

การศึกษาเชิงทดลองของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อโดยใช้การระเหยสำหรับชุดความแน่น  
ของโรงน้ำแข็ง



นาย อธิกร วงศธนวิศ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2549

ISBN 974-14-2026-9

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

AN EXPERIMENTAL STUDY ON THE EVAPORATIVE TUBE HEAT  
EXCHANGER FOR CONDENSING UNIT OF AN ICE FACTORY

Mr. Atikorn Wongsatanawarid



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2006

ISBN 974-14-2026-9



อชิกร วงศรณวริศ : การศึกษาเชิงทดลองของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อโดยใช้การระเหยสำหรับชุดควบแน่นของโรงงานน้ำแข็ง. (AN EXPERIMENTAL STUDY ON THE EVAPORATIVE TUBE HEAT EXCHANGER FOR CONDENSING UNIT OF AN ICE FACTORY) อ. ที่ปรึกษา:รศ.ดร.มานิจ ทองประเสริฐ, 138 หน้า. ISBN 974-14-2026-9

เป็นการศึกษาปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตของโรงงานผลิตน้ำแข็งในส่วนของกาถ่ายเทความร้อนของชุดควบแน่น โดยมุ่งเน้นการศึกษาไปที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อเปลือยเพื่อศึกษาดัชนีประสิทธิผลต่อการถ่ายเทความร้อนเพื่อนำไปสู่การออกแบบที่เหมาะสมต่อการใช้งานด้านการระบายความร้อนเป็นหลัก โดยอาศัยการทำการทดลองเพื่อศึกษาผลของตัวแปรที่ส่งผลการถ่ายเทความร้อนภายนอกอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อเปลือย จากการจำลองการถ่ายเทความร้อนของฟิล์มน้ำภายนอกท่อและน้ำร้อนภายในท่อกับตัวแปรต่างๆคือ อัตราการไหลของฟิล์มน้ำ, รูปแบบการไหล, ระยะห่างระหว่างท่อและความเร็วลม ทดลองกับท่อทองแดงขนาด 12.8 มม.และ 19 มม.

ผลการทดลองที่ได้พบว่าอัตราการไหลของฟิล์มน้ำเป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมากที่สุดซึ่งอัตราการไหลฟิล์มที่น้อยกว่า 0.1 kg/m.s จะทำให้เกิดรูปแบบการไหลแบบ droplet และเมื่อเพิ่มอัตราการไหลฟิล์มมากขึ้นจะทำให้รูปแบบฟิล์มเปลี่ยนเป็นแบบ column และเมื่อเพิ่มอัตราการไหลมากกว่า 0.3 kg/m.s จะทำให้เกิดการไหลแบบ liquid sheet ซึ่งอัตราการไหลเพิ่มขึ้นจาก 0.1 ถึง 0.3 kg/m.s จะทำให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงขึ้น 36% แต่เมื่อทำการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของท่อขนาด 19 มม.จะมีค่าน้อยกว่าท่อขนาด 12.8 มม.ประมาณ 15-35 % เมื่อระยะห่างระหว่างท่อเพิ่มขึ้นคิดเป็นค่า  $s/d$  จาก 1.4 เป็น 2.5และ3.5 ตามลำดับพิจารณาที่อัตราการไหล 0.2 kg/m.s จะได้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนลดลงประมาณ 7 – 8 % ที่ท่อขนาด 12.8 มม.และลดลง 20.4% ที่ท่อขนาด 19 มม. ส่วนผลการเพิ่มความเร็วลมในการศึกษานี้คือ 0.96 , 1.2 และ 1.45 m/s จะส่งผลส่วนใหญ่ทำให้การถ่ายเทความร้อนแยกลงเนื่องจากส่งผลกระทบต่ออัตราการไหลฟิล์มมากขึ้นโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อค่า  $s/d$  เพิ่มขึ้น

โดยสรุปแล้วการถ่ายเทความร้อนบนท่อเรียบแนวนอนนี้จะมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงเมื่ออัตราการไหลฟิล์มสูงขึ้นและขนาดของท่อที่เล็กกว่าโดยมีระยะห่างของจุดศูนย์กลางท่อไม่เกิน 2 เท่า ซึ่งจะลดปัญหาการรบกวนการไหลฟิล์มจากลมและสภาวะแวดล้อมอื่นๆ โดยความเร็วลมที่เหมาะสมไม่ควรไปทำลายรูปแบบการไหลของฟิล์ม

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
ปีการศึกษา 2549

ลายมือชื่อนิสิต..... *DN V.*  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... *ดร.มานิจ ทองประเสริฐ*

## 467-0393821 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEY WORD: EVAPORATIVE COOLING / HORIZONTAL TUBE / CONDENSING UNIT / ICE FACTORY

ATIKORN WONGSATANAWARID : AN EXPERIMENTAL STUDY ON THE EVAPORATIVE TUBE  
HEAT EXCHANGER FOR CONDENSING UNIT OF AN ICE FACTORY .

THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF.DR.MANIT THONGPRASERT, 138pp.

ISBN 974-14-2026-9

This research is a study of heat transfer enhancement in the direct-contact evaporative condensing unit using in an ice factory. The objective is to investigate the variation of heat transfer coefficient of the direct evaporative cooling for a condensing unit with the film flow rate , film pattern , distance between pipes , and air velocity. The experiment is conducted by scaling the direct-contact condensing unit down to laboratory scale. The copper tube diameter 12.8 mm. and 19.0 mm. are available in the experiment

The result indicates that the film flow rate has the strongest effective on the heat transfer coefficient. When film flow rate is less than 0.1 kg/m.s , it will generate droplet flow pattern. When the flow rate increases up to 0.3 kg/m.s the column flow pattern will form. If the flow rate is over 0.3 kg/m.s , the liquid sheet flow pattern will appear. When film flow rate raises from 0.1 to 0.3 , the heat transfer coefficient increases by 36%. By comparing the tube sizes , it is found that the heat transfer coefficient of the 19-mm pipe is lower than the 12.8-mm pipe by 15-35%. At the same film flow rate , when the distance-to-diameter ratio ( $s/d$ ) increases from 1.4 , 2.5 to 3.5 , the heat transfer coefficient will decrease by 7-8% for the 12.8-mm pipe , and by 20.4% for the 19-mm pipe. In case of the air velocity varied from 0.96 , 1.2 and 1.45 m/s , the heat transfer coefficient will reduce because of the eruption of the film pattern , especially for the higher distance-to-diameter ratio case.

It is conclude that the heat transfer coefficient on the horizontal tube is maximized when the film flow rate is higher , the tube size is smaller , and the distance-to-diameter ratio less than 2 . Under this condition, the eruption of the film pattern from the improper air velocity is prevented

Department Mechanical Engineering

Field of study Mechanical Engineering

Academic year 2006

Student's signature.....

Advisor's signature.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของอาจารย์  
รองศาสตราจารย์ ดร. มานิจ ทองประเสริฐ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้สนับสนุนทั้ง  
เครื่องมือ-อุปกรณ์ ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ในการวิจัยด้วยดีตลอดมา อีกทั้งขอขอบคุณ  
อาจารย์ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์ อาจารย์ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิตติน  
แดงเที่ยง ซึ่งเป็นคณะกรรมการวิทยานิพนธ์ที่ให้คำแนะนำปรึกษาในปัญหาทุกด้าน และ รอง  
ศาสตราจารย์ อุดชากร จิรกาลวสาน ประธานกรรมการวิทยานิพนธ์อาจารย์ผู้ให้คำแนะนำอย่างดีใน  
สิ่งที่ท่านมีประสบการณ์เชี่ยวชาญในด้านที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณอาจารย์ทุกๆท่านที่ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลที่ได้ประสิทธิ์ประสาท  
ความรู้และให้คำแนะนำ รวมถึงกำลังใจแก่ข้าพเจ้าตลอดการวิจัยครั้งนี้

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ที่ได้ให้โอกาส  
และสนับสนุนให้กำลังใจแก่ข้าพเจ้าเสมอมา

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญภาพ.....	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินงานวิจัย.....	4
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ทฤษฎีวัฏจักรกำลังไออัดตัว.....	5
2.2 ทฤษฎีการไหลสองสถานะ.....	7
2.2.1 การไหลสองสถานะแบบวงแหวน.....	9
2.2.2 การควบแน่นของการไหลสองสถานะ.....	11
2.2.3 แบบจำลองในการหา void fraction.....	12
2.2.3.1 แบบจำลองการไหลเนื้อเดียว.....	12
2.2.3.2 แบบจำลอง Rouhani-Axelsson.....	13
2.2.3.3 แบบจำลองลอการิทึมเฉลี่ย.....	14
2.3 การหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉพาะที่ของการควบแน่นภายในท่อเรียบ แนวนอน.....	15
2.4 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน โดยการวิเคราะห์ทางทฤษฎี.....	20
2.5 การถ่ายเทความร้อนโดยการระเหย.....	25
2.5.1 รูปแบบการไหลของฟิล์ม.....	25
2.5.2 ความดันไอน้ำในอากาศ.....	26
2.5.3 ความเร็วอากาศ.....	26

	หน้า
2.6 แบบจำลองการคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของฟิล์มน้ำที่ไหลผ่าน ท่อแนวนอน.....	27
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	29
บทที่ 3 วิธีการทดลองและอุปกรณ์การทดลอง.....	32
3.1 วิธีการทดลอง.....	32
3.2 ขั้นตอนการทดลอง.....	34
3.3 อุปกรณ์การทดลอง.....	38
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	43
4.1 ผลการทดลอง.....	43
4.2 การคำนวณผลการทดลอง.....	46
บทที่ 5 วิเคราะห์ผลการทดลอง.....	50
5.1 วิเคราะห์ผลการทดลอง.....	50
5.1.1 ผลของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนกับเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ.....	50
5.1.2 ผลของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนกับอัตราการไหลและรูปแบบ การไหลฟิล์ม.....	51
5.1.3 ผลของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนกับระยะห่างระหว่างท่อ.....	52
5.1.4 ผลของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนกับความเร็วลม.....	53
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัย.....	56
6.1 สรุปผลการทดลอง.....	56
6.2 ข้อบกพร่องของงานวิจัยและแนวทางแก้ไข.....	57
6.3 แนวทางการประยุกต์ใช้เพื่อการออกแบบ.....	57
6.4 แนวทางการพัฒนาการวิจัย.....	58
รายการอ้างอิง.....	59
ภาคผนวก.....	60
ภาคผนวก ก. ข้อมูลการทดลองและผลการทดลอง.....	61
ภาคผนวก ข. ผลการคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน.....	116
ภาคผนวก ค. ตารางคุณสมบัติของน้ำ.....	135
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	138



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 4.1 แสดงช่วงข้อมูลจากการทดลองของท่อทองแดงขนาด 12.8 มม.....	45
ตารางที่ 4.2 แสดงช่วงข้อมูลจากการทดลองของท่อทองแดงขนาด 19 มม.....	45
ตารางที่ 4.3 ผลการคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของท่อขนาด 12.8 มม.....	47
ตารางที่ 4.4 ผลการคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของท่อขนาด 19 มม.....	48
ตารางที่ 5.1 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ได้จากการคำนวณโดยสมการแนวโน้ม ที่ได้จากการทดลองของท่อขนาด 12.8 มม.....	51
ตารางที่ 5.2 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ได้จากการคำนวณโดยสมการแนวโน้ม ที่ได้จากการทดลองของท่อขนาด 19 มม. ....	52



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 แผนการระบบไอ้อัดตัวอย่างง่ายและอุปกรณ์สำคัญในระบบ.....	6
รูปที่ 2.2 แผนภาพความดัน-เอนทาลปี ของระบบไอ้อัดตัวในอุดมคติ.....	7
รูปที่ 2.3 แสดงการไหลสองสถานะในลักษณะต่างๆ.....	8
รูปที่ 2.4 แผนผังการไหลของแอมโมเนีย.....	9
รูปที่ 2.5 ภาพที่ถ่ายจากการทดลองแสดงการไหลแบบวงแหวนของแอมโมเนีย.....	10
รูปที่ 2.6 ค่าความถูกต้องของการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน โดยวิธีแบบจำลองการไหลเนื้อเดียว สำหรับสารทำความเย็นชนิดต่างๆ.....	12
รูปที่ 2.7 ค่าความถูกต้องของการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน โดยวิธีแบบจำลอง Rouhani-Axelsson สำหรับสารทำความเย็นชนิดต่างๆ.....	13
รูปที่ 2.8 6 ค่าความถูกต้องของการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน โดยวิธีแบบจำลองลอการิทึมเฉลี่ย สำหรับสารทำความเย็นชนิดต่างๆ.....	14
รูปที่ 2.9 แสดงโครงสร้างของรูปแบบการไหลสองสถานะ.....	15
รูปที่ 2.10 แสดงแบบจำลองการหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของการไหลสองสถานะ.....	16
รูปที่ 2.11 แสดงลักษณะทางกายภาพของการไหลแบบวงแหวน.....	20
รูปที่ 2.12 ลักษณะการไหลของฟิล์มน้ำผ่านท่อเรียบแนวนอนแบบต่างๆ.....	26
รูปที่ 2.13 แสดงภาพจำลองการถ่ายเทความร้อนและมวลของฟิล์มที่ไหลผ่านท่อแนวนอน.....	27
รูปที่ 2.14 ภาพจำลองอุปกรณ์ทดลองในงานวิจัยของ Armbruster และ Mitrovic.....	29
รูปที่ 3.1 ภาพระบบจำลองเพื่อศึกษาการถ่ายเทความร้อนโดยการระเหยสำหรับท่อเปลือย.....	33
รูปที่ 3.2 แผนผังการแปรเปลี่ยนตัวและเก็บผลการทดลองของท่อขนาด 19 มม.....	36
รูปที่ 3.3 ชุดสร้างฟิล์มน้ำและท่อทองแดง.....	38
รูปที่ 3.4 หอฝึ่งน้ำอย่างง่าย.....	39
รูปที่ 3.5 ชุดฮีตเตอร์ผลิตน้ำร้อน.....	39
รูปที่ 3.6 ผู้ควบคุมอุณหภูมิน้ำร้อนและการทำงานของฮีตเตอร์.....	39
รูปที่ 3.7 เครื่องบันทึกอุณหภูมิแบบสะสมข้อมูล.....	40
รูปที่ 3.8 คาซังน้ำหนักและบีกเกอร์ตวงอัตราการไหลมวลของน้ำ.....	40
รูปที่ 3.9 เครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ.....	41
รูปที่ 3.10 เครื่องมือวัดอุณหภูมิแบบสัมผัส.....	41
รูปที่ 3.11 เครื่องมือวัดความเร็วลม.....	42

รูปที่ 4.1 การทดลองของอนุภาคน้ำร้อนในท่อทองแดง 19 มม. Droplet flow s/d1.4 $v_1$ .....	43
รูปที่ 4.2 การทดลองของอนุภาคน้ำร้อนในท่อทองแดง 19 มม. Column flow s/d1.4 $v_1$ .....	43
รูปที่ 4.3 การทดลองของอนุภาคน้ำร้อนในท่อทองแดง 19 มม. Liquid sheet flow s/d1.4 $v_1$ .....	44
รูปที่ 4.1 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจริงกับอัตราการไหลฟิล์มของท่อ ขนาด 12.8 มม. ....	49
รูปที่ 4.2 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจริงกับอัตราการไหลฟิล์มของท่อ ขนาด 19 มม. ....	49
รูปที่ 5.1 แสดงค่าความชันการลดลงของอนุภาคกับความเร็วลมของท่อขนาด 12.8 มม. ....	54
รูปที่ 5.2 แสดงค่าความชันการลดลงของอนุภาคกับความเร็วลมของท่อขนาด 19 มม. ....	54



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

### สัญลักษณ์

A	หมายถึง	พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน ( $m^2$ )
Cp	"	ค่าความจุความร้อนจำเพาะ ( $kJ/kg.K$ )
d	"	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (m)
g	"	ค่าแรงโน้มถ่วงโลก มีค่า $9.81 m/s^2$
h	"	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ( $W/m.K$ )
k	"	ค่าคุณสมบัติการนำความร้อนของวัสดุ ( $W/m^2.K$ )
Pr	"	Prandtl นัมเบอร์
Ka	"	Kapissta นัมเบอร์
Re	"	Raynolds นัมเบอร์
q	"	ฟลักซ์ความร้อน ( $W/m^2$ )
r	"	รัศมีของท่อ (m)
s	"	ระยะห่างระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (m)
T	"	อุณหภูมิ ( $^{\circ}C$ )
u	"	ความเร็วต้นของลม (m/s)
v	"	ความเร็วลม ณ จุดใดๆ (m/s)
W	"	อัตราการไหลของสารในท่อ (kg/s)
x	"	คุณภาพของไอ
y	"	ความหนาของชั้นฟิล์มของเหลวภายในท่อ (m)
$\rho$	"	ความหนาแน่นของสาร ( $kg/m^3$ )
$\delta$	"	ความหนาของชั้นฟิล์ม (m.)
$\sigma$	"	แรงตึงผิวของน้ำ (N/m)
$\tau$	"	ความเค้นเฉือนที่ผิว ( $N/m^2$ )
$\nu$	"	ความหนืดคิเนมาติกส์ ( $m^2/s$ )
$\mu$	"	ความหนืดไดนามิกส์ ( $N.s/m^2$ )
$\Gamma$	"	อัตราการไหลของฟิล์มต่อความยาวท่อ (kg/m.s)
$\epsilon$	"	สัดส่วนการแยกตัวของของไหลสองสถานะ

### อักษรย่อต่าง

v	"	สภาวะไอ
L,l	"	สภาวะของเหลว
t	"	ช่องทางการไหล
0,s	"	สภาวะที่ผิว
$\infty$	"	สภาวะที่ระยะอนันต์เทียบกับระยะที่พิจารณา
h	"	Homogeneous model
ra	"	Rouhani – Axelsson model
LM	"	Logarithmic mean model
t	"	ค่าโดยรวมใช้กับสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน
c	"	สภาวะตามแนวการไหล
f	"	สภาวะของฟิล์มที่ไหลตกตามผนังท่อ
fi	"	สภาวะฟิล์มน้ำเข้า
fo	"	สภาวะฟิล์มน้ำออก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

เนื่องจากความสนใจในการพิจารณาด้านพลังงานของกระบวนการผลิตน้ำแข็งที่โรงงานผลิตน้ำแข็งในปัจจุบันใช้งานอยู่ทำให้พบข้อบกพร่องทางวิศวกรรมมากมายเนื่องจากความล้ำสมัยของเทคโนโลยี หนึ่งในนั้นคือปัญหาการระบายความร้อนของชุดอุปกรณ์ควบแน่นภายในระบบทำความเย็น ซึ่งปัญหาคือการถ่ายเทความร้อนที่สารทำความเย็นได้รับมาจากการทำความเย็นมีปริมาณไม่เพียงพอ หรืออีกนัยหนึ่งคือความไม่มีประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแม้ว่าในปัจจุบัน เทคโนโลยีการทำเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนได้พัฒนาไปมากก็ตาม เช่นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น (plate heat exchanger) ที่มีประสิทธิภาพสูงมาก แต่เมื่อนำไปใช้กับโรงงานผลิตน้ำแข็งก็พบปัญหาที่ไม่เหมาะสมทำให้มีค่าใช้จ่ายสูงตามมา โดยดั้งเดิมแล้วพบว่าโรงงานผลิตน้ำแข็งได้ใช้การถ่ายเทความร้อนอย่างง่ายและใช้งานกันอย่างแพร่หลายคือการใช้การระบายความร้อนจากท่อเปลือย (bare tube condenser) โดยการพาความร้อนของน้ำแลกเปลี่ยนความร้อนกับท่อ condenser ซึ่งมีข้อดีของอุปกรณ์ชนิดนี้หลายประการทำให้เป็นที่นิยม แต่ก็ยังขาดการศึกษาออกแบบทางวิศวกรรมที่ดีทำให้ การถ่ายเทความร้อนไม่เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดดังนั้นจึงเป็นที่มาของการศึกษาหัวข้องานวิจัยในครั้งนี้

ในปัจจุบันกระบวนการผลิตน้ำแข็งมีความสำคัญมากทั้งในด้านการทำความเย็น และการบริโภคเพราะว่าประเทศไทยเป็นประเทศเขตร้อนดังนั้นอุตสาหกรรมการทำน้ำแข็งจึงมีอยู่แทบทุกอำเภอใหญ่ๆ ในทุกจังหวัดของประเทศไทย ในกระบวนการผลิตน้ำแข็งการถ่ายเทความร้อนมีอยู่สองส่วนหลักๆ คือการทำความเย็นในบ่อที่ต้องการทำน้ำแข็ง (evaporator) และ การนำความร้อนไปถ่ายเทที่ชุดควบแน่น (condenser) ทั้งสองส่วนมีความสำคัญไม่น้อยไปกว่ากันเพราะว่าหากสามารถนำความร้อนไประบายทิ้งได้มาก ก็จะได้สารทำความเย็นในสถานะของเหลวไปดูดซับความร้อนได้มากด้วยเช่นกัน อุปกรณ์ชุดควบแน่น ที่มีใช้กันอยู่ใน โรงงานผลิตน้ำแข็งก็มีอยู่หลายชนิด ซึ่งจากการสำรวจจะสามารถแบ่งได้ดังนี้

#### แบบ Shell-Tube heat exchanger

##### ข้อดี

1. มีราคาถูก
2. มีประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนดีกว่าแบบท่อเปลือย
3. โครงสร้างไม่ซับซ้อนผู้ใช้สามารถเข้าใจได้ง่าย

### ข้อเสีย

1. ต้องอาศัยการออกแบบทางวิศวกรรมเพื่อให้มีพื้นที่ถ่ายเทความร้อนที่เหมาะสม
2. การทำความสะอาดทำได้ยากเมื่อเกิดตะไคร่น้ำ
3. มีการสูญเสียความดันมากเนื่องจากความต้านทานการไหลต้องอาศัยงานที่ให้คอมเพรสเซอร์สูง
4. ตรวจพบการรั่วไหลได้ยาก
5. การซ่อมแซมทำได้ยาก

### แบบ Plate heat exchanger

#### ข้อดี

1. มีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนสูงมากที่สุดทำให้การแลกเปลี่ยนความร้อนที่ดีมาก
2. ประหยัดเนื้อที่ในการติดตั้งมากกว่าแบบอื่น

#### ข้อเสีย

1. ลักษณะโครงสร้างซับซ้อนผู้ใช้เข้าใจได้ยากต้องอาศัยการฝึกอบรมที่ดี
2. ค่าใช้จ่ายในการดูแลรักษาทำความสะอาดสูง เช่น ค่าปะเก็น ค่าแรงงาน
3. การทำความสะอาดทำได้ยากกว่าเพราะต้องทำการถอดประกอบที่ซับซ้อน
4. มีการสูญเสียความดันมากเนื่องจากความต้านทานการไหลต้องอาศัยงานที่ให้คอมเพรสเซอร์สูง
5. อายุการใช้งานสั้นเมื่อใช้กับระบบทำความเย็นในโรงงานน้ำแข็งเพราะความดันระบบสูง และใช้สารทำความเย็นคือแอมโมเนีย แต่วัสดุของ plate heat exchanger คือ สแตนเลสที่ถูกรออกแบบให้บางกว่าเมื่อเทียบกับผนังของท่อเพื่อให้มีการถ่ายเทความร้อนที่ดีกว่าแต่ยังคงรับแรงดันสูงขณะทำงานได้แต่สแตนเลสจะทำปฏิกิริยาเคมีที่เกิดการผุกร่อนได้รวดเร็วกว่าผนังท่อเหล็ก
6. ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนจะลดลงอย่างมากเมื่อเกิดตะไคร่น้ำเนื่องจากช่องทางการไหลมีขนาดเล็กมาก มีโอกาสอุดตันได้ง่าย

### แบบ ท่อเปลือย อาศัยการแลกเปลี่ยนความร้อนกับของไหลภายนอกท่อ

#### ข้อดี

1. โครงสร้างง่ายมากผู้ใช้เข้าใจได้ง่ายมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า
2. การทำความสะอาดทำได้ง่ายเพราะตะไคร่จะเกิดภายนอกท่อมองเห็นได้จากภายนอก

3. ท่อมีความหนาเพราะต้องรับความดันอายุการใช้งานจึงยาวนาน
4. ค่าใช้จ่ายในการดูแลรักษาต่ำ
5. การตรวจสอบการรั่วไหลทำได้ง่าย
6. การซ่อมแซมทำได้ง่าย ค่าใช้จ่ายต่ำ

ข้อเสีย

1. ต้องใช้เนื้อที่ในการติดตั้งมาก
2. ประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนต่ำกว่าชนิดอื่นๆ

ดังนั้นจากการสำรวจข้อมูลพบว่าชุดควบแน่นแบบท่อเปลี่ยมีใช้มานานแล้วและเป็นที่ยอมรับมากกว่า เนื่องจากมีข้อดีในการใช้งานมากกว่า ขาดแต่การศึกษาออกแบบทางวิศวกรรมที่ดีเพื่อให้ได้การใช้งานที่เหมาะสมที่สุดในการถ่ายเทความร้อนจึงได้เกิดแนวความคิดที่จะนำมาศึกษาหาการใช้งานที่เหมาะสมที่สุดต่อการใช้งานด้านนี้ต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย

1. เพื่อศึกษาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของอุปกรณ์การถ่ายเทความร้อนแบบท่อเปลี่ยที่อาศัยการพาความร้อนของน้ำร่วมกับการระเหยของน้ำ
2. เพื่อหาความเหมาะสมในการออกแบบโดยเน้นทางการถ่ายเทความร้อนที่มากที่สุดเป็นหลัก
3. เพื่อศึกษาตัวแปรต่างๆ ที่ส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนของอุปกรณ์โดยการทำการทดลองกับระบบจำลองเพื่อหาสภาวะการถ่ายเทความร้อนที่เหมาะสมที่สุด
4. เพื่อเป็นแนวทางปรับปรุงประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อเปลี่ยสำหรับโรงงานผลิตน้ำแข็ง

## 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาปัญหาของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อเปลี่ยที่อาศัยการพาความร้อนแบบบังคับโดยใช้น้ำเป็นตัวพาความร้อนออกไปเพื่อการควบแน่นสารทำความเย็นในระบบควบแน่นโดยเน้นการใช้งานในโรงงานผลิตน้ำแข็ง โดยมีขอบเขตการศึกษาคือ

1. ศึกษาตัวแปร โดยศึกษาจากทฤษฎีของการถ่ายเทความร้อนของฟิล์มน้ำบนท่อเรียบแนวนอนที่มีการระเหย
2. ทำการทดลอง โดยศึกษากับระบบจำลองโดยจำลองการถ่ายเทความร้อนที่ชุดควบแน่นสารทำความเย็นตามแบบที่ศึกษามา
3. ศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนเพื่อหาสภาวะการถ่ายเทความร้อนที่เหมาะสม



#### 1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย

เนื่องจากงานวิจัยนี้มีที่มาจากสภาพความเป็นจริงที่ใช้งานอยู่ในโรงงานอุตสาหกรรมในกระบวนการผลิตน้ำแข็งเริ่มต้นจากการได้ทราบถึงปัญหาจากการไปสำรวจเพื่อให้ความรู้แก่ผู้ประกอบการจากหน่วยงานของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จึงได้รับทราบปัญหาเพื่อทำการศึกษการวิจัยนี้จะเริ่มศึกษาเป็นขั้นตอนดังนี้

1. ศึกษาทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนของฟิล์มของน้ำภายนอกท่อของเครื่องควบแน่น เพื่อศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อน
2. ออกแบบการทดลองโดยการจำลองระบบและการถ่ายเทความร้อนตามลักษณะที่ศึกษามา
3. ทำการทดลองเพื่อศึกษาการถ่ายเทความร้อนโดยการแปรเปลี่ยนตัวแปรต่างๆที่ส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนตามทฤษฎี
4. วิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้และประมวลผลที่ได้จากตัวแปรต่างๆ
5. สรุปผลที่ได้จากการทดลองเพื่อสามารถใช้เป็นข้อมูลในการปรับปรุงหรือออกแบบสำหรับอุปกรณ์ชนิดนี้ต่อไป

#### 1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

งานวิจัยนี้จะสามารถทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญต่อการออกแบบเพื่อการถ่ายเทความร้อนที่มากที่สุด และยังสามารถศึกษาความเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเมื่อแปรเปลี่ยนตัวแปรอื่นๆ เช่น อัตราการไหล , รูปแบบการไหล , ระยะห่างระหว่างท่อ และ ความเร็วอากาศ เนื่องจากจะได้จัดทำเป็นแบบจำลองเพื่อช่วยในการคำนวณผลจากการทดลองและแปรเปลี่ยนตัวแปร ดังนั้นงานวิจัยนี้สามารถใช้เป็นเครื่องมือในการออกแบบทางวิศวกรรมที่เหมาะสมหรือเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพสำหรับอุปกรณ์ชนิดนี้ต่อไป

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ทฤษฎีวัฏจักรไออัดตัว ( Vapor compression cycle)

ระบบการทำความเย็นที่ใช้ในโรงงานผลิตน้ำแข็งทั่วไปเป็น วัฏจักรในกระบวนการทางเทอร์โมไดนามิกส์แบบหนึ่งที่เรียกว่า วัฏจักรไออัดตัวโดยมีสารทำความเย็นเป็น แอมโมเนีย (R-717) โดยมีหลักการเริ่มจากการทำความเย็น (refrigeration) คือการนำความร้อนจากที่ๆ มีอุณหภูมิต่ำไปทิ้งในที่ๆมีอุณหภูมิสูงกว่า ตามกฎข้อที่ 2 ทางเทอร์โมไดนามิกส์แล้วพบว่าระบบจะเป็นจริงได้ต้องมีการให้งานแก่ระบบ ดังนั้นระบบการทำความเย็นจึงต้องมีการให้งานแก่ระบบด้วย ดังแสดงในรูประบบอย่างง่ายในรูปที่ 1

