเชิงมวลของอากาศร้อน จากการทดลองทั้งหมด 800 สภาวะข้อมูลที่ได้นำมาใช้หาความสัมพันธ์ออกมาเป็นสมการในรูปของนัสเซลันัมเบอร์ทั้งในและนอกท่อขด ซึ่งพบว่า เมื่อความชื้นในอากาศมีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการจับตัวกันของฝุ่นผงซักฟอกทำให้ในอากาศมีผงซักฟอกที่ทำหน้าที่เป็นฉนวนต้านทานการถ่ายเทความร้อนน้อยลงและพบว่าเมื่อมุมระยะห่างของขดท่อเพิ่มขึ้นแล้วค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมมีค่าลดลง เนื่องจากเมื่อมุมระยะห่างของขดท่อเพิ่มขึ้นท่อจะมีลักษณะคล้ายท่อตรงมากขึ้นทำให้สูญเสียคุณสมบัติในการถ่ายเทความร้อนของท่อขดไป และยังพบว่าเมื่ออัตราส่วนของอัตราการไหลเชิงมวลของฝุ่นผงซักฟอกต่ออัตราการไหลเชิงมวลของอากาศร้อนเพิ่มขึ้นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมมีค่าลดลงเช่นกัน เนื่องจากปริมาณฝุ่นผงซักฟอกที่มากขึ้นส่งผลให้เกิดการต้านทานความร้อนบริเวณพื้นผิวของท่อขดทำให้ประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนน้อยลง เมื่อพิจารณาความดันลดของอากาศร้อน (นอกท่อขด) พบว่าเมื่อมุมระยะห่างของขดท่อเพิ่มขึ้น ค่าความดันลดนอกท่อขดจะมีค่ามากขึ้นตรงกันข้ามกับค่าความดันลดของน้ำ (ในท่อขด) ที่เมื่อมุมระยะห่างของขดท่อเพิ่มขึ้น ค่าความดันลดในท่อขดจะมีค่าน้อยลง จากข้อมูลทั้งหมดพบว่าท่อขดที่มุมระยะห่างของขดท่อเท่ากับ 25 องศาเป็นท่อที่เหมาะสมที่สุดในการใช้กับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อขด

ศูนย์วิทยุทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

- [1] ณรงค์ ทรัพย์พุทธิวงษ์. การเพิ่มสมรรถนะเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยครีบและตัวสร้างกระแสวน. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2550.
- [2] ผ่องศรี ศิวราศักดิ์. Heat transfer การถ่ายโอนความร้อน. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์ทริปเพิ้ล เอดูเคชั่น, 2550.
- [3] วรวิมล มั่นสกุล. การศึกษาและพัฒนาอุปกรณ์อุ่นอากาศด้วยไอเสียสำหรับเตาเผาอุตสาหกรรม. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544.
- [4] วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล. อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนในอุตสาหกรรม. ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : ส.เอเซียเพรส (1989), 2536.
- [5] Holman, J.P. การถ่ายเทความร้อน. แปลโดย ธนาคม สุนทรชัยนาคแสง. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์ท้อป, 2547.
- [6] อารัมภรัตน์ รัชดานุรักษ์. วงจรรวบรวมวารสารจรรยา 50 : กันยายน-ตุลาคม 2542.
- [7] รดีบุรณ์ ชินสุทธิ. การลดรีเวิร์คในกระบวนการผลิตผงซักฟอกชนิดธรรมชาติ. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2546.
- [8] Abd-Elhady, M.S., et al. Minimum gas speed in heat exchangers to avoid particulating fouling. International journal of Heat and Mass transfer 47 (2004): 3943-3955.
- [9] Nuntaphan, A., and Kiatsiriroat, T. Thermal behavior of spiral fin-and tube heat exchanger having fly ash deposit. Experimental Thermal and fluid Science 31 (2007): 1103-1109.
- [10] Marner, W.J., and Macdavid, K.S. Development of a Gas Side Fouling Measuring Device. National Heat Transfer 108 (1989): 305-314.
- [11] ณรงค์ ทรัพย์พุทธิวงษ์. การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมด้วยครีบและตัวสร้างกระแสวน. การประชุมวิชาการเครือข่ายเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 20, หน้า 103-107. 18-20 ตุลาคม 2549.

- [12] Welkey, J.J., Inventors: Brown Fintube, assignee. Mixed finned tube and bare tube heat exchanger tube bundle. U.S Patent 5472047, 1995.
- [13] Kun, L.C., Inventors: Union Carbide Corporation, assignee. Cross flow heat exchanger. U.S Patent 3810509, 1974.
- [14] Leedham, H.W.T., Inventors: Borg-Warner Corporation, assignee. Finned tube bundle heat exchanger. U.S Patent 4049048, 1977.
- [15] Donhowe, D.P., Amundson, C.H., and Hill, C.G. Performance of heat recovery system for spray dryer. Journal of food engineering processing 12 (1989): 13-32.
- [16] ปิยะภัทร คุ่มปรีดี. การศึกษาและพัฒนาอุปกรณ์อุ่นอากาศด้วยไอเสียสำหรับเตาเผาอุตสาหกรรม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544.
- [17] Salimpour, M.R. Heat transfer characteristics of a temperature-dependent fluid in shell and coiled tube heat exchangers. International communications of heat and mass transfer 35(2008) : 1190-1195.
- [18] วัชรารวรรณ วิชาญวดี. การพัฒนากระบวนการนำความร้อนจากสายขาออกของหมอบแห้งแบบพ่นฝอย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2552.



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก
สภาวะที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ ก-1 สภาวะในการทดลอง

การทดลองที่	ความเร็วของ		ปริมาณฝุ่นผง
	อากาศ (m/s)	อุณหภูมิของอากาศ (°C)	ชักฟอก (g/s)
1	9.87	70	0.5
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
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	0.8
18	13.15	86	0.96
19	16.44	78	0.54
20	19.73	93	0.7
21	9.87	75	0.87

การทดลองที่	ความเร็วของ	อุณหภูมิของ	ปริมาณฝุ่นผง
	อากาศ (m/s)	อากาศ (°C)	ชักฟอก (g/s)
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	0.9
34	13.15	85	0.62
35	16.44	78	0.78
36	19.73	93	0.95
37	9.87	77	0.52
38	13.15	89	0.69
39	16.44	92	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	0.8
45	9.87	76	0.97

การทดลองที่	ความเร็วของ	อุณหภูมิของ	ปริมาณฝุ่นผง
	อากาศ (m/s)	อากาศ (°C)	ชักฟอก (g/s)
46	13.15	91	0.54
47	16.44	84	0.71
48	19.73	99	0.88
49	9.87	71	0.6
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	0.9
61	9.87	77	0.62
62	13.15	92	0.79
63	16.44	85	0.96
64	19.73	100	0.53
65	9.87	70	0.7
66	13.15	85	0.86
67	16.44	78	0.59
68	19.73	93	0.8
69	9.87	74	0.92

การทดลองที่	ความเร็วของ	อุณหภูมิของ	ปริมาณฝุ่นผง
	อากาศ (m/s)	อากาศ (°C)	ชักฟอก (g/s)
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	0.6
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	0.5
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
88	19.73	97	0.61

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การทดลองที่	ความเร็วของ	อุณหภูมิของ	ปริมาณฝุ่นผง
	อากาศ (m/s)	อากาศ (°C)	ชักฟอก (g/s)
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	0.8
99	16.44	78	0.97
100	19.73	93	0.54

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข
ผลการทดลอง

ตารางที่ ข-1 ผลการทดลองที่มุมของชุดท่อ 25 องศา ในระบบที่ไม่มีการเพิ่มความชื้น

การทดลอง	ความเร็วอากาศ (m/s)	อุณหภูมิอากาศ (°c)		อุณหภูมิน้ำ (°c)		ความชื้นอากาศ (%RH)
		ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก	
1	10.223	70.500	67.125	32.612	39.560	62.5
2	13.452	85.500	81.152	33.442	39.445	62.4
3	16.574	78.000	76.743	33.420	39.122	62.4
4	19.450	93.000	91.530	35.026	42.333	62.4
5	10.065	74.000	72.666	33.154	38.120	62.3
6	13.458	89.000	86.127	32.521	37.031	62.3
7	16.884	81.000	78.220	33.465	39.983	62.3
8	20.212	93.000	90.123	34.287	40.324	62.3
9	9.116	72.000	70.125	33.175	37.012	62.4
10	13.455	87.000	84.321	33.538	40.520	62.4
11	16.782	79.000	76.146	34.174	38.152	62.4
12	19.112	94.000	90.234	35.258	42.150	62.4
13	9.547	76.250	73.794	32.458	37.021	62.4
14	13.152	91.000	89.006	33.225	37.787	62.4
15	17.018	83.000	81.256	34.369	39.132	62.3
16	20.006	98.000	94.110	33.548	42.967	62.3
17	9.473	71.000	69.112	33.546	36.558	62.4
18	14.216	86.000	83.869	33.785	37.021	62.4
19	16.228	78.000	75.003	35.142	40.055	62.4
20	19.458	93.000	89.925	32.124	42.102	62.5
21	9.555	75.000	73.010	33.256	36.145	62.5

การทดลอง	ความเร็วอากาศ (m/s)	อุณหภูมิอากาศ (°c)		อุณหภูมิน้ำ (°c)		ความชื้นอากาศ (% RH)
		ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก	
22	13.172	90	88.234	33.452	39.452	62.4
23	17.217	82	79.558	34.221	39.323	62.4
24	19.456	97	94.156	34.22	41.96	62.4
25	9.223	73	71.787	33.126	37.025	62.3
26	13.551	88	85.872	34.787	39.317	62.4
27	16.113	80	78.968	35.676	38.968	62.3
28	19.451	95	92.076	34.168	42.368	62.4
29	9.258	77	74.264	35.154	37.211	62.4
30	13.75	92	89.125	33.223	39.796	62.4
31	16.322	84	81.974	32.124	41.21	62.4
32	19.721	99	96.22	33.695	43.252	62.4
33	9.554	70	68.993	33.689	37.111	62.5
34	13.166	85	82.543	33.689	38.633	62.4
35	16.464	78	76.515	34.33	38.665	62.3
36	20.137	93	90.075	35.006	39.527	62.4
37	9.115	74	71.664	35.106	38.454	62.4
38	14.152	89	85.438	35.142	39.415	62.4
39	17.108	82	79.868	34.985	39.554	62.4
40	20.005	97	94.25	34.687	43.36	62.3
41	10.351	72.25	69.557	33.125	37.02	62.3
42	14.526	87	84.004	33.228	38.966	62.3
43	16.123	80	77.765	33.313	38.522	62.3
44	19.155	95	90.264	34.44	41.324	62.4
45	9.154	76	73.828	33.55	36.911	62.4

การทดลอง	ความเร็วอากาศ (m/s)	อุณหภูมิอากาศ (°c)		อุณหภูมิน้ำ (°c)		ความชื้นอากาศ (% RH)
		ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก	
46	13.879	91	88.731	33.968	38.669	62.4
47	17.156	84	81.154	33.84	38.457	62.4
48	20.054	99	96.97	33.612	43.85	62.4
49	10.264	71	69.128	33.132	36.772	62.5
50	13.164	86	83.794	34.265	37.223	62.4
51	16.998	79	77.581	34.128	39.051	62.5
52	19.792	94	91.143	35.019	42.333	62.5
53	10.555	75	72	35.217	38.145	62.5
54	13.51	90	87.486	34.939	38.212	62.4
55	16.433	83	79.147	34.682	41.028	62.3
56	19.666	98	94.111	34.667	42.633	62.4
57	9.84	73	71.75	33.524	36.666	62.4
58	13.252	88	86.096	34.163	38.124	62.4
59	16.333	81	79.125	33.12	37.996	62.4
60	19.326	96	93.463	34.977	39.985	62.4
61	9.456	77	74.124	34.123	37.878	62.4
62	13.85	92	90.734	34.458	37.667	62.5
63	16.667	85	82.162	34.124	37.364	62.5
64	19.477	100	97.103	36.154	44.025	62.5
65	9.874	70.5	67.981	33.62	37.551	62.4
66	13.156	85	82.118	35.877	39.32	62.4
67	16.458	78	74.133	34.154	38.24	62.4
68	19.725	93	90.021	35.118	40.363	62.4
69	9.885	74	71.698	33.972	36.998	62.4
70	13.348	89	86.713	33.256	39.455	62.3