ขั้นตอนของระบบทำความเย็นจะอธิบายทางทฤษฎีได้ดังนี้

ขั้นที่ 1-2 การอัดตัวแบบไอเซนโทรปิก (isentropic compression) ในเครื่องอัด (compressor)

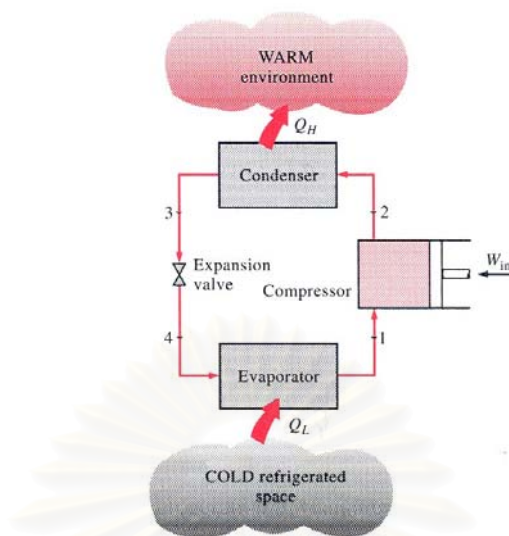
ขั้นตอนนี้สารทำความเย็นจะถูกอัดทำให้ความดันเพิ่มสูงขึ้น โดยทางทฤษฎีสารทำความเย็นจะถูกอัดจากสถานะไออิ่มตัว (saturated vapor) ไปเป็นสถานะไอร้อนยิ่งยวด (superheated vapor) โดยการคำนวณจะถือว่าค่า เอนทาลปีเพิ่มขึ้น ค่าเอนโทรปีคงที่ อุณหภูมิสารทำความเย็นจะสูงขึ้น

ขั้นที่ 2-3 การคายความร้อนโดยความดันคงที่ในเครื่องควบแน่น (condenser)

เป็นขั้นตอนที่สารทำความเย็นที่อยู่ในสถานะไอร้อนยิ่งยวด (superheated vapor) ต่อเนื่องจากขั้นที่หนึ่ง สารทำความเย็นจะถูกลดอุณหภูมิลงโดยมีความดันคงที่ ภายในเครื่องควบแน่น โดยการระบายความร้อนของชุดอุปกรณ์อาจจะระบายโดยน้ำ หรืออากาศ ก็ได้ ดังนั้นในทางอุดมคติเมื่อสารทำความเย็นผ่านอุปกรณ์นี้ไปแล้วจะอยู่ในสถานะของเหลวอิ่มตัว (saturated liquid)

ขั้นที่ 3-4 การขยายตัวลดความดันโดยผ่านอุปกรณ์ลดความดัน

อุปกรณ์ที่ใช้ในการลดความดันในระบบทำความเย็นมีหลายชนิด เช่น วาล์วขยายตัว (expansion valve), วาล์วทรอทลิง (throttling valve) หรือ ท่อ capillary tube ล้วนแล้วแต่เป็นอุปกรณ์ทำให้สารทำความเย็นมีความดันลดลงดังนั้นจากสถานะของสารที่เป็นของเหลวอิ่มตัว (saturated liquid) จะกลายเป็นของผสมของเหลว-ไอที่มีคุณภาพไอต่ำ

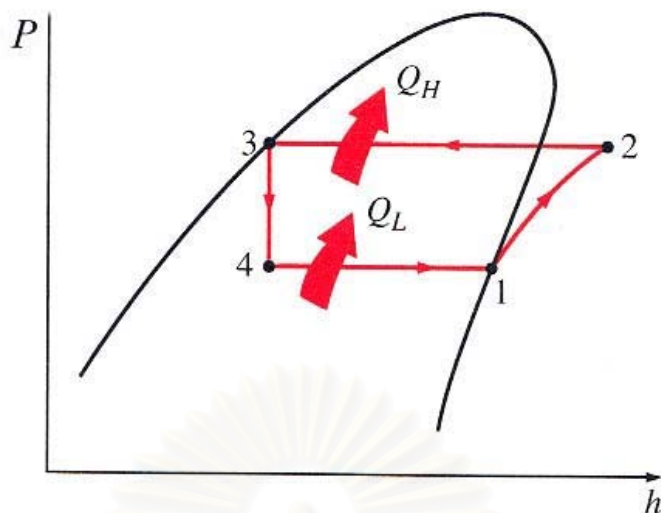


รูปที่ 2.1 แผนภาพระบบไออัดตัวอย่างง่ายและอุปกรณ์สำคัญในระบบ (Cengel and Boles 1994)

#### ขั้นที่ 4-1 การดูดความร้อนโดยความดันคงที่ในเครื่องระเหย (evaporator)

จากของผสมของเหลว-ไอที่มีคุณภาพไอต่ำและมีความดันต่ำลงแล้วสารทำความเย็นจะผ่านเข้าไปรับความร้อนเพื่อการระเหยตัวทั้งหมดโดยผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน เรียกว่า evaporator เมื่อสารทำความเย็นผ่านเข้ามาจะทำการดูดความร้อนไปโดยอุปกรณ์ชุดนี้เองที่จะทำการผ่านตัวกลางในบริเวณที่เราต้องการทำความเย็นมาให้ความร้อนแก่สารทำความเย็น ตัวกลางที่ผ่านอุปกรณ์นี้จึงมีอุณหภูมิลดลง ส่วนสารทำความเย็นก็จะระเหยอยู่ภายในท่ออยู่ในสถานะไออิ่มตัว (saturated vapor) เพื่อเตรียมพร้อมที่จะผ่านเข้าไปในเครื่องอัดอีกทีหนึ่งดังเช่นขั้นที่ 1 และระบบจะทำงานเป็นวัฏจักรเช่นนี้เรื่อยไปสามารถแสดงได้โดยแผนภาพทางเทอร์โมไดนามิกส์เช่น T-s diagram หรือ P-h diagram ดังรูป ที่ 2.2

สำหรับงานวิจัยครั้งนี้จะมุ่งเน้นการวิเคราะห์เครื่องควบแน่น ที่ใช้ระบายความร้อนออกจากระบบทำความเย็นที่สนใจคือระบบทำความเย็นของโรงงานผลิตน้ำแข็ง โดยรูปแบบของเครื่องควบแน่นที่ใช้จะมีลักษณะเป็นท่อโลหะกลมแนวนอน (horizontal tube) ที่ให้สารทำความเย็นคือแอมโมเนียไหลผ่านภายในท่อ ด้านนอกท่อมีการระบายความร้อนด้วยการปล่อยน้ำที่อุณหภูมิลดลงให้ไหลผ่านเพื่อช่วยในการระบายความร้อนออกไป สิ่งที่น่าสนใจเป็นหลักในงานวิจัยนี้คือสารทำความเย็นภายในท่อของเครื่องควบแน่นที่ทางออกต้องการให้อยู่ในสถานะของเหลวอิ่มตัว saturated liquid ดังนั้นจึงต้องศึกษาการควบแน่นภายในท่อแนวนอนของของไหลที่เป็นไอ เมื่อมีการควบแน่นเกิดขึ้นสถานะส่วนใหญ่ภายในท่อของเครื่องควบแน่นจะเป็นของผสมที่มีคุณภาพไอ (vapor quality) เปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องส่งผลให้การไหลภายในท่อ เป็นการไหลสองสถานะ (two phase flow)



The  $P$ - $h$  diagram of an ideal vapor-compression refrigeration cycle.

รูปที่ 2.2 แผนภาพ ความดัน - เอนทาลปีของระบบไออัดตัวในอุดมคติ(Cengel and Boles 1994)

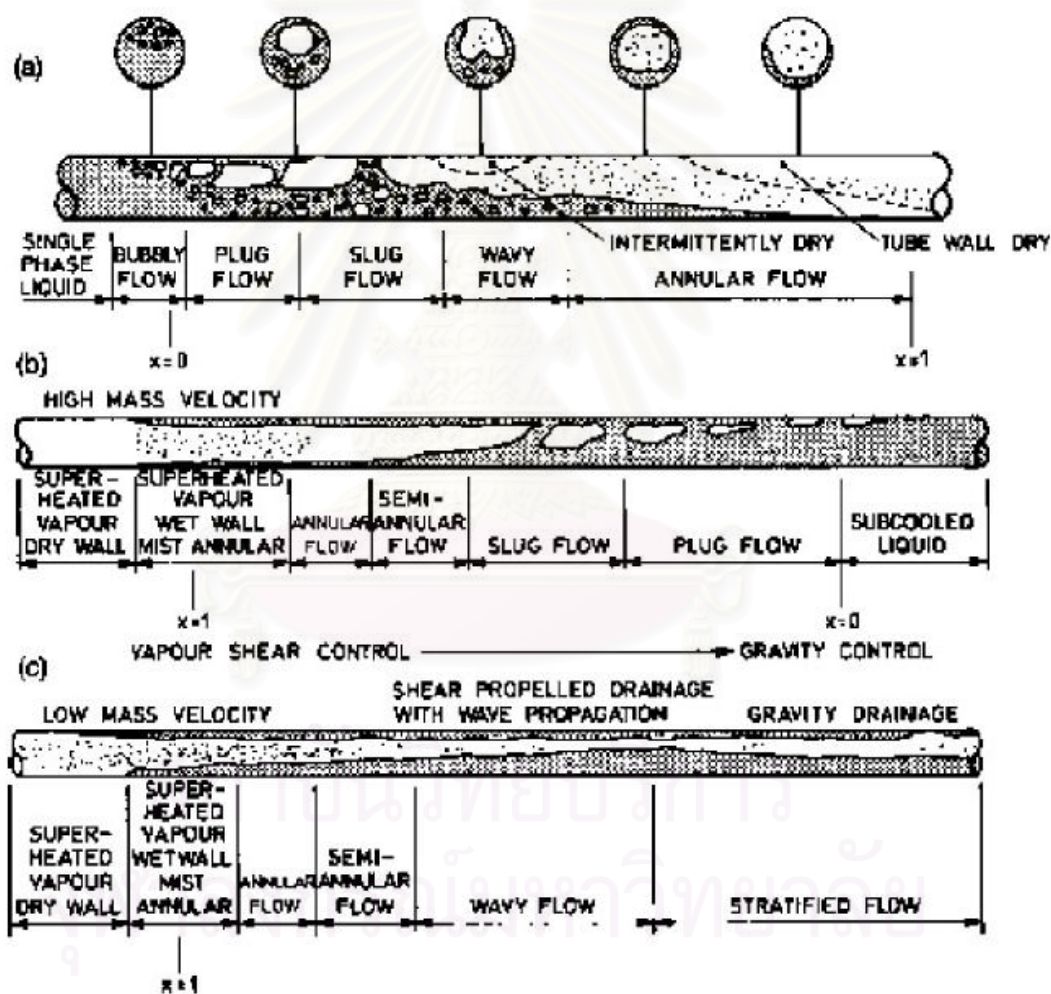
## 2.2 การไหลสองสถานะ (two-phase flow)

ในเรื่องของการไหลสองสถานะอาจจะมีได้ทั้งที่เป็น ของเหลวกับของแข็ง หรือของแข็งกับก๊าซ ก็ได้แต่ในที่นี้จะพิจารณาการไหลสองสถานะของของเหลวกับไอของสารทำความเย็นในระบบที่สนใจคือแอมโมเนีย(R-717) การแบ่งประเภทของการไหลสองสถานะเป็นชนิดต่างๆโดยตัวแปรที่เป็นที่นิยมคือ void fraction ( $\epsilon$ ) ซึ่งกล่าวคือพื้นที่หน้าตัดของท่อที่เป็นส่วนของสถานะไอ ( $A_v$ ) เทียบกับพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของช่องการไหล ( $A_t$ )

$$\epsilon = \frac{A_v}{A_t} \quad (1)$$

ค่านี้จะเป็นตัวกำหนดรูปแบบการไหลของของผสมในท่อซึ่งจะให้ผลต่อการคำนวณและการถ่ายเทความร้อนที่ต่างกันไปตามรูปแบบการไหลซึ่งแบ่งได้ดังนี้ bubbly flow , plug flow , slug flow , stratified-wavy flow , annular flow , droplet flow หรือ mist flow เป็นต้น ดังแผนภาพการไหลในรูปที่ 2.3

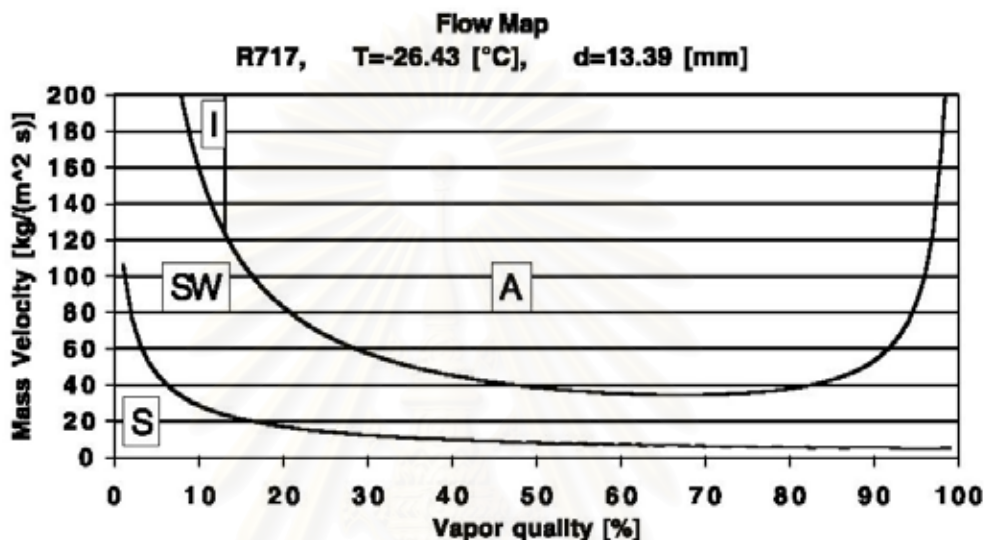
นอกจากนี้รูปแบบการไหลยังขึ้นอยู่กับ อัตราการไหลของสารด้วยโดยอัตราการไหลจะพิจารณาในรูปของฟลักซ์การไหลของมวล (G) (mass flux velocity) คือความเร็วในการไหลของมวลต่อพื้นที่หน้าตัด มีหน่วยเป็น  $\text{kg} / \text{m}^2 \cdot \text{s}$  โดยการไหลแบบต่างๆ ก็จะมีการคำนวณค่าอัตราการไหลต่างกันไป ซึ่งการไหลสองสถานะของสารทำความเข้าใจในงานที่พิจารณาในงานวิจัยครั้งนี้ เนื่องจากความต้องการการถ่ายเทความร้อนที่มีค่ามากและระบบที่มีขนาดใหญ่และ จากการศึกษา งานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าในการควบคุมของสารที่มีค่า ฟลักซ์การไหลของมวล มากกว่า  $150 \text{ kg} / \text{m}^2 \cdot \text{s}$  (J. El Hajal et.al 2002) จะสามารถพิจารณาการไหลในรูปแบบการไหลแบบวงแหวนได้ (annular flow) ซึ่งก็สอดคล้องกับแผนผังการไหลที่ได้จากการทดลองของแอมโมเนีย ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.3 แสดงการไหลสองสถานะในลักษณะต่างๆ ในท่อแนวนอน (a) การระเหย , (b) การควบคุมที่ฟลักซ์การไหลมวลสูง , (c) การควบคุมที่ฟลักซ์การไหลมวลต่ำ (El Hajal et al 2002)

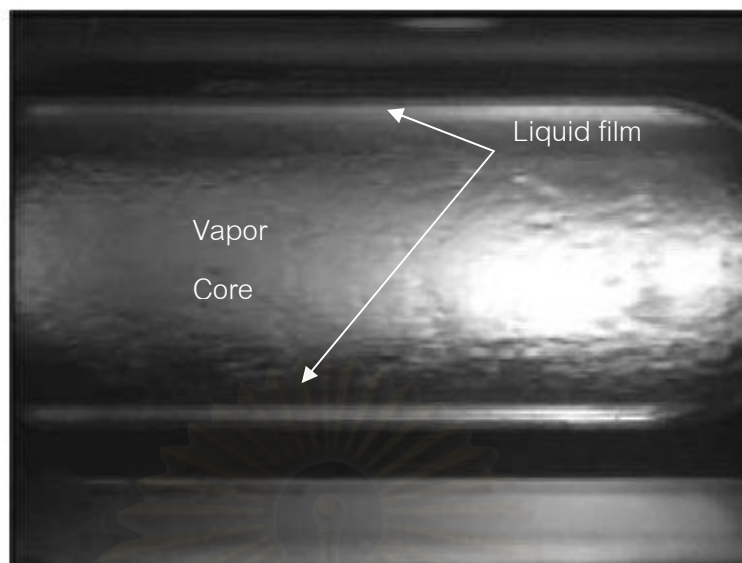
### 2.2.1 การไหลสองสถานะแบบวงแหวน ( Annular flow pattern )

การไหลแบบวงแหวนเป็นแบบจำลองที่มีความนิยมในการคำนวณมากและมีการทำการวิจัยกันมาอย่างต่อเนื่องเพราะว่าการไหลส่วนใหญ่สามารถพิจารณาได้เป็นการไหลแบบวงแหวน ซึ่งสังเกตได้จากการไหลแบบวงแหวนนั้นมีอาณาเขตการไหลในแผนผังการไหลเป็นบริเวณกว้างมากที่สุด ตามรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แผนผังการไหลของแอมโมเนีย ที่อุณหภูมิ -26.1 °C ( S = Stratified , SW = Wavy , I = Intermittent , A = Annular ( Zurcher et al 2002 )

ในการพิจารณาการไหลสองสถานะแบบวงแหวนนั้นจะพิจารณาได้เมื่อค่าฟลักซ์การไหลของมวลมีค่ามากพอสมควรซึ่งได้มาจากแผนผังการไหลสองสถานะ โดยมีค่าประมาณ 100-150 kg/m<sup>2</sup>.s จากรูปที่ 2.4 จะพบว่าแอมโมเนียหากฟลักซ์มวลการไหลมีค่าต่ำกว่า 40 kg/m<sup>2</sup>.s นั้นจะไม่เกิดการไหลแบบวงแหวนเลยและที่ค่าคุณภาพของไอที่มากกว่า 98 % ไม่ว่าฟลักซ์การไหลจะมีค่าสูงเท่าใดก็จะไม่เกิดการไหลแบบวงแหวนเช่นกัน โดยการไหลแบบวงแหวนมีลักษณะกายภาพที่สำคัญ จะมีการไหลของสถานะของเหลวอยู่ในบริเวณโดยรอบช่องทางไหลในกรณีท่อกลม แนวนอน ของเหลวจะอยู่ตามแนวรอบวงของผนังท่อและสถานะไอจะอยู่ในบริเวณแกนกลางท่อของไหลทั้งสองชนิดนี้จะเคลื่อนที่ไปด้วยกันแต่อาจจะมีความแตกต่างของความเร็วของทั้งสองสถานะเนื่องจากความตึงผิวของสารนั้นๆ และความเร็วรวมของการไหลด้วยดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ภาพที่ถ่ายจากการทดลองแสดงการไหลแบบวงแหวนของแอม โมเนียที่ vapor quality 0.81  
ฟลักซ์การไหล  $122 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$  (Zurcher et al 2002)

สมการการถ่ายเทความร้อน

การถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นจะแยกพิจารณาเป็นส่วนๆ ดังนี้

1. การพาความร้อนภายนอกท่อโดยน้ำ
2. การนำความร้อนผ่านผนังท่อ
3. การพาความร้อนของชั้นฟิล์มของเหลวที่เกิดจากการควบแน่น

การพาความร้อนภายนอกท่อ เป็นการถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำเป็นเสมือนแหล่งที่งความร้อน (Heat Sink) ที่รับความร้อนจากสารทำความเย็นในสภาวะไอ ในการพิจารณาส่วนนี้จะพิจารณาโดยรวมซึ่งจะกล่าวโดยละเอียดต่อไปเพื่อจะหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพาของน้ำที่มีการระเหย โดยมีสมการการพาความร้อนคือ

$$q = h_{av} A (T_{s2} - T_{w\infty}) \quad (2)$$

เมื่อ  $h_{av}$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ย

$A$  คือ พื้นที่ผิวแลกเปลี่ยนความร้อน

$T_{s2}$  คือ อุณหภูมิผิวภายนอกของท่อ

$T_{w\infty}$  คือ อุณหภูมิน้ำที่นอกขอบเขต boundary layer

การนำความร้อนผ่านท่อ เป็นการถ่ายเทความร้อนผ่านทาง การนำความร้อน โดยจะพิจารณาว่าการนำความร้อนเป็นเพียงหนึ่งมิติผ่านตามความหนาท่อในแนวรัศมีเท่ากันตามแนวเส้นรอบวงที่ทุกๆหน้าตัดของท่อ โดยที่ภายในและภายนอกท่อจะมีการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนของไหลที่ผิวท่อ ดังนั้นสมการการนำความร้อน 1 มิติสำหรับกรณีที่มีการพาความร้อนที่ผิวคือ

$$q = \frac{-k(2\pi L)(T_{s1} - T_{s2})}{\left(\frac{1}{r_i h_i} + \frac{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{k} + \frac{1}{r_o h_o}\right)} \quad (3)$$

- เมื่อ  $h_i$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยผิวในท่อ  
 $h_o$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยผิวนอกท่อ  
 $k$  คือ คุณสมบัติการนำความร้อนของวัสดุท่อ  
 $T_{s1}$  คือ อุณหภูมิผิวภายในของท่อ  
 $T_{s2}$  คือ อุณหภูมิผิวภายนอกของท่อ  
 $r_i$  คือ รัศมีภายในท่อ  
 $r_o$  คือ รัศมีภายนอกท่อ

การพาความร้อนของชั้นฟิล์มของเหลวที่เกิดจากการกลั่นตัวในส่วนนี้เป็นส่วนที่ซับซ้อน การศึกษานี้เพื่อเป็นแนวทางที่จะใช้ทำความเข้าใจสภาวะภายนอกท่อชุดควบแน่นเท่านั้น

## 2.2.2 การควบแน่นของการไหลสองสถานะแบบวงแหวน

การถ่ายเทความร้อนออกจากสารที่อยู่ภายในท่อคือสารทำความเย็นแอมโมเนีย (R-717) เพื่อทำการควบแน่นให้สารทำความเย็นที่เข้ามาภายในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเปลี่ยนสถานะจากเป็นไออิ่มตัวหรือสภาวะไอร้อนยิ่งยวดเปลี่ยนไปเป็นของเหลวอิ่มตัว หรืออีกนัยหนึ่งคือ สภาวะที่ทางเข้าจะพิจารณาให้มีค่าคุณภาพไอ(x) เป็น 1 และสภาวะที่ทางออกมีคุณภาพไอ(x) เป็น 0 เพื่อความเข้าใจในปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจึงต้องศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นภายในท่อในลักษณะของการไหลแบบสองสถานะเพื่อนำค่าที่ได้ไปใช้ทำนายผลการถ่ายเทความร้อนรวมของอุปกรณ์



### 2.2.3 แบบจำลองในการหา Void Fraction

แบบจำลองที่มีความสำคัญต่อมาก็คือแบบจำลองที่ใช้ในการหาค่า Void Fraction ซึ่งค่าตัวแปรนี้เป็นตัวแปรที่จะบ่งชี้ถึงสัดส่วนของสถานะไอต่อสัดส่วนรวมของช่องทางการไหลดังที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น โดยที่แบบจำลองที่มีใช้กันอยู่นั้น ได้ถูกพัฒนามาอย่างต่อเนื่องและใช้กันอย่างแพร่หลาย ดังนี้

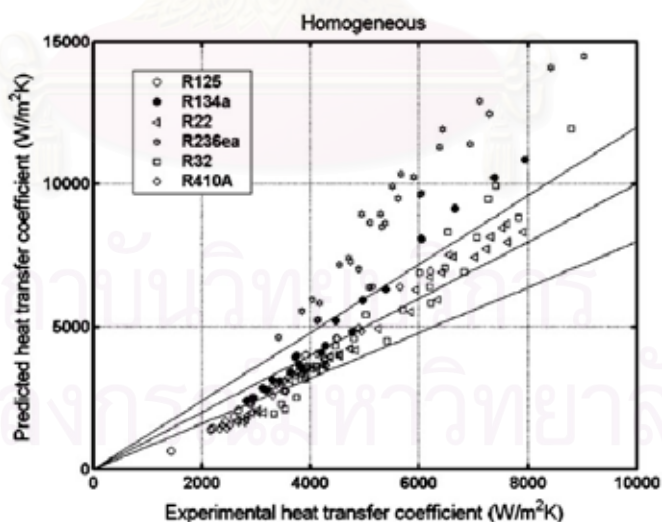
#### 2.2.3.1 แบบจำลองการไหลเนื้อเดียว

แบบจำลองที่พิจารณาการไหลเป็นแบบเนื้อเดียวกัน ( Homogeneous Model ) ซึ่งมีสมมุติฐานสำคัญคือ พิจารณาการไหลของของไหลทั้งสองสถานะว่ามี การไหลไปด้วยความเร็วที่เท่ากันซึ่ง ค่า Void Fraction สามารถหาได้จากสมการ

$$\epsilon_h = [ 1 + (1-x) \cdot \frac{\rho_v}{\rho_l} \cdot x ]^{-1} \quad (4)$$

- เมื่อ  $\epsilon_h$  คือ ค่า void fraction  
 $\rho_l$  คือ ความหนาแน่นของสารในสถานะของเหลว  
 $\rho_v$  คือ ความหนาแน่นของสารในสถานะไอ  
 $x$  คือ ค่า vapor quality

ซึ่งแบบจำลองนี้ก็มีความถูกต้องในระดับหนึ่งเนื่องจากในสภาพการไหลจริงไม่ได้เป็นการไหลแบบเนื้อเดียวเสมอไปซึ่งขึ้นอยู่กับความเร็วในการไหลหรือ ค่าพังก์ชันการไหลของมวลดังรูปที่ 2.6



Comparison of experimental to predicted values using  $e_h$  for  $\epsilon$  ( $c = 0.0000785$ ,  $n = 1.115$ ).

รูปที่ 2.6 ค่าความถูกต้องของการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยวิธีแบบจำลองการไหลเนื้อเดียว สำหรับสารทำความเย็นชนิดต่างๆ (El Hajal et al 2002)

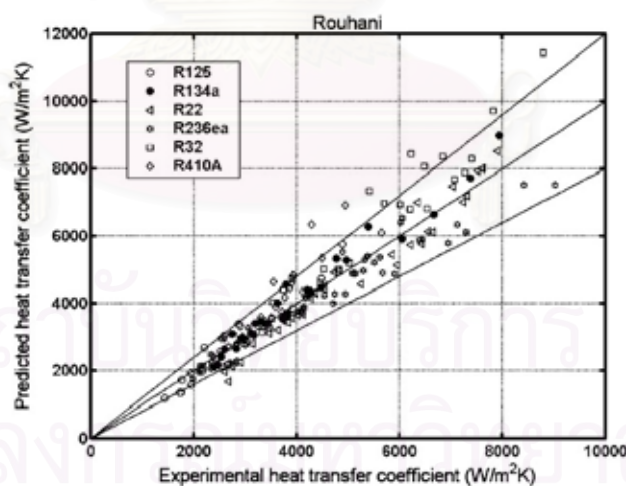
### 2.2.3.2 แบบจำลอง Rouhani-Axelsson

แบบจำลองต่อมาคือแบบจำลองที่ได้รับการพัฒนาโดยพิจารณาถึงผลของความแตกต่างของความเร็วในการไหลที่ต่างกันของสองสถานะโดยพิจารณาในเทอมของความตึงผิวและความเร็วในการไหลแบบจำลองนี้ถูกพัฒนาโดย Rouhani-Axelsson ซึ่งเป็นแบบจำลองที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย เรียกว่า แบบจำลองแบบ drift flux ของ Rouhani-Axelsson ซึ่งค่า void Fraction สามารถหาได้จาก

$$\epsilon_{ra} = \frac{\left(\frac{x}{\rho_v}\right)}{\left[1 + 0.12(1-x) \cdot \left(\frac{x}{\rho_v} + \frac{(1-x)}{\rho_l}\right) + 1.18(1-x) \cdot \left[\frac{g \sigma (\rho_l - \rho_v)}{G \cdot \rho_l^{0.5}}\right]^{0.25}\right]} \quad (5)$$

เมื่อ  $G$  คือ ฟลักซ์การไหลของมวลต่อพื้นที่หน้าตัดการไหล ( $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$ )

เนื่องจากข้อจำกัดของแบบจำลองทั้งสองที่มีข้อเสียแตกต่างกันนั้นคือแบบจำลองแบบเนื้อเดียวกันมีความซับซ้อนน้อยทำให้หาค่าได้ง่ายแต่ก็เหมาะกับการไหลที่มีค่าฟลักซ์การไหลไม่สูงมากก็จะให้ค่าความถูกต้องในระดับดี ส่วนแบบจำลองของ Rouhani-Axelsson ก็เป็นแบบจำลองที่มีความละเอียดมากขึ้นแต่ก็มีความยุ่งยากมากขึ้น และก็ยังมีความคลาดเคลื่อนอยู่บ้าง ดังรูปที่ 2.7



Comparison of experimental to predicted values using  $\epsilon_{ra}$  for ( $c = 0.0099$ ,  $n = 0.636$ ).

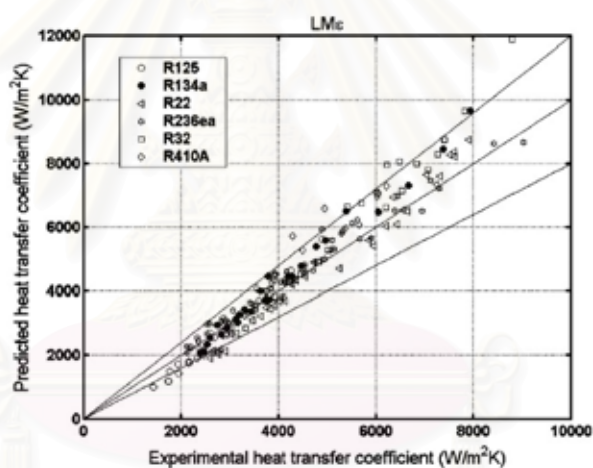
รูปที่ 2.7 ค่าความถูกต้องของการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยวิธีแบบจำลองของ RouhaniAxelsson สำหรับสารทำความเย็นชนิดต่างๆ (El Hajal et al 2002)

### 2.2.3.3 แบบจำลองลอการิทึมเฉลี่ย

จากงานวิจัยของ El Hajal และคณะ(2002) ได้ทำการหาค่าเฉลี่ยของแบบจำลองของ Void Fraction ทั้งสองโมเดลนี้เพื่อปรับปรุงค่าความถูกต้องของแบบจำลองมากขึ้น โดยใช้ค่าการเฉลี่ยแบบลอการิทึมซึ่งแบบจำลองใหม่ที่ได้เรียกว่า Logarithmic mean void fraction แทนด้วย  $\varepsilon_{LM}$  ซึ่งหาได้จากสมการ

$$\varepsilon_{LM} = \frac{(\varepsilon_h - \varepsilon_{ra})}{\ln(\varepsilon_h / \varepsilon_{ra})} \quad (6)$$

ซึ่งจากแบบจำลองที่ได้จะนำไปหาค่า Void fraction เพื่อนำไปคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสำหรับการควบแน่นภายในท่อแนวนอน โดยจากการทดสอบแบบจำลองนี้พบว่ามีความถูกต้องมากกว่าแบบจำลองที่ผ่านมา ดังรูปที่ 2.8

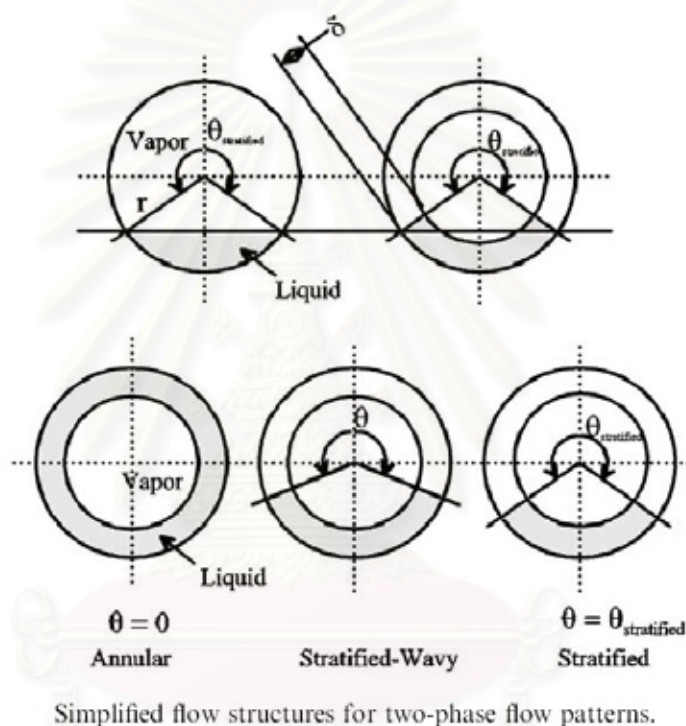


Comparison of experimental to predicted values using LMc for  $\varepsilon$  ( $c = 0.0039$ ,  $n = 0.734$ ).

รูปที่ 2.8 ค่าความถูกต้องของการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยวิธีแบบจำลองลอการิทึมเฉลี่ยสำหรับสารทำความเย็นชนิดต่างๆ (El Hajal et al 2002)

## 2.3 การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉพาะที่ของการควบแน่นภายในท่อเรียบแนวนอน

การถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นภายในท่อกลมเรียบแนวนอน ได้มีการศึกษากันมาภายหลังจากการพัฒนาการศึกษาการไหลสองสถานะแบบไม่มีการถ่ายเทความร้อนจนกระทั่งต่อมาศึกษาถึงการถ่ายเทความร้อนภายในท่อแนวนอนที่มีการเดือด ส่วนการควบแน่นภายในท่อแนวนอนเป็นการศึกษาในเวลานี้ โดยผู้ศึกษาวิจัยได้ศึกษาจากพื้นฐานสมการการไหลจากสองสถานะเรื่อยมา ซึ่งสามารถแสดงรูปกายภาพของการไหลได้ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แสดง โครงสร้างของรูปแบบการไหลสองสถานะ (Thome et al 2002)

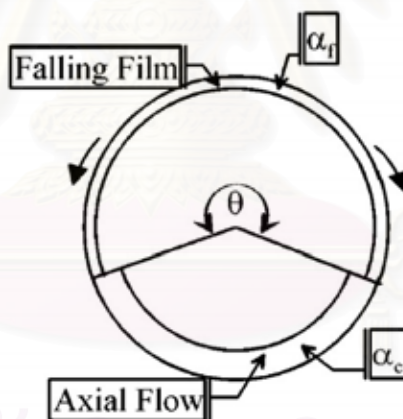
จากรูปพบว่าการไหลที่เราจะพิจารณาคือการไหลแบบวงแหวน ( Annular Flow ) นั้นรูปแบบการไหลจะถูกจำลองให้ของเหลวมีการไหลอยู่ที่บริเวณเส้นรอบวงตามผนังท่อเท่านั้นส่วนสถานะไอจะไหลอยู่ตามแนวแกนกลางของท่อ ดังนั้นการไหลแบบนี้จะถือว่ามีความสมมาตรตามแนวเส้นแกนศูนย์กลาง (Axial Symmetry)

จากการศึกษาพบว่า การไหลสองสถานะที่มีการควบแน่นนั้นจะสามารถแบ่งได้เป็นสองส่วนใหญ่ๆ คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่เกิดจากของเหลวที่ไหลตกลงมาตามผนังท่อ เนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลกกับสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่เกิดจากของเหลวที่ไหลไปตามแนวท่อ เนื่องจากการไหลตามแนวแกนของท่อซึ่งแสดงในรูปที่ 2.10 เราจะเห็นว่า มีมุมของของไหลที่

เกิดขึ้น พิจารณาแยกกันระหว่างของไหลที่ไหลตกกับของไหลที่ไหลตามแนวแกน โดยให้มุมของของไหลที่ไหลตกเป็นมุม  $\theta$  และ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนก็จะพิจารณาแยกกันด้วย ดังนั้นการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยรวมสามารถหาได้ดังสมการที่ 7

$$h_t = \frac{[h_f \cdot r \cdot \theta + (2\pi - \theta) r h_c]}{2\pi r} \quad (7)$$

- เมื่อ  $h_t$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของการไหลในท่อ
- $h_f$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของฟิล์ม
- $h_c$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของของไหลที่ไหลตามแนวแกนของท่อ
- $\theta$  คือ มุมของฟิล์มที่ไหลตกตามผนังท่อ
- $r$  คือ รัศมีภายในท่อ



Heat transfer model showing convective and falling film boundaries.

รูปที่ 2.10 แสดงแบบจำลองการหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของการไหลสองสถานะ(Thome et al 2002)

เนื่องจากการไหลแบบวงแหวนที่พิจารณาเป็นการไหลที่นิยมใช้เป็นแบบจำลองพื้นฐานในงานการถ่ายเทความร้อนที่มีการควบแน่นจึงได้มีผู้ศึกษาวิจัยและตั้งสมมุติฐานที่สำคัญของการไหลแบบวงแหวนและเพื่อให้สมการการถ่ายเทความร้อนสามารถแก้ได้ง่ายขึ้นโดยใช้สมมุติฐานของงานวิจัยของ Thome et.al (2002)

- 1) ความหนาของชั้นฟิล์มเท่ากันตลอดตามแนวเส้นรอบวง  $\theta = 0$
- 2) ไม่พิจารณาความแตกต่างของความหนาชั้นฟิล์มระหว่างด้านบนและด้านล่างของท่อ
- 3) ไม่พิจารณาของเหลวที่ออกมาจากของไหลสถานะไอที่แกนกลางการไหล
- 4) การไหลในชั้นฟิล์มเป็นแบบ steady turbulent flow
- 5) คุณสมบัติของของเหลวมีค่าคงที่ในชั้นฟิล์ม
- 6) พิจารณามุมยกของท่อเป็นศูนย์ (horizontal tube)

และสามารถหาพื้นที่หน้าตัดของการไหลสถานะของเหลวได้จาก

$$A_1 = \frac{d^2}{8} \cdot [(2\pi - \theta_{strat}) - \sin(2\pi - \theta_{strat})] \quad (8)$$

หรือสามารถแสดงในรูปของ Void Fraction ได้ดังนี้

$$A_1 = (1 - \epsilon) A \quad (9)$$

และ 
$$A_v = \epsilon A = 1 - A_1 \quad (10)$$

เนื่องจากการไหลแบบวงแหวนมีค่า มุม  $\theta = 0$  เมื่อนำไปแทนในสมการที่(7) แล้วจะได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของการไหลสามารถหาได้จากสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของการไหลตามแนวแกนเท่านั้น จะได้ว่า

$$h_c = h_c$$

จากสมการพื้นฐานการถ่ายเทความร้อนเราพบว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนตามแนวแกนสามารถหาได้จากสมการที่แสดงในรูปของกลุ่มตัวแปรไร้มิติสองกลุ่มคือ ค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ และค่า แพรนด์ตล์นัมเบอร์ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังนี้

$$h_c = \frac{c \text{Re}_L^n \text{Pr}_L^m \lambda_L}{\delta} \quad (11)$$

ซึ่งค่าคงที่  $c$ ,  $n$  และ  $m$  ในสมการเป็นค่าคงที่ของสมการซึ่งไม่ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของของไหลแต่ขึ้นอยู่กับรูปแบบการไหลและการถ่ายเทความร้อนค่าคงที่นี้ได้มีผู้ทำการศึกษาวิจัยไว้ซึ่งค่าที่ได้มาจากการทดลองและการหาค่าทางสถิติที่ให้ค่าที่เหมาะสมที่สุดซึ่งขึ้นอยู่กับแบบจำลองที่ใช้

ด้วยโดยที่ ค่า  $c$  จะมีค่าเท่ากับ 0.0000785 ค่า  $n$  เท่ากับ 1.115 ค่า  $m$  เท่ากับ 0.5 เมื่อใช้แบบจำลองการหาค่า void fraction แบบเนื้อเดียว ดังรูปที่ 2.6 เมื่อใช้แบบจำลองของ Rouhani ค่าคงที่ที่เหมาะสมคือ  $c$  เท่ากับ 0.0099 ค่า  $n$  เท่ากับ 0.636 ค่า  $m$  เท่ากับ 0.5 ดังรูปที่ 2.7

จากการศึกษาของ Thome และคณะ(2002) พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากการไหลภายในท่อกลมที่มีการควบแน่นนั้นยังมีผลกระทบอื่นที่ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนด้วยนั่นคือค่าความหยาบของผิวรอยต่อของไหล ดังนั้น สมการที่ (11) สามารถแสดงในรูปแบบที่มีค่าการปรับปรุงความถูกต้องเนื่องจากความหยาบผิวรอยต่อของไหล ดังนั้นสมการที่ได้ใหม่สามารถแสดงได้ดังนี้

$$h_c = \frac{c Re_L^n \cdot Pr_L^m \cdot \lambda_L \cdot f_i}{\delta} \quad (12)$$

จากสมการที่ 12 เมื่อพิจารณาร่วมกับการใช้แบบจำลองในการหาค่า Void Fraction โดยวิธีการกการที่มละเอียดแล้ว พบว่าค่าคงที่ที่เหมาะสมที่สุดคือ ค่า  $c$  เท่ากับ 0.003 ค่า  $n$  เท่ากับ 0.74 และค่า  $m$  เท่ากับ 0.5 (Thome et al (2002))

โดยงานวิจัยส่วนมากแล้วในการศึกษาการไหลแบบสองสถานะที่มีการควบแน่นแล้วการคำนวณโดยแบบจำลองคณิตศาสตร์จะใช้แบบจำลองของการไหลแบบวงแหวนแบบเดี่ยวตลอดการไหล ข้อนี้ก็เป็นสมมุติฐานสำคัญอีกอันหนึ่งถึงแม้ว่าในการไหลจริงๆ แล้ว เมื่อค่า vapor quality มีค่าน้อยลงจนเข้าใกล้ ศูนย์ นั้นการไหลจะเปลี่ยนไปเป็นแบบ Intermittent Flow แต่ก็มีกรณีการไหลในแบบนี้ในช่วงไม่มากนักสำหรับสารทำความเย็นที่เป็นแอมโมเนีย ดังที่สังเกตได้จากรูปแผนผังการไหล รูปที่ 2.3 และมีแนวโน้มลดลงเมื่อค่า พลังค์ความเร็วการไหลของมวลมีค่าเพิ่มขึ้น

ค่าตัวแปรไร้มิติที่แสดงในสมการที่ 12 นั้นสามารถหาได้โดยค่าตัวแปรกลุ่มดังกล่าวเป็นตัวแปรที่ขึ้นกับสภาวะการไหลที่เป็นฟิล์มของเหลวทั้งสิ้น

ค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์หาได้จาก

$$Re_L = \frac{4G(1-x) \delta}{(1-\epsilon) \mu_L} \quad (13)$$

ค่าพรานด์ตล์นัมเบอร์หาได้จาก

$$Pr_L = \frac{C_{pL} \mu_L}{\lambda_L} \quad (14)$$

การคำนวณหาค่าความหนาของชั้นฟิล์ม ( $\delta$ ) ก็สามารถหาได้จากการแก้รูปเรขาคณิตของการไหล จะได้ว่า

$$\delta = \frac{d}{2} - 0.5 \left[ \frac{d^2}{2} - \frac{8A_L}{2\pi - \theta} \right]^{1/2} \quad (15)$$

จากสมการที่ 15 จะพบว่า  $\delta$  มีค่าน้อยกว่า  $d/2$  เสมอ หรือ เท่ากับรัศมีของท่อหาก  $\delta$  มีค่าเท่ากับรัศมีท่อแล้วก็จะเป็นการไหลของของเหลวภายในท่อปกตินั่นเอง ปัจจัยต่อมาที่มีผลต่อความหนาแน่นของของเหลวคือ ตัวปรับแก้เนื่องจากความหยาบของผิวรอยต่อของของไหลสองสถานะ เป็นผลเนื่องจากความเค้นเฉือนที่ผิวรอยต่อของการไหล ซึ่งขึ้นอยู่กับความแตกต่างของความเร็วของการไหลของทั้งสองสถานะ โดยที่ความเร็วการไหลของของเหลวสามารถแสดงดังนี้

$$u_L = \frac{G(1-x)}{(1-\varepsilon)\rho_L} \quad (16)$$

ความเร็วการไหลของไอคือ

$$u_V = \frac{Gx}{\varepsilon \cdot \rho_V} \quad (17)$$

และจะหาค่า ตัวแปรไร้มิติได้จาก

$$f_i = 1 + (u_L/u_V)^{1/2} \cdot \left( \frac{(\rho_L - \rho_V) \cdot \delta^2}{\sigma} \right)^{1/4} \quad (18)$$

แต่จากสมการที่กล่าวมาแล้วข้างต้นพบว่า มีข้อจำกัดคือค่า  $\varepsilon$  ไม่สามารถมีค่าเท่ากับ 1 ได้ เนื่องจากจะทำให้ตัวหารของสมการเป็นศูนย์ ดังนั้นแบบจำลองนี้ จะมีความถูกต้องที่ค่า vapor quality อยู่ในช่วงตั้งแต่ 0.97 – 0.03

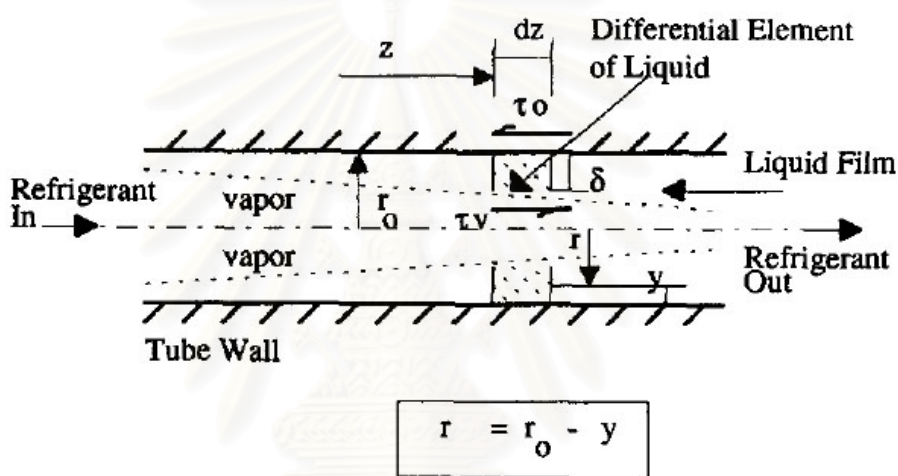
จากแบบจำลองที่แสดงมาข้างต้นนั้นเป็นแบบจำลองที่ได้มาจากการทดลองเป็นส่วนมาก ดังนั้นการคำนวณของแบบจำลองต้องใช้ข้อมูลจากการวัดข้อมูลจากการทดลองเป็นสำคัญดังสังเกตได้จาก ค่า local void fraction , local vapor quality , local film thickness ที่คำนวณได้ โดยไม่ได้กล่าวถึงเรื่องของอุณหภูมิ หรือ ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทเลย เนื่องจากจุดสุดท้ายที่ออกมาในรูปแบบของ vapor quality เฉพาะจุดแล้ว ดังนั้น โดยสรุปแล้วแบบจำลองข้างต้นเป็นแบบจำลองเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉพาะที่ของการควบแน่นที่ทราบข้อมูลจากการทดลองและได้ปรับแก้ค่าคงที่จนได้ค่าที่เหมาะสมจากข้อมูลและวิธีการทางสถิติแล้ว



### 2.4 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการวิเคราะห์ทางทฤษฎี

การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉพาะที่สามารถทำได้อีกทางหนึ่งคือการอาศัยทฤษฎีพื้นฐานของการไหลสองสถานะแล้วอาศัยการจํารูประสมการให้อยู่ในรูปความสัมพันธ์ของตัวแปรโดยใช้ทฤษฎีพื้นฐาน แต่เนื่องจากการวิเคราะห์ทางทฤษฎีพื้นฐานอย่างเดียวความคลาดเคลื่อนจึงจะมากกว่าการหาค่าจากการทดลอง

การจําลองปัญหาโดยใช้การวิเคราะห์ทางทฤษฎีก็จะใช้ข้อสมมุติฐานเดียวกันกับการทดลองคือ การไหลสองสถานะเป็นแบบวงแหวนตลอดการไหลโดยการวิเคราะห์จะอาศัยลักษณะทางกายภาพดังรูปที่ 2.11



Physical situation for the annular flow condensation.

รูปที่ 2.11 แสดงลักษณะทางกายภาพของการไหลแบบวงแหวน(Chitti and Anand 1995)

จากสมการกำกับของปัญหาการไหลแบบเทอร์บิวเลนต์ในชั้นฟิล์ม

สมการ โมเมนตัม

$$\tau = (\mu_l + \rho_l \epsilon_m) \cdot \frac{du}{dy} \tag{19}$$

สมการการถ่ายเทความร้อน

$$q = -(k_l + \rho_l c_{pl} \epsilon_h) \frac{dT}{dy} \tag{20}$$

และสามารถจัดรูปสมการ 19 และ 20 ให้อยู่ในรูปตัวแปรไร้มิติได้ดังนี้

$$\tau / \tau_0 = (1 + \frac{\varepsilon_m}{\nu_1}) \frac{du^+}{dy^+} \quad (21)$$

$$q / q_0 = (\frac{1}{Pr} + \frac{\varepsilon_h}{\nu_1}) \frac{dT^+}{dy^+} \quad (22)$$

เมื่อเทอมไร้มิติแสดงได้ดังนี้

$$u^+ = u / u^* = u / (\tau_0 / \rho_l)^{1/2} \quad (23)$$

$$u^* = (\tau_0 / \rho_l)^{1/2} \text{ คือความเร็วเสียดทาน friction velocity} \quad (24)$$

$$y^+ = y u^* / \nu_1 = y (\tau_0 / \rho_l)^{1/2} / \nu_1 \quad (25)$$

$$T^+ = (T_0 - T) u^* / (q_0 / \rho_l C_{pl}) \quad (26)$$

$$Pr = \nu_1 / \alpha_1 = \mu_1 C_{pl} / k_1 \quad (27)$$

จากความสัมพันธ์ของ Turbulent Prandtl Number ( $Pr_t$ )

$$Pr_t = \frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_h} \quad (28)$$

จากการค้นคว้าของ Chitti และคณะ(1995) พบว่า ค่า  $Pr_t$  สำหรับการไหลแบบปั่นป่วนในท่อกลมแนวนอนมีค่าเท่ากับ 0.9 ซึ่งจะใช้เป็นค่าคงที่ แต่จากความสัมพันธ์ ดังสมการ 27 จะจัดรูปใหม่โดย

$$Pr_t = \frac{\varepsilon_m / \nu_1}{\varepsilon_h / \nu_1} \quad (29)$$

เมื่อแทนค่า สมการ 28 ลงในสมการ 22 จะได้ว่า

$$q / q_0 = (\frac{1}{Pr} + \frac{1}{Pr_t} \cdot \frac{\varepsilon_m}{\nu_1}) \frac{dT^+}{dy^+} \quad (30)$$

ย้ายข้างสมการแล้วทำการอินทิเกรตระยะตามแนวรัศมีจะได้ว่า

$$T_{\delta}^+ = \int \left( (q/q_0) / \left( 1/Pr + (1/Pr_t) * (\epsilon_m/V_1) \right) \right) dy^+ \quad (31)$$

ค่าที่อินทิเกรตได้คือค่าอุณหภูมิไร้มิติ ของชั้นฟิล์มเหลวซึ่งแสดงได้ว่า

$$T_{\delta}^+ = (T_0 - T_{\delta}) u^* / (q_0 / (\rho_1 C_{pl})) \quad (32)$$

ซึ่งจะสามารถอินทิเกรตสมการที่ 30 ได้ต้องทราบค่าเทอม  $(q/q_0)$  และ  $(\epsilon_m/V_1)$  ในรูปของตัวแปร  $y^+$  ก่อนซึ่งจะสามารถใช้ทฤษฎี Prandtl's mixing length กับ Van-Dreist's hypothesis เพื่อจัดรูปเทอม  $(\epsilon_m/V_1)$  ในรูปของตัวแปร  $y^+$  ได้ ซึ่งสามารถแสดงดังนี้

Van-Dreist's hypothesis เมื่อใช้ Prandtl's mixing length 'l' จะได้ว่า

$$l = ky \left[ 1 - \left( 1 / e^{y^{A^+}} \right) \right] \quad (33)$$

เมื่อ  $k = 0.4$  เป็นค่าคงที่ Von Karman's ในกรณี การไหลภายในท่อ  
 $A^+ = 26.0$  ค่าคงที่กรณีการไหลภายในท่อ ( Chitti and Anand 1995 )

จากนิยามของ  $\epsilon_m$  จะได้ว่า

$$\epsilon_m = l^2 \left| \frac{du}{dy} \right| \quad (34)$$

แทนค่า l ในสมการจะได้ว่า

$$\epsilon_m = k^2 y^2 \left[ 1 - \left( 1 / e^{y^{A^+}} \right) \right]^2 \left| \frac{du}{dy} \right| \quad (35)$$

จัดให้อยู่ในรูปตัวแปรไร้มิติได้ว่า

$$\epsilon_m / V_1 = k^2 y^2 \left[ 1 - \left( 1 / e^{y^{A^+}} \right) \right]^2 \left| \frac{du^+}{dy^+} \right| \quad (36)$$

ในเทอมของ  $\left| \frac{du^+}{dy^+} \right|$  จะใช้การกระจายตัวของความเร็วจาก Von Karman 's universal distribution

$$u^+ = y^+ \quad ; \quad 0 < y^+ < 5$$

$$u^+ = -3.05 + 5 \ln(y^+) \quad ; \quad 5 \leq y^+ \leq 30$$

$$u^+ = 5.5 + 2.5 \ln(y^+) \quad ; \quad y^+ \geq 30$$

ดังนั้น เทอม  $\mathcal{E}_m / V_1$  สามารถแทนในรูปของ  $y^+$  ได้ทุกค่า

ส่วนเทอม  $(q / q_0)$  โดยการสมดุลฟลักซ์ความร้อนที่ถ่ายเทผ่านผิวของเหลวของชั้นฟิล์มไปที่ผิวภายในท่อที่สภาวะ steady state เมื่อพิจารณาเฉพาะในแนวรอบวงโดยไม่คิดถึงการกระจายตัวตามแนวแกนการไหลจะได้ว่า

$$q(2\pi r L) = q_0(2\pi r_0 L)$$

เมื่อ  $r = r_0 - y$

$$\frac{q}{q_0} = \frac{r_0}{r} \frac{r_0}{r_0 - y} = \frac{1}{1 - \frac{y}{r_0}} = \frac{1}{1 - \frac{y^+}{r_0^+}} \quad (37)$$

ซึ่งจะสามารถจัดรูปให้อยู่ในเทอมของ  $y^+$  ได้ และนำสมการ 36 และ 37 ไปแทนในสมการ 31 ก็จะสามารถอินทิเกรตได้

ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉพาะที่จะสามารถหาได้จากนิยามคือ

$$h_x = \frac{q_0}{T_0 - T_\delta} = \frac{\rho l C_{pl} u^*}{T_\delta^+} \quad (38)$$

โดยที่ค่า  $u^*$  คือ friction velocity สามารถหาได้จากการสมดุลแรงในปริมาตรเล็ก ยาว  $dz$  ของ condenser จากรูปที่ 2.11 เราจะได้ว่า

$$\tau_0 (2\pi r_0) = \left( \frac{dp}{dz} \right)_{TPF} \cdot (\pi r_0^2) \quad (39)$$

ซึ่งสามารถจัดรูปสมการได้ใหม่คือ

$$2\tau_o r_o = \left( \frac{dp}{dz} \right)_{\text{TPF}} \quad (40)$$

โดยใช้ความสัมพันธ์ของตัวแปร Lockhart – Martinelli  $\phi_{\text{VV}}$  จะได้ว่า

$$\left( \frac{dp}{dz} \right)_{\text{TPF}} = \phi_{\text{VV}}^2 \left( \frac{dp}{dz} \right)_v \quad (41)$$

แทนสมการที่ 41 ในสมการที่ 40 และจากสมการที่ 39 นำมาจัดรูปใหม่จะได้ว่า

$$\tau_o / \rho_l = (u^*)^2 = (r_o / 2\rho_l) \phi_{\text{VV}}^2 \left| \frac{dp}{dz} \right|_v \quad (42)$$

จากงานวิจัยของ Azer et.al พบว่า

$$\phi_{\text{VV}} = 1 + 2.85 X_{\text{tt}}^{0.523} \quad (43)$$

เมื่อ

$$X_{\text{tt}} = \left( \frac{\mu_l}{\mu_v} \right)^{0.1} \left( (1-x) / x \right)^{0.9} \left( \frac{\rho_v}{\rho_l} \right)^{0.5} \quad (44)$$

และ

$$\left| \frac{dp}{dz} \right|_v = 0.143 \mu_v^{0.2} W_v^{0.8} / \rho_v D^{4.8} \quad (45)$$

$$W_v = W_T \cdot x \quad (46)$$

จากรูปที่ 2.11 เราสามารถได้ค่า อัตราการไหลของของเหลวคือ  $W_l$

$$W_l = 2\pi\rho_l \int_0^{r_o} (r_o - y) dy \quad (47)$$

จากค่า x

$$W_l = W_T \cdot (1-x) \quad (48)$$

ดังนั้นสามารถคำนวณหาอัตราการไหลรวมได้จาก

$$W_{\text{T,CALC}} = \frac{2\pi\rho_l}{1-x} \cdot \int_0^{r_o} (r_o - y) dy \quad (49)$$

สมการที่ 23 สามารถเขียนในรูปตัวแปรไร้มิติได้โดย

$$W_{\text{T,CALC}} = \frac{2\pi\rho_l V_l}{(1-x) \cdot u^*} \cdot \int_0^+ (r_o^+ - y^+) dy^+ \quad (50)$$

เมื่อ  $W_T$  คือ Total mass flow rate คำนวณที่ ระยะต่างๆ ตามแนวแกน

ดังนั้นเมื่อคำนวณ ได้ค่า  $u^*$  และ  $T_{\delta}^+$  แล้วนำไปแทนในสมการที่ 38 แล้วจะหาค่า  $h_x$  ได้ ซึ่งจากวิธีการวิเคราะห์ทางทฤษฎีนี้ จะเห็นความสัมพันธ์ของอุณหภูมิ, การลดลงของความดัน และ ฟลักซ์การถ่ายเทความร้อน แบบจำลองดังกล่าวข้างต้นเป็นแบบจำลองที่พัฒนามาจากสมการกำกับ

พื้นฐานทางทฤษฎีของการพาความร้อน (Kays and Crawford 1980) ซึ่งจากผลการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Chitti and Anand 1995) พบว่ามีเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง  $\pm 25\%$

## 2.5 การถ่ายเทความร้อนของฟิล์มน้ำบนท่อเรียบแนวนอนโดยการระเหย ( Falling film on horizontal tube with evaporative cooling )