การทดลอง	ความเร็วอากาศ (m/s)	อุณหภูมิอากาศ (°c)		อุณหภูมิน้ำ (°c)		ความชื้นอากาศ (% RH)
		ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก	
71	16.776	81	79.321	32.223	36.222	62.4
72	20.146	96	93.954	35.894	40.368	62.4
73	10.025	72	70.041	34.25	37.544	62.4
74	14.015	87	84.123	34.731	38.654	62.5
75	16.782	80	76.4	34.613	38.651	62.4
76	19.373	95	91.032	36.995	42.755	62.4
77	9.887	76	73.115	33.333	36.854	62.3
78	13.156	91	88.327	34.94	38.123	62.4
79	16.771	83.5	80.364	34.088	40.233	62.4
80	20.012	98	94.126	34.195	41.215	62.5
81	9.809	71	69.705	34.294	36.963	62.4
82	13.596	86	84.173	34.77	38.143	62.4
83	16.542	79	76.153	33.542	37.667	62.4
84	19.273	94	90.734	35.468	39.168	62.3
85	10.236	75	72.237	34.585	37.88	62.4
86	14.551	90	87.456	35.527	39.177	62.3
87	16.415	82	79.124	35.107	38.752	62.4
88	20.043	97	93.175	35.964	42.333	62.4
89	9.673	73	70.521	33.824	36.21	62.4
90	14.776	88	85.73	34.55	37.96	62.3

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การทดลอง	ความเร็วอากาศ (m/s)	อุณหภูมิอากาศ (°c)		อุณหภูมิน้ำ (°c)		ความชื้นอากาศ (% RH)
		ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก	
91	16.552	81	77.256	34.082	40.236	62.4
92	19.845	96	93.14	35.694	43.115	62.4
93	9.85	77	75.616	33.143	35.44	62.4
94	13.682	92	90.251	35.955	39.667	62.5
95	16.956	84	81.133	34.26	38.065	62.4
96	19.825	99	97.044	36.096	42.685	62.4
97	9.556	71	68.129	34.025	37.12	62.4
98	13.254	86	83.42	34.969	38.034	62.4
99	16.789	78.5	75.329	33.234	38.228	62.4
100	20.112	93	88.545	35.326	42.333	62.4

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-2 ผลการทดลองที่มุมของชุดท่อ 25 องศา ในระบบที่มีการเพิ่มความชื้น

การทดลอง	ความเร็วอากาศ (m/s)	อุณหภูมิอากาศ (°C)		อุณหภูมิน้ำ (°C)		ความชื้นอากาศ (%RH)
		ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก	
1	10.356	70.000	68.657	33.750	38.340	85.4
2	14.112	85.250	82.312	34.540	39.445	85.4
3	16.220	78.000	76.018	33.220	38.825	85.4
4	19.666	93.000	89.342	35.026	44.028	85.3
5	9.734	74.000	71.453	33.200	38.333	85.3
6	13.333	89.000	85.347	34.532	40.211	85.4
7	16.650	81.500	78.104	33.932	39.832	85.4
8	19.771	93.000	89.321	34.876	41.427	85.4
9	9.342	72.000	69.340	33.338	38.567	85.4
10	13.681	87.000	83.218	34.450	40.664	85.3
11	16.442	79.000	75.144	33.567	38.993	85.3
12	20.017	94.000	89.331	35.547	43.550	85.3
13	9.234	76.000	71.976	33.765	38.435	85.3
14	13.353	91.000	88.018	34.650	40.502	85.3
15	16.922	83.000	80.102	34.266	39.967	85.4
16	20.250	98.000	93.202	35.351	44.565	85.4
17	9.347	71.000	68.078	33.344	37.994	85.4
18	13.901	86.000	82.792	34.340	40.026	85.4
19	16.445	78.000	74.667	33.819	39.128	85.4
20	19.230	93.500	88.869	34.675	43.550	85.2
21	9.267	75.000	72.800	33.113	37.220	85.0
22	13.410	90.000	88.024	34.543	40.667	85.3
23	17.096	82.000	78.160	34.107	39.934	85.3
24	20.024	97.000	93.333	34.552	43.032	85.3
25	9.990	73.000	70.108	33.557	38.925	85.3

การ ทดลอง	ความเร็วอากาศ (m/s)	อุณหภูมิอากาศ (°C)		อุณหภูมิน้ำ (°C)		ความชื้นอากาศ (%RH)
		ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก	
26	13.547	88.000	83.314	34.361	40.532	85.3
27	16.566	80.000	77.261	33.920	39.493	85.3
28	20.023	95.000	91.022	34.276	44.566	85.3
29	9.667	77.000	73.004	33.677	38.323	85.4
30	13.982	92.000	88.102	34.341	41.350	85.4
31	16.452	84.000	81.205	34.116	42.010	85.4
32	19.355	99.000	94.836	34.992	45.228	85.4
33	9.877	70.000	68.500	32.884	36.822	85.4
34	13.459	85.000	81.433	34.040	39.485	85.4
35	16.395	78.000	75.988	33.263	38.501	85.4
36	20.142	93.000	88.160	35.044	41.324	85.4
37	9.388	74.000	70.640	33.126	38.657	85.4
38	13.448	89.000	84.861	35.062	39.978	85.4
39	17.043	82.000	78.103	34.828	39.333	85.4
40	19.456	97.000	92.424	35.718	46.094	85.4
41	9.675	72.250	69.292	33.528	38.274	85.4
42	13.333	87.000	84.206	34.527	39.993	85.4
43	16.428	80.000	76.319	34.201	40.012	85.4
44	19.969	95.500	88.118	35.310	45.457	85.4
45	9.824	76.250	73.053	33.424	37.796	85.4
46	13.210	91.000	88.392	34.333	40.203	85.4
47	16.508	84.500	80.466	34.006	40.985	85.4
48	19.433	99.000	94.018	35.295	45.222	85.4
49	10.104	71.000	68.902	32.821	38.693	85.4
50	13.778	86.000	82.313	34.290	40.167	85.4

การ ทดลอง	ความเร็วอากาศ (m/s)	อุณหภูมิอากาศ (°c)		อุณหภูมิน้ำ (°c)		ความชื้นอากาศ (%RH)
		ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก	
51	16.604	79.000	75.231	33.214	39.932	85.4
52	19.865	94.000	90.099	34.950	45.216	85.4
53	9.667	75.000	71.185	33.284	37.282	85.4
54	13.336	90.000	87.129	35.145	39.784	85.4
55	16.734	83.000	80.332	34.767	41.109	85.4
56	19.182	98.000	92.680	35.092	45.995	85.4
57	9.489	73.000	72.561	33.492	36.333	85.3
58	13.732	88.500	84.102	34.500	40.370	85.3
59	16.198	81.000	77.939	34.026	38.255	85.3
60	19.272	96.000	92.497	34.776	42.450	85.3
61	10.472	77.000	74.510	33.026	38.973	85.3
62	13.638	92.000	87.825	35.013	40.667	85.2
63	16.708	85.000	82.130	34.589	39.582	85.2
64	19.671	100.000	95.261	35.036	46.938	85.2
65	9.802	70.000	67.371	33.253	37.970	85.2
66	13.489	85.000	82.962	34.786	40.332	85.2
67	16.116	78.000	72.125	33.632	39.966	85.2
68	19.355	93.000	88.127	35.203	44.382	85.4
69	9.960	74.000	72.206	33.935	37.028	85.4
70	13.248	89.000	85.667	35.106	40.577	85.4
71	16.279	81.000	78.993	33.417	38.947	85.3
72	20.018	96.000	91.044	35.843	44.732	85.3
73	10.336	72.000	69.644	33.670	38.382	85.3
74	13.259	87.000	84.491	35.027	39.764	85.4
75	16.358	80.000	77.017	35.102	39.458	85.4

การ ทดลอง	ความเร็วอากาศ (m/s)	อุณหภูมิอากาศ (°C)		อุณหภูมิน้ำ (°C)		ความชื้นอากาศ (%RH)
		ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก	
76	19.591	95.000	89.892	35.995	45.153	85.4
77	9.747	76.000	74.894	33.237	36.557	85.4
78	13.489	91.000	89.250	35.479	40.368	85.4
79	16.779	83.250	79.213	34.118	40.366	85.4
80	19.928	98.000	93.162	35.750	44.921	85.4
81	9.516	71.000	68.113	33.870	36.325	85.4
82	13.552	86.000	83.415	34.382	40.225	85.4
83	16.784	79.000	75.552	33.334	39.025	85.4
84	19.819	94.000	88.246	35.930	44.407	85.4
85	10.008	75.000	72.212	32.020	38.938	85.4
86	13.643	90.000	86.954	35.306	40.981	85.4
87	16.308	82.500	78.794	34.886	39.458	85.3
88	20.034	97.000	92.352	35.613	45.031	85.3
89	9.855	73.000	70.280	32.121	36.487	85.3
90	13.670	88.000	84.152	34.666	39.269	85.3
91	16.500	81.000	76.286	33.938	40.519	85.3
92	19.648	96.000	92.272	35.821	45.620	85.4
93	9.911	77.000	73.688	33.036	37.204	85.4
94	13.564	92.000	88.315	35.938	41.670	85.4
95	16.536	84.000	80.333	34.204	40.109	85.4
96	19.787	99.000	95.002	36.667	43.923	85.4
97	9.753	71.000	68.137	32.015	36.992	85.4
98	13.298	86.000	82.362	34.401	39.243	85.4
99	16.776	78.000	73.752	33.333	38.945	85.4
100	19.992	93.000	87.816	36.320	44.762	85.4

ตารางที่ ข-3 ผลการทดลองที่มุมของชุดท่อ 35 องศา ในระบบที่ไม่มี การเพิ่มความชื้น

การทดลอง	ความเร็วอากาศ (m/s)	อุณหภูมิอากาศ (°c)		อุณหภูมิน้ำ (°c)		ความชื้นอากาศ (%RH)
		ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก	
1	9.522	70.250	68.467	32.545	36.450	67.7
2	12.865	85.000	81.550	32.980	36.338	67.6
3	16.537	78.000	76.452	33.021	36.539	67.6
4	19.124	93.000	91.076	34.524	38.118	67.6
5	10.050	74.000	73.108	33.122	35.200	67.8
6	12.973	89.250	87.241	34.440	37.633	67.7
7	16.966	81.000	77.930	33.150	36.922	67.5
8	20.333	93.000	90.252	34.580	38.500	67.6
9	9.168	72.000	70.035	33.154	36.826	67.4
10	13.667	87.250	84.316	34.225	38.067	67.5
11	16.268	79.000	76.508	33.854	37.333	67.4
12	19.190	94.000	90.168	35.021	39.527	67.4
13	9.273	76.000	73.223	33.273	36.980	67.4
14	13.188	91.750	89.217	34.220	36.856	67.5
15	16.698	83.750	81.025	33.874	37.042	67.4
16	19.743	98.000	95.757	35.021	38.265	67.5
17	10.275	71.000	69.224	31.550	34.771	67.4
18	13.947	86.000	84.881	33.693	35.125	67.4
19	16.444	78.000	75.667	32.778	36.887	67.4
20	20.029	93.000	90.073	34.200	36.560	67.4
21	9.253	75.000	72.930	33.887	36.188	67.4
22	13.155	90.500	88.114	34.333	36.858	67.4
23	17.242	82.000	78.880	33.175	37.329	67.4
24	20.003	97.250	94.253	35.188	38.235	67.5
25	9.305	73.000	70.444	33.207	35.186	67.4