การถ่ายเทความร้อนของชุดควบแน่นสารทำความเย็นในระบบการทำความเย็นสามารถแบ่งได้เป็นสองประเภทใหญ่ๆ คือการระบายความร้อนด้วยอากาศ และการระบายความร้อนด้วยน้ำ ซึ่งโรงงานผลิตน้ำแข็งทำให้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อเปลือกส่วนใหญ่ จะอาศัยการแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยน้ำโดยนำน้ำอุณหภูมิบรรยากาศหรือในบางโรงงานที่มีการออกแบบที่ดี อาจจะนำน้ำที่ได้มาจากการระบายความร้อนกับหอพ่นน้ำ (Cooling Tower) น้ำที่ได้จะมีอุณหภูมิต่ำกว่าบรรยากาศเล็กน้อย น้ำที่จะนำมาถ่ายเทความร้อนออกจากระบบควบแน่นสารทำความเย็นในโรงงานน้ำแข็งจะถูกนำมาปล่อยผ่านท่อเพื่อให้ น้ำไหลผ่านท่อสารทำความเย็นโดยอาศัยการพาความร้อนโดยการระเหยของฟิล์มน้ำเป็นการดูดความร้อนออกไปเพื่อช่วยควบแน่นสารทำความเย็นภายในท่อ จากการศึกษาของ Armbruster et. al (1998) พบว่าลักษณะการพาความร้อนของฟิล์มน้ำที่ไหลผ่านท่อเรียบแนวนอน โดยมีการระเหยของฟิล์มน้ำเนื่องจากการถ่ายเทความร้อนและมวลของฟิล์มน้ำกับผิวของท่อและอากาศพบว่าตัวแปรที่สำคัญที่จะส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนของฟิล์มน้ำคือ รูปแบบการไหลของฟิล์ม, อัตราการไหลของฟิล์มน้ำ, ความเร็วของอากาศ และระยะห่างของท่อที่อยู่ถัดไป

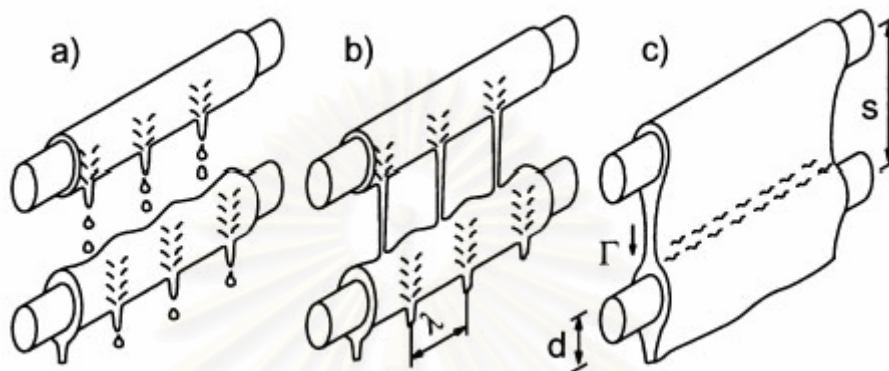
### 2.5.1 รูปแบบการไหลของฟิล์ม

พื้นที่ในการสัมผัสอากาศของฟิล์มจะเป็นไปตามลักษณะการไหลของฟิล์มดังรูปที่ 2.12 ซึ่งแปรผันกับอัตราการไหลและระยะห่างระหว่างท่อ ซึ่งสามารถแบ่งเป็น 3 ประเภทดังนี้

2.5.1.1 การไหลของฟิล์มน้ำแบบหยดน้ำ (droplets) ลักษณะการไหลของน้ำที่ไหลผ่านท่อที่มีอัตราการไหลค่อนข้างต่ำและระยะห่างท่อมากจะทำให้การไหลของฟิล์มขาดเป็นช่วงๆจนทำให้น้ำที่ไหลขาดจากกันเป็นลักษณะการไหลตกของหยดน้ำในอากาศ การไหลแบบนี้จะมีพื้นที่ในการสัมผัสอากาศมากที่สุด

2.5.1.2 การไหลของฟิล์มน้ำแบบแท่ง (columns) ลักษณะการไหลของน้ำที่ไหลผ่านท่อที่อัตราการไหลปานกลางไม่สูงมากนักและระยะห่างระหว่างท่อไม่มากนัก ฟิล์มน้ำที่ไหลผ่านผิวท่อแต่ละชั้นจะต่อเนื่องกันในลักษณะเป็นแท่งๆ ต่อเนื่องไปตามแนวยาวของท่อ ฟิล์มน้ำจะมีพื้นที่ในการถ่ายเทสัมผัสอากาศน้อยกว่าแบบหยดน้ำ

2.5.1.3 การไหลของฟิล์มน้ำแบบแผ่นของเหลว (liquid sheet) เป็นลักษณะการไหลของน้ำที่มีอัตราการไหลสูงและระยะห่างของท่อน้อยทำให้น้ำที่ไหลผ่านท่อแต่ละชั้นไหลต่อเนื่องกัน โดยคุณสมบัติของความตึงผิวของน้ำแล้วน้ำที่ไหลจึงเกาะตัวกันเกิดเป็นแผ่นฟิล์มน้ำไหลอย่างต่อเนื่องกัน



รูปที่ 2.12 ลักษณะการไหลของฟิล์มน้ำผ่านท่อเรียบแนวอนแบบต่างๆ (a) Droplets, (b) Columns (c) Liquid sheet. (Armbruster and Mitrovic 1998)

### 2.5.2 ความดันไอน้ำในอากาศ

ความดันไอน้ำในอากาศเป็นคุณสมบัติของอากาศที่อยู่โดยรอบเป็นตัวแปรที่จะสามารถบอกคุณสมบัติในการระเหยของน้ำที่สัมผัสกับอากาศในขณะนั้นซึ่งเป็นผลเกี่ยวเนื่องกับอุณหภูมิอากาศ , ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ ขณะนั้นด้วย

### 2.5.3 ความเร็วของอากาศ

ความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านฟิล์มน้ำจะส่งผลมากกว่าความแตกต่างของอุณหภูมิอากาศกับน้ำ (Armbruster and Mitrovic ) เนื่องจากการเพิ่มความเร็วของอากาศที่สัมผัสกับน้ำจะเป็นการเร่งอัตราการถ่ายเทมวลของน้ำกับอากาศซึ่งมีผลกับการถ่ายเทความร้อนได้สูงกว่าการเพิ่มความแตกต่างของอุณหภูมิอากาศกับน้ำที่จะส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนเพียงอย่างเดียว แต่อย่างไรก็ตาม การเพิ่มความเร็วของอากาศก็มีข้อจำกัดคือต้องไม่มากเกินไปจนทำให้ฟิล์มของน้ำเสียหายไป นั่นคือส่งผลต่อความเค้นเฉือนของของเหลวซึ่งจะทำให้อัตราการไหลของฟิล์มลดลง และจะทำให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนลดลง

## 2.6 แบบจำลองการคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของฟิล์มน้ำที่ไหลผ่านท่อแนวนอน

แบบจำลองที่ศึกษาจะเป็นการคำนวณหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของฟิล์มน้ำที่ไหลผ่านท่อแนวนอน โดยท่อแนวนอนจะวางเรียงศูนย์กลางอยู่ในแนวระนาบเดียวกันและระยะห่างแต่ละท่อเท่ากันเพื่อเป็นการรักษาสมดุลของการไหลของฟิล์มน้ำดังในรูปที่ 2.13

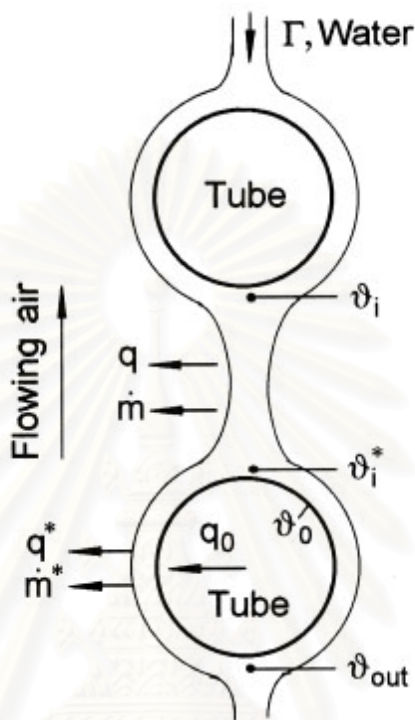


Illustration of heat and mass transfer processes associated with liquid film falling on horizontal tubes.

รูปที่ 2.13 แสดงภาพจำลองการถ่ายเทความร้อนและมวลของฟิล์มที่ไหลผ่านท่อแนวนอน

(Armbruster and Mitrovic 1998)

จากนิยามของสัมประสิทธิ์การพาความร้อนคือ

$$h_i = \frac{q_0}{T_s - T_f} \quad (51)$$

เมื่อพิจารณาการไหลของฟิล์มจากค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์

$$Re = \frac{\Gamma}{\mu} \quad (52)$$

หรือสามารถแสดงในรูปของ

$$Re = A Ka^n \quad (53)$$

เมื่อ  $A$  คือค่าคงที่ของการไหล โดยที่  $A = 0.11$  สำหรับค่าสูงสุดของเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ที่ฟิล์มไหลแบบหยดน้ำ  $A = 0.15 - 0.37$  สำหรับการไหลแบบแท่ง และ  $A = 0.48$  สำหรับการไหลแบบแผ่นของเหลว



n คือค่าคงที่ เท่ากับ 0.25 สำหรับน้ำ (Armbruster and Mitrovic 1998)

$$Ka = \sigma^3 \cdot \frac{\rho_L}{g \cdot \mu_L^4}$$

จากการทดลองของ Armbruster et.al พบว่าแบบจำลองที่เหมาะสมในการหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของฟิล์มน้ำที่ไหลผ่านท่อแนวนอนแบบท่อเดียว (Single tube) คือ

$$h_i = \frac{q_0}{T_s - T_{fi}} \quad (54)$$

จะได้ว่า

$$h_i = Nu_i k_L \left(\frac{g}{v_L^2}\right)^{1/3} \quad (55)$$

$$Nu_i = Nu_{i1} \left(1 + \left(\frac{Nu_{i1}}{Nu_{i2}}\right)^4\right)^{-1/4} \cdot \left(\frac{s}{d}\right)^m \quad (56)$$

เมื่อ

$$Nu_{i1} = 0.5 Re_L Pr_L Ga^{-1/3}$$

$$Nu_{i2} = F Re_L^n \cdot Pr_L^{2/3} \left(1 + 0.5 \left(\frac{1}{Re_L} \cdot \frac{q}{h_{fg} \mu_L} \cdot (v_L^2 / g)^{1/3}\right)^{0.075}\right)$$

$$F = 0.0135 \left(1 - 0.05 \cdot e^{-(0.46 \cdot \frac{Ka^{0.25}}{Re_L})^{12}}\right)$$

$$Ga = \left(\pi \cdot \frac{d}{2}\right)^3 \cdot \frac{g}{v_L^2}$$

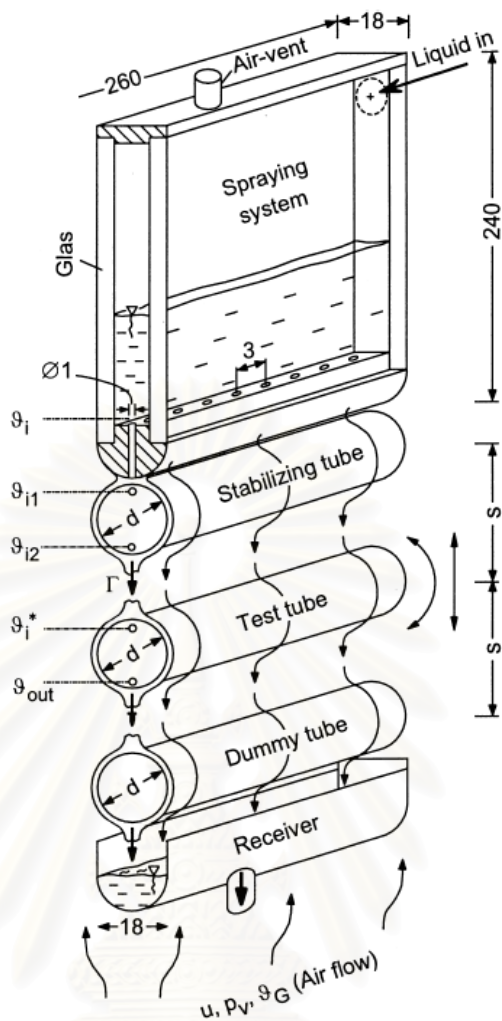
$$n = 1/3 \cdot \frac{Ka^{0.092}}{(1 + Ka^{0.092})}$$

$$m = 0.16 \cdot Re_L \cdot (Ka^{0.025} - \frac{5.25}{(Re_L \cdot Ka^{0.025} + 1)})$$

โดยที่ คุณสมบัติของเหลวที่อุณหภูมิ

$$T_b = 0.5(T_s + 0.5(T_{fi}^* + T_{fo})) \quad (57)$$

จากงานวิจัยของ Armbruster et.al นี้มีความคล้ายคลึงกับการวิจัยในครั้งนี้เพียงแต่งานวิจัยของ Armbruster et.al เป็นการหาการถ่ายเทความร้อนจากสภาพท่อที่มีอุณหภูมิผิวคงที่และมีค่าฟลักซ์ความร้อนคงที่ซึ่งภายในท่อไม่มีการไหลแต่อย่างใดและยังมีผลจากการ Pre-cooling ของฟิล์มน้ำก่อนที่จะเกิดการถ่ายเทความร้อนกับท่อทดสอบจริงซึ่งอุปกรณ์การทดลองของ Armbruster et.al นั้นจะแสดงได้ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 ภาพจำลองอุปกรณ์การทดลองในงานวิจัยของ Armbruster et.al (1998)

จากแบบจำลองในการหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของฟิล์มน้ำข้างต้นซึ่งจะได้ใช้เป็นแนวทางในการคำนวณเพื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยในครั้งต่อไป

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

M.S. Chitti and N.K. Anand (1994)

ได้ทำการศึกษาการควบแน่นของสารทำความเย็น(R-22)ในท่อแนวนอนโดยการใช้อาศัยสมการพื้นฐานของการไหลและการถ่ายเทความร้อน และการถ่ายเทโมเมนตัม และสร้างแบบจำลองทางทฤษฎีโดยทำให้สมการง่ายขึ้นโดยการจัดรูปให้อยู่ในรูปตัวแปรไร้มิติ และใช้ Van-Dreist's hypothesis ในการลดความยุ่งยากของสมการโมเมนตัมให้อยู่ในรูปของความเร็ว และการใช้รูปแบบการกระจายความเร็วของ Von-Karman's universal velocity distribution ในการแปลงสมการให้ง่ายขึ้น จากนั้นเมื่อได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่เหลือตัวแปร เพียงความเร็ว ความสูงของชั้นฟิล์ม และอุณหภูมิของชั้นฟิล์มก็สามารถหาค่าได้และใช้การคำนวณแบบทำซ้ำเพื่อหาค่าโดยการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (Fortran )เพื่อช่วยในการคำนวณ ก็สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉพาะที่ได้ และได้ค่าความหนาของชั้นฟิล์มของเหลว และอุณหภูมิชั้นฟิล์ม จากนั้นก็นำไปเทียบกับค่าที่ได้จากการวัดจริงจากการทดลองเพื่อหาค่าความคลาดเคลื่อนพบว่ามี ความคลาดเคลื่อนอยู่ที่  $\pm 25\%$  โดยที่แบบจำลองที่ได้จะลดความยุ่งยากจากการหาความเค้นเฉือนของของไหล , การลดลงของความดัน และ void fraction

J.El Hajal , J.R. Thome and A. Cavallini Part1 (2002)

จากการศึกษาแบบจำลองเดิมที่พัฒนามาจากการระเหย(evaporation) ซึ่ง Cavallini และคณะ ได้ทำการศึกษาและต่อมาได้พัฒนามาเพื่อใช้กับการควบแน่น ( condensation ) โดยอ้างอิงจากแบบจำลองพื้นฐานจากแบบจำลอง Void fraction ที่เป็น homogeneous ที่พิจารณาว่าของไหลทั้งสองสถานะมีความเร็วเดียวกันและ แบบจำลองที่เป็นแบบ drift flux ที่พิจารณาถึงแรงดึงดูดระหว่างรอยต่อระหว่างของไหลทั้งสองสถานะด้วยซึ่งแบบจำลองทั้งสองก็ใช้กันอย่างแพร่หลายแต่ Cavallini ก็ได้พิจารณาพบว่าสามารถทำให้มีความถูกต้องมากขึ้นจึงได้พัฒนาแบบจำลองใหม่โดยอาศัยการอ้างอิงจากแบบจำลองทั้งสองเรียกว่า แบบจำลองค่าเฉลี่ยลอการิทึม ( Logarithmic mean void fraction model) ซึ่งได้ทำการทดสอบแบบจำลองและเทียบผลที่ได้จากการทดลองโดยทดสอบกับสารทำความเย็นชนิดต่างๆ รวม 6 ชนิด พบว่ามีค่าความถูกต้องมากขึ้น

J.R. Thome, J.El Hajal and A. Cavallini Part2 (2002)

เป็นการศึกษาต่อจากภาคที่1 ของงานวิจัยก่อนหน้าเพื่อนำแบบจำลองในการหาค่า void fraction แบบลอการิทึมมาใช้พัฒนาต่อไปเพื่อหาแบบจำลองในการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของไหลสองสถานะในแบบต่างๆ โดยแบ่งเป็นการไหลได้ 5 แบบหลักคือ annular flow , stratified-wavy flow , fully stratified flow , intermittent flow และ bubbly flow โดยจะพิจารณาการแบบจำลองที่ใช้ เหลือเพียง 3 แบบเท่านั้น โดย intermittent flow และ bubbly flow

จะใช้สมมุติฐานเดียวกับการไหลแบบ annular flow โดยสมมุติฐานหลักที่ใช้คือการพาความร้อนในท่อจะมาจาก 2 ส่วนคือ การพาความร้อนจากการไหลตกของฟิล์ม รวมกับการพาความร้อนจากของไหลที่วิ่งในท่อโดยอิทธิพลของการพาความร้อนทั้งสองแบบจะมีมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดการไหล โดยการไหลแบบ annular flow นั้นจะไม่คิดการพาความร้อนจากฟิล์มที่ไหลตกเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก เพราะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับการพาความร้อนจากของไหลที่วิ่งในท่อ และแบ่งการไหลแบบ annular flow เป็นสองแบบทั้งแบบราบเรียบ และแบบปั่นป่วนในชั้นฟิล์มโดยพิจารณาจากค่าความหยาบของผิวรอยต่อสองสถานะซึ่งจากการทดลองพบว่ามีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเพราะจะทำให้เกิดการปั่นป่วนของชั้นฟิล์มช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้ ซึ่งแบบจำลองได้พัฒนาเทียบผลการคำนวณที่ได้กับค่าที่ได้จากการทดลองของสารทำความเย็น 11 ชนิดจากห้องทดลองเอกชน 9 แห่ง ซึ่งผลที่ได้มีค่าความถูกต้องอยู่ในเกณฑ์  $\pm 20\%$

F.J Smit , J.P. Meyer (2002)

งานวิจัยของ Smit และ Myer เน้นที่การทำกรทดลองเพื่อหาทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของสารทำความเย็น โดยอาศัยการสมมูลพลังงานของระบบโดยรวมเป็นแนวคิดที่แสดงถึงการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนได้จากการเก็บข้อมูลการทดลองโดยแบ่งชุดทดลองออกเป็น 8 ช่วงต่อเนื่องกันเพื่อวัดค่าความแตกต่างของความดันและอุณหภูมิของสารทำความเย็นและน้ำหล่อเย็น เพื่อนำไปสมมูลพลังงานรวมทั้งหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉพาะช่วงซึ่งจากผลที่ได้ สามารถนำไปหาค่าเอนทาลปีในแต่ละช่วงและไปทำนาย ค่า vapor quality ในแต่ละช่วงได้ทำให้สามารถหาแนวโน้มของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนได้

R.Armbruster , J.Mitrovic (1998)

เป็นการศึกษาการถ่ายเทความร้อน โดยการระเหยของฟิล์มน้ำที่ไหลผ่านท่อเรียบแนวนอน โดยการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของฟิล์มน้ำที่ไหลผ่านท่อแนวนอน โดยคำนึงถึงการถ่ายเทความร้อนของการระเหยของฟิล์มน้ำไปในอากาศที่ไหลสวนทางกับการไหลของน้ำซึ่งทำให้การถ่ายเทความร้อนมีประสิทธิภาพสูง ตัวแปรที่เกี่ยวข้องในการพาความร้อนที่ทำการศึกษาคือ อัตราการไหลของน้ำ, อัตราความเร็วของอากาศ, ความดันไออิ่มตัวของอากาศ และ ระยะห่างระหว่างท่อ ซึ่งผลจากการคำนวณเมื่อนำไปเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองแล้วพบว่าแบบจำลองที่ได้มีความถูกต้องสูงอยู่ในเกณฑ์ 95% ซึ่งพบว่าแบบจำลองที่ใช้สามารถนำไปใช้ทำนายสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของฟิล์มน้ำที่ไหลผ่านท่อแนวนอนได้ดี

## บทที่ 3

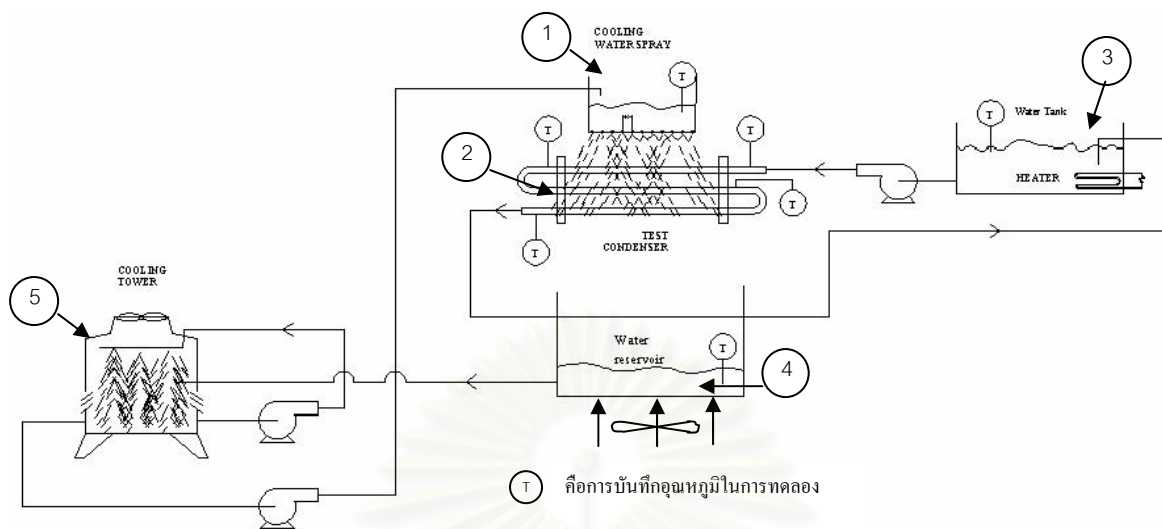
### วิธีการทดลองและอุปกรณ์การทดลอง

#### 3.1 วิธีการทดลอง

การทดลองจะอาศัยการจำลองสภาพการถ่ายเทความร้อนภายนอกชุดอุปกรณ์ควบแน่นเพื่อศึกษาผลของตัวแปรสำหรับการถ่ายเทความร้อนภายนอกสำหรับเครื่องควบแน่นสารทำความเย็น โดยอาศัยหลักการการพาความร้อนภายนอกท่อเปลือก เนื่องจากสภาพความเป็นจริงในการทำงานไม่สามารถปรับปรุงเปลี่ยนแปลงตัวแปรการไหลภายในท่อสารทำความเย็นได้ จึงจะมุ่งเน้นที่จะศึกษาสภาพการถ่ายเทความร้อนภายนอกเนื่องจากการถ่ายเทความร้อนของฟิล์มน้ำเพื่อการศึกษาตัวแปรต่างๆที่ปรับปรุงความสามารถในการถ่ายเทความร้อน โดยที่สภาวะการไหลภายในท่อไม่เปลี่ยนแปลง ดังนั้นจะจำลองสภาพการถ่ายเทความร้อนภายนอกท่อเป็นหลัก ส่วนสภาวะภายในท่อจะจำลองโดยใช้การไหลของน้ำร้อนที่มีการควบคุมอุณหภูมิและสภาพการไหลให้มีความคงตัว

สภาพการถ่ายเทความร้อนภายนอกท่อ โดยการพาความร้อนของฟิล์มน้ำจะเป็นวัตถุประสงค์หลักของการวิจัยนี้ โดยที่จะออกแบบชุดทดลองให้สามารถมีการแปรเปลี่ยนค่าตัวแปรต่างๆที่ส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนดังที่ได้ศึกษาทางทฤษฎีมา ดังนี้

- อัตราการไหลของฟิล์มน้ำ แปรเปลี่ยนอัตราการไหลในช่วง  $0.05 - 0.38 \text{ kg/m.s}$  ซึ่งการวัดอัตราการไหลของน้ำบนท่อจะเป็นการวัดมวลของน้ำที่ไหลผ่านท่อกับเวลาต่อความยาวของท่อซึ่งเป็นการวัดอัตราการไหลฟิล์มทั่วไปบนท่อเรียบแนวนอน
- รูปแบบการไหลของฟิล์ม จากการแปรเปลี่ยนอัตราการไหลของฟิล์มจะทำให้ได้รูปแบบการไหลทั้ง 3 ชนิดจากทฤษฎีคือ droplet , column และ liquid sheet
- ระยะห่างระหว่างท่อ จะทำการแปรเปลี่ยนระยะห่างของท่อจากจุดศูนย์กลางท่อ (s) ซึ่งทางทฤษฎีจะพิจารณาในเทอมไร้หน่วยคือ ระยะห่างระหว่างท่อกับเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (s/d) โดยทำการศึกษาที่ค่า 1.4 , 2.5 และ 3.5 ซึ่งค่าที่ได้มีแนวคิดมาจากการงานวิจัยของ Armbruster และ Mitrovic เพื่อที่จะสามารถเปรียบเทียบผลการทดลองกับแบบจำลองทางทฤษฎีได้
- ความเร็วอากาศ ความเร็วของอากาศที่ไหลสวนทางกับการไหลนั้นจะทำการแปรเปลี่ยนที่ความเร็ว 0.96 , 1.2 และ 1.45 m/s ซึ่งเป็นความเร็วลมที่ได้จากการทดสอบโดยการวัดความเร็วลมจะวัดที่บริเวณด้านข้างใกล้กับฟิล์มน้ำมากที่สุดซึ่งแตกต่างจากการวัดความเร็วลมที่ต้นทางของงานวิจัยของ Armbruster และ Mitrovic ซึ่งทำให้ไม่สามารถประเมินความเร็วลมจริงที่ฟิล์มได้รับได้



รูปที่ 3.1 ภาพระบบจำลองเพื่อศึกษาการถ่ายเทความร้อนโดยการระเหยสำหรับท่อเปลือย

จากรูปที่ 3.1 แสดงระบบจำลองของชุดทดลองซึ่งแสดงให้เห็นส่วนประกอบหลักๆของการทดลองดังนี้

(1) คือ ชุดสร้างฟิล์มน้ำโดยสร้างจากแผ่นอะคริลิกใสหนา 3 มม. มาประกอบและตัดโค้งที่ด้านล่างและเจาะรูขนาด 1 มม. ทุกๆระยะห่าง 3 มม. เหมือนชุดสร้างฟิล์มน้ำในงานวิจัยของ Armbruster และ Mitrovic แต่มีความยาวมากกว่าคือ 50 ซม. เพื่อให้ น้ำกระจายตลอดความยาวท่อทดสอบน้ำที่ใช้เป็นฟิล์มแลกเปลี่ยนความร้อนมาจากห่อฟุ้งน้ำเข้าทางช่องเปิดด้านบนและควบคุมอัตราการไหลฟิล์มด้วยปั้มน้ำและวาล์วห้เพื่อควบคุมความสูงของน้ำในชุดสร้างฟิล์มน้ำนี้ทำให้น้ำที่ออกจากชุดสร้างฟิล์มน้ำมีอัตราการไหลมากน้อยได้ตามต้องการ

(2) คือ ชุดท่อทดสอบเป็นท่อทองแดงมีความยาวในช่วงทดสอบ 50 ซม. ความยาวรวมของท่อ 80 ซม. เหลือด้านปลาย 2 ด้านเพื่อต่อท่อโค้งและติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลที่ฝังไว้ในท่อด้านทางเข้าออก โดยจะมีโพรบวัดบันทึกอุณหภูมิน้ำร้อนในท่อเข้าออกทั้งหมด 4 จุดดังรูปท่อจะถูกยึดไว้แน่นกับโครงเหล็กเพื่อให้มีระยะห่างและความยาวในการทดสอบการแลกเปลี่ยนความร้อนคงที่โดยระยะห่างระหว่างท่อจะถูกตั้งโดยตัวยึดท่อซึ่งต้องทำการเปลี่ยนทุกครั้งทีเปลี่ยนค่าระยะห่างของท่อโดยท่อทองแดงที่ใช้เป็นท่อทองแดงแลกเปลี่ยนความชนิค L มี 2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคือ 12.8 มม. หนา 1 มม. และ 19 มม. หนา 1 มม. ภายในท่อจะมีน้ำร้อนไหลผ่านและด้านนอกจะมีฟิล์มน้ำเพื่อทดสอบการแลกเปลี่ยนความร้อน

③ คือ ชุดทำน้ำร้อนเป็นภาชนะปิดพร้อมติดตั้งฮีทเตอร์ไฟฟ้าแบบจุ่มน้ำขนาด 4 kW ไว้ภายในควบคุมการทำงานโดยตู้ควบคุมไฟฟ้าป้องกันให้กับฮีทเตอร์โดยมีเทอร์โมคัปเปิลควบคุมอุณหภูมิภายในและในภาชนะมีปั้มน้ำแบบจุ่มน้ำเพื่อทำการจ่ายน้ำร้อนเพื่อให้เข้าไปในท่อทองแดงเพื่อลำเลียงความร้อนและไหลกลับมาที่ภาชนะอีกครั้ง

④ คือ ชุดรองรับน้ำเป็นภาชนะรองรับฟิล์มน้ำที่ผ่านการถ่ายความร้อนแล้วเพื่อสูบจ่ายไปที่หอฟุ้งน้ำให้แลกเปลี่ยนความร้อนกับอากาศให้พร้อมที่จะแลกเปลี่ยนความร้อนอีกครั้งที่ด้านล่างมีพัดลมวางไว้พร้อมกับใบปรับทิศทางเพื่อให้ลมมีทิศทางสวนทางกับการไหลตกของฟิล์ม