การ ทดลอง	ความเร็วอากาศ (m/s)	อุณหภูมิอากาศ (°c)		อุณหภูมิน้ำ (°c)		ความชื้นอากาศ (%RH)
		ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก	
26	13.175	88.000	85.843	34.018	38.947	67.4
27	16.279	80.000	78.312	33.684	35.960	67.4
28	19.750	95.500	91.832	34.952	38.411	67.4
29	9.333	77.250	76.005	33.333	36.603	67.4
30	13.455	92.500	89.516	34.845	37.281	67.4
31	16.857	84.250	81.680	33.199	38.106	67.4
32	19.743	99.000	96.074	35.921	40.571	67.4
33	9.933	70.000	69.150	33.203	36.988	67.4
34	13.225	85.000	83.451	33.123	36.870	67.4
35	16.032	78.000	76.379	33.247	37.433	67.4
36	20.127	93.000	90.228	35.025	39.539	67.4
37	9.788	74.000	71.987	32.418	37.021	67.4
38	13.983	89.000	86.011	34.418	38.923	67.8
39	16.047	82.000	80.035	32.945	38.310	67.4
40	20.018	97.000	93.207	35.117	39.206	67.4
41	9.855	72.000	69.827	33.200	36.204	67.4
42	13.226	87.000	84.684	34.249	38.343	67.4
43	16.176	80.000	77.845	33.681	38.772	67.4
44	19.588	95.000	91.233	35.623	39.850	67.4
45	9.190	76.250	74.658	33.142	37.124	67.4
46	13.363	91.250	88.222	34.966	38.006	67.4
47	16.193	84.000	81.583	33.852	37.145	67.4
48	19.511	99.000	96.271	35.493	39.267	67.4
49	9.126	71.000	68.988	32.723	37.680	67.4
50	13.591	86.000	84.020	34.182	37.306	67.4

การ ทดลอง	ความเร็วอากาศ (m/s)	อุณหภูมิอากาศ (°C)		อุณหภูมิน้ำ (°C)		ความชื้นอากาศ (%RH)
		ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก	
51	16.313	79.000	77.805	33.450	37.652	67.4
52	20.941	94.000	91.255	35.484	39.516	67.4
53	10.178	75.500	73.013	32.548	34.942	67.4
54	13.201	90.000	87.323	35.301	38.406	67.4
55	16.858	83.000	79.739	34.275	38.103	67.4
56	19.156	98.000	94.320	35.789	40.335	67.4
57	9.943	73.000	71.785	32.313	35.767	67.4
58	13.739	88.000	85.320	33.358	36.761	67.4
59	16.764	81.000	79.154	32.696	35.298	67.4
60	19.174	96.000	93.422	35.718	40.412	67.4
61	9.173	77.000	74.011	32.867	36.356	67.4
62	14.031	92.500	89.094	34.200	37.131	67.4
63	16.278	85.000	82.883	33.525	37.409	67.4
64	19.842	100.000	97.067	36.333	39.935	67.4
65	10.337	70.000	68.020	33.587	36.963	65.2
66	14.556	85.000	82.274	34.500	37.667	65.3
67	17.743	78.000	75.500	32.530	36.230	65.3
68	19.592	93.000	90.310	34.401	40.284	65.3
69	11.002	74.000	71.882	32.238	35.019	65.2
70	13.554	89.000	87.313	33.026	36.454	65.2
71	16.783	81.000	78.177	32.120	36.412	65.2
72	19.891	96.000	93.107	34.657	38.679	65.2
73	10.220	72.500	70.210	32.116	35.021	65.2
74	14.385	87.000	85.313	33.370	36.850	65.2
75	16.872	80.000	77.800	33.633	37.275	65.2

การ ทดลอง	ความเร็วอากาศ (m/s)	อุณหภูมิอากาศ (°c)		อุณหภูมิน้ำ (°c)		ความชื้นอากาศ (%RH)
		ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก	
76	20.005	95.000	91.683	35.125	39.004	65.2
77	9.886	76.000	73.638	32.973	36.268	65.2
78	13.573	91.000	88.700	34.779	37.780	65.2
79	17.204	83.000	80.362	34.244	37.498	65.2
80	19.838	98.250	94.106	35.472	38.613	65.2
81	9.753	71.000	69.923	33.588	36.937	65.4
82	13.253	86.000	84.072	34.190	37.607	65.2
83	17.058	79.000	76.340	33.712	37.119	65.2
84	19.550	94.000	91.533	34.941	38.058	65.2
85	9.909	75.000	72.029	32.511	36.142	65.3
86	13.663	90.750	88.884	34.265	37.300	65.2
87	16.565	82.250	79.530	33.280	36.275	65.3
88	20.753	97.250	93.989	35.156	39.758	65.2
89	9.837	73.000	70.873	33.571	36.456	65.2
90	13.198	88.000	85.108	34.072	37.560	65.2
91	16.761	81.000	78.176	34.104	37.910	65.2
92	19.882	96.000	92.940	34.925	39.767	65.2
93	9.451	77.000	75.662	33.259	36.111	65.2
94	13.375	92.000	89.504	34.183	37.629	65.2
95	16.319	84.750	81.961	33.616	36.078	65.3
96	19.188	99.250	96.476	35.266	38.123	65.2
97	9.213	71.000	68.380	33.096	36.038	65.2
98	13.662	86.000	83.457	34.194	37.929	65.2
99	16.755	78.000	75.685	33.373	37.278	65.2
100	20.023	93.250	89.637	34.492	39.752	65.2

ตารางที่ ข-4 ผลการทดลองที่มุมของชุดท่อ 35 องศา ในระบบที่มีการเพิ่มความชื้น

การทดลอง	ความเร็วอากาศ (m/s)	อุณหภูมิอากาศ (°C)		อุณหภูมิน้ำ (°C)		ความชื้นอากาศ (%RH)
		ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก	
1	10.335	70.000	68.158	32.981	38.213	86.3
2	13.454	85.250	82.541	34.323	38.667	86.3
3	16.333	78.000	76.032	33.175	38.146	86.3
4	20.115	93.000	89.410	35.928	42.345	86.1
5	9.586	74.000	71.556	33.050	38.333	86.1
6	13.204	89.000	85.500	34.208	39.578	86.1
7	16.633	81.000	78.204	33.556	39.142	86.1
8	20.006	93.000	89.423	34.754	41.191	86.1
9	10.159	72.000	69.205	33.280	38.253	86.1
10	13.030	87.750	84.556	34.457	38.260	86.1
11	16.864	79.000	76.704	33.502	37.872	86.1
12	20.258	94.250	89.972	35.100	42.226	86.1
13	9.887	76.000	72.467	32.233	38.235	86.1
14	13.656	91.000	88.412	34.378	39.317	86.1
15	16.732	83.750	80.900	33.519	38.658	86.3
16	20.005	98.250	94.254	35.430	42.146	86.4
17	9.120	71.000	69.204	33.104	36.133	86.3
18	13.305	86.000	83.762	34.139	39.321	86.3
19	16.822	78.000	75.050	33.201	38.935	86.3
20	19.230	93.000	89.747	35.417	42.298	86.3
21	9.963	75.000	72.500	33.255	37.226	86.3
22	13.467	90.000	88.232	35.018	40.579	86.3
23	17.041	82.250	78.248	34.624	39.543	86.3
24	20.524	97.000	93.919	35.981	43.252	86.3
25	9.431	73.000	70.103	32.020	37.750	86.3

การ ทดลอง	ความเร็วอากาศ (m/s)	อุณหภูมิอากาศ (°C)		อุณหภูมิน้ำ (°C)		ความชื้นอากาศ (%RH)
		ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก	
26	13.259	88.000	84.056	34.883	39.108	86.3
27	16.816	80.000	77.063	34.114	38.165	86.3
28	20.027	95.000	92.420	35.741	43.100	86.3
29	9.731	77.000	74.953	34.416	37.760	86.3
30	13.450	92.000	89.682	35.769	41.837	86.3
31	16.524	84.000	81.650	34.761	42.325	86.3
32	19.382	99.000	95.758	36.019	44.746	86.3
33	9.075	70.000	67.493	33.031	37.215	86.3
34	13.973	85.500	81.071	34.684	39.136	86.3
35	16.594	78.000	76.885	33.400	37.140	86.3
36	19.917	93.000	88.270	35.323	41.016	86.3
37	9.572	74.000	70.654	33.560	38.118	86.4
38	13.547	89.000	84.861	34.946	39.978	86.4
39	17.363	82.000	79.038	34.667	38.747	86.4
40	20.029	97.000	93.676	35.953	45.490	86.4
41	9.426	72.000	69.467	33.723	39.057	86.4
42	13.260	87.000	85.344	34.938	38.889	86.4
43	16.385	80.000	76.058	33.274	40.160	86.4
44	19.753	95.250	90.520	35.884	43.015	86.4
45	9.504	76.000	73.587	33.440	37.316	86.4
46	13.746	91.000	88.555	35.629	39.500	86.4
47	16.138	84.000	81.947	34.135	39.821	86.3
48	19.945	99.000	95.277	36.356	42.120	86.3
49	10.294	71.000	68.488	32.325	38.434	86.3
50	13.754	86.000	82.509	34.801	39.554	86.3

การ ทดลอง	ความเร็วอากาศ (m/s)	อุณหภูมิอากาศ (°C)		อุณหภูมิน้ำ (°C)		ความชื้นอากาศ (%RH)
		ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก	
51	16.047	79.000	76.933	33.491	39.812	86.3
52	19.956	94.000	91.387	36.050	43.319	86.3
53	9.779	75.000	72.153	33.193	36.980	86.3
54	13.839	90.250	87.529	35.124	39.370	86.3
55	16.752	83.000	81.024	34.816	38.200	86.3
56	19.381	98.000	93.836	35.490	44.433	86.2
57	9.315	73.000	72.561	33.286	36.333	86.3
58	13.908	88.000	85.784	34.916	38.635	86.2
59	16.864	81.000	78.783	34.050	39.342	86.2
60	19.649	96.250	93.636	35.989	40.367	86.2
61	10.419	77.500	75.630	33.275	38.058	86.2
62	13.282	92.000	88.833	35.997	40.409	86.2
63	16.973	85.000	83.017	34.685	38.012	86.2
64	19.344	100.000	97.146	36.201	44.092	86.2
65	9.823	70.000	68.851	33.430	38.500	86.3
66	13.118	85.000	83.582	35.891	40.013	86.3
67	16.405	78.000	73.959	33.373	39.481	86.3
68	19.093	93.000	89.820	35.365	45.023	86.3
69	9.336	74.250	72.204	33.487	37.010	86.3
70	13.821	89.000	85.018	35.776	40.222	86.3
71	16.715	81.000	78.500	35.145	39.143	86.3
72	20.193	96.000	92.158	36.048	42.027	86.3
73	9.902	72.000	70.233	33.253	37.250	86.3
74	13.195	87.000	85.464	35.100	39.174	86.3
75	16.272	80.000	77.578	34.572	39.821	86.3

การ ทดลอง	ความเร็วอากาศ (m/s)	อุณหภูมิอากาศ (°c)		อุณหภูมิน้ำ (°c)		ความชื้นอากาศ (%RH)
		ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก	
76	19.173	95.000	90.705	35.883	44.810	86.3
77	9.537	76.000	75.068	33.168	36.145	86.3
78	13.696	91.750	89.943	35.563	38.828	86.3
79	16.375	83.000	80.727	34.313	39.490	86.1
80	19.464	98.000	95.598	35.980	44.053	86.2
81	9.062	71.000	69.444	33.846	36.672	86.2
82	13.562	86.000	84.026	35.136	39.438	86.2
83	16.597	79.000	76.492	33.200	37.015	86.2
84	19.278	94.000	89.168	35.880	42.338	86.2
85	10.085	75.000	73.148	32.450	37.851	86.2
86	13.250	90.000	87.074	35.374	40.105	86.2
87	16.716	82.000	79.608	34.082	39.259	86.2
88	19.489	97.000	93.455	35.868	44.093	86.2
89	9.194	73.000	71.424	33.971	36.450	86.2
90	13.557	88.000	84.051	35.783	38.484	86.2
91	16.882	81.000	76.283	33.434	39.554	86.2
92	19.168	96.000	92.272	35.966	44.947	86.2
93	9.718	77.250	73.038	33.158	37.204	86.3
94	13.824	92.000	89.468	35.517	40.020	86.3
95	16.731	84.000	81.076	34.352	39.156	86.3
96	19.933	99.000	95.002	36.550	43.923	86.3
97	9.837	71.000	68.100	33.863	37.250	86.3
98	13.427	86.000	81.216	34.213	40.551	86.3
99	16.555	78.000	75.288	33.585	39.073	86.3
100	19.764	93.000	88.861	35.389	43.183	86.3

ตารางที่ ข-5 ผลการทดลองที่มุมของชุดท่อ 45 องศา ในระบบที่ไม่มีการเพิ่มความชื้น

การทดลอง	ความเร็วอากาศ (m/s)	อุณหภูมิอากาศ (°C)		อุณหภูมิน้ำ (°C)		ความชื้นอากาศ (%RH)
		ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก	
1	9.988	70.000	68.143	33.396	36.240	59.2
2	13.533	85.000	83.220	33.945	35.123	59.2
3	16.781	78.500	77.433	33.021	35.667	59.3
4	19.867	93.000	91.012	34.500	37.508	59.3
5	10.255	74.250	73.346	33.430	35.201	59.1
6	13.891	89.000	87.241	34.826	37.633	59.1
7	16.379	81.000	77.838	32.313	36.984	59.1
8	19.859	93.000	90.402	34.890	38.310	59.1
9	9.502	72.000	70.667	33.054	35.156	59.1
10	13.367	87.000	84.495	33.989	36.578	59.1
11	16.625	79.000	77.335	32.175	35.434	59.2
12	19.919	94.000	92.157	35.340	38.152	59.2
13	9.245	76.000	74.238	33.694	36.727	59.2
14	13.623	91.000	89.201	35.183	36.956	59.1
15	16.421	83.000	81.206	33.353	36.737	59.1
16	19.426	98.500	95.869	35.600	37.204	59.2
17	10.259	71.250	69.424	31.921	33.143	59.3
18	13.204	86.000	84.783	33.845	35.494	59.3
19	16.500	78.000	75.333	32.340	35.328	59.3
20	20.773	93.000	90.244	35.276	37.481	59.1
21	9.852	75.000	73.610	32.502	35.100	59.1
22	13.355	90.000	87.789	34.996	37.237	59.1
23	17.313	82.500	80.330	33.565	36.579	59.2
24	19.058	97.000	94.039	36.212	38.416	59.2
25	9.779	73.250	71.358	33.028	35.322	59.1

การ ทดลอง	ความเร็วอากาศ (m/s)	อุณหภูมิอากาศ (°C)		อุณหภูมิน้ำ (°C)		ความชื้นอากาศ (%RH)
		ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก	
26	13.591	88.000	85.967	34.490	37.334	59.1
27	16.907	80.000	78.400	33.687	35.238	59.1
28	19.532	95.000	91.750	35.682	37.417	59.1
29	9.959	77.000	75.808	33.146	35.452	59.1
30	13.212	92.250	89.433	35.086	37.382	59.4
31	16.225	84.250	81.721	34.133	37.786	59.1
32	19.530	99.000	96.455	36.540	39.628	59.1
33	9.716	70.000	69.238	33.215	36.010	59.3
34	13.456	85.500	83.597	34.500	36.575	59.1
35	16.406	78.000	76.817	33.704	36.227	59.1
36	20.053	93.000	91.216	35.298	37.934	59.2
37	9.751	74.000	72.234	32.338	35.576	59.2
38	13.853	89.000	86.570	34.373	38.113	59.2
39	16.759	82.250	80.200	34.267	37.148	59.2
40	19.254	97.000	93.958	35.440	37.809	59.2
41	9.370	72.000	69.747	33.200	36.010	59.2
42	13.135	87.000	84.913	34.891	38.467	59.2
43	16.352	80.000	77.703	33.147	37.772	59.2
44	19.779	95.000	92.324	36.836	39.053	59.1
45	9.365	76.000	74.550	33.388	37.018	59.1
46	13.781	91.000	89.733	35.500	38.406	59.1
47	16.542	84.000	81.769	33.200	36.725	59.1
48	19.273	99.000	96.380	36.005	39.099	59.1
49	9.201	71.000	69.401	33.963	37.568	59.1
50	13.265	86.250	84.114	34.694	36.700	59.1

การ ทดลอง	ความเร็วอากาศ (m/s)	อุณหภูมิอากาศ (°C)		อุณหภูมิน้ำ (°C)		ความชื้นอากาศ (%RH)
		ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก	
51	16.244	79.000	77.350	33.582	36.398	59.1
52	20.273	94.000	91.053	35.821	39.039	59.1
53	10.198	75.500	73.705	32.182	34.530	59.1
54	13.446	90.000	88.467	34.946	37.516	59.3
55	16.280	83.000	80.117	34.433	38.254	59.3
56	19.985	98.000	95.068	35.882	38.827	59.2
57	9.155	73.000	71.633	32.500	35.402	59.2
58	13.966	88.250	86.698	33.444	37.500	59.2
59	16.226	81.000	79.006	33.208	35.882	59.1
60	19.273	96.000	93.812	35.313	39.670	59.1
61	9.680	77.000	74.990	32.831	35.268	59.1
62	13.842	92.000	89.250	35.100	37.153	59.1
63	16.756	85.000	82.945	34.346	37.297	59.2
64	19.440	100.000	97.111	36.667	39.467	59.2
65	10.659	70.000	68.711	33.194	35.353	59.2
66	13.753	85.000	82.364	34.333	36.813	59.3
67	16.438	78.000	75.228	32.351	36.769	59.3
68	19.456	93.000	90.065	35.106	40.313	59.2
69	10.953	74.000	72.140	32.634	35.548	59.1
70	13.688	89.000	87.387	34.182	36.944	59.1
71	16.346	81.000	79.100	32.434	35.065	59.1
72	19.504	96.250	94.292	35.771	37.114	59.1
73	10.564	72.500	71.157	32.128	34.370	59.1
74	13.750	87.000	85.652	33.330	36.212	59.1
75	16.966	80.250	78.063	33.485	36.372	59.1

การ ทดลอง	ความเร็วอากาศ (m/s)	อุณหภูมิอากาศ (°c)		อุณหภูมิน้ำ (°c)		ความชื้นอากาศ (%RH)
		ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก	
76	20.052	95.000	91.629	35.350	38.887	59.1
77	9.826	76.000	74.295	32.786	36.116	59.1
78	13.908	91.000	88.624	35.720	37.506	59.1
79	16.369	83.000	80.742	34.669	37.683	59.1
80	19.733	98.000	94.667	35.984	38.397	59.2
81	9.513	71.000	69.826	33.203	35.602	59.2
82	13.020	86.000	84.300	34.597	36.851	59.1
83	16.115	79.000	76.436	33.356	36.715	59.1
84	19.889	94.000	91.500	35.082	37.933	59.1
85	9.850	75.000	72.412	33.385	35.786	59.1
86	13.968	90.250	88.369	35.120	37.620	59.1
87	16.278	82.000	79.033	33.342	36.777	59.1
88	20.406	97.000	93.335	35.992	39.114	59.1
89	9.880	73.000	71.039	33.273	35.658	59.1
90	13.191	88.000	86.913	34.153	36.667	59.1
91	16.571	81.000	77.902	33.848	37.815	59.1
92	19.577	96.000	92.974	35.182	39.992	59.1
93	9.438	77.000	75.169	33.554	36.814	59.1
94	13.250	92.000	90.268	35.246	37.467	59.1
95	16.101	84.000	82.179	34.543	36.656	59.1
96	19.866	99.000	96.417	36.667	39.500	59.1
97	9.454	71.000	68.925	32.126	35.637	59.2
98	13.824	86.000	83.246	34.833	37.490	59.1
99	16.667	78.000	75.775	33.244	37.258	59.1
100	19.283	93.250	89.373	34.460	39.094	59.1

ตารางที่ ข-6 ผลการทดลองที่มุมของชุดท่อ 45 องศา ในระบบที่มีการเพิ่มความชื้น

การทดลอง	ความเร็วอากาศ (m/s)	อุณหภูมิอากาศ (°c)		อุณหภูมิน้ำ (°c)		ความชื้นอากาศ (%RH)
		ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก	
1	9.991	70.750	68.855	32.750	36.667	82.1
2	13.230	85.750	83.036	34.021	36.443	82.2
3	16.175	78.000	76.210	33.556	37.878	82.2
4	19.728	93.000	90.333	35.400	40.122	82.2
5	9.340	74.500	72.487	33.233	35.402	82.2
6	14.552	89.000	86.667	34.159	38.240	82.2
7	16.843	81.000	78.512	33.950	37.653	82.2
8	20.503	93.750	91.028	35.404	38.297	82.2
9	9.450	72.000	70.378	33.111	36.116	82.2
10	13.778	87.250	84.539	34.026	38.264	82.2
11	16.375	79.000	76.980	33.480	35.167	82.2
12	20.200	94.250	91.333	35.667	39.500	82.2
13	9.667	76.000	73.375	33.454	36.344	82.2
14	13.280	91.250	88.689	34.300	37.393	82.2
15	16.559	83.750	81.270	33.648	36.093	82.2
16	19.206	98.250	95.805	36.440	40.370	82.4
17	9.345	71.750	69.002	33.207	36.683	82.4
18	13.333	86.000	84.320	34.024	38.088	82.3
19	16.580	78.000	75.235	33.203	38.014	82.3
20	19.806	93.500	90.253	35.798	39.516	82.3
21	9.473	75.000	72.396	33.112	36.057	82.4
22	13.467	90.000	88.029	35.410	39.471	82.4
23	17.550	82.250	79.363	34.106	38.214	82.4
24	20.525	97.000	94.274	36.558	41.226	82.4
25	9.446	73.000	70.297	33.475	36.013	82.1