⑤ คือ หอฝุ้งน้ำที่สร้างขึ้นอย่างง่ายเพื่อใช้ในการทำน้ำที่จะใช้เป็นฟิล์มแลกเปลี่ยนความร้อนโดยออกแบบให้มีขนาดใหญ่รองรับน้ำให้มากพอที่จะทำการทดสอบโดยอุณหภูมิของฟิล์มน้ำขณะทำการทดลองมีค่าคงที่

### 3.2 ขั้นตอนการทดลอง

จะลำดับขั้นตอนการทดลองที่ใช้เก็บผลการทดสอบจริงไว้เป็นข้อๆ ดังนี้

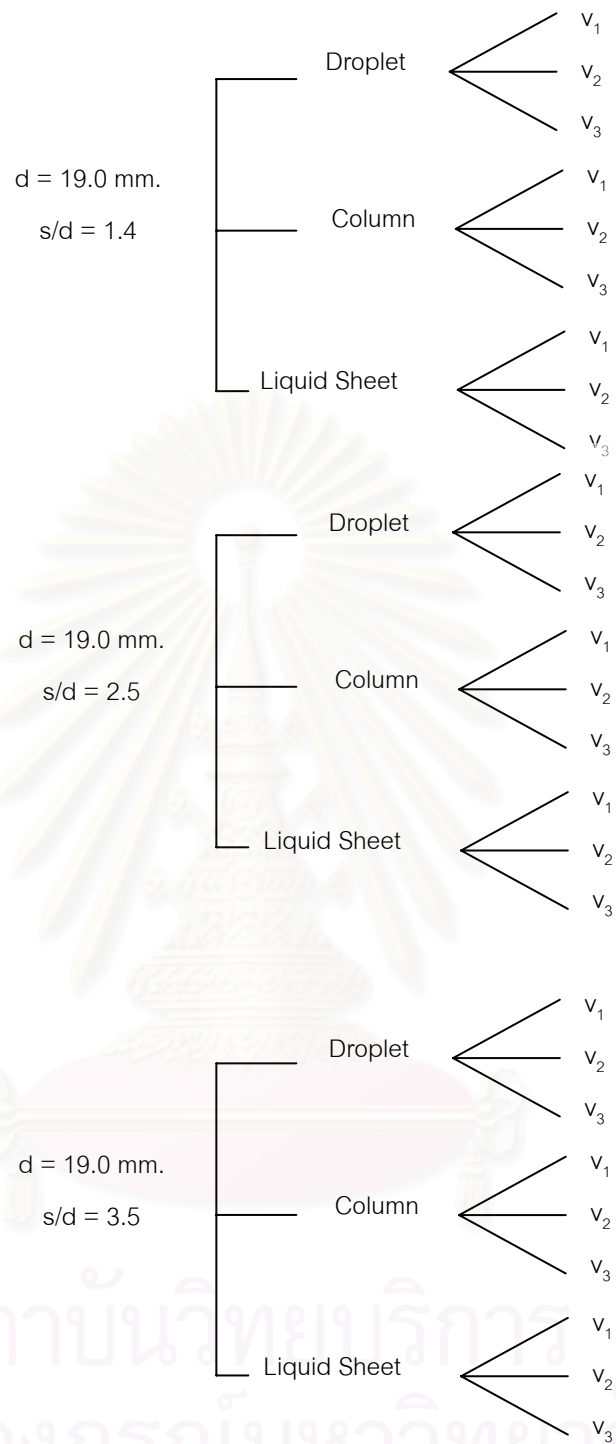
- 3.2.1. ติดตั้งชุดท่อทดสอบกับโครงเหล็กโดยกำหนดตัวยึดท่อที่กำหนดระยะห่างไว้ และขนาดท่อที่ต้องการทดสอบและเชื่อมต่อท่อแต่ละท่อนด้วยข้อต่อ
- 3.2.2. เปิดเครื่องบันทึกข้อมูลอุณหภูมิและเชื่อมต่อสายเทอร์โมคัปเปิลกับอุปกรณ์และคอมพิวเตอร์เพื่อทดสอบการอ่านค่าและรอกการบันทึก
- 3.2.3. จัดวางพัดลมในตำแหน่งที่กำหนดไว้ที่ทดสอบและวัดค่าอัตราเร็วลมเพื่อการทดลองไว้แล้ว
- 3.2.4. ทำการเดินปั้มน้ำหมุนเวียนน้ำในหอฝุ้งน้ำเพื่อให้อุณหภูมิน้ำปกคิลลดลงให้เข้าใกล้อุณหภูมิกระเปาะเปียกมากที่สุดโดยทั่วไปจะต้องเดินหอฟุ้งน้ำไว้ก่อนการทดสอบประมาณ 15 นาที เพื่อให้อุณหภูมิน้ำคงที่พร้อมทดสอบและหอฟุ้งน้ำจะเดินตลอดเวลาที่ทำการทดสอบเพื่อรักษาอุณหภูมิ
- 3.2.5. ตวงน้ำในชุดทำน้ำร้อนในระดับควบคุมให้ได้ระดับที่กำหนดไว้ซึ่งมีปริมาณเท่ากันทุกครั้งและโดยส่วนใหญ่ของการทดลองไม่ต้องเติมมากนักเพราะเป็นภาชนะปิดโดยการเริ่มต้นการทดลองสำหรับท่อขนาดเท่ากันจะทำการเดินปั้มน้ำหมุนเวียนและปรับวาล์วควบคุมอัตราการไหลน้ำร้อนไว้ค่าหนึ่งและทำการวัดอัตราการไหลน้ำร้อน 3 ครั้งเพื่อหาค่าเฉลี่ยไว้และจะไม่ทำการปรับเปลี่ยนอีกเลยจนกว่าจะทำการเปลี่ยนขนาดท่อทองแดงในการทดลอง

- 3.2.6. จากนั้นเปิดสวิทช์ควบคุมอุณหภูมิน้ำร้อนตัวควบคุมจะสั่งให้ฮีทเตอร์ทำงาน โดยตั้งค่าน้ำร้อนไว้ที่  $50^{\circ}\text{C}$  และเปิดปั้มน้ำหมุนเวียนน้ำร้อนภายในท่อทดสอบซึ่ง น้ำจะไหลวนกลับมาที่ชุดทำน้ำร้อนทิ้งไว้จนกระทั่งอุณหภูมิคงที่และได้ตามค่า ที่ตั้งไว้ซึ่งฮีทเตอร์จะหยุดทำงาน
- 3.2.7. ในขณะที่รออุณหภูมิน้ำร้อนจะเริ่มปล่อยน้ำเข้าสู่สร้างฟิล์มน้ำเพื่อปรับอัตรา การไหลของฟิล์มน้ำโดยฟิล์มน้ำจะไหลผ่านท่อและนำภาชนะทรงยาวไปรองรับ น้ำที่ไหลผ่านท่อตามแนวยาวพร้อมกันนั้นจับเวลาด้วยนาฬิกาจับเวลาช่วงหนึ่ง จากนั้นนำน้ำที่ได้ไปชั่งน้ำหนักเทียบกับเวลาและความยาวของภาชนะเพื่อคำนวณ อัตราการไหลฟิล์มต่อความยาวท่อในหน่วยของ  $\text{kg/m}\cdot\text{s}$  ซึ่งต้องปรับจนได้ค่า อัตราการไหลฟิล์มตามต้องการและสังเกตรูปแบบการไหลของฟิล์มตามที่ต้องการ ทดสอบแต่ละครั้งทำการวัด 3 ครั้งเพื่อใช้ค่าเฉลี่ยเป็นอัตราการไหลฟิล์มขณะนั้น
- 3.2.8. จากนั้นจะหยุดปั้มน้ำของชุดสร้างฟิล์มเพื่อรอให้อุณหภูมิน้ำร้อนได้ตามที่ กำหนดไว้และรอให้ฮีทเตอร์หยุดการทำงาน
- 3.2.9. อ่านค่าอุณหภูมิอากาศและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศบันทึกผลไว้
- 3.2.10. เมื่อฮีทเตอร์หยุดทำงานซึ่งสภาวะเริ่มต้นอุณหภูมิผิวของท่อทั้ง 3 ท่อนจะมีค่า เท่ากันก็เริ่มบันทึกค่าอุณหภูมิน้ำร้อน โดยเครื่องบันทึกแบบต่อเนื่องโดยทำการ บันทึกทุกๆ 3 วินาที จากนั้นเปิดปั้มน้ำจ่ายน้ำเย็นจากหอพักน้ำเข้าสู่สร้างฟิล์มน้ำ ก็จะเกิดการไหลของฟิล์มบนท่อและแลกเปลี่ยนความร้อนกับน้ำร้อนในท่อและ เปิดพัดลมตามค่าที่กำหนดไว้พัดลมที่ใช้สามารถปรับระดับความเร็วได้ 3 ระดับ ณ. จุดนี้จะทำการวัดอุณหภูมิฟิล์มน้ำที่เข้าและออกจากท่อแต่ละท่อนโดยแต่ละ ท่อนจะวัดตามแนวยาวท่อ 4 จุด ในขณะเดียวกันบันทึกอุณหภูมิน้ำร้อนที่อ่านได้ จากเครื่องบันทึกขณะนั้นไว้ด้วย และปล่อยให้เครื่องบันทึกข้อมูลบันทึกต่อไป ตลอดจนกระทั่งฮีทเตอร์ทำงานอีกครั้งเนื่องจากอุณหภูมิชุดทำน้ำร้อนต่ำลงโดย ส่วนใหญ่ฮีทเตอร์จะกลับมาทำงานอีกครั้งเมื่ออุณหภูมิต่ำลงประมาณ  $10^{\circ}\text{C}$  เนื่องจากความหยาบและคลาดเคลื่อนของตัวควบคุมอุณหภูมิ
- 3.2.11. ในการเปลี่ยนตัวแปรความเร็วลมที่ระยะห่างและขนาดท่อเดิม เริ่มต้นทำการ ทดลองอีกครั้งตามข้อ 3.2.10 เพียงแต่เปลี่ยนความเร็วลมที่พัดลมจนครบ 3 ค่า
- 3.2.12. ในการเปลี่ยนอัตราการไหลของฟิล์มน้ำจะต้องเริ่มตั้งแต่ข้อ 3.2.7 เพื่อปรับ อัตราการไหลฟิล์มและบันทึกค่าไว้ให้ได้ก่อนและทำการทดลองซ้ำจนถึงข้อ 3.2.10 และวนจนครบ 3 ค่า
- 3.2.13. ในการเปลี่ยนระยะห่างระหว่างท่อจะต้องถอดประกอบตัวยึดท่อกับ โครงเหล็ก ใหม่ซึ่งจะต้องทำการทดลองใหม่ทั้งหมดเนื่องจากการเปลี่ยนจะอาศัยเวลานาน



จากการศึกษาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อ เปลือกโดยอาศัยการพาความร้อนของฟิล์มน้ำ พบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนคือ อัตราการไหลของฟิล์มน้ำ, ความเร็วลม, รูปแบบการไหลของฟิล์มน้ำ และระยะห่างระหว่างท่อ ทำให้การแปรเปลี่ยนตัวแปรของการเก็บผลการทดลองมีมาก ดังนั้น เพื่อความเป็นระบบระเบียบในการทำการทดลอง จึงทำการศึกษาริเริ่มต้นจากท่อทองแดงเส้นผ่านศูนย์กลาง( $d$ ) ขนาด 19.0 มม. หนา 1 มม. โดยมีการแปรเปลี่ยนค่าระยะห่างระหว่างท่อ ( $s$ ) โดยพิจารณาเป็นตัวแปรไร้มิติเป็นสัดส่วนระหว่างระยะห่างระหว่างท่อต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ ( $s/d$ ) โดยทำการศึกษาค่า  $s/d$  ต่างๆ 3 ค่า คือ 1.4, 2.5 และ 3.5 และที่ระยะ  $s/d$  แต่ละค่าจะทำการศึกษาเป็น 3 ช่วงอัตราการไหล ซึ่งจะทำให้ได้รูปแบบการไหล 3 แบบ คือ Droplet flow, Column flow และ Liquid sheet flow ซึ่งในแต่ละรูปแบบการไหลก็จะทำการศึกษาโดยแปรเปลี่ยนความเร็วอากาศรอบข้างอีก 3 ระดับ คือ 0.96, 1.20 และ 1.45 m/s ดังนั้นในท่อขนาด 19.0 มม. จะทำให้มีผลการทดลองย่อย 27 ชุด ซึ่งจะแสดงแผนผังการทำการทดลองได้ ดังรูปที่ 3.2

และเมื่อเปลี่ยนตัวแปรขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเป็นขนาด 12.8 มม. ก็จะต้องเริ่มต้นทำการทดลองแปรเปลี่ยนตัวแปรอื่นๆทั้งหมดนั่นคือการแปรเปลี่ยนค่า  $s/d$  และรูปแบบการไหลทั้งสามแบบและแปรเปลี่ยนความเร็วทั้งสามค่าดังนั้นก็จะมีผลการทดลองอีกอย่างน้อย 27 ชุด ซึ่งในการวิจัยครั้งนี้จะมีผลการทดลองอย่างน้อย 54 ชุด



รูปที่ 3.2 แผนผังการแปรเปลี่ยนตัวแปรและเก็บผลการทดลองของท่อขนาด 19 มม.

### 3.3 อุปกรณ์การทดลอง

การจำลองระบบการถ่ายเทความร้อนของเครื่องควบแน่นแบบท่อเปลือกที่อาศัยการระเหย จะจำลองโดยใช้ชุดท่อทองแดงวางซ้อนกันในลักษณะแนวเส้นผ่านศูนย์กลางท่ออยู่ในระนาบเดียวกันในแนวตั้งและมีชุดควบคุมการไหลของฟิล์มน้ำที่อยู่ด้านบน โดยใช้ปั๊มน้ำและควบคุมอัตราการไหลเพื่อให้ น้ำกระจายตัวอยู่ในชุดสร้างฟิล์มน้ำเพื่อให้ไหลตามแนวยาวของท่ออย่างสม่ำเสมอ ซึ่งจะประกอบไปด้วยอุปกรณ์ย่อยๆอีกหลายส่วนดังนี้

- 3.3.1. ชุดสร้างฟิล์มน้ำเพื่อให้ฟิล์มน้ำกระจายตัวตามแนวยาวท่ออย่างสม่ำเสมอซึ่งได้แบบจำลองมาจากงานวิจัยของ Armbruster et.al (1998)



รูปที่ 3.3 ชุดสร้างฟิล์มน้ำและท่อทองแดง

- 3.3.2. หอผึ่งน้ำอย่างง่ายจัดทำขึ้นเพื่อการระบายความร้อนจากฟิล์มน้ำที่ได้รับความร้อนจากน้ำร้อนภายในท่อทองแดงและเพื่อควบคุมให้อุณหภูมิฟิล์มน้ำที่ใช้ในการทดลองคงที่แต่อุณหภูมิน้ำที่ได้จะเป็นไปตามสภาวะอากาศจริงในวันที่ทดลอง เพื่อให้เกิดความสมจริงกับสภาพการใช้งาน



รูปที่ 3.4 หอผึ่งน้ำอย่างง่าย (Cooling Tower)

3.3.3. ชุดควบคุมอุณหภูมิน้ำร้อนและฮีตเตอร์เพื่อสร้างน้ำร้อนให้ไหลภายในท่อทองแดงและศึกษาการถ่ายเทความร้อนกับฟิล์มน้ำภายนอก



รูปที่ 3.5 ชุดฮีตเตอร์ผลิตน้ำร้อน



รูปที่ 3.6 ชุดควบคุมอุณหภูมิน้ำร้อนและการทำงานของฮีตเตอร์

3.3.4. เครื่องบันทึกอุณหภูมิน้ำแบบสะสมข้อมูล ( Temperature Data Logger)  
บันทึกข้อมูลโดยรับสัญญาณจากโปรบวัดอุณหภูมิชนิด K



รูปที่ 3.7 เครื่องบันทึกอุณหภูมิน้ำแบบสะสมข้อมูล

3.3.5. ตาชั่งน้ำหนักและปิ๊กเกอร์เพื่อวัดอัตราการไหลมวลของฟิล์มน้ำและอัตราการไหลน้ำร้อน โดยทำการตวงและจับเวลาจากนั้นนำมาชั่งน้ำหนักคิดเป็นอัตราการไหลโดยมวล



รูปที่ 3.8 ตาชั่งน้ำหนักและปิ๊กเกอร์ตวงอัตราการไหลมวลของน้ำ

- 3.3.6. เครื่องวัดสภาวะอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์อากาศเพื่อบันทึกข้อมูลสภาวะอากาศในขณะที่ทำการทดลอง



รูปที่ 3.9 เครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์อากาศ

- 3.3.7. เครื่องมือวัดอุณหภูมิผิวและอุณหภูมิน้ำ (โพรบวัดอุณหภูมิชนิด K)



รูปที่ 3.10 เครื่องมือวัดอุณหภูมิแบบสัมผัส

3.3.8. เครื่องมือวัดความเร็วลม (Anemometer) ชนิด digital โดยโพรบแบบใบพัด



รูปที่ 3.11 เครื่องมือวัดความเร็วลม

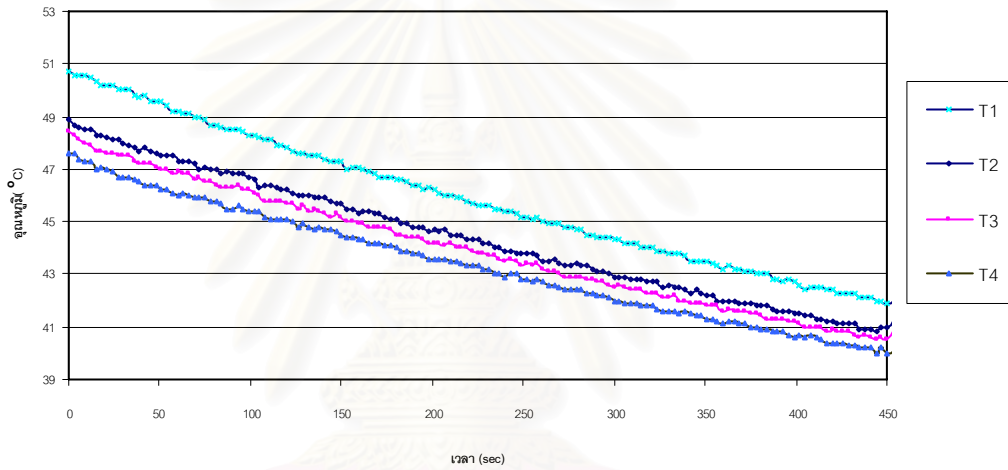
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 4

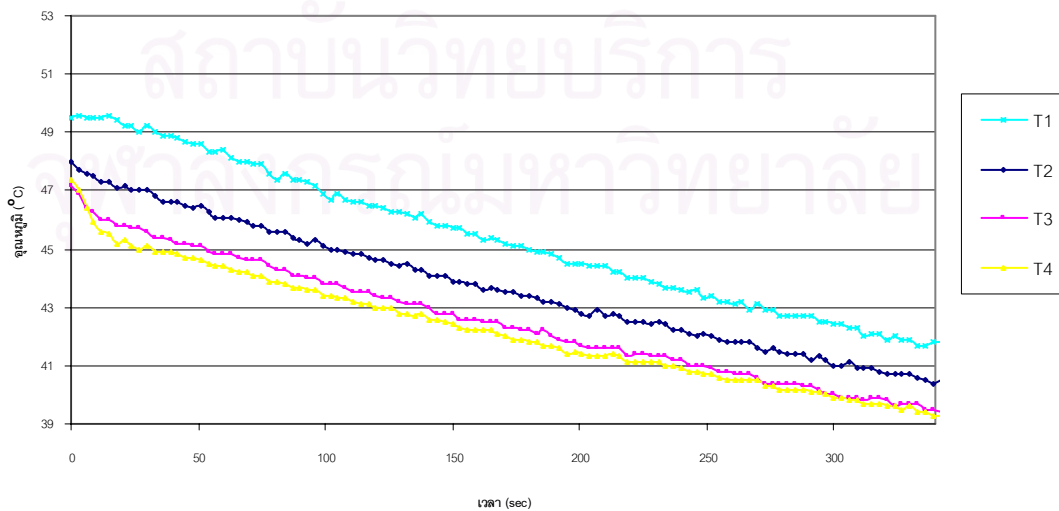
## ผลการทดลอง

### 4.1 ผลการทดลอง

ผลที่ได้จากการทดลองโดยเก็บข้อมูลการลดอุณหภูมิของน้ำร้อนด้วยเครื่องบันทึกข้อมูลทุกๆช่วงเวลา 3 วินาที ทำให้ได้เส้นกราฟที่ต่อเนื่องกันตลอดระยะเวลาที่เก็บข้อมูลแต่เนื่องจากข้อมูลในแต่ละการทดลองนั้นมีจำนวนมากจึงจะแสดงกราฟตัวอย่างการลดลงของอุณหภูมิดังรูปที่ 4.1 ซึ่งแสดงกราฟของการลดลงของอุณหภูมิของน้ำร้อนในท่อทองแดงขนาด 19 มม. ระยะ s/d 1.4 ที่ความเร็วอากาศ  $v_1$  0.96 m/s

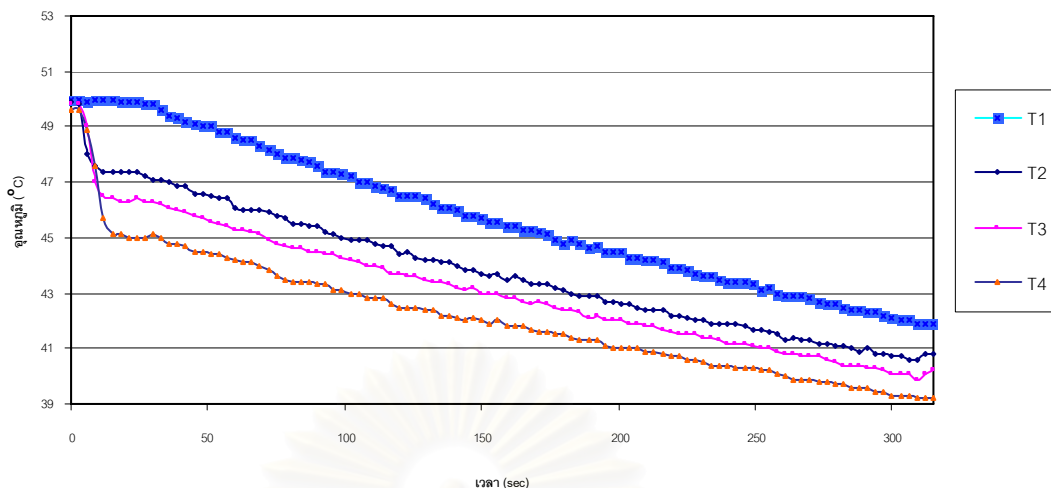


รูปที่ 4.1 การลดลงของอุณหภูมิของน้ำร้อนในท่อทองแดง 19 มม. Droplet flow s/d1.4  $v_1$



รูปที่ 4.2 การลดลงของอุณหภูมิของน้ำร้อนในท่อทองแดง 19 มม. Column flow s/d1.4  $v_1$





รูปที่ 4.3 การลดลงของอุณหภูมิน้ำร้อนในท่อทองแดง 19 มม. Liquid sheet flow s/d1.4 v<sub>1</sub>

จากรูปที่ได้แสดงถึงความแตกต่างของอุณหภูมิในแต่ละท่อทดสอบและลักษณะการลดลงของอุณหภูมิต่อเนื่องของน้ำร้อนในท่อจากการแลกเปลี่ยนความร้อนกับฟิล์มน้ำภายนอกท่อที่สภาวะทดสอบต่างๆ โดยค่า T1 , T2 , T3 และ T4

- เมื่อ T1 คือ อุณหภูมิน้ำร้อนที่เข้าท่อทดสอบตอนที่ 1
- T2 คือ อุณหภูมิน้ำร้อนที่ออกจากท่อทดสอบตอนที่ 1 และ เข้าท่อตอนที่ 2
- T3 คือ อุณหภูมิน้ำร้อนที่ออกจากท่อทดสอบตอนที่ 2 และ เข้าท่อตอนที่ 3
- T4 คือ อุณหภูมิน้ำร้อนที่ออกจากท่อทดสอบตอนที่ 3

โดยผลการทดลองที่ได้ทั้งหมดจะมีแนวโน้มของข้อมูลและสามารถนำไปเขียนกราฟได้ลักษณะเดียวกับรูปที่ 4.1-4.3 คือความแตกต่างของอุณหภูมิตั้งแต่เข้าและออกจากท่อค่อนข้างสม่ำเสมอตลอดการทดสอบและมีแนวโน้มลดลงในลักษณะขนานกันจากการทำการทดลองและแปรเปลี่ยนตัวแปรต่างๆเพื่อทำการศึกษาตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัยครั้งนี้พบว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองรวม 54 ครั้งซึ่งแต่ละครั้งก็จะทำการแปรเปลี่ยนตัวแปรไปโดยทำการบันทึกผลที่ได้ต่างๆในตารางดังภาคผนวก ก. ซึ่งสามารถนำมาสรุปได้ดังตารางที่ 4.1 และ 4.2

ตารางที่ 4.1 ช่วงข้อมูลจากการทดลองของท่อทองแดงขนาด 12.8 มม.

ข้อมูลการทดลอง		หน่วย
เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ	12.8	มม.
อุณหภูมิอากาศ	26-31	°C
s/d	1.4 , 2.5 , 3.5	-
ความเร็วลม	0.96,1.2,1.45	m/s
อัตราการไหลน้ำร้อน	0.1117	kg/s
อัตราการไหลฟิล์มน้ำ	0.04-0.36	kg/m.s
ฟลักซ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ย	12,000-50,000	W/m <sup>2</sup>

ตารางที่ 4.2 ช่วงข้อมูลจากการทดลองของท่อทองแดงขนาด 19 มม.

ข้อมูลการทดลอง		หน่วย
เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ	19	มม.
อุณหภูมิอากาศ	29-34	°C
s/d	1.4 , 2.5 , 3.5	-
ความเร็วลม	0.96,1.2,1.45	m/s
อัตราการไหลน้ำร้อน	0.1353	kg/s
อัตราการไหลฟิล์มน้ำ	0.06-0.36	kg/m.s
ฟลักซ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ย	10,000-27,000	W/m <sup>2</sup>

#### 4.2 การคำนวณผลการทดลอง

จากผลการทดลองทั้งหมดที่ได้ตั้งในภาคผนวก ก. นั้นข้อมูลจะถูกนำไปคำนวณโดยอาศัยการคำนวณทางทฤษฎีโดยใช้สมการ (55) ถึง สมการ (57) ดังแสดงในบทที่ 2 ซึ่งเป็นการคำนวณจากแบบจำลองการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบนท่อเรียบแนวนอนของ Armbruster et. al (1998) ซึ่งเป็นแบบจำลองที่มีความใกล้เคียงกับการวิจัยครั้งนี้เพียงแต่มีความแตกต่างกันที่แบบจำลองของ Armbruster et.al (1998) นั้นเป็นแบบจำลองที่ใช้คำนวณหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบนท่อเพียงท่อนเดียวและยังมีผลของการ pre-cooling ของฟิล์มน้ำก่อนเข้าท่อทดสอบด้วยซึ่งแตกต่างจากงานวิจัยในครั้งนี้เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นารทดสอบท่อเรียบแนวนอน 3 ท่อนต่อเนื่องกันโดยจำลองจากสภาพการใช้งานในโรงงานผลิตน้ำแข็งและไม่มี การ pre-cooling ฟิล์มน้ำก่อนซึ่งการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจริงจะสามารถหาได้จากสมการพื้นฐานทางการพาความร้อนดังสมการ(54) ในบทที่ 2 เช่นกันและนำมาหาความแตกต่างของผลการคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจริงเทียบกับผลจากการคำนวณทางทฤษฎีซึ่งแสดงค่าการคำนวณโดยละเอียดได้ดังภาคผนวก ข. ซึ่งสามารถแสดงค่าโดยสรุปได้ดังตารางที่ 4.3 และ 4.4 สำหรับท่อขนาด 12.8 และ 19 มม.ตามลำดับ

จากผลที่ได้ดังกล่าวจะนำค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจริงที่ได้มาเขียนแผนภาพแสดงผลของข้อมูลและแสดงเส้นแนวโน้มจากข้อมูลที่ได้โดยการประมาณโดยสมการเอกซ์โปเนนเชียลซึ่งแสดงผลที่ได้จากการทดลองสำหรับท่อขนาด 12.8 มม. ดังรูปที่ 4.1 และสำหรับท่อขนาด 19 มม. ดังรูปที่ 4.2

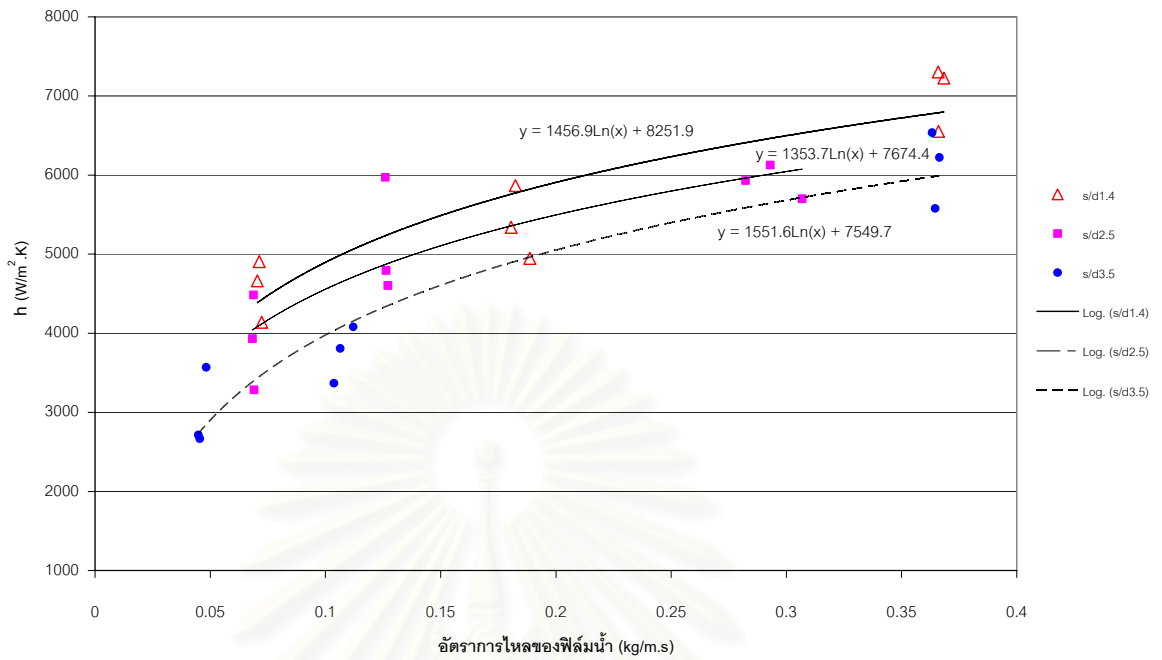
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.3 ผลการคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของท่อขนาด 12.8 มม.

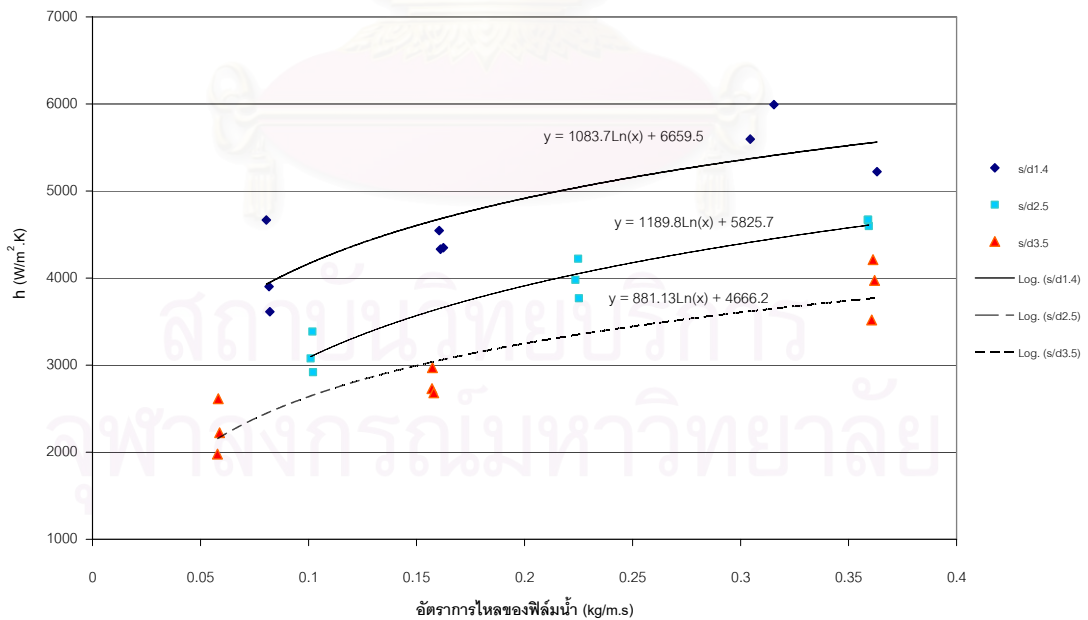
Data d = 12.8 mm.		$h_{i,cal}$	$h_{av,act}$	$\Delta h$
	m/s	$W/m^2 \cdot K$	$W/m^2 \cdot K$	%
Droplet flow s/d 1.4	$v_1$	3547.28	4905.37	38.29
	$v_2$	3546.94	4138.31	16.67
	$v_3$	3534.75	4662.33	31.90
Column flow s/d 1.4	$v_1$	4598.83	5867.51	27.59
	$v_2$	4585.24	5338.84	16.44
	$v_3$	4631.22	4945.43	6.78
Liquid sheet flow s/d 1.4	$v_1$	5400.64	6552.57	21.33
	$v_2$	5388.71	7225.96	34.09
	$v_3$	5358.57	7303.12	36.29
Droplet flow s/d 2.5	$v_1$	3799.35	3931.5	3.48
	$v_2$	3803.91	3283.81	13.67
	$v_3$	3830.20	4484.63	17.09
Column flow s/d 2.5	$v_1$	4538.59	5971.24	31.57
	$v_2$	4580.06	4604.86	0.54
	$v_3$	4544.12	4794.21	5.50
Liquid sheet flow s/d 2.5	$v_1$	5477.65	5928.71	8.23
	$v_2$	5593.50	5699.71	1.90
	$v_3$	5530.50	6125.22	10.75
Droplet flow s/d 3.5	$v_1$	3481.18	2714.02	22.04
	$v_2$	3591.59	3567.88	0.66
	$v_3$	3493.34	2665.84	23.69
Column flow s/d 3.5	$v_1$	4564.88	3368.91	26.20
	$v_2$	4683.76	4081.24	12.86
	$v_3$	4604.03	3806.75	17.32
Liquid sheet flow s/d 3.5	$v_1$	6414.48	5577.84	13.04
	$v_2$	6599.91	6223.13	5.71
	$v_3$	6773.06	6537.41	3.48

ตารางที่ 4.4 ผลการคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของท่อขนาด 19 มม.

Data d = 19 mm.		$h_{i,cal}$	$h_{av,act}$	$\Delta h$
	m/s	$W/m^2 \cdot K$	$W/m^2 \cdot K$	%
Droplet flow s/d 1.4	$v_1$	3613.58	3901.41	7.97
	$v_2$	3591.93	4666.23	29.91
	$v_3$	3616.97	3613.03	0.11
Column flow s/d 1.4	$v_1$	4463.54	4545.66	1.84
	$v_2$	4481.81	4331.1	3.36
	$v_3$	4518.78	4349.2	3.75
Liquid sheet flow s/d 1.4	$v_1$	5207.61	5991.56	15.05
	$v_2$	5441.03	5220.86	4.05
	$v_3$	5118.66	5594.72	9.30
Droplet flow s/d 2.5	$v_1$	4182.71	3077.11	26.43
	$v_2$	4200.54	3385.34	19.41
	$v_3$	4197.16	2919.8	30.43
Column flow s/d 2.5	$v_1$	5121.29	4220.99	17.58
	$v_2$	5113.84	3978.02	22.21
	$v_3$	5111.20	3766.28	26.31
Liquid sheet flow s/d 2.5	$v_1$	5801.63	4596.34	20.77
	$v_2$	5802.18	4668.33	19.54
	$v_3$	5801.94	4670.22	19.51
Droplet flow s/d 3.5	$v_1$	3585.32	2613.78	27.10
	$v_2$	3557.79	1979.26	44.37
	$v_3$	3594.76	2665.84	25.84
Column flow s/d 3.5	$v_1$	5096.65	2970.76	41.71
	$v_2$	5088.58	2730.52	46.34
	$v_3$	5069.45	2682.61	47.08
Liquid sheet flow s/d 3.5	$v_1$	6303.90	4211.74	33.19
	$v_2$	6471.18	3973.68	38.59
	$v_3$	6596.00	3518.64	46.65



รูปที่ 4.1 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจริงกับอัตราการไหลฟิล์มของท่อขนาด 12.8 มม.



รูปที่ 4.2 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจริงกับอัตราการไหลฟิล์มของท่อขนาด 19 มม.

## บทที่ 5

### วิเคราะห์ผลการทดลอง

#### 5.1 วิเคราะห์ผลการทดลอง

การพิจารณาผลการทดลองจะเริ่มต้นจากการพิจารณาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเป็นหลักซึ่งจากผลการศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องจะเห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายนอกท่อเรียบแนวนอนที่มีการแลกเปลี่ยนความร้อนกับฟิล์มน้ำในรูปแบบการไหลต่างๆ โดยมีการระเหยของน้ำด้วยนั้นอาศัยแบบจำลองการคำนวณจากงานวิจัยของ Armbruster และ Mitrovic (1998) เป็นแนวทางเนื่องจากมีความคล้ายคลึงกับงานวิจัยนี้พบว่าตัวแปรที่สำคัญที่สุดกับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนคืออัตราการไหลของฟิล์มน้ำบนท่อซึ่งจากงานวิจัยครั้งนี้จะได้นำผลของตัวแปรต่างๆที่ได้มาคำนวณด้วยแบบจำลองนี้เป็นการคำนวณทางทฤษฎีแต่ก็เนื่องจากข้อจำกัดของแบบจำลองและความแตกต่างกันของลักษณะการทดลองทำให้ผลจากการคำนวณแตกต่างจากผลที่ได้จริงโดยทฤษฎีพื้นฐานทางการพาความร้อนซึ่งการพิจารณาผลจะได้แบ่งออกเป็นผลของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ได้ตามผลของตัวแปรต่างๆดังนี้

##### 5.1.1 ผลของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนกับเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ

จากการทดลองพบว่าท่อทองแดงขนาด 12.8 มม. ที่มีรูปแบบการไหลแบบ droplet flow ที่มีค่าอัตราการไหลของฟิล์มน้ำอยู่ในช่วง 0.04-0.075 kg/m.s จะมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนอยู่ในช่วง 2600-4900 W/m<sup>2</sup>.K ส่วนการไหลแบบ column ที่มีการไหลในช่วง 0.11-0.19 kg/m.s จะมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนอยู่ในช่วง 3400-6000 W/m<sup>2</sup>.K และการไหลแบบ liquid sheet ที่มีการไหลในช่วง 0.28-0.36 kg/m.s จะมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนอยู่ในช่วง 5600-7300 W/m<sup>2</sup>.K ส่วนผลที่ได้จากท่อทองแดงขนาด 19 มม. ที่มีรูปแบบการไหลแบบ droplet ที่มีค่าอัตราการไหลของฟิล์มน้ำอยู่ในช่วง 0.05-0.1 kg/m.s จะมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนอยู่ในช่วง 2000-4670 W/m<sup>2</sup>.K ส่วนการไหลแบบ column ที่มีการไหลในช่วง 0.15-0.25 kg/m.s จะมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนอยู่ในช่วง 2700-4500 W/m<sup>2</sup>.K และการไหลแบบ liquid sheet ที่มีการไหลในช่วง 0.3-0.36 kg/m.s จะมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนอยู่ในช่วง 3520-6000 W/m<sup>2</sup>.K ซึ่งค่าที่ได้แสดงไว้ดังรูปที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ ซึ่งผลที่ได้แสดงว่าท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่าจะให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงกว่าไม่ว่าจะเป็นรูปแบบการไหลของฟิล์มแบบใดก็ตามซึ่งเป็นผลมาจากท่อที่มีขนาดเล็กกว่านั้นจะมีสภาพการไหลภายในท่อที่มีการถ่ายเทมวลระหว่างชั้นการไหลได้ดีกว่าท่อขนาดใหญ่ซึ่งส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนดีกว่าท่อขนาดใหญ่ดังที่ทราบกันคืออยู่แล้วตามทฤษฎีการไหลพื้นฐาน

5.1.2 ผลของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนกับอัตราการไหลและรูปแบบการไหลฟิล์ม ดังทฤษฎีที่ศึกษามาอัตราการไหลของฟิล์มน้ำเป็นตัวแปรที่ส่งผลต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมากที่สุดซึ่งพบว่ารูปแบบการไหลของฟิล์มจะแปรผันกับอัตราการไหลฟิล์มเช่นกัน จากงานวิจัยของ Armbruster และ Mitrovic (1998) พบว่ารูปแบบการไหลฟิล์มแบบ droplet นั้นจะเกิดขึ้นเมื่ออัตราการไหลฟิล์มมีค่าไม่เกิน  $0.1 \text{ kg/m.s}$  และการไหลแบบ column จะมีอัตราการไหลฟิล์มอยู่ในช่วง  $0.1-0.25 \text{ kg/m.s}$  และรูปแบบการไหลแบบ liquid sheet จะต้องมีอัตราการไหลฟิล์มมากกว่า  $0.25 \text{ kg/m.s}$  เป็นต้นไปซึ่งในการทดลองศึกษาครั้งนี้ได้ทำการแปรเปลี่ยนอัตราการไหลของฟิล์มหลายค่าซึ่งทำให้ครอบคลุมรูปแบบการไหลทั้งหมดซึ่งการพิจารณานั้นอาจทำได้โดยอาศัยสมการแนวโน้มของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ได้จากการทดลองซึ่งจะทำการวิเคราะห์ค่าที่อัตราการไหลฟิล์มสมมุติคือ  $0.1, 0.2$  และ  $0.3 \text{ kg/m.s}$  ซึ่งแสดงถึงรูปแบบการไหลแบบ droplet, column และ liquid sheet ตามลำดับ จากการคำนวณจะได้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของท่อขนาด 12.8 มม. และ 19 มม. ดังตารางที่ 5.1 และ 5.2 ตามลำดับ

ตารางที่ 5.1 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ได้จากการคำนวณโดยสมการแนวโน้มที่ได้จากการทดลองของท่อขนาด 12.8 มม.

d 12.8 mm.	$\Gamma$ (kg/m.s)	h (W/m <sup>2</sup> .K)
s/d1.4	0.1	4897.26
	0.2	5907.11
	0.3	6497.83
s/d2.5	0.1	4557.39
	0.2	5495.70
	0.3	6044.58
s/d3.5	0.1	3977.01
	0.2	5052.50
	0.3	5681.62



ตารางที่ 5.2 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ได้จากการคำนวณโดยสมการ  
แนวโน้มที่ได้จากการทดลองของท่อขนาด 19 มม.

d 19mm.	$\Gamma$ (kg/m.s)	h (W/m <sup>2</sup> .K)
s/d1.4	0.1	4164.19
	0.2	4915.35
	0.3	5354.75
s/d2.5	0.1	3086.08
	0.2	3910.79
	0.3	4393.21
s/d3.5	0.1	2637.32
	0.2	3248.08
	0.3	3605.34

จากตารางทั้งสองแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลฟิล์มนั้นจะทำให้  
สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงขึ้น

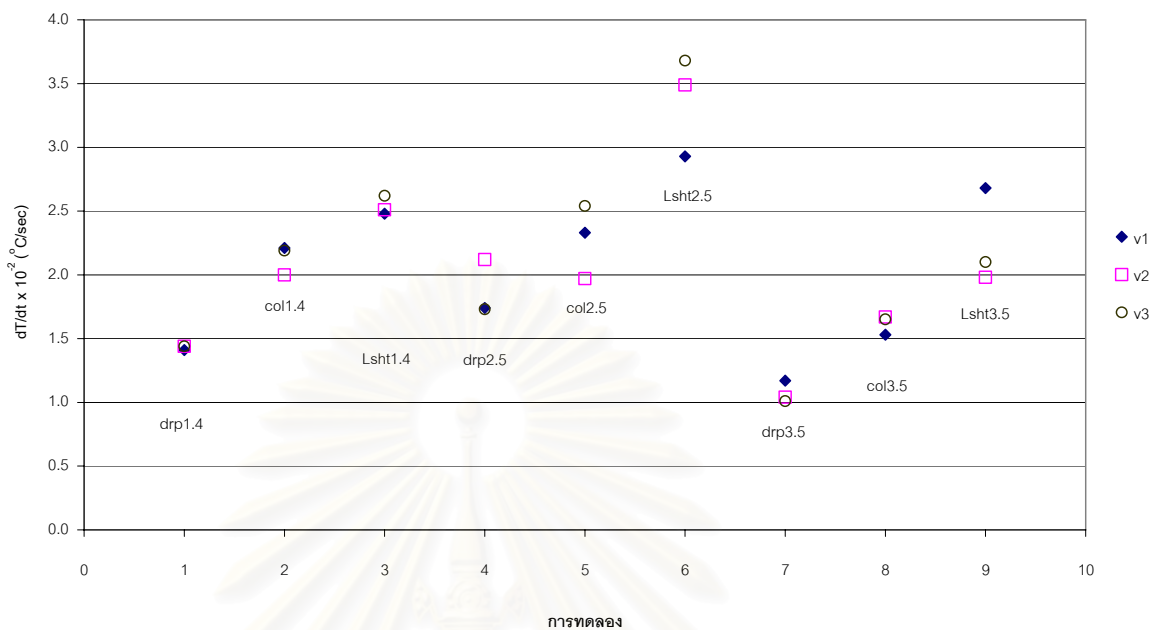
### 5.1.3 ผลของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนกับระยะห่างระหว่างท่อ

ตัวแปรที่มีผลกระทบต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนต่อมาคือระยะห่างระหว่างท่อ  
ทองแดงซึ่งในที่นี้ถูกพิจารณาในรูปของตัวแปรไร้มิติคือค่า  $s/d$  หมายถึงสัดส่วนของระยะห่าง  
ระหว่างกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อจะแสดงถึงท่อที่ถูกล้อมเรียงซ้อนกันในระนาบเดียวกันมี  
ระยะห่างของท่อเป็นกี่เท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางท่อซึ่งการทำการทดลองศึกษาจะทำให้  $s/d$  เท่ากับ  
1.4 ,2.5 และ 3.5 ซึ่งทำให้เปรียบเทียบได้ชัดเจนทั้งท่อขนาด 12.8 มม. หรือ 19 มม. ซึ่งจะให้ค่า  
สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ได้ดังรูป 4.1 และ 4.2 เช่นกันการพิจารณาผลของ  $s/d$  จะพิจารณา  
จากเส้นแนวโน้มที่ได้จากผลการทดลองเนื่องจากผลที่ได้จากการทดลองไม่สามารถให้มีค่าอัตราการ  
การไหลคงที่ได้ตลอดโดยกำหนดค่าการเปรียบเทียบไว้ที่ 0.2 kg/m.s ซึ่งเป็นค่ากลางของการไหล  
และเป็นการไหลที่ใช้มากที่สุดนั้นเป็นค่าในการประเมินเปรียบเทียบซึ่งท่อขนาด 12.8 มม. จะได้ค่า  
สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนประมาณ 5907.11 W/m<sup>2</sup>.K ที่  $s/d$  1.4 และเมื่อค่า  $s/d$  เพิ่มขึ้นเป็น  
2.5 จะทำให้สัมประสิทธิ์ที่ได้ลดลง 6.96% และเมื่อ  $s/d$  เป็น 3.5 สัมประสิทธิ์ที่ได้จะลดลง 14.47 %

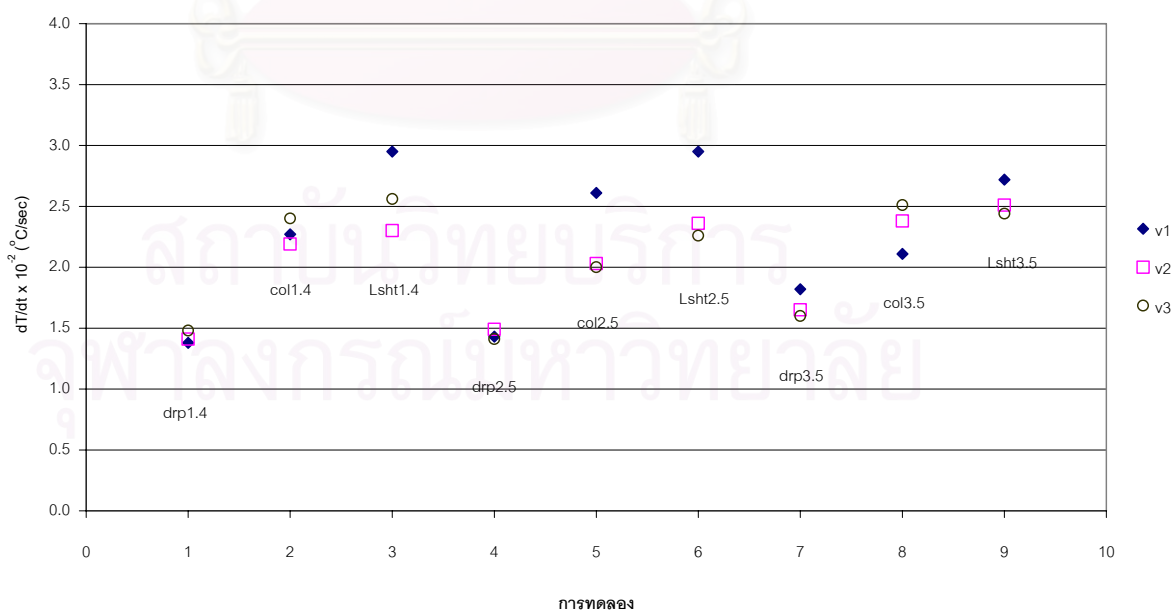
เมื่อเทียบกับสัมประสิทธิ์ที่ได้เมื่อ  $s/d$  เป็น 1.4 เช่นกันกับท่อขนาด 19 มม. ที่  $0.2 \text{ kg/m.s}$  จะได้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนประมาณ  $4915.4 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  ที่  $s/d$  1.4 และเมื่อค่า  $s/d$  เพิ่มขึ้นเป็น 2.5 จะทำให้สัมประสิทธิ์ที่ได้ลดลง 20.44 % และเมื่อ  $s/d$  เป็น 3.5 สัมประสิทธิ์ที่ได้จะลดลง 33.92 % เมื่อเทียบกับสัมประสิทธิ์ที่ได้เมื่อ  $s/d$  เป็น 1.4 จากผลที่ได้จากการทดลองการเพิ่มขึ้นของระยะห่างระหว่างท่อหรือในที่นี้คือสัดส่วน  $s/d$  นั้นจะทำให้ผลของการรบกวนการไหลเนื่องจากอากาศที่ไหลผ่านท่อทำให้ระหว่างท่อที่มีระยะห่างกันมากขึ้นนั้นจะมีความปั่นป่วนของอากาศมากกว่าและส่งผลให้การรบกวนการไหลของชั้นฟิล์มน้ำมากกว่าทำให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในท่อที่มีขนาดใหญ่กว่าเมื่อค่า  $s/d$  เพิ่มขึ้นเท่ากันแต่จะส่งผลให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนลดลงมากกว่าท่อที่มีขนาดเล็กกว่า

#### 5.1.4 ผลของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนกับความเร็วลม

ผลการศึกษาที่สำคัญอีกตัวแปรหนึ่งคือการแปรเปลี่ยนความเร็วลมที่พัดผ่านฟิล์มน้ำจากการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า การเพิ่มความเร็วลมที่พัดสวนทางกับการไหลของฟิล์มน้ำนั้น อาจจะช่วยเพิ่มอัตราการระเหยของน้ำซึ่งมีส่วนช่วยเพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนนั้นแต่ก็มีหลายงานวิจัยที่กล่าวว่าการเพิ่มความเร็วลมนั้นจะส่งผลรบกวนการไหลและทำให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนลดลงได้เช่นกัน โดยงานวิจัยของ Parker et. al (1961) กล่าวถึงข้อเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในสภาวะที่มีอากาศไหลจะมีสัมประสิทธิ์น้อยกว่าสภาวะที่ไม่มีอากาศไหลถึง 20% จากการทดลองพบข้อจำกัดของการเพิ่มความเร็วลมซึ่งในการทดลองศึกษาครั้งนี้ได้แปรเปลี่ยนความเร็วของลมในช่วงแคบๆ 3 ค่าด้วยกันคือ  $v_1 = 0.96$ ,  $v_2 = 1.2$  และ  $v_3 = 1.45 \text{ m/s}$  ซึ่งการทำการวัดค่าความเร็วลมนั้นทำการวัดที่บริเวณใกล้กับฟิล์มน้ำมากที่สุดเพื่อหาค่าความเร็วลมจริงที่ฟิล์มน้ำได้รับจากผลการทดลองที่ได้แสดงในรูปที่ 4.1 และ 4.2 ซึ่งแสดงผลของความเร็วลมไม่เด่นชัดเนื่องจากมีปัจจัยของตัวแปรอื่นที่ส่งผลต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมากกว่าจึงจะแสดงผลของความเร็วลมในรูปของค่าความชันในการลดลงของอุณหภูมิน้ำร้อนในท่อที่สภาวะการไหลต่างๆ ซึ่งหากความชันมากก็จะแสดงถึงการแลกเปลี่ยนความร้อนที่ดีกว่าความชันที่ได้คิดจากผลต่างของอุณหภูมิน้ำร้อนที่ลดลงเมื่อผ่านเข้าออกชุดแลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งถูกบันทึกโดยเครื่องบันทึกข้อมูลอัตโนมัติเทียบกับช่วงเวลาที่บ้านทิกข้อมูลซึ่งความแตกต่างของอุณหภูมิที่นำมาคิดความชันถูกกำหนดและควบคุมโดยชุดควบคุมอุณหภูมิและโปรแกรมวัดอุณหภูมิผลที่ได้จะแสดงในรูปของค่า  $dT/dt$  ซึ่งนำไปเขียนกราฟแสดงไว้ดังรูปที่ 5.1 แสดงข้อมูลตามรูปแบบการไหลและค่า  $s/d$  แบบต่างๆ กับผลของความเร็วลมทั้ง 3 ค่า ของท่อขนาด 12.8 มม. และรูปที่ 5.2 แสดงผลเช่นเดียวกันของท่อขนาด 19 มม.



รูปที่ 5.1 ค่าความชันการลดลงของอุณหภูมิกับความเร็วมของท่อขนาด 12.8 มม.



รูปที่ 5.2 ค่าความชันการลดลงของอุณหภูมิกับความเร็วมของท่อขนาด 19 มม.

พิจารณาผลของท่อขนาด 12.8 มม.เมื่อระยะ s/d เป็น 1.4 ผลของความเร็วลมไม่ค่อยส่งผลต่อค่า  $dT/dt$  นักเนื่องจากท่ออยู่ชิดกันมากทำให้ผลของความเร็วลมที่จะส่งผลกระทบต่อค่านี้น้อยทำให้ค่าที่ได้จะประมาณ 0.015 , 0.022 และ 0.025 °C/sec ตามรูปแบบการไหล และเมื่อ s/d 2.5 ผลของความเร็วลมจะทำให้ค่าความชื้นที่ได้สูงขึ้นเล็กน้อยและกระจายตัวให้เห็นผลกระทบของความเร็วลมต่อความชื้นของการลดอุณหภูมิมากขึ้นแต่ในหลายกรณีเมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้นจะทำให้ความชื้นลดลงนั่นคือการแสดงถึงความเร็วลมกับสภาวะการไหลที่ไม่เหมาะสมทำให้ความเร็วลมไปรบกวนการไหลของฟิล์มน้ำแต่ที่สภาวะ s/d 2.5 การไหลแบบ liquid sheet ค่าการเพิ่มความเร็วมจะส่งผลดีต่อการไหลมากที่สุดและเมื่อ s/d 3.5 ความเร็วลมจะส่งผลน้อยลงเนื่องจากอัตราการไหลของน้ำสูงมากขึ้นแต่ค่าความชื้นที่ลดลงอย่างมากเนื่องจากตัวแปรของ s/d มากกว่า แนวโน้มของท่อขนาด 19 มม.ก็คล้ายกันคือที่ s/d 1.4 ผลของความเร็วลมไม่ค่อยส่งผลต่อค่า  $dT/dt$  มากนักแต่จะเริ่มส่งผลเมื่อการไหลเป็นแบบ liquid sheet และเมื่อ s/d 2.5 ความเร็วลมกลับส่งผลให้ค่าความชื้นลดลงมากกว่า เมื่อ s/d 3.5 ที่การไหลแบบ column ความเร็วลมจะส่งผลดีเพียงเล็กน้อยต่อการไหลเมื่อความเร็วลมมากขึ้นส่วนที่สภาวะอื่นความเร็วลมไม่ค่อยส่งผลดีมากนัก จากผลของการแปรเปลี่ยนความเร็วลมมีค่าที่ได้ค่อนข้างแปรปรวนและควบคุมได้ยากดังนั้นโดยสรุปแล้วสภาวะที่เหมาะสมของความเร็วลมกับระยะห่างของท่อกับรูปแบบการไหลอาจจะไม่สามารถสรุปได้แน่ชัดนักแต่อย่างไรก็ตามความเร็วลมกับระยะห่างท่อใดๆที่ทำให้รูปแบบการไหลเสียไปหรือความเร็วลมที่ไปรบกวนการไหลของฟิล์มนั้นสามารถสรุปได้ว่าจะส่งผลเสียต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