การ ทดลอง	ความเร็วอากาศ (m/s)	อุณหภูมิอากาศ (°C)		อุณหภูมิน้ำ (°C)		ความชื้นอากาศ (%RH)
		ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก	
26	13.878	88.500	85.957	34.890	38.268	82.2
27	16.284	80.000	77.500	34.342	36.241	82.2
28	20.104	95.000	92.568	35.978	41.662	82.2
29	9.363	77.000	74.223	34.101	37.219	82.2
30	13.550	92.000	89.480	35.437	39.333	82.2
31	16.800	84.000	81.978	34.124	40.313	82.2
32	19.321	99.000	96.373	36.570	42.962	82.2
33	9.208	70.000	68.221	33.674	36.874	82.2
34	13.333	85.500	82.167	34.206	38.667	82.2
35	16.475	78.000	76.234	33.285	37.385	82.2
36	19.303	93.000	90.088	35.718	39.116	82.2
37	9.364	74.000	71.393	33.664	38.611	82.2
38	13.215	89.500	85.676	34.435	38.610	82.2
39	17.970	82.000	80.900	34.229	38.424	82.2
40	20.088	97.000	94.016	36.214	43.663	82.3
41	9.446	72.000	70.113	33.500	36.518	82.3
42	13.624	87.000	85.273	34.004	38.821	82.3
43	16.770	80.000	77.712	33.910	38.727	82.3
44	19.500	95.250	91.180	35.428	39.961	82.3
45	9.656	76.000	74.257	33.564	36.822	82.3
46	13.412	91.000	88.460	35.600	38.018	82.3
47	16.803	84.000	81.950	34.721	38.333	82.3
48	19.337	99.250	96.324	36.242	40.202	82.3
49	9.674	71.000	69.210	34.113	37.852	82.3
50	13.222	86.000	83.898	34.554	38.180	82.3

การ ทดลอง	ความเร็วอากาศ (m/s)	อุณหภูมิอากาศ (°c)		อุณหภูมิน้ำ (°c)		ความชื้นอากาศ (%RH)
		ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก	
51	16.714	79.000	76.933	33.200	37.554	82.3
52	19.732	94.000	91.454	36.251	40.300	82.4
53	9.970	75.000	73.580	33.186	35.971	82.4
54	13.633	90.250	87.262	35.085	39.324	82.4
55	16.581	83.000	81.176	34.727	36.947	82.4
56	19.665	98.000	95.063	36.100	40.146	82.3
57	9.656	73.000	71.488	33.532	37.315	82.3
58	13.740	88.000	85.182	34.821	38.434	82.4
59	16.445	81.250	79.600	34.115	37.113	82.4
60	19.733	96.000	93.275	36.774	40.210	82.4
61	9.545	77.000	75.244	33.010	37.376	82.4
62	13.781	92.000	89.277	35.222	38.853	82.4
63	16.667	85.000	82.956	34.810	37.444	82.2
64	19.028	100.000	96.933	36.442	41.012	82.1
65	9.879	70.000	68.800	32.684	37.589	82.2
66	13.250	85.500	83.844	33.707	40.231	82.2
67	16.440	78.500	75.322	33.280	37.750	82.1
68	19.509	93.000	91.146	35.112	43.724	82.1
69	9.134	74.000	72.055	33.795	36.910	82.1
70	13.203	89.000	87.190	35.058	39.052	82.1
71	16.670	81.000	79.511	35.293	38.578	82.1
72	19.733	96.250	93.556	36.150	40.067	82.1
73	9.912	72.250	70.650	32.102	36.430	82.1
74	13.450	87.000	85.123	35.444	39.100	82.1
75	16.395	80.000	77.576	34.367	37.026	82.1

การ ทดลอง	ความเร็วอากาศ (m/s)	อุณหภูมิอากาศ (°c)		อุณหภูมิน้ำ (°c)		ความชื้นอากาศ (%RH)
		ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก	
76	19.667	95.000	91.724	35.392	41.500	82.2
77	9.535	76.500	75.369	33.576	36.018	82.2
78	13.114	91.000	90.233	35.023	37.388	82.2
79	16.488	83.000	80.500	34.809	37.913	82.2
80	19.376	98.000	95.467	35.405	42.520	82.2
81	9.061	71.000	69.089	34.382	37.321	82.2
82	13.165	86.500	84.372	35.188	38.597	82.2
83	16.733	79.000	76.500	33.230	36.031	82.2
84	19.578	94.000	90.372	35.153	40.333	82.2
85	10.332	75.000	73.750	33.787	36.483	82.2
86	13.258	90.000	88.148	35.236	39.060	82.2
87	16.667	82.000	80.030	34.670	38.249	82.2
88	19.234	97.000	93.346	35.960	42.706	82.4
89	9.989	73.000	71.055	34.151	37.320	82.4
90	14.322	88.500	85.300	34.555	37.736	82.4
91	16.341	81.000	77.228	34.015	37.039	82.4
92	20.060	96.000	92.737	35.369	41.667	82.4
93	9.776	77.250	75.940	32.511	35.267	82.4
94	13.500	92.000	90.000	35.500	39.806	82.4
95	16.457	84.000	82.215	34.814	38.410	82.4
96	19.766	99.000	97.244	36.670	40.750	82.4
97	9.813	71.250	69.033	32.828	36.709	82.1
98	13.440	86.000	83.377	34.234	39.141	82.1
99	16.983	78.000	76.422	33.979	39.672	82.1
100	19.994	93.000	90.163	35.133	41.326	82.1

ตารางที่ ข-7 ผลการทดลองที่มุมของชุดท่อ 55 องศา ในระบบที่ไม่มีการเพิ่มความชื้น

การทดลอง	ความเร็วอากาศ (m/s)	อุณหภูมิอากาศ (°c)		อุณหภูมิน้ำ (°c)		ความชื้นอากาศ (%RH)
		ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก	
1	9.854	70.000	68.140	34.040	37.459	61.2
2	13.024	85.000	82.123	33.560	36.410	61.3
3	16.412	78.250	77.906	33.670	36.780	61.3
4	19.882	93.000	91.452	34.010	38.981	61.3
5	9.883	74.000	73.548	33.560	35.875	61.2
6	13.213	89.000	87.350	34.120	37.773	61.3
7	16.764	81.000	78.233	33.320	36.989	61.2
8	19.712	93.500	91.121	34.170	38.486	61.2
9	9.912	72.000	71.542	34.210	36.119	61.2
10	13.123	87.000	85.458	34.050	37.387	61.2
11	16.395	79.000	77.003	33.930	36.880	61.3
12	19.564	94.000	92.145	32.980	35.741	61.2
13	9.869	76.000	74.335	33.120	36.071	61.2
14	13.089	91.000	89.217	33.670	35.920	61.2
15	16.443	83.000	80.992	34.110	37.042	61.2
16	19.854	98.000	95.757	33.540	37.739	60.9
17	9.798	71.000	70.011	32.350	34.771	61.3
18	13.754	86.000	84.881	33.240	35.007	61.2
19	16.321	78.000	75.243	32.960	36.887	61.2
20	19.648	93.000	90.114	34.120	36.478	61.3
21	9.901	75.000	73.452	33.450	35.223	61.2
22	13.002	90.000	88.114	33.480	36.858	60.8
23	16.192	82.250	79.545	33.120	36.874	61.0
24	19.089	97.000	94.339	33.340	36.997	61.2
25	9.674	73.000	71.893	33.250	35.870	61.2

การทดลอง	ความเร็วอากาศ (m/s)	อุณหภูมิอากาศ (°C)		อุณหภูมิน้ำ (°C)		ความชื้นอากาศ (%RH)
		ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก	
26	13.239	88.000	86.945	33.670	35.980	61.3
27	16.341	80.000	78.312	34.110	35.476	61.2
28	19.399	95.000	92.458	33.990	38.411	61.2
29	9.776	77.000	76.114	34.020	36.522	61.2
30	13.213	92.000	90.556	34.450	36.809	61.2
31	16.391	84.000	82.134	34.340	37.489	61.2
32	19.494	99.000	97.002	33.930	38.712	61.2
33	9.881	70.000	69.282	33.220	35.110	61.2
34	13.108	85.000	83.451	33.340	36.870	61.2
35	16.211	78.000	76.117	33.450	36.457	61.2
36	19.534	93.000	91.557	34.040	38.005	61.3
37	9.901	74.000	72.966	33.980	36.478	61.2
38	13.435	89.000	87.249	33.230	36.997	61.2
39	16.383	82.000	80.041	33.560	37.183	61.3
40	19.219	97.000	94.244	33.760	38.492	61.2
41	9.992	72.000	70.334	33.100	35.899	61.2
42	13.378	87.000	85.240	33.450	36.174	61.2
43	16.324	80.000	77.993	34.010	37.858	61.2
44	19.667	95.000	92.460	34.230	37.908	61.2
45	9.823	76.250	74.834	34.010	36.072	61.1
46	13.112	91.000	89.650	33.230	36.117	60.9
47	16.295	84.000	82.258	33.560	36.875	61.2
48	19.456	99.000	96.874	33.760	38.446	61.2
49	9.798	71.000	69.711	33.120	36.457	61.2
50	13.211	86.000	84.124	34.010	36.890	61.2

การทดลอง	ความเร็วอากาศ (m/s)	อุณหภูมิอากาศ (°C)		อุณหภูมิน้ำ (°C)		ความชื้นอากาศ (%RH)
		ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก	
51	16.402	79.000	77.032	34.450	37.093	61.2
52	19.716	94.000	91.213	34.410	38.135	61.2
53	9.812	75.000	73.228	33.550	35.807	61.2
54	13.198	90.000	88.990	33.570	36.324	61.2
55	16.396	83.000	81.107	33.670	37.551	61.3
56	19.771	98.000	95.541	33.910	38.639	61.2
57	9.792	73.000	71.887	33.560	35.454	61.2
58	13.151	88.000	86.249	33.210	36.852	61.2
59	16.412	81.000	79.016	33.650	36.450	61.2
60	19.788	96.000	93.450	34.100	39.198	61.2
61	9.915	77.000	74.236	34.010	36.975	61.3
62	13.216	92.000	90.254	34.020	37.441	61.2
63	16.634	85.000	83.110	33.650	36.487	61.2
64	19.722	100.000	97.068	33.980	38.145	61.2
65	9.866	70.500	68.970	33.140	35.823	61.1
66	13.158	85.000	83.331	34.560	36.996	61.2
67	16.421	78.000	75.772	34.230	38.410	61.2
68	19.792	93.000	90.440	34.110	38.687	61.2
69	9.645	74.000	72.879	33.230	35.740	61.2
70	13.119	89.000	87.313	33.320	36.454	61.2
71	16.444	81.000	79.228	33.580	37.019	61.2
72	19.871	96.000	93.410	33.510	37.252	61.3
73	9.812	72.000	70.877	33.560	36.471	61.2
74	13.006	87.000	85.030	33.450	36.874	61.2
75	16.391	80.000	77.982	33.570	36.913	61.2

การทดลอง	ความเร็วอากาศ (m/s)	อุณหภูมิอากาศ (°C)		อุณหภูมิน้ำ (°C)		ความชื้นอากาศ (%RH)
		ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก	
76	19.722	95.000	92.111	33.130	38.323	61.2
77	9.991	76.000	74.887	33.560	35.873	61.2
78	13.153	91.000	89.103	33.570	36.221	61.2
79	16.422	83.000	81.220	34.090	36.782	61.2
80	19.694	98.000	95.478	34.120	37.568	61.2
81	9.823	71.500	70.216	34.010	36.888	61.3
82	13.155	86.000	84.550	33.960	36.870	61.2
83	16.501	79.000	77.142	33.220	37.454	61.2
84	19.821	94.000	91.533	33.340	38.740	61.2
85	9.792	75.000	73.150	33.710	36.142	61.2
86	13.123	90.000	88.454	33.160	36.882	61.2
87	16.329	82.000	80.014	33.560	36.743	61.3
88	19.623	97.000	94.120	33.190	38.141	61.3
89	9.801	73.000	71.960	33.120	35.774	61.3
90	13.366	88.000	86.248	34.030	36.864	61.2
91	16.227	81.000	78.675	34.020	37.699	61.2
92	19.916	96.000	93.009	34.060	38.591	61.2
93	9.823	77.000	76.210	33.890	36.117	61.2
94	13.222	92.000	90.144	32.990	35.428	61.2
95	16.667	84.000	82.032	33.140	36.980	61.2
96	19.519	99.000	96.550	33.560	37.014	61.2
97	9.822	71.500	69.434	33.440	37.035	61.2
98	13.213	86.000	84.355	33.910	37.150	61.2
99	16.343	78.000	76.128	33.810	37.687	61.2
100	19.738	93.000	90.430	34.020	38.942	61.2

ตารางที่ ข-8 ผลการทดลองที่มุมของชุดท่อ 55 องศา ในระบบที่มีการเพิ่มความชื้น

การทดลอง	ความเร็วอากาศ (m/s)	อุณหภูมิอากาศ (°C)		อุณหภูมิน้ำ (°C)		ความชื้นอากาศ (%RH)
		ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก	
1	9.981	70.000	68.368	33.561	38.669	85.1
2	13.243	85.000	81.964	34.134	39.224	85.2
3	16.568	78.000	76.112	34.985	37.564	85.2
4	19.452	93.000	91.003	34.150	39.425	85.2
5	9.547	74.000	73.210	33.128	36.721	85.2
6	13.24	89.000	87.353	32.154	34.360	85.2
7	16.785	81.250	78.356	33.650	36.997	85.1
8	19.248	93.000	91.550	34.114	39.152	85.2
9	9.364	72.000	71.213	33.245	35.114	85.3
10	13.542	87.000	84.210	33.854	37.445	85.3
11	16.421	79.000	77.450	32.975	36.500	85.3
12	19.897	94.000	91.332	33.195	36.178	85.2
13	9.774	76.000	73.945	32.458	36.997	85.2
14	13.156	91.000	89.222	33.225	36.365	85.2
15	16.985	83.000	81.001	34.369	37.998	85.2
16	20.41	98.000	94.215	33.548	38.784	85.2
17	9.542	71.000	70.354	33.546	34.968	85.0
18	14.012	86.000	84.369	33.785	36.005	85.2
19	16.231	78.000	74.546	35.142	39.669	85.3
20	19.823	93.250	89.978	32.124	38.145	85.2
21	9.512	75.000	73.350	33.256	35.871	82.0
22	13.658	90.500	88.224	33.145	37.686	85.3
23	17.015	82.000	79.348	34.125	38.425	85.3
24	19.254	97.000	94.154	34.695	38.150	85.3
25	9.441	73.000	71.112	33.005	35.500	85.3

การ ทดลอง	ความเร็วอากาศ (m/s)	อุณหภูมิอากาศ (°C)		อุณหภูมิน้ำ (°C)		ความชื้นอากาศ (%RH)
		ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก	
26	13.493	88.000	85.454	33.645	35.986	85.3
27	16.986	80.000	78.369	35.485	37.660	85.3
28	19.733	95.000	92.450	34.360	39.778	85.3
29	9.236	77.000	75.873	32.650	36.540	85.2
30	13.745	92.000	90.286	33.124	37.400	85.2
31	16.722	84.000	81.974	32.659	39.212	85.2
32	19.184	99.000	96.454	32.697	34.005	85.2
33	9.228	70.000	69.110	32.648	34.333	85.2
34	13.47	85.000	82.570	33.564	36.425	85.2
35	16.441	78.250	76.446	33.122	37.004	85.2
36	19.227	93.000	91.255	33.458	37.440	85.3
37	9.874	74.000	72.363	33.694	36.541	85.2
38	14.235	89.000	85.124	33.117	37.882	85.2
39	17.005	82.000	79.411	33.554	37.650	85.2
40	20.356	97.000	94.002	33.666	40.225	85.2
41	9.743	72.000	70.325	33.664	36.443	85.2
42	13.558	87.000	84.231	33.657	36.660	85.2
43	16.447	80.000	77.512	34.158	37.961	85.2
44	20.352	95.000	91.890	34.694	39.995	85.2
45	9.854	76.000	74.231	33.411	35.445	85.2
46	13.236	91.000	88.450	33.678	36.005	85.2
47	16.666	84.000	81.256	33.969	36.148	85.3
48	19.852	99.000	96.009	33.129	37.669	85.3
49	10.256	71.000	69.452	33.654	36.455	85.3
50	12.644	86.000	84.973	33.650	36.410	85.3

การ ทดลอง	ความเร็วอากาศ (m/s)	อุณหภูมิอากาศ (°C)		อุณหภูมิน้ำ (°C)		ความชื้นอากาศ (%RH)
		ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก	
51	16.887	79.000	77.500	34.656	38.323	85.3
52	19.326	94.000	91.002	32.227	39.886	85.2
53	10.254	75.000	73.500	32.747	35.009	85.2
54	13.447	90.000	87.126	32.877	36.458	85.2
55	16.458	83.000	80.452	32.666	38.664	85.2
56	19.223	98.000	95.333	32.648	39.025	85.2
57	9.745	73.250	71.982	33.125	35.620	85.2
58	13.209	88.500	86.034	33.124	37.681	85.2
59	16.455	81.000	79.085	33.699	37.458	85.2
60	19.724	96.000	93.666	34.500	40.006	85.3
61	9.521	77.250	75.121	34.150	37.151	85.3
62	13.265	92.000	90.254	34.020	37.654	85.3
63	16.754	85.000	83.025	33.690	37.636	85.2
64	19.638	100.000	97.004	33.457	41.234	85.2
65	9.97	70.000	68.636	33.650	37.320	85.2
66	13.422	85.000	83.745	35.114	36.778	85.2
67	16.587	78.000	75.000	34.656	38.585	85.2
68	19.123	93.000	90.960	34.215	39.458	85.2
69	9.477	74.000	72.364	33.200	35.445	85.2
70	13.159	89.000	87.554	33.520	38.772	85.2
71	16.474	81.250	79.650	33.652	37.984	85.2
72	20.654	96.250	93.312	33.330	38.006	85.2
73	10.365	72.750	70.222	33.654	37.950	85.2
74	14.101	87.000	85.334	33.781	37.483	85.2
75	16.441	80.000	78.450	33.119	37.694	85.2

การ ทดลอง	ความเร็วอากาศ (m/s)	อุณหภูมิอากาศ (°C)		อุณหภูมิน้ำ (°C)		ความชื้นอากาศ (%RH)
		ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก	
76	19.745	95.000	92.004	33.991	40.356	85.2
77	9.884	76.000	74.365	33.125	35.475	85.2
78	13.452	91.000	89.197	34.332	37.006	85.2
79	16.45	83.000	80.645	34.119	37.690	85.2
80	19.686	98.000	95.114	34.174	38.332	85.2
81	9.452	71.000	70.326	33.165	34.992	85.1
82	13.745	86.000	84.323	33.002	38.412	85.2
83	16.585	79.000	77.002	32.888	38.773	85.2
84	19.737	94.000	90.545	33.781	38.746	85.1
85	10.025	75.000	72.543	33.630	37.310	85.2
86	14.057	90.000	88.155	33.222	38.094	85.2
87	16.454	82.000	80.345	33.655	38.648	85.2
88	19.682	97.000	93.428	33.414	40.250	85.2
89	9.245	73.000	71.316	33.229	35.225	85.2
90	14.147	88.250	85.321	34.650	37.873	85.2
91	16.485	81.000	77.986	34.001	39.994	85.2
92	20.365	96.000	92.664	33.548	40.125	85.2
93	9.845	77.000	76.007	33.611	35.630	85.2
94	13.562	92.000	90.125	32.580	36.413	85.2
95	16.445	84.000	82.637	33.425	37.978	85.2
96	19.367	99.000	97.056	33.263	37.157	85.2
97	9.872	71.000	69.108	33.155	36.458	85.2
98	13.114	86.000	84.337	33.215	36.689	85.2
99	16.548	78.000	76.451	34.562	38.319	85.2
100	19.365	93.000	89.005	34.166	40.980	85.2

ภาคผนวก ค
ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม

ตารางที่ ค-1 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่มุมขดท่อ 25 องศา ในระบบที่มีการเพิ่มความชื้น

การทดลองที่	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ($w/m^2.K$)	
	การทดลอง	การทำนาย
1	154.643	108.304
2	181.457	161.719
3	221.498	199.107
4	265.032	257.836
5	124.259	143.965
6	151.096	177.869
7	238.718	233.802
8	246.942	236.427
9	112.506	114.502
10	182.958	199.289
11	235.204	265.247
12	244.524	296.137
13	121.048	141.566
14	154.608	147.881
15	217.28	200.625
16	255.85	275.955
17	119.149	112.309
18	161.535	175.525
19	251.237	240.299
20	244.851	265.696
21	108.981	111.878
22	165.519	155.129

การทดลองที่	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ($w/m^2.K$)	
	การทดลอง	การทำนาย
23	233.405	241.955
24	231.226	236.479
25	134.084	169.308
26	160.714	150.241
27	214.622	199.325
28	271.712	277.367
29	121.947	131.429
30	158.144	154.433
31	232.979	208.519
32	230.9	263.578
33	124.95	101.593
34	175.104	186.771
35	227.846	218.224
36	242.604	263.279
37	129.428	135.899
38	163.418	173.345
39	225.866	253.831
40	250.726	235.157
41	124.984	133.887
42	152.91	148.558
43	236.382	257.008
44	247.003	271.903
45	113.646	122.873
46	164.722	142.312
47	221.36	222.966
48	222.851	204.436
49	141.772	148.823

การทดลองที่	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ($w/m^2.K$)	
	การทดลอง	การทำนาย
50	169.223	166.531
51	221.676	235.659
52	256.981	260.082
53	118.457	114.489
54	144.833	137.502
55	245.61	225.173
56	235.901	232.38
57	114.862	112.495
58	177.355	216.096
59	221.875	195.158
60	224.3	219.48
61	137.273	145.786
62	155.666	152.019
63	206.497	182.99
64	252.224	256.273
65	132.945	140.449
66	160.404	155.97
67	243.51	255.538
68	240.734	225.072
69	119.69	126.076
70	162.592	164.621
71	216.503	249.874
72	232.145	233.859
73	147.781	146.769
74	160.808	131.556
75	217.129	203.556
76	256.476	233.502

การทดลองที่	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ($w/m^2.K$)	
	การทดลอง	การทำนาย
77	118.257	106.746
78	146.46	137.053
79	232.941	266.518
80	235.943	231.965
81	115.437	127.134
82	183.313	187.85
83	242.343	246.844
84	243.619	245.891
85	136.153	167.98
86	161.983	156.13
87	210.645	232.234
88	256.773	272.162
89	125.422	142.589
90	155.468	183.527
91	248.212	283.874
92	245.008	258.158
93	118.036	121.465
94	166.679	176.344
95	220.378	235.679
96	224.986	241.215
97	134.172	142.597
98	159.965	179.676
99	225.368	231.626
100	274.677	291.666

ตารางที่ ค-2 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่มุมของข้อต่อ 35 องศา ในระบบที่มีการเพิ่มความชื้น

การทดลองที่	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ($w/m^2.K$)	
	การทดลอง	การทำนาย
1	139.003	136.024
2	151.498	140.559
3	191.868	152.096
4	226.831	238.359
5	111.770	139.806
6	134.432	136.774
7	203.194	196.959
8	211.479	231.544
9	115.565	125.520
10	151.033	144.372
11	204.333	195.783
12	209.082	204.783
13	120.689	130.813
14	142.377	127.200
15	183.735	184.296
16	211.593	236.637
17	105.634	95.351
18	136.561	125.329
19	216.557	222.678
20	207.259	213.855
21	110.828	127.644
22	148.289	104.030
23	198.281	201.925
24	202.480	205.354
25	113.820	120.659