## บทที่ 6

### สรุปผลการวิจัย

#### 6.1 สรุปผลการทดลอง

จากผลการของการทดลองเมื่อนำไปคำนวณเปรียบเทียบกับค่าทางทฤษฎีพบว่ามีความแตกต่างกันอยู่มากเนื่องจากแบบจำลองที่นำมาทำการคำนวณเพื่อเป็นแนวทางเปรียบเทียบนั้นมีสถานะการทดลองแตกต่างกันหลายด้านคือแบบจำลองที่ใช้ได้มาจากการทดลองบนท่อเพียงท่อเดียวที่มีการรักษาให้ฟลักซ์การถ่ายเทความร้อนที่ผิวคงที่และมีผลการ pre-cooling फिल्मน้ำก่อนที่ फिल्मน้ำจะเข้าและเปลี่ยนความร้อนกับท่อทดสอบส่วนการวิจัยครั้งนี้เป็นการทดลองศึกษากับท่อแลกเปลี่ยนความร้อน 3 ท่อและสภาพฟลักซ์การถ่ายเทความร้อนแปรผันการสภาพการไหลภายในท่อที่สถานะคงตัวและไม่มีผลการ pre-cooling फिल्मน้ำซึ่งการศึกษาการแลกเปลี่ยนความร้อนกับท่อหลายท่อนั้นจะแสดงถึงการส่งผลต่อกันของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนด้วยแต่อย่างไรก็ตามไม่พบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ตรงตามงานวิจัยนี้อย่างแท้จริงจึงจำเป็นต้องใช้แนวทางทางทฤษฎีที่ได้ศึกษามา ซึ่งได้ผลของตัวแปรต่างๆกับสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อที่ศึกษาขนาด 12.8 มม. และ 19 มม. โดยขนาดท่อเป็น 19 มม. จะมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนต่ำกว่าท่อขนาด 12.8 มม. 15 – 35 % ซึ่งขึ้นอยู่กับตัวแปรอื่นๆ ด้วย ส่วนอัตราการไหลต่างๆที่ส่งผลให้เกิดรูปแบบการไหลแบบ droplet , column และ liquid sheet นั้น โดยพิจารณาการไหลแบบ droplet ที่อัตราการไหล फिल्म 0.1 kg/m.s และ 0.2 kg/m.s สำหรับการไหลแบบ column และ 0.3 kg/m.s สำหรับแบบ liquid sheet ซึ่งให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงขึ้นเมื่ออัตราการไหลสูงขึ้น 22.7% และ 36% เมื่อเทียบกับสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่อัตราการไหล 0.1 kg/m.s ส่วนการเพิ่มระยะห่างระหว่างท่อโดยพิจารณาค่า  $s/d$  ที่ 1.4 , 2.5 และ 3.5 นั้นหากระยะ  $s/d$  เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนลดลงโดยพิจารณาที่ 0.2 kg/m.s ซึ่งเมื่อท่อขนาด 12.8 มม.  $s/d$  เพิ่มขึ้นจะทำให้สัมประสิทธิ์ที่ได้ลดลง 6.96% และ 8.77% ตามลำดับ เช่นกันกับท่อขนาด 19 มม. แต่การที่  $s/d$  เพิ่มขึ้นจะทำให้สัมประสิทธิ์ลดลงมากกว่าโดยลดลง 20.44% และ 20.40% ตามลำดับ เช่นเดียวกับความเร็วลมคือเมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้นโดยทำการศึกษาจาก 0.96 , 1.2 และ 1.45 m/s จะทำให้ค่าความชันของการลดอุณหภูมิลดลงแสดงถึงการถ่ายเทความร้อนที่ต่ำลงโดยผลการทดลองที่ได้กับท่อขนาด 12.8 มม. ความเร็วลมที่เพิ่มขึ้นจะทำให้การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นหรือลดลง 26% ส่วนท่อขนาด 19 มม. ความเร็วที่เพิ่มขึ้นจะทำให้การถ่ายเทความร้อนต่ำลง 23% หรือสูงขึ้น 19 % ผลของความเร็วลมอาจจะเพิ่มหรือลดการถ่ายเทความร้อนก็ได้ซึ่งขึ้นกับปัจจัยอื่นๆด้วยหากความเร็วลมที่สถานะการไหลนั้นไปทำให้เกิดการรบกวนการไหลของ फिल्मก็จะทำให้การถ่ายเทความร้อนลดลงแต่หากความเร็วลมในสถานะการ

ไหลนั้นเหมาะสมก็จะมีผลช่วยเสริมให้การถ่ายเทความร้อนดีขึ้นซึ่งผลที่ได้เป็นไปได้เป็นไปในแนวทางเดียวกับงานวิจัยของ Parker et. al (1961) กับ Rana et. al (1986)

## 6.2 ข้อบกพร่องของงานวิจัยและแนวทางแก้ไข

การทำการทดลองในงานวิจัยนี้ยังพบข้อบกพร่องอยู่หลายจุดที่ควรปรับปรุงซึ่งสามารถพิจารณาเป็นข้อๆ ได้ดังนี้

- การสร้างอุปกรณ์สร้างฟิล์มน้ำที่ต้องการการเจาะรูให้มีระยะห่างเท่าๆกันขนาด 1 มม.ห่างทุก 3 มม. นั้นเป็นงานที่ต้องการความละเอียดสูงมากซึ่งการเจาะที่ทำให้รูไม่ตั้งฉากกับพื้นผิวจะทำให้น้ำที่ออกจากอุปกรณ์มีทิศทางเอนเอียงออกไปแต่อย่างไรก็ตามการปล่อยฟิล์มน้ำให้ใกล้กับผิวท่อมากที่สุดก็สามารถลดปัญหานี้ได้ส่วนหนึ่ง
- การวัดอุณหภูมิผิวของท่อจริงไม่สามารถทำได้เนื่องจากต้องอาศัยเครื่องมือที่ความแม่นยำสูงมากเพื่อเจาะเข้าไประหว่างความหนาผิวท่อทองแดงและฝงสายวัดอุณหภูมิตั้งที่งานวิจัยอื่นๆใช้ซึ่งงานวิจัยนี้ทำได้เพียงวัดอุณหภูมิน้ำร้อนที่เข้าและออกท่อทองแดงเท่านั้นเพื่อนำไปคำนวณอุณหภูมิผิวท่อที่ทางเข้าออกและนำมาหาค่าอุณหภูมิผิวเฉลี่ยจากผลของอุณหภูมิผิวที่ทำการทดลองไว้
- การสร้างความเร็วลมที่ไหลสวนทางกับการไหลของฟิล์มน้ำเป็นการออกแบบที่ค่อนข้างยากเนื่องจากสภาพของชุดทดลองกับชุดรองรับน้ำทำให้การติดตั้งพัดลมทำได้ยากอีกทั้งปัญหาของหยดน้ำกับระบบไฟฟ้าทำให้การติดตั้งพัดลมอย่างถาวรกับชุดทดลองต้องอาศัยโครงสร้างที่แข็งแรงและต้องลงทุนสูงดังนั้นจึงต้องอาศัยการให้ลมผ่านแผ่นบังคับทิศทาง (guide vain) เพื่อควบคุมลมให้มีทิศทางสวนทางกับการไหลซึ่งก็ทำให้สภาพการไหลของลมไม่สม่ำเสมอมากนัก

## 6.3 แนวทางการประยุกต์ใช้เพื่อการออกแบบ

จากผลงานวิจัยที่ได้ครั้งนี้ทำให้สามารถเสนอแนวทางในการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อเปลือยสำหรับใช้ในโรงงานผลิตน้ำแข็งได้ดังนี้

- การออกแบบต้องใช้ท่อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็กในการออกแบบเพื่อให้ได้การถ่ายเทความร้อนที่ดีที่สุดโดยพิจารณาร่วมกับหลักการไหลภายในท่อและความสูญเสียความดันภายในท่อร่วมในการออกแบบด้วย
- ออกแบบให้ท่อมีค่าระยะห่างระหว่างท่อเทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางท่อไม่เกิน 2.0 เนื่องจากจะทำให้การถ่ายเทความร้อนถูกรบกวนได้ง่ายหากค่าดังกล่าวสูงกว่า 2.5

- การใช้ความเร็วลมของอากาศที่ไหลสวนทางการไหลของฟิล์มควรพิจารณาอย่างระมัดระวังโดยไม่ให้ความเร็วลมไปรบกวนการไหลของฟิล์มน้ำซึ่งจะทำให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนลดต่ำลง
- ควรออกแบบการไหลของฟิล์มน้ำให้มีอัตราการไหลสูง โดยอาจจะออกแบบให้อัตราการไหลอยู่ในช่วง 0.3 – 0.4 kg/m.s ซึ่งจะทำให้มีสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่สูงกว่า แต่อัตราการไหลที่มากกว่าช่วงดังกล่าวอาจจะทำให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงขึ้นหรือต่ำลงไม่สามารถทำนายได้เนื่องจากอยู่นอกเหนือขอบเขตงานวิจัยในครั้งนี้

#### 6.4 แนวทางการพัฒนาการวิจัย

อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้เป็นเพียงการศึกษาสภาพการถ่ายเทความร้อนภายนอกท่อซึ่งนับว่าเป็นเพียงครึ่งหนึ่งของอุปกรณ์ดังที่แสดงไว้ในบทที่ 2 เนื่องจากยังมีส่วนของการถ่ายเทความร้อนภายในท่อจริงของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อเปลือกที่มีการไหลและการถ่ายเทความร้อนแบบสองสถานะซึ่งทำให้การถ่ายเทความร้อนและมวลภายในท่อมีความซับซ้อนกว่าการจำลองระบบในครั้งนี้นักวิจัยทั้งยังสามารถพัฒนางานวิจัยนี้ไปในทางที่เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยอาศัยการคำนวณเชิงตัวเลขช่วยเพื่อให้สามารถปรับปรุงใช้กับลักษณะการถ่ายเทความร้อนอื่นๆ รวมทั้งการทดลองศึกษาต่อจากงานวิจัยครั้งนี้โดยศึกษาเป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีลักษณะท่อเป็นกลุ่ม (tube bank) เพื่อให้มีลักษณะเข้าใกล้การใช้งานจริงมากขึ้นไปอีกก็สามารถพัฒนาได้ต่อไป

## รายการอ้างอิง

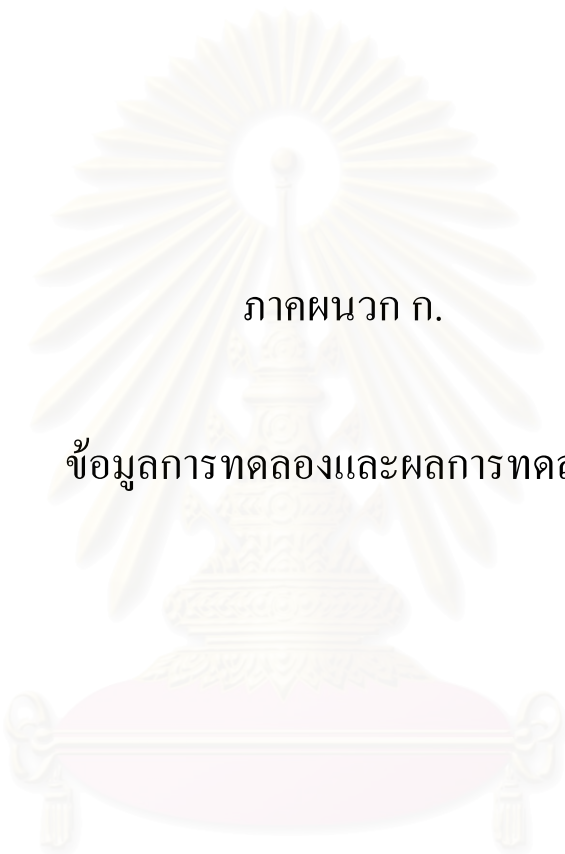
- F.J. Smit , J.P. Meyer , Condensation heat transfer coefficients of the zeotropic refrigerant mixture R-22 /R-142b in smooth horizontal tubes ,International Journal of Thermal Sciences ,41(2002) 625-630.
- J. El Hajal , J.R. Thome , A. Cavallini , Condensation in horizontal tubes, part 1: two-phase flow pattern map , International Journal of Heat and Mass Transfer 46 (2003) 3349–3363.
- J.R. Thome , J. El Hajal , A. Cavallini , Condensation in horizontal tubes, part 2: new heat transfer model based on flow regimes , International Journal of Heat and Mass Transfer 46 (2003) 3365–3387.
- M.S. Chitti , N. K. Anand, An analytical model for local heat transfer coefficients for forced convective condensation inside smooth horizontal tubes ,International journal of Heat and Mass Transfer V.38 No.4 ,1995 , p615-627.
- Merle C. Potter , David C. Wiggert , Midhat Hondzo , Tom .I.P. Shih , Mechanics of Fluids (3<sup>rd</sup> Edition) Prentice-Hall ,Inc. USA. (2001)
- O. Zurcher , D .Favrat ,J.R. Thome , Development of diabatic two-phase flow pattern map for horizontal flow boiling , International Journal of Heat and Mass Transfer 45(2002) 291–301.
- R.O.Parker , R.E.Treybal, The heat,mass transfer characteristics of evaporative coolers, Chemical Engineering Progressive Symposium .Ser.57(32)(1961) 138-149
- R. Armbruster, J. Mitrovic , Evaporative cooling of a falling water film on horizontal tubes , Experimental Thermal and Fluid Science 18 (1998) 183-194.
- R.S.Rana , V. Charan and H.K.Varma ,Heat and mass transfer from a horizontal tube of an evaporative heat dissipater,International Journal of Heat and Mass Transfer29(1986)555–562
- W. M. Kays and M. E. Crawford, Convective Heat and Mass Transfer (2nd Edn). McGraw-Hill, New York (1980).
- Yunus A. Cengel and Michael A. Boles , Thermodynamics An Engineering Approches (2<sup>nd</sup> Edition) McGraw-Hill, New York (1994).
- Yildiz Bayazitoglu , M.Necati Ozisik , Elements of Heat Transfer (Int .Edition) , McGraw-Hill, New York (2000)





ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก.

ข้อมูลการทดลองและผลการทดลอง

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางบันทึกผล วิทยานิพนธ์

เรื่อง การศึกษาเชิงทดลองของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อโดยใช้การระเหยสำหรับชุดควบคุมแรงดันของโรงน้ำแข็ง

	ข้อมูล	หน่วย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่4	ครั้งที่5	เฉลี่ย	หมายเหตุ
1	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อทองแดง (d)	mm.	12.8						
2	อุณหภูมิ dry bulb	°C	26	25.8	27			26.3	
3	% RH	%	45	50	50			48.3	
4	อุณหภูมิ wet bulb	°C							
5	ระยะห่างท่อ (s/d)	mm.	1.4						
6	ความเร็วลม cross air (v)	m/s	0.96						
7	Film pattern		droplet						
8	อุณหภูมิผิวท่อ	°C	49.7	47.4	46.8	46.2		47.51	
9	อัตราการไหลน้ำร้อน (V)	kg/sec						0.1117	
10	อุณหภูมิน้ำร้อนเข้า	°C						50.0	จาก data logger
11	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 1	°C						47.7	จาก data logger
12	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 2	°C						47.1	จาก data logger
13	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 3	°C						46.5	จาก data logger
14	อัตราการไหลฟิล์ม ( $\Gamma$ )	kg/m.sec						0.0712	
15	อุณหภูมิ film น้ำเข้า1	°C	20.5	21	22.5	21.6		21.4	
16	อุณหภูมิ film น้ำเข้า2	°C	35.4	36	35.8	34		35.3	
17	อุณหภูมิ film น้ำเข้า3	°C	37.9	38.2	38.9	39.2		38.6	
18	อุณหภูมิ film น้ำออก	°C	41.2	41	42.4	41.1		41.4	
19	อุณหภูมิคุณสมบัติน้ำ							39.46	$0.5*(T_s+0.5(T_{fi}+T_{out}))$
20	ฟลักซ์การถ่ายเทความร้อน(q")	W/m <sup>2</sup>						27088.55	

ตารางบันทึกผล วิทยานิพนธ์

เรื่อง การศึกษาเชิงทดลองของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อโดยใช้การระเหยสำหรับชุดความแน่นของโรงน้ำแข็ง

	ข้อมูล	หน่วย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่4	ครั้งที่5	เฉลี่ย	หมายเหตุ
1	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อทองแดง (d)	mm.	12.8						
2	อุณหภูมิ dry bulb	°C	26	25.8	27			26.3	
3	% RH	%	45	50	50			48.3	
4	อุณหภูมิ wet bulb	°C							
5	ระยะห่างท่อ (s/d)	mm.	1.4						
6	ความเร็วลม cross air (v)	m/s	1.2						
7	Film pattern		droplet						
8	อุณหภูมิผิวท่อ	°C	49.1	47.3	46.7	46.0		47.26	
9	อัตราการไหลน้ำร้อน (V)	kg/sec						0.1117	
10	อุณหภูมิน้ำร้อนเข้า	°C						49.4	จาก data logger
11	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 1	°C						47.6	จาก data logger
12	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 2	°C						47.0	จาก data logger
13	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 3	°C						46.3	จาก data logger
14	อัตราการไหลฟิล์ม ( $\Gamma$ )	kg/m.sec						0.0723	
15	อุณหภูมิ film น้ำเข้า1	°C	22.6	23.1	22.5	22.4		22.7	
16	อุณหภูมิ film น้ำเข้า2	°C	32.5	32.4	33.4	32		32.6	
17	อุณหภูมิ film น้ำเข้า3	°C	35.8	36.2	35.4	35.6		35.8	
18	อุณหภูมิ film น้ำออก	°C	38.2	38.6	37.9	38.4		38.3	
19	อุณหภูมิคุณสมบัติน้ำ							38.86	0.5*(Ts+0.5(Tfi+Tout))
20	ฟลักซ์การถ่ายเทความร้อน(q")	W/m <sup>2</sup>						23992.71	

ตารางบันทึกผล วิทยานิพนธ์

เรื่อง การศึกษาเชิงทดลองของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อโดยใช้การระเหยสำหรับชุดความแน่นของโรงน้ำแข็ง

	ข้อมูล	หน่วย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่4	ครั้งที่5	เฉลี่ย	หมายเหตุ
1	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อทองแดง (d)	mm.	12.8						
2	อุณหภูมิ dry bulb	°C	26	25.8	27			26.3	
3	% RH	%	45	50	50			48.3	
4	อุณหภูมิ wet bulb	°C							
5	ระยะห่างท่อ (s/d)	mm.	1.4						
6	ความเร็วลม cross air (v)	m/s	1.45						
7	Film pattern		droplet						
8	อุณหภูมิผิวท่อ	°C	49.6	47.8	47.1	46.4		47.71	
9	อัตราการไหลน้ำร้อน (V)	kg/sec						0.1117	
10	อุณหภูมิน้ำร้อนเข้า	°C						49.9	จาก data logger
11	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 1	°C						48.1	จาก data logger
12	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 2	°C						47.4	จาก data logger
13	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 3	°C						46.7	จาก data logger
14	อัตราการไหลฟิล์ม ( $\Gamma$ )	kg/m.sec						0.0704	
15	อุณหภูมิ film น้ำเข้า1	°C	21.7	22.2	21.9	22.4		22.1	
16	อุณหภูมิ film น้ำเข้า2	°C	32.2	32.8	33.2	33.8		33.0	
17	อุณหภูมิ film น้ำเข้า3	°C	38.5	37.4	38.9	39.1		38.5	
18	อุณหภูมิ film น้ำออก	°C	40.3	40.8	41	40.2		40.6	
19	อุณหภูมิคุณสมบัติน้ำ							39.51	0.5*(Ts+0.5(Tfi+Tout))
20	ฟลักซ์การถ่ายเทความร้อน(q")	W/m <sup>2</sup>						24766.67	

ตารางบันทึกผล วิทยานิพนธ์

เรื่อง การศึกษาเชิงทดลองของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อโดยใช้การระเหยสำหรับชุดควบคุมแน่นของโรงน้ำแข็ง

	ข้อมูล	หน่วย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่4	ครั้งที่5	เฉลี่ย	หมายเหตุ
1	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อทองแดง (d)	mm.	12.8						
2	อุณหภูมิ dry bulb	°C	26	25.8	27			26.3	
3	% RH	%	45	50	50			48.3	
4	อุณหภูมิ wet bulb	°C							
5	ระยะห่างท่อ (s/d)	mm.	1.4						
6	ความเร็วลม cross air (v)	m/s	0.96						
7	Film pattern		column						
8	อุณหภูมิผิวท่อ	°C	48.6	45.9	44.6	43.3		45.58	
9	อัตราการไหลน้ำร้อน (V)	kg/sec						0.1117	
10	อุณหภูมิน้ำร้อนเข้า	°C						48.9	จาก data logger
11	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 1	°C						46.2	จาก data logger
12	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 2	°C						44.9	จาก data logger
13	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 3	°C						43.6	จาก data logger
14	อัตราการไหลฟิล์ม ( $\Gamma$ )	kg/m.sec						0.1824	
15	อุณหภูมิ film น้ำเข้า1	°C	22.1	22.8	22.4	23.1		22.6	
16	อุณหภูมิ film น้ำเข้า2	°C	24.5	24.8	23.5	25.4		24.6	
17	อุณหภูมิ film น้ำเข้า3	°C	27.6	27.8	28.2	27.4		27.8	
18	อุณหภูมิ film น้ำออก	°C	29.2	30.5	30.4	39.6		32.4	
19	อุณหภูมิคุณสมบัติน้ำ							36.55	$0.5*(T_s+0.5(T_{fi}+T_{out}))$
20	ฟลักซ์การถ่ายเทความร้อน(q")	W/m <sup>2</sup>						41019.80	

ตารางบันทึกผล วิทยานิพนธ์

เรื่อง การศึกษาเชิงทดลองของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อโดยใช้การระเหยสำหรับชุดความแน่นของโรงน้ำแข็ง

	ข้อมูล	หน่วย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่4	ครั้งที่5	เฉลี่ย	หมายเหตุ
1	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อทองแดง (d)	mm.	12.8						
2	อุณหภูมิ dry bulb	°C	26	25.8	27			26.3	
3	% RH	%	45	50	50			48.3	
4	อุณหภูมิ wet bulb	°C							
5	ระยะห่างท่อ (s/d)	mm.	1.4						
6	ความเร็วลม cross air (v)	m/s	1.2						
7	Film pattern		column						
8	อุณหภูมิผิวท่อ	°C	48.9	46.5	45.2	44.3		46.21	
9	อัตราการไหลน้ำร้อน (V)	kg/sec						0.1117	
10	อุณหภูมิน้ำร้อนเข้า	°C						49.2	จาก data logger
11	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 1	°C						46.8	จาก data logger
12	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 2	°C						45.5	จาก data logger
13	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 3	°C						44.6	จาก data logger
14	อัตราการไหลฟิล์ม ( $\Gamma$ )	kg/m.sec						0.1806	
15	อุณหภูมิ film น้ำเข้า1	°C	22.3	22.6	23.4	23.2		22.9	
16	อุณหภูมิ film น้ำเข้า2	°C	27.6	27.7	28.2	28		27.9	
17	อุณหภูมิ film น้ำเข้า3	°C	29.8	30.1	29.5	30.4		30.0	
18	อุณหภูมิ film น้ำออก	°C	30.5	31.2	30.8	30.8		30.8	
19	อุณหภูมิคุณสมบัติน้ำ							36.53	0.5*(Ts+0.5(Tfi+Tout))
20	ฟลักซ์การถ่ายเทความร้อน(q")	W/m <sup>2</sup>						35602.09	

ตารางบันทึกผล วิทยานิพนธ์

เรื่อง การศึกษาเชิงทดลองของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อโดยใช้การระเหยสำหรับชุดความแน่นของโรงน้ำแข็ง

	ข้อมูล	หน่วย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่4	ครั้งที่5	เฉลี่ย	หมายเหตุ
1	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อทองแดง (d)	mm.	12.8						
2	อุณหภูมิ dry bulb	°C	26	25.8	27			26.3	
3	% RH	%	45	50	50			48.3	
4	อุณหภูมิ wet bulb	°C							
5	ระยะห่างท่อ (s/d)	mm.	1.4						
6	ความเร็วลม cross air (v)	m/s	1.45						
7	Film pattern		column						
8	อุณหภูมิผิวท่อ	°C	49.3	47.4	46.0	45.0		46.91	
9	อัตราการไหลน้ำร้อน ( V )	kg/sec						0.1117	
10	อุณหภูมิน้ำร้อนเข้า	°C						49.6	จาก data logger
11	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 1	°C						47.7	จาก data logger
12	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 2	°C						46.3	จาก data logger
13	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 3	°C						45.3	จาก data logger
14	อัตราการไหลฟิล์ม ( $\Gamma$ )	kg/m.sec						0.1887	
15	อุณหภูมิ film น้ำเข้า1	°C	22.4	22.2	22.8	22.6		22.5	
16	อุณหภูมิ film น้ำเข้า2	°C	28.1	28.4	28.2	28.5		28.3	
17	อุณหภูมิ film น้ำเข้า3	°C	30.1	29.2	29.5	30		29.7	
18	อุณหภูมิ film น้ำออก	°C	30.2	31.5	31.8	30.8		31.1	
19	อุณหภูมิคุณสมบัติน้ำ							36.85	0.5*(Ts+0.5(Tfi+Tout))
20	ฟลักซ์การถ่ายเทความร้อน(q")	W/m <sup>2</sup>						33280.22	



ตารางบันทึกผล วิทยานิพนธ์

เรื่อง การศึกษาเชิงทดลองของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อโดยใช้การระเหยสำหรับชุดควบคุมแน่นของโรงน้ำแข็ง

	ข้อมูล	หน่วย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่4	ครั้งที่5	เฉลี่ย	หมายเหตุ
1	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อทองแดง (d)	mm.	12.8						
2	อุณหภูมิ dry bulb	°C	26	25.8	27			26.3	
3	% RH	%	45	50	50			48.3	
4	อุณหภูมิ wet bulb	°C							
5	ระยะห่างท่อ (s/d)	mm.	1.4						
6	ความเร็วลม cross air (v)	m/s	0.96						
7	Film pattern		liquid sheet						
8	อุณหภูมิผิวท่อ	°C	49.6	47.1	45.5	44.2		46.58	
9	อัตราการไหลน้ำร้อน (V)	kg/sec						0.1117	
10	อุณหภูมิน้ำร้อนเข้า	°C						49.9	จาก data logger
11	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 1	°C						47.4	จาก data logger
12	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 2	°C						45.8	จาก data logger
13	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 3	°C						44.5	จาก data logger
14	อัตราการไหลฟิล์ม ( $\Gamma$ )	kg/m.sec						0.3661	
15	อุณหภูมิ film น้ำเข้า1	°C	23.6	23.4	23.8	24.1		23.7	
16	อุณหภูมิ film น้ำเข้า2	°C	27.5	28.2	27.8	29.1		28.2	
17	อุณหภูมิ film น้ำเข้า3	°C	30.7	30.4	30.8	31.2		30.8	
18	อุณหภูมิ film น้ำออก	°C	32.4	32.8	32.6	33.4		32.8	
19	อุณหภูมิคุณสมบัติน้ำ							37.42	$0.5*(T_s+0.5(T_{fi}+T_{out}))$
20	ฟลักซ์การถ่ายเทความร้อน(q")	W/m <sup>2</sup>						41793.76	

ตารางบันทึกผล วิทยานิพนธ์

เรื่อง การศึกษาเชิงทดลองของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อโดยใช้การระเหยสำหรับชุดความแน่นของโรงน้ำแข็ง

	ข้อมูล	หน่วย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่4	ครั้งที่5	เฉลี่ย	หมายเหตุ
1	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อทองแดง (d)	mm.	12.8						
2	อุณหภูมิ dry bulb	°C	26	25.8	27			26.3	
3	% RH	%	45	50	50			48.3	
4	อุณหภูมิ wet bulb	°C							
5	ระยะห่างท่อ (s/d)	mm.	1.4						
6	ความเร็วลม cross air (v)	m/s	1.2						
7	Film pattern		liquid sheet						
8	อุณหภูมิผิวท่อ	°C	50.5	47.3	45.5	44.2		46.86	
9	อัตราการไหลน้ำร้อน ( V )	kg/sec						0.1117	
10	อุณหภูมิน้ำร้อนเข้า	°C						50.8	จาก data logger
11	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 1	°C						47.6	จาก data logger
12	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 2	°C						45.8	จาก data logger
13	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 3	°C						44.5	จาก data logger
14	อัตราการไหลฟิล์ม ( $\Gamma$ )	kg/m.sec						0.3684	
15	อุณหภูมิ film น้ำเข้า1	°C	22.3	22.4	22.3	22.5		22.4	
16	อุณหภูมิ film น้ำเข้า2	°C	28.4	28.8	29.4	29.1		28.9	
17	อุณหภูมิ film น้ำเข้า3	°C	29.4	29.6	30.7	30.2		30.0	
18	อุณหภูมิ film น้ำออก	°C	30.6	30.8	31.4	32.1		31.2	
19	อุณหภูมิคุณสมบัติน้ำ							36.83	0.5*(Ts+0.5(Tfi+Tout))
20	ฟลักซ์การถ่ายเทความร้อน(q")	W/m <sup>2</sup>						48759.39	

ตารางบันทึกผล วิทยานิพนธ์

เรื่อง การศึกษาเชิงทดลองของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อโดยใช้การระเหยสำหรับชุดความแน่นของโรงน้ำแข็ง

	ข้อมูล	หน่วย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่4	ครั้งที่5	เฉลี่ย	หมายเหตุ
1	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อทองแดง (d)	mm.	12.8						
2	อุณหภูมิ dry bulb	°C	26	25.8	27			26.3	
3	% RH	%	45	50	50			48.3	
4	อุณหภูมิ wet bulb	°C							
5	ระยะห่างท่อ (s/d)	mm.	1.4						
6	ความเร็วลม cross air (v)	m/s	1.45						
7	Film pattern		liquid sheet						
8	อุณหภูมิผิวท่อ	°C	49.8	46.4	44.7	43.3		46.03	
9	อัตราการไหลน้ำร้อน (V)	kg/sec						0.1117	
10	อุณหภูมิน้ำร้อนเข้า	°C						50.1	จาก data logger
11	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 1	°C						46.7	จาก data logger
12	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 2	°C						45.0	จาก data logger
13	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 3	°C						43.6	จาก data logger
14	อัตราการไหลฟิล์ม ( $\Gamma$ )	kg/m.sec						0.3659	
15	อุณหภูมิ film น้ำเข้า1	°C	22.9	22.8	22.7	22.9		22.8	
16	อุณหภูมิ film น้ำเข้า2	°C	26.3	26.5	26.8	26.4		26.5	
17	อุณหภูมิ film น้ำเข้า3	°C	28.2	28.4	28.8	28.8		28.6	
18	อุณหภูมิ film น้ำออก	°C	30	30.4	31.2	30.8		30.6	
19	อุณหภูมิคุณสมบัติน้ำ							36.37	0.5*(Ts+0.5(Tfi+Tout))
20	ฟลักซ์การถ่ายเทความร้อน(q")	W/m <sup>2</sup>						50307.31	

ตารางบันทึกผล วิทยานิพนธ์

เรื่อง การศึกษาเชิงทดลองของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อโดยใช้การระเหยสำหรับชุดควบคุมแรงดันของโรงน้ำแข็ง