การทดลองที่	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ($w/m^2.K$)	
	การทดลอง	การทำนาย
26	139.747	140.143
27	188.576	197.315
28	225.332	222.073
29	111.732	100.073
30	134.445	125.898
31	199.529	184.457
32	197.096	209.521
33	103.700	139.533
34	161.896	171.132
35	196.765	193.374
36	203.468	210.089
37	121.142	167.793
38	147.278	195.124
39	196.712	197.666
40	217.093	233.662
41	111.018	113.342
42	135.908	141.284
43	201.084	208.788
44	204.917	202.561
45	100.552	106.839
46	153.869	146.730
47	184.987	185.387
48	195.886	215.173
49	131.704	169.528
50	150.170	178.993

การทดลองที่	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ($w/m^2.K$)	
	การทดลอง	การทำนาย
51	182.280	167.603
52	216.085	207.110
53	110.047	136.620
54	136.500	131.595
55	207.554	228.518
56	202.347	219.411
57	103.603	104.063
58	158.372	142.744
59	198.340	195.270
60	195.451	184.299
61	122.937	108.866
62	134.860	143.097
63	181.655	183.899
64	207.656	180.935
65	120.528	102.001
66	138.574	128.254
67	208.537	210.040
68	200.352	234.086
69	101.403	103.804
70	153.172	189.672
71	192.678	170.956
72	199.245	206.210
73	126.279	108.468
74	142.422	137.684
75	185.743	178.058

การทดลองที่	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ($w/m^2.K$)	
	การทดลอง	การทำนาย
76	210.516	210.742
77	105.881	96.710
78	133.818	126.446
79	192.708	197.321
80	194.263	166.551
81	99.377	85.565
82	161.303	160.967
83	202.320	198.739
84	200.012	212.509
85	124.371	117.267
86	139.904	140.303
87	187.090	169.026
88	209.165	228.654
89	104.752	108.927
90	138.363	132.958
91	214.808	212.472
92	202.495	226.644
93	106.335	109.688
94	151.061	143.067
95	191.406	187.231
96	194.731	203.154
97	123.566	128.256
98	145.740	153.713
99	189.247	204.867
100	224.995	225.953

ตารางที่ ค-3 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่มุมของข้อต่อ 45 องศา ในระบบที่มีการเพิ่มความชื้น

การทดลองที่	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ($w/m^2.K$)	
	การทดลอง	การทำนาย
1	116.178	115.741
2	127.872	119.847
3	158.141	135.517
4	179.736	168.043
5	96.375	87.059
6	129.388	120.436
7	168.971	163.654
8	175.111	159.217
9	94.424	88.251
10	137.947	135.692
11	163.661	159.794
12	170.170	174.208
13	103.992	115.353
14	120.014	108.446
15	152.194	138.982
16	166.379	136.148
17	97.406	106.721
18	119.338	113.659
19	174.105	198.620
20	173.816	180.495
21	93.799	105.323
22	128.399	100.375
23	167.517	171.815
24	166.798	167.502
25	101.681	121.514

การทดลองที่	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ($w/m^2.K$)	
	การทดลอง	การทำนาย
26	126.300	121.454
27	152.514	146.670
28	182.712	161.699
29	96.088	99.131
30	118.770	115.807
31	167.043	152.662
32	162.546	162.370
33	94.656	101.830
34	131.499	165.013
35	162.380	152.785
36	162.055	167.777
37	104.508	142.241
38	123.614	127.805
39	166.695	164.837
40	177.077	179.257
41	99.247	99.348
42	122.292	101.151
43	168.222	166.996
44	166.299	189.221
45	92.241	88.373
46	129.261	106.448
47	160.520	151.726
48	157.324	156.740
49	107.876	110.530
50	123.842	106.907

การทดลองที่	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ($w/m^2.K$)	
	การทดลอง	การทำนาย
51	158.561	150.313
52	174.399	155.782
53	100.000	85.160
54	117.660	110.122
55	168.741	158.705
56	168.196	163.190
57	97.815	92.556
58	134.492	134.406
59	159.793	158.785
60	163.187	155.925
61	99.309	95.796
62	122.443	122.295
63	150.008	149.362
64	168.195	164.137
65	107.600	100.171
66	121.758	113.786
67	170.027	195.372
68	167.860	155.290
69	89.522	95.768
70	124.816	113.708
71	159.198	157.472
72	160.504	155.703
73	111.142	101.697
74	126.491	129.384
75	156.335	151.150

การทดลองที่	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ($w/m^2.K$)	
	การทดลอง	การทำนาย
76	175.411	184.154
77	94.8244	98.0825
78	112.238	101.538
79	161.32	151.595
80	160.776	163.286
81	90.1235	101.821
82	133.485	106.014
83	167.888	159.018
84	166.731	166.674
85	112.495	110.82
86	121.459	122.689
87	155.647	142
88	169.707	179.558
89	103.679	106.36
90	126.743	128.807
91	169.837	172.65
92	173.213	184.542
93	94.7998	95.2243
94	127.029	129.896
95	156.314	156.234
96	159.183	156.452
97	108.349	125.6
98	125.275	139.577
99	160.746	143.778
100	182.862	190.551

ตารางที่ ค-4 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่มุมของข้อต่อ 55 องศา ในระบบที่มีการเพิ่มความชื้น

การทดลองที่	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ($w/m^2.K$)	
	การทดลอง	การทำนาย
1	100.153	122.527
2	109.014	116.5
3	131.264	127.697
4	141.317	130.486
5	86.5214	89.7508
6	100.209	98.7407
7	135.614	136.563
8	134.21	143.999
9	82.1526	84.7458
10	113.825	109.296
11	132.627	129.1
12	135.266	143.895
13	91.2878	108.548
14	101.459	108.176
15	127.835	129.812
16	140.524	107.858
17	87.0277	87.0837
18	106.394	98.026
19	137.819	139.275
20	139.219	165.456
21	82.6421	77.8029
22	109.433	108.961
23	132.33	143.852
24	128.565	117.84
25	88.431	88.1258

การทดลองที่	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ($w/m^2.K$)	
	การทดลอง	การทำนาย
26	104.740	106.811
27	128.860	107.329
28	143.030	155.845
29	82.749	67.158
30	102.464	95.024
31	134.268	148.348
32	130.686	111.322
33	83.194	87.833
34	111.600	112.868
35	131.304	128.857
36	130.578	106.176
37	95.163	84.823
38	112.249	119.634
39	129.966	146.187
40	142.277	152.823
41	89.511	89.338
42	104.018	123.219
43	133.804	163.135
44	138.122	138.375
45	83.201	76.531
46	107.802	99.433
47	129.915	148.175
48	130.881	157.143
49	98.519	90.215
50	100.719	104.734

การทดลองที่	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ($w/m^2.K$)	
	การทดลอง	การทำนาย
51	130.024	114.423
52	137.614	129.119
53	89.921	82.1657
54	99.5507	101.978
55	135.455	141.224
56	133.164	142.903
57	86.306	87.4969
58	108.584	117.38
59	130.384	127.269
60	132.043	143.683
61	86.7657	94.8986
62	100.376	100.816
63	123.921	122.892
64	138.397	137.235
65	94.1769	93.6911
66	105.102	99.9256
67	137.977	106.195
68	133.394	130.857
69	82.2811	75.2543
70	105.47	105.881
71	128.31	115.522
72	134.692	148.946
73	99.9408	93.5179
74	111.33	109.801
75	127.609	116.905

การทดลองที่	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ($w/m^2.K$)	
	การทดลอง	การทำนาย
76	140.382	164.266
77	87.1154	74.6442
78	99.3845	78.583
79	130.737	143.377
80	132.146	153.754
81	82.8184	81.6227
82	116.257	102.832
83	134.365	147.466
84	135.18	148.538
85	94.784	92.3554
86	108.789	99.016
87	125.94	122.416
88	138.476	146.851
89	83.6363	74.9976
90	106.294	115.179
91	137.216	110.575
92	140.096	150.793
93	84.1964	89.1406
94	107.734	105.744
95	127.423	118.566
96	127.566	104.25
97	94.4467	105.986
98	103.582	94.1556
99	128.223	118.963
100	142.391	144.005

ตารางที่ ค-5 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่มุมของข้อต่อ 25 องศา ในระบบที่ไม่มีการเพิ่มความชื้น

การทดลองที่	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ($w/m^2.K$)	
	การทดลอง	การทำนาย
1	151.321	124.241
2	169.534	150.596
3	224.237	221.073
4	256.062	223.947
5	127.543	107.447
6	150.543	143.22
7	240.801	237.967
8	249.977	250.003
9	107.002	104.968
10	176.039	175.541
11	237.379	236.322
12	227.549	234.964
13	123.581	122.287
14	149.005	137.502
15	215.13	219.359
16	248.333	247.201
17	119.147	102.49
18	163.468	149.065
19	244.302	220.347
20	245.067	220.452
21	112.197	114.156
22	159.696	152.937
23	231.232	245.43
24	219.863	213.241
25	117.755	119.676

การทดลองที่	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ($w/m^2.K$)	
	การทดลอง	การทำนาย
26	156.742	143.603
27	203.149	203.339
28	258.407	257.534
29	112.799	108.553
30	152.098	146.18
31	227.297	220.962
32	232.169	218.133
33	117.732	105.723
34	167.244	152.484
35	226	202.288
36	237.668	201.748
37	122.193	116.083
38	172.177	171.947
39	222.417	254.56
40	254.259	231.342
41	135.062	147.989
42	169.338	165.084
43	226.704	231.055
44	230.249	246.97
45	101.644	100.614
46	173.385	163.912
47	229.448	222.886
48	225.901	208.682
49	142.933	133.942
50	156.325	144.292

การทดลองที่	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ($w/m^2.K$)	
	การทดลอง	การทำนาย
51	222.917	223.546
52	251.853	225.736
53	131.224	148.894
54	145.391	143.636
55	239.247	247.817
56	238.91	236.385
57	119.906	106.57
58	166.095	187.384
59	220.365	235.784
60	221.598	251.287
61	118.573	130.347
62	154.606	165.271
63	203.604	192.624
64	244.452	243.609
65	131.816	145.486
66	154.25	142.331
67	244.505	260.057
68	241.394	247.959
69	117.488	114.358
70	161.406	156.373
71	221.917	217.149
72	228.094	229.766
73	139.97	112.024
74	171.311	164.29
75	222.535	238.166

การทดลองที่	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ($w/m^2.K$)	
	การทดลอง	การทำนาย
76	248.992	241.296
77	120.501	123.227
78	140.774	144.12
79	228.645	223.803
80	233.463	229.129
81	117.718	118.897
82	181.295	196.438
83	234.806	212.297
84	229.9	214.044
85	138.726	137.543
86	173.723	186.345
87	210.328	181.36
88	253.213	232.661
89	120.741	114.645
90	168.727	166.948
91	245.325	259.358
92	244.329	222.466
93	114.332	115.089
94	164.968	187.88
95	223.952	226.001
96	220.877	233.084
97	129.095	145.668
98	156.562	142.078
99	220.619	224.464
100	272.76	289.804

ตารางที่ ค-6 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่มุมของข้อต่อ 35 องศา ในระบบที่ไม่มีการเพิ่มความชื้น

การทดลองที่	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ($w/m^2.K$)	
	การทดลอง	การทำนาย
1	124.614	106.617
2	143.54	149.789
3	192.604	192.193
4	212.486	213.519
5	116.472	129.953
6	129.273	130.21
7	206.146	191.002
8	212.704	194.446
9	100.319	104.809
10	158.881	158.326
11	195.609	191.238
12	196.204	213.28
13	110.143	122.817
14	134.494	130.452
15	181.861	187.004
16	206.077	219.996
17	121.351	118.716
18	142.333	151.924
19	209.474	200.082
20	213.989	218.166
21	99.9172	88.4958
22	142.815	136.872
23	198.837	195.989
24	195.016	197.647
25	110.782	105.688