	ข้อมูล	หน่วย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่4	ครั้งที่5	เฉลี่ย	หมายเหตุ
1	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อทองแดง (d)	mm.	12.8						
2	อุณหภูมิ dry bulb	°C	27	28	28			27.7	
3	% RH	%	35	40	45			40.0	
4	อุณหภูมิ wet bulb	°C						0.0	
5	ระยะห่างท่อ (s/d)	mm.	2.5						
6	ความเร็วลม cross air (v)	m/s	0.96						
7	Film pattern		droplet						
8	อุณหภูมิผิวท่อ	°C	49.7	47.2	46.9	46.2		47.48	
9	อัตราการไหลน้ำร้อน (V)	kg/sec						0.1117	
10	อุณหภูมิน้ำร้อนเข้า	°C						50.0	จาก data logger
11	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 1	°C						47.5	จาก data logger
12	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 2	°C						47.2	จาก data logger
13	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 3	°C						46.5	จาก data logger
14	อัตราการไหลฟิล์ม ( $\Gamma$ )	kg/m.sec						0.0683	
15	อุณหภูมิ film น้ำเข้า1	°C	21.9	22.1	22	22.2		22.1	
16	อุณหภูมิ film น้ำเข้า2	°C	29.2	29.6	29.8	30.1		29.7	
17	อุณหภูมิ film น้ำเข้า3	°C	34.1	34.4	34.5	34.3		34.3	
18	อุณหภูมิ film น้ำออก	°C	36	36.5	37	36.8		36.6	
19	อุณหภูมิคุณสมบัติน้ำ							38.40	$0.5*(T_s+0.5(T_{fi}+T_{out}))$
20	ฟลักซ์การถ่ายเทความร้อน(q")	W/m <sup>2</sup>						27088.55	

ตารางบันทึกผล วิทยานิพนธ์

เรื่อง การศึกษาเชิงทดลองของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อโดยใช้การระเหยสำหรับชุดความแน่นของโรงน้ำแข็ง

	ข้อมูล	หน่วย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่4	ครั้งที่5	เฉลี่ย	หมายเหตุ
1	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อทองแดง (d)	mm.	12.8						
2	อุณหภูมิ dry bulb	°C	27	28	28			27.7	
3	% RH	%	35	40	45			40.0	
4	อุณหภูมิ wet bulb	°C							
5	ระยะห่างท่อ (s/d)	mm.	2.5						
6	ความเร็วลม cross air (v)	m/s	1.2						
7	Film pattern		droplet						
8	อุณหภูมิผิวท่อ	°C	49.6	47.8	47.3	46.7		47.83	
9	อัตราการไหลน้ำร้อน (V)	kg/sec						0.1117	
10	อุณหภูมิน้ำร้อนเข้า	°C						49.9	จาก data logger
11	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 1	°C						48.1	จาก data logger
12	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 2	°C						47.6	จาก data logger
13	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 3	°C						47.0	จาก data logger
14	อัตราการไหลฟิล์ม ( $\Gamma$ )	kg/m.sec						0.0690	
15	อุณหภูมิ film น้ำเข้า1	°C	21.8	22	21.7	22.1		21.9	
16	อุณหภูมิ film น้ำเข้า2	°C	29.5	29.9	30	31.8		30.3	
17	อุณหภูมิ film น้ำเข้า3	°C	33.4	33.5	33.8	34.2		33.7	
18	อุณหภูมิ film น้ำออก	°C	35.1	35.8	35.7	35.4		35.5	
19	อุณหภูมิคุณสมบัติน้ำ							38.27	$0.5*(T_s+0.5(T_{fi}+T_{out}))$
20	ฟลักซ์การถ่ายเทความร้อน(q")	W/m <sup>2</sup>						22444.80	

ตารางบันทึกผล วิทยานิพนธ์

เรื่อง การศึกษาเชิงทดลองของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อโดยใช้การระเหยสำหรับชุดความแน่นของโรงน้ำแข็ง

	ข้อมูล	หน่วย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่4	ครั้งที่5	เฉลี่ย	หมายเหตุ
1	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อทองแดง (d)	mm.	12.8						
2	อุณหภูมิ dry bulb	°C	27	28	28			27.7	
3	% RH	%	35	40	45			40.0	
4	อุณหภูมิ wet bulb	°C							
5	ระยะห่างท่อ (s/d)	mm.	2.5						
6	ความเร็วลม cross air (v)	m/s	1.45						
7	Film pattern		droplet						
8	อุณหภูมิผิวท่อ	°C	49.4	46.8	46.5	45.9		47.13	
9	อัตราการไหลน้ำร้อน ( V )	kg/sec						0.1117	
10	อุณหภูมิน้ำร้อนเข้า	°C						49.7	จาก data logger
11	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 1	°C						47.1	จาก data logger
12	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 2	°C						46.8	จาก data logger
13	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 3	°C						46.2	จาก data logger
14	อัตราการไหลฟิล์ม ( $\Gamma$ )	kg/m.sec						0.0688	
15	อุณหภูมิ film น้ำเข้า1	°C	21.3	21.5	21.4	21.7		21.5	
16	อุณหภูมิ film น้ำเข้า2	°C	30.5	31.1	30.8	31.4		31.0	
17	อุณหภูมิ film น้ำเข้า3	°C	38.8	38	37.9	38.6		38.3	
18	อุณหภูมิ film น้ำออก	°C	41	40.5	40.8	41.4		40.9	
19	อุณหภูมิคุณสมบัติน้ำ							39.17	$0.5*(T_s+0.5(T_{fi}+T_{out}))$
20	ฟลักซ์การถ่ายเทความร้อน(q")	W/m <sup>2</sup>						27088.55	

ตารางบันทึกผล วิทยานิพนธ์

เรื่อง การศึกษาเชิงทดลองของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อโดยใช้การระเหยสำหรับชุดควบคุมแน่นของโรงน้ำแข็ง

	ข้อมูล	หน่วย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่4	ครั้งที่5	เฉลี่ย	หมายเหตุ
1	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อทองแดง (d)	mm.	12.8						
2	อุณหภูมิ dry bulb	°C	27	28	28			27.7	
3	% RH	%	35	40	45			40.0	
4	อุณหภูมิ wet bulb	°C							
5	ระยะห่างท่อ (s/d)	mm.	2.5						
6	ความเร็วลม cross air (v)	m/s	0.96						
7	Film pattern		column						
8	อุณหภูมิผิวท่อ	°C	49.3	46.2	45.6	44.8		46.46	
9	อัตราการไหลน้ำร้อน (V)	kg/sec						0.1117	
10	อุณหภูมิน้ำร้อนเข้า	°C						49.6	จาก data logger
11	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 1	°C						46.5	จาก data logger
12	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 2	°C						45.9	จาก data logger
13	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 3	°C						45.1	จาก data logger
14	อัตราการไหลฟิล์ม ( $\Gamma$ )	kg/m.sec						0.1260	
15	อุณหภูมิ film น้ำเข้า1	°C	23.2	23.4	23.1	23.2		23.2	
16	อุณหภูมิ film น้ำเข้า2	°C	27.9	27.8	28.5	28.8		28.3	
17	อุณหภูมิ film น้ำเข้า3	°C	29.9	30.2	31	30		30.3	
18	อุณหภูมิ film น้ำออก	°C	30.6	31.1	30.9	32.4		31.3	
19	อุณหภูมิคุณสมบัติน้ำ							36.85	$0.5*(T_s+0.5(T_{fi}+T_{out}))$
20	ฟลักซ์การถ่ายเทความร้อน(q")	W/m <sup>2</sup>						34828.13	

ตารางบันทึกผล วิทยานิพนธ์

เรื่อง การศึกษาเชิงทดลองของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อโดยใช้การระเหยสำหรับชุดความแน่นของโรงน้ำแข็ง

	ข้อมูล	หน่วย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่4	ครั้งที่5	เฉลี่ย	หมายเหตุ
1	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อทองแดง (d)	mm.	12.8						
2	อุณหภูมิ dry bulb	°C	27	28	28			27.7	
3	% RH	%	35	40	45			40.0	
4	อุณหภูมิ wet bulb	°C							
5	ระยะห่างท่อ (s/d)	mm.	2.5						
6	ความเร็วลม cross air (v)	m/s	1.2						
7	Film pattern		column						
8	อุณหภูมิผิวท่อ	°C	50.6	47.7	47.1	46.2		47.88	
9	อัตราการไหลน้ำร้อน (V)	kg/sec						0.1117	
10	อุณหภูมิน้ำร้อนเข้า	°C						50.9	จาก data logger
11	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 1	°C						48.0	จาก data logger
12	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 2	°C						47.4	จาก data logger
13	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 3	°C						46.5	จาก data logger
14	อัตราการไหลฟิล์ม ( $\Gamma$ )	kg/m.sec						0.1271	
15	อุณหภูมิ film น้ำเข้า1	°C	22.7	22.8	22.6	22.7		22.7	
16	อุณหภูมิ film น้ำเข้า2	°C	28.7	28.9	29.4	28.6		28.9	
17	อุณหภูมิ film น้ำเข้า3	°C	30.1	30.4	30.8	31.2		30.6	
18	อุณหภูมิ film น้ำออก	°C	31.9	31.6	32.5	33.1		32.3	
19	อุณหภูมิคุณสมบัติน้ำ							37.68	$0.5*(T_s+0.5(T_{fi}+T_{out}))$
20	ฟลักซ์การถ่ายเทความร้อน(q")	W/m <sup>2</sup>						34054.18	



ตารางบันทึกผล วิทยานิพนธ์

เรื่อง การศึกษาเชิงทดลองของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อโดยใช้การระเหยสำหรับชุดความแน่นของโรงน้ำแข็ง

	ข้อมูล	หน่วย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่4	ครั้งที่5	เฉลี่ย	หมายเหตุ
1	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อทองแดง (d)	mm.	12.8						
2	อุณหภูมิ dry bulb	°C	27	28	28			27.7	
3	% RH	%	35	40	45			40.0	
4	อุณหภูมิ wet bulb	°C							
5	ระยะห่างท่อ (s/d)	mm.	2.5						
6	ความเร็วลม cross air (v)	m/s	1.45						
7	Film pattern		column						
8	อุณหภูมิผิวท่อ	°C	49.7	46.5	46.0	45.1		46.81	
9	อัตราการไหลน้ำร้อน (V)	kg/sec						0.1117	
10	อุณหภูมิน้ำร้อนเข้า	°C						50.0	จาก data logger
11	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 1	°C						46.8	จาก data logger
12	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 2	°C						46.3	จาก data logger
13	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 3	°C						45.4	จาก data logger
14	อัตราการไหลฟิล์ม ( $\Gamma$ )	kg/m.sec						0.1263	
15	อุณหภูมิ film น้ำเข้า1	°C	23.2	23.2	23.3	23.2		23.2	
16	อุณหภูมิ film น้ำเข้า2	°C	26.1	26.5	26.7	27.5		26.7	
17	อุณหภูมิ film น้ำเข้า3	°C	28	28.4	28.8	28		28.3	
18	อุณหภูมิ film น้ำออก	°C	30.6	30.9	31.6	30.2		30.8	
19	อุณหภูมิคุณสมบัติน้ำ							36.92	$0.5*(T_s+0.5(T_{fi}+T_{out}))$
20	ฟลักซ์การถ่ายเทความร้อน(q")	W/m <sup>2</sup>						35602.09	

ตารางบันทึกผล วิทยานิพนธ์

เรื่อง การศึกษาเชิงทดลองของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อโดยใช้การระเหยสำหรับชุดควบแน่นของโรงน้ำแข็ง

	ข้อมูล	หน่วย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่4	ครั้งที่5	เฉลี่ย	หมายเหตุ
1	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อทองแดง (d)	mm.	12.8						
2	อุณหภูมิ dry bulb	°C	27	28	28			27.7	
3	% RH	%	35	40	45			40.0	
4	อุณหภูมิ wet bulb	°C							
5	ระยะห่างท่อ (s/d)	mm.	2.5						
6	ความเร็วลม cross air (v)	m/s	0.96						
7	Film pattern		liquid sheet						
8	อุณหภูมิผิวท่อ	°C	49.8	46.7	45.4	44.5		46.58	
9	อัตราการไหลน้ำร้อน (V)	kg/sec						0.1117	
10	อุณหภูมิน้ำร้อนเข้า	°C						50.1	จาก data logger
11	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 1	°C						47.0	จาก data logger
12	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 2	°C						45.7	จาก data logger
13	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 3	°C						44.8	จาก data logger
14	อัตราการไหลฟิล์ม ( $\Gamma$ )	kg/m.sec						0.2823	
15	อุณหภูมิ film น้ำเข้า1	°C	24.6	24.8	25.1	24.9		24.9	
16	อุณหภูมิ film น้ำเข้า2	°C	26.5	26.4	26.8	27		26.7	
17	อุณหภูมิ film น้ำเข้า3	°C	28.6	28.8	28.9	28.8		28.8	
18	อุณหภูมิ film น้ำออก	°C	29.7	29.2	30.8	30.4		30.0	
19	อุณหภูมิคุณสมบัติน้ำ							37.01	$0.5*(T_s+0.5(T_{fi}+T_{out}))$
20	ฟลักซ์การถ่ายเทความร้อน(q")	W/m <sup>2</sup>						41019.80	

ตารางบันทึกผล วิทยานิพนธ์

เรื่อง การศึกษาเชิงทดลองของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อโดยใช้การระเหยสำหรับชุดความแน่นของโรงน้ำแข็ง

	ข้อมูล	หน่วย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่4	ครั้งที่5	เฉลี่ย	หมายเหตุ
1	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อทองแดง (d)	mm.	12.8						
2	อุณหภูมิ dry bulb	°C	27	28	28			27.7	
3	% RH	%	35	40	45			40.0	
4	อุณหภูมิ wet bulb	°C							
5	ระยะห่างท่อ (s/d)	mm.	2.5						
6	ความเร็วลม cross air (v)	m/s	1.2						
7	Film pattern		liquid sheet						
8	อุณหภูมิผิวท่อ	°C	49.5	46.5	45.0	44.3		46.31	
9	อัตราการไหลน้ำร้อน ( V )	kg/sec						0.1117	
10	อุณหภูมิน้ำร้อนเข้า	°C						49.8	จาก data logger
11	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 1	°C						46.8	จาก data logger
12	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 2	°C						45.3	จาก data logger
13	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 3	°C						44.6	จาก data logger
14	อัตราการไหลฟิล์ม ( $\Gamma$ )	kg/m.sec						0.3069	
15	อุณหภูมิ film น้ำเข้า1	°C	23.7	24	24.1	23.9		23.9	
16	อุณหภูมิ film น้ำเข้า2	°C	25.2	25.8	25.6	26.4		25.8	
17	อุณหภูมิ film น้ำเข้า3	°C	28.6	28.9	29.8	30.1		29.4	
18	อุณหภูมิ film น้ำออก	°C	29.7	31.4	30.2	29.4		30.2	
19	อุณหภูมิคุณสมบัติน้ำ							36.68	0.5*(Ts+0.5(Tfi+Tout))
20	ฟลักซ์การถ่ายเทความร้อน(q")	W/m <sup>2</sup>						40245.84	

ตารางบันทึกผล วิทยานิพนธ์

เรื่อง การศึกษาเชิงทดลองของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อโดยใช้การระเหยสำหรับชุดความแน่นของโรงน้ำแข็ง

	ข้อมูล	หน่วย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่4	ครั้งที่5	เฉลี่ย	หมายเหตุ
1	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อทองแดง (d)	mm.	12.8						
2	อุณหภูมิ dry bulb	°C	27	28	28			27.7	
3	% RH	%	35	40	45			40.0	
4	อุณหภูมิ wet bulb	°C							
5	ระยะห่างท่อ (s/d)	mm.	2.5						
6	ความเร็วลม cross air (v)	m/s	1.45						
7	Film pattern		liquid sheet						
8	อุณหภูมิผิวท่อ	°C	49.3	46.6	45.1	44.1		46.26	
9	อัตราการไหลน้ำร้อน ( V )	kg/sec						0.1117	
10	อุณหภูมิน้ำร้อนเข้า	°C						49.6	จาก data logger
11	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 1	°C						46.9	จาก data logger
12	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 2	°C						45.4	จาก data logger
13	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 3	°C						44.4	จาก data logger
14	อัตราการไหลฟิล์ม ( $\Gamma$ )	kg/m.sec						0.2931	
15	อุณหภูมิ film น้ำเข้า1	°C	25.4	25.6	25.4	25.4		25.5	
16	อุณหภูมิ film น้ำเข้า2	°C	27.2	27.4	27.6	27.8		27.5	
17	อุณหภูมิ film น้ำเข้า3	°C	28.1	28.6	28.4	28.7		28.5	
18	อุณหภูมิ film น้ำออก	°C	29.3	29.8	30.1	29		29.6	
19	อุณหภูมิคุณสมบัติน้ำ							36.88	0.5*(Ts+0.5(Tfi+Tout))
20	ฟลักซ์การถ่ายเทความร้อน(q")	W/m <sup>2</sup>						40245.84	

ตารางบันทึกผล วิทยานิพนธ์

เรื่อง การศึกษาเชิงทดลองของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อโดยใช้การระเหยสำหรับชุดควบคุมแน่นของโรงน้ำแข็ง

	ข้อมูล	หน่วย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่4	ครั้งที่5	เฉลี่ย	หมายเหตุ
1	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อทองแดง (d)	mm.	12.8						
2	อุณหภูมิ dry bulb	°C	30	29	29			29.3	
3	% RH	%	60	55	50			55.0	
4	อุณหภูมิ wet bulb	°C						0.0	
5	ระยะห่างท่อ (s/d)	mm.	3.5						
6	ความเร็วลม cross air (v)	m/s	0.96						
7	Film pattern		droplet						
8	อุณหภูมิผิวท่อ	°C	49.1	47.8	47.1	47.0		47.73	
9	อัตราการไหลน้ำร้อน (V)	kg/sec						0.1117	
10	อุณหภูมิน้ำร้อนเข้า	°C						49.4	จาก data logger
11	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 1	°C						48.1	จาก data logger
12	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 2	°C						47.4	จาก data logger
13	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 3	°C						47.3	จาก data logger
14	อัตราการไหลฟิล์ม ( $\Gamma$ )	kg/m.sec						0.0448	
15	อุณหภูมิ film น้ำเข้า1	°C	26	25.8	26.1	26		26.0	
16	อุณหภูมิ film น้ำเข้า2	°C	31.5	35.6	33.4	32.4		33.2	
17	อุณหภูมิ film น้ำเข้า3	°C	35.5	35.8	38.7	37.2		36.8	
18	อุณหภูมิ film น้ำออก	°C	37.2	42.2	40.8	41.4		40.4	
19	อุณหภูมิคุณสมบัติน้ำ							40.46	$0.5*(T_s+0.5(T_{fi}+T_{out}))$
20	ฟลักซ์การถ่ายเทความร้อน(q")	W/m <sup>2</sup>						16253.13	

ตารางบันทึกผล วิทยานิพนธ์

เรื่อง การศึกษาเชิงทดลองของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อโดยใช้การระเหยสำหรับชุดความแน่นของโรงน้ำแข็ง

	ข้อมูล	หน่วย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่4	ครั้งที่5	เฉลี่ย	หมายเหตุ
1	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อทองแดง (d)	mm.	12.8						
2	อุณหภูมิ dry bulb	°C	30	30.5	31			30.5	
3	% RH	%	35	40	35			36.7	
4	อุณหภูมิ wet bulb	°C							
5	ระยะห่างท่อ (s/d)	mm.	3.5						
6	ความเร็วลม cross air (v)	m/s	1.2						
7	Film pattern		droplet						
8	อุณหภูมิผิวท่อ	°C	48.9	47.5	46.8	46.5		47.41	
9	อัตราการไหลน้ำร้อน (V)	kg/sec						0.1117	
10	อุณหภูมิน้ำร้อนเข้า	°C						49.2	จาก data logger
11	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 1	°C						47.8	จาก data logger
12	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 2	°C						47.1	จาก data logger
13	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 3	°C						46.8	จาก data logger
14	อัตราการไหลฟิล์ม ( $\Gamma$ )	kg/m.sec						0.0482	
15	อุณหภูมิ film น้ำเข้า1	°C	25.5	25.7	25.4	25.8		25.6	
16	อุณหภูมิ film น้ำเข้า2	°C	31.3	30.2	30.8	31.1		30.9	
17	อุณหภูมิ film น้ำเข้า3	°C	41	39.8	39.7	41.4		40.5	
18	อุณหภูมิ film น้ำออก	°C	42.7	42.1	41.9	42		42.2	
19	อุณหภูมิคุณสมบัติน้ำ							40.65	$0.5*(T_s+0.5(T_{fi}+T_{out}))$
20	ฟลักซ์การถ่ายเทความร้อน(q")	W/m <sup>2</sup>						18575.00	

ตารางบันทึกผล วิทยานิพนธ์

เรื่อง การศึกษาเชิงทดลองของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อโดยใช้การระเหยสำหรับชุดความแน่นของโรงน้ำแข็ง

	ข้อมูล	หน่วย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่4	ครั้งที่5	เฉลี่ย	หมายเหตุ
1	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อทองแดง (d)	mm.	12.8						
2	อุณหภูมิ dry bulb	°C	30	30.5	31			30.5	
3	% RH	%	35	40	35			36.7	
4	อุณหภูมิ wet bulb	°C							
5	ระยะห่างท่อ (s/d)	mm.	3.5						
6	ความเร็วลม cross air (v)	m/s	1.45						
7	Film pattern		droplet						
8	อุณหภูมิผิวท่อ	°C	48.0	47.3	46.6	46.4		47.06	
9	อัตราการไหลน้ำร้อน (V)	kg/sec						0.1117	
10	อุณหภูมิน้ำร้อนเข้า	°C						48.3	จาก data logger
11	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 1	°C						47.6	จาก data logger
12	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 2	°C						46.9	จาก data logger
13	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 3	°C						46.7	จาก data logger
14	อัตราการไหลฟิล์ม ( $\Gamma$ )	kg/m.sec						0.0454	
15	อุณหภูมิ film น้ำเข้า1	°C	25.6	25.4	25.6	25.7		25.6	
16	อุณหภูมิ film น้ำเข้า2	°C	34.5	34.6	35.2	34.8		34.8	
17	อุณหภูมิ film น้ำเข้า3	°C	38.4	38.6	39.2	38.4		38.7	
18	อุณหภูมิ film น้ำออก	°C	41.2	41.6	42.2	42.1		41.8	
19	อุณหภูมิคุณสมบัติน้ำ							40.37	$0.5*(T_s+0.5(T_{fi}+T_{out}))$
20	ฟลักซ์การถ่ายเทความร้อน(q")	W/m <sup>2</sup>						12383.34	

ตารางบันทึกผล วิทยานิพนธ์

เรื่อง การศึกษาเชิงทดลองของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อโดยใช้การระเหยสำหรับชุดควบคุมแน่นของโรงน้ำแข็ง

	ข้อมูล	หน่วย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่4	ครั้งที่5	เฉลี่ย	หมายเหตุ
1	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อทองแดง (d)	mm.	12.8						
2	อุณหภูมิ dry bulb	°C	31	31	32			31.3	
3	% RH	%	35	35	35			35.0	
4	อุณหภูมิ wet bulb	°C							
5	ระยะห่างท่อ (s/d)	mm.	3.5						
6	ความเร็วลม cross air (v)	m/s	0.96						
7	Film pattern		column						
8	อุณหภูมิผิวท่อ	°C	47.8	46.9	45.7	45.4		46.43	
9	อัตราการไหลน้ำร้อน (V)	kg/sec						0.1117	
10	อุณหภูมิน้ำร้อนเข้า	°C						48.1	จาก data logger
11	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 1	°C						47.2	จาก data logger
12	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 2	°C						46.0	จาก data logger
13	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 3	°C						45.7	จาก data logger
14	อัตราการไหลฟิล์ม ( $\Gamma$ )	kg/m.sec						0.1037	
15	อุณหภูมิ film น้ำเข้า1	°C	25.3	25.4	25.3	25.5		25.4	
16	อุณหภูมิ film น้ำเข้า2	°C	30.1	30.4	30.6	31.2		30.6	
17	อุณหภูมิ film น้ำเข้า3	°C	34.1	34.6	35.4	34.8		34.7	
18	อุณหภูมิ film น้ำออก	°C	36.2	37.2	36.5	36.6		36.6	
19	อุณหภูมิคุณสมบัติน้ำ							38.72	$0.5*(T_s+0.5(T_{fi}+T_{out}))$
20	ฟลักซ์การถ่ายเทความร้อน(q")	W/m <sup>2</sup>						18575.00	



ตารางบันทึกผล วิทยานิพนธ์

เรื่อง การศึกษาเชิงทดลองของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อโดยใช้การระเหยสำหรับชุดควบคุมแน่นของโรงน้ำแข็ง

	ข้อมูล	หน่วย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่4	ครั้งที่5	เฉลี่ย	หมายเหตุ
1	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อทองแดง (d)	mm.	12.8						
2	อุณหภูมิ dry bulb	°C	31	31	32			31.3	
3	% RH	%	35	35	35			35.0	
4	อุณหภูมิ wet bulb	°C							
5	ระยะห่างท่อ (s/d)	mm.	3.5						
6	ความเร็วลม cross air (v)	m/s	1.2						
7	Film pattern		column						
8	อุณหภูมิผิวท่อ	°C	48.2	46.7	45.8	45.3		46.48	
9	อัตราการไหลน้ำร้อน (V)	kg/sec						0.1117	
10	อุณหภูมิน้ำร้อนเข้า	°C						48.5	จาก data logger
11	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 1	°C						47.0	จาก data logger
12	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 2	°C						46.1	จาก data logger
13	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 3	°C						45.6	จาก data logger
14	อัตราการไหลฟิล์ม ( $\Gamma$ )	kg/m.sec						0.1120	
15	อุณหภูมิ film น้ำเข้า1	°C	26.6	26.4	26.4	26.7		26.5	
16	อุณหภูมิ film น้ำเข้า2	°C	30.4	30.6	31.1	30.8		30.7	
17	อุณหภูมิ film น้ำเข้า3	°C	34.6	34.5	34.8	34.8		34.7	
18	อุณหภูมิ film น้ำออก	°C	35.7	36.1	35.9	36.5		36.1	
19	อุณหภูมิคุณสมบัติน้ำ							38.88	$0.5*(T_s+0.5(T_{fi}+T_{out}))$
20	ฟลักซ์การถ่ายเทความร้อน(q")	W/m <sup>2</sup>						22444.80	

ตารางบันทึกผล วิทยานิพนธ์

เรื่อง การศึกษาเชิงทดลองของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อโดยใช้การระเหยสำหรับชุดความแน่นของโรงน้ำแข็ง

	ข้อมูล	หน่วย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่4	ครั้งที่5	เฉลี่ย	หมายเหตุ
1	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อทองแดง (d)	mm.	12.8						
2	อุณหภูมิ dry bulb	°C	31	31	32			31.3	
3	% RH	%	35	35	35			35.0	
4	อุณหภูมิ wet bulb	°C							
5	ระยะห่างท่อ (s/d)	mm.	3.5						
6	ความเร็วลม cross air (v)	m/s	1.45						
7	Film pattern		column						
8	อุณหภูมิผิวท่อ	°C	48.4	47.2	46.2	45.7		46.86	
9	อัตราการไหลน้ำร้อน (V)	kg/sec						0.1117	
10	อุณหภูมิน้ำร้อนเข้า	°C						48.7	จาก data logger
11	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 1	°C						47.5	จาก data logger
12	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 2	°C						46.5	จาก data logger
13	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 3	°C						46.0	จาก data logger
14	อัตราการไหลฟิล์ม ( $\Gamma$ )	kg/m.sec						0.1064	
15	อุณหภูมิ film น้ำเข้า1	°C	26.1	26.3	26.3	26.4		26.3	
16	อุณหภูมิ film น้ำเข้า2	°C	31.1	31.9	31.7	32.1		31.7	
17	อุณหภูมิ film น้ำเข้า3	°C	33.7	34	34.2	33.6		33.9	
18	อุณหภูมิ film น้ำออก	°C	34.1	35.2	34.8	35.4		34.9	
19	อุณหภูมิคุณสมบัติน้ำ							38.72	$0.5*(T_s+0.5(T_{fi}+T_{out}))$
20	ฟลักซ์การถ่ายเทความร้อน(q")	W/m <sup>2</sup>						20896.88	

ตารางบันทึกผล วิทยานิพนธ์

เรื่อง การศึกษาเชิงทดลองของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อโดยใช้การระเหยสำหรับชุดควบคุมแน่นของโรงน้ำแข็ง

	ข้อมูล	หน่วย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่4	ครั้งที่5	เฉลี่ย	หมายเหตุ
1	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อทองแดง (d)	mm.	12.8						
2	อุณหภูมิ dry bulb	°C	30	30	32			30.7	
3	% RH	%	35	35	35			35.0	
4	อุณหภูมิ wet bulb	°C							
5	ระยะห่างท่อ (s/d)	mm.	3.5						
6	ความเร็วลม cross air (v)	m/s	0.96						
7	Film pattern		liquid sheet						
8	อุณหภูมิผิวท่อ	°C	48.1	45.9	44.6	43.8		45.58	
9	อัตราการไหลน้ำร้อน (V)	kg/sec						0.1117	
10	อุณหภูมิน้ำร้อนเข้า	°C						48.4	จาก data logger
11	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 1	°C						46.2	จาก data logger
12	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 2	°C						44.9	จาก data logger
13	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 3	°C						44.1	จาก data logger
14	อัตราการไหลฟิล์ม ( $\Gamma$ )	kg/m.sec						0.3646	
15	อุณหภูมิ film น้ำเข้า1	°C	26.2	26.3	26.4	26.5		26.4	
16	อุณหภูมิ film น้ำเข้า2	°C	27.5	28.1	28.2	27.8		27.9	
17	อุณหภูมิ film น้ำเข้า3	°C	30.7	30.1	30.6	30.8		30.6	
18	อุณหภูมิ film น้ำออก	°C	31.3	31	31.5	31.1		31.2	
19	อุณหภูมิคุณสมบัติน้ำ							37.18	$0.5*(T_s+0.5(T_{fi}+T_{out}))$
20	ฟลักซ์การถ่ายเทความร้อน(q")	W/m <sup>2</sup>						33280.22	

ตารางบันทึกผล วิทยานิพนธ์

เรื่อง การศึกษาเชิงทดลองของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อโดยใช้การระเหยสำหรับชุดความแน่นของโรงน้ำแข็ง

	ข้อมูล	หน่วย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่4	ครั้งที่5	เฉลี่ย	หมายเหตุ
1	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อทองแดง (d)	mm.	12.8						
2	อุณหภูมิ dry