การทดลองที่	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ($w/m^2.K$)	
	การทดลอง	การทำนาย
26	136.362	132.024
27	179.602	173.272
28	220.565	215.985
29	104.381	106.145
30	133.121	136.005
31	201.824	202.49
32	199.12	191.54
33	113.98	122.607
34	149.387	134.129
35	188.825	180.749
36	202.494	200.407
37	122.509	113.367
38	150.742	144.281
39	178.552	177.341
40	215.587	204.86
41	116.042	110.597
42	134.845	124.174
43	195.323	184.414
44	201.19	209.919
45	94.7973	84.8662
46	147.793	144.53
47	184.547	198.275
48	189.072	183.488
49	112.49	123.057
50	145.8	137.462

การทดลองที่	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ($w/m^2.K$)	
	การทดลอง	การทำนาย
51	183.368	197.267
52	225.159	219.047
53	113.769	106.711
54	128.266	114.871
55	208.647	197.035
56	197.951	194.27
57	111.947	105.209
58	155.263	141.323
59	195.184	172.196
60	189.46	189.168
61	105.398	122.283
62	142.136	137.814
63	172.313	176
64	211.584	193.381
65	127.633	118.787
66	155.956	138.136
67	222.256	224.66
68	203.541	191.644
69	123.478	106.445
70	146.656	141.522
71	192.038	177.069
72	193.579	181.075
73	129.583	112.277
74	156.043	149.439
75	191.198	186.999

การทดลองที่	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ($w/m^2.K$)	
	การทดลอง	การทำนาย
76	216.933	216.259
77	110.589	108.805
78	132.46	129.847
79	201.639	201.155
80	197.438	209.613
81	107.682	104.744
82	155.684	146.043
83	206.691	205.971
84	199.13	199.28
85	121.364	135.973
86	141.892	144.682
87	183.499	157.129
88	220.287	187.752
89	113.248	105.494
90	132.068	127.625
91	209.763	200.035
92	207.826	206.24
93	100.317	105.978
94	143.999	105.825
95	183.32	176.76
96	183.84	185.981
97	112.762	124.032
98	145.707	125.202
99	189.71	161.601
100	225.047	217.125

ตารางที่ ค-7 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่มุมของข้อต่อ 45 องศา ในระบบที่ไม่มีการเพิ่มความชื้น

การทดลองที่	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ($w/m^2.K$)	
	การทดลอง	การทำนาย
1	115.911	103.777
2	129.921	125.108
3	160.875	157.86
4	178.875	165.84
5	105.493	98.1411
6	122.028	103.815
7	164.022	165.781
8	170.006	150.515
9	93.8999	96.7276
10	132.877	109.257
11	164.281	141.704
12	166.468	157.141
13	97.598	82.9901
14	121.958	103.887
15	150.304	141.435
16	166.362	154.75
17	106.847	99.4674
18	116.745	105.011
19	171.884	165.736
20	179.602	156.37
21	96.4218	97.1637
22	126.231	121.84
23	163.437	154.326
24	155.007	146.475
25	103.881	97.9387

การทดลองที่	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ($w/m^2.K$)	
	การทดลอง	การทำนาย
26	122.75	104.003
27	155.881	145.275
28	177.44	164.13
29	101.055	98.1293
30	114.455	108.445
31	160.7	157.308
32	162.611	142.727
33	98.985	87.375
34	130.681	126.719
35	160.119	143.852
36	165.489	155.323
37	107.621	89.6985
38	128.268	115.379
39	155.78	126.038
40	169.347	150.843
41	97.5579	107.371
42	116.862	102.098
43	163.271	176.645
44	166.555	144.472
45	88.0155	78.6705
46	130.943	124.171
47	157.027	151.788
48	155.653	153.476
49	101.022	95.811
50	122.837	122.956

การทดลองที่	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ($w/m^2.K$)	
	การทดลอง	การทำนาย
51	153.022	148.314
52	177.169	169.523
53	101.156	101.104
54	114.364	100.576
55	165.556	172.438
56	169.159	153.527
57	91.0622	91.6173
58	134.966	122.92
59	157.073	148.544
60	158.173	147.732
61	99.9572	84.2713
62	121.838	109.214
63	149.501	129.882
64	169.84	143.832
65	115.592	115.586
66	126.357	121.698
67	169.037	185.988
68	166.676	179.944
69	108.423	98.2572
70	128.103	106.193
71	155.178	142.213
72	157.04	137.179
73	117.277	111.091
74	127.752	129.178
75	159.375	138.288

การทดลองที่	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ($w/m^2.K$)	
	การทดลอง	การทำนาย
76	176.847	187.391
77	97.8751	85.5412
78	119.13	107.151
79	158.87	134.404
80	162.406	167.077
81	93.8926	96.2081
82	131.121	137.636
83	161.339	160.77
84	166.933	149.302
85	106.53	111.198
86	126.64	114.863
87	151.61	172.612
88	176.793	197.352
89	101.391	93.3345
90	114.763	114.95
91	170.155	193.78
92	168.172	172.878
93	90.6689	86.2747
94	123.301	111.878
95	151.947	148.509
96	159.036	143.955
97	103.206	109.157
98	127.783	127.257
99	157.118	156.456
100	176.459	168.271

ตารางที่ ค-8 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่มุมของข้อต่อ 55 องศา ในระบบที่ไม่มีการเพิ่มความชื้น

การทดลองที่	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ($w/m^2.K$)	
	การทดลอง	การทำนาย
1	98.2912	111.918
2	106.504	126.668
3	128.601	123.852
4	142.309	147.471
5	88.5554	86.7392
6	99.3774	82.1126
7	134.808	132.449
8	135.537	142.32
9	86.0455	85.5308
10	109.613	108.429
11	131.898	130.055
12	132.531	121.51
13	91.1917	81.3964
14	100.201	102.332
15	123.922	120.022
16	136.509	124.13
17	88.632	89.2564
18	103.651	103.375
19	136.956	141.511
20	137.64	133.183
21	85.2673	88.499
22	104.323	104.695
23	126.562	139.971
24	126.744	136.663
25	89.4502	83.3395

การทดลองที่	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ($w/m^2.K$)	
	การทดลอง	การทำนาย
26	101.647	101.979
27	124.277	116.247
28	140.538	144.909
29	86.6808	90.3031
30	98.0477	92.0934
31	131.508	112.717
32	131.419	114.185
33	88.1351	86.3543
34	107.935	92.2375
35	129.391	124.835
36	131.16	113.786
37	94.3802	99.9068
38	105.283	86.1248
39	125.38	124.656
40	135.964	150.403
41	90.8827	89.3958
42	101.597	91.8151
43	132.062	136.133
44	133.77	141.521
45	81.9041	75.1966
46	105.652	102.061
47	126.587	105.863
48	127.907	118.705
49	93.5795	82.0483
50	104.217	89.1542

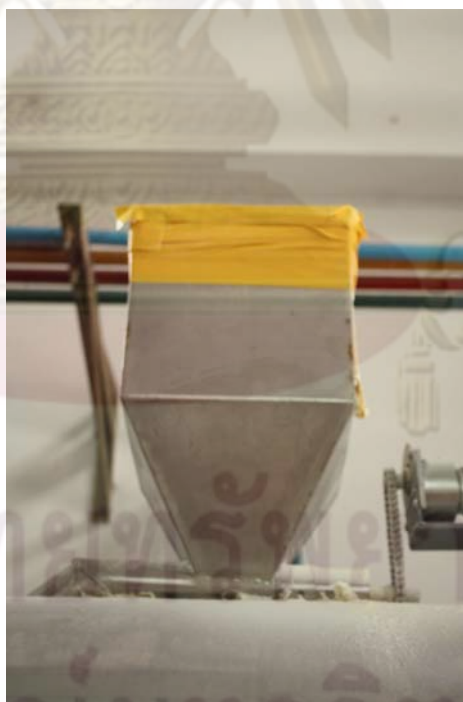
การทดลองที่	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ($w/m^2.K$)	
	การทดลอง	การทำนาย
51	126.597	127.057
52	138.578	157.315
53	85.5645	80.8128
54	96.4198	81.456
55	134.007	121.38
56	134.912	138.034
57	86.0985	87.1422
58	107.45	85.479
59	129.286	121.49
60	131.533	150.402
61	89.8901	109.944
62	99.2364	89.0818
63	122.333	118.621
64	137.81	150.679
65	92.0907	85.7741
66	102.644	90.1462
67	135.862	140.358
68	135.918	145.056
69	82.8026	80.9615
70	104.399	107.896
71	127.537	116.47
72	130.297	141.434
73	94.2927	109.892
74	103.218	93.0399
75	126.67	130.875

การทดลองที่	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ($w/m^2.K$)	
	การทดลอง	การทำนาย
76	139.257	167.09
77	87.0862	87.6271
78	96.5876	89.1342
79	129.468	106.411
80	131.176	132.019
81	85.1817	77.7384
82	111.26	103.215
83	132.956	133.645
84	134.349	152.103
85	91.6868	85.5441
86	101.578	95.7386
87	124.448	121.685
88	136.997	158.828
89	87.5451	81.5518
90	100.045	91.647
91	134.525	147.419
92	137.024	138.147
93	83.2077	84.6004
94	104.585	94.4362
95	128.028	122.289
96	127.655	124.632
97	92.9042	105.274
98	103.48	103.243
99	126.298	134.942
100	142.664	157.672

ภาคผนวก ง
เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อขด



รูปที่ ง-1 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อขด



รูปที่ ง-2 ชุดป้อนฝุ่นผงซักฟอก



รูปที่ ง-3 ลักษณะการวางท่อขดในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน



รูปที่ ง-4 ไซโคลน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ง-5 ไมโครที่ใช้ในการควบคุมเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน



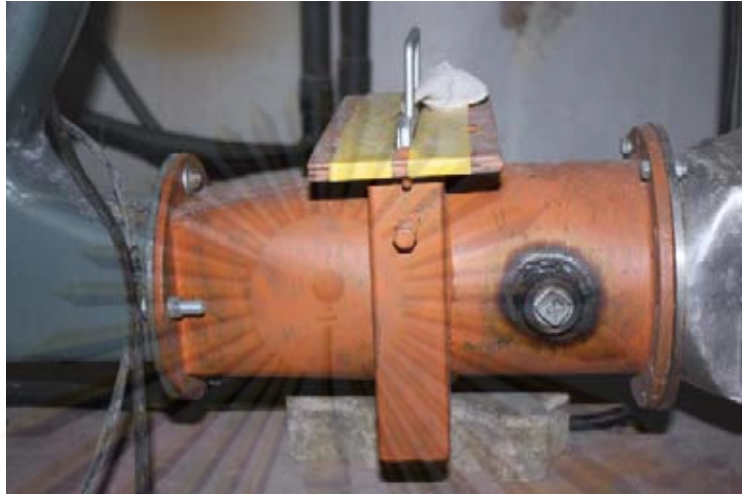
รูปที่ ง-6 เครื่องเป่าลม (Blower)



รูปที่ ง-7 เครื่องทำความร้อน (Heater)



รูปที่ ง-8 ถังเก็บน้ำ



รูปที่ ง-9 ส่วนป้องกันความชื้น



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย มีนกร พุนดี เกิดเมื่อวันที่ 12 มกราคม พุทธศักราช 2527 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาที่โรงเรียนเตรียมอุดมศึกษาพัฒนาการในปีการศึกษา 2543 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เมื่อปีการศึกษา 2547 เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2550



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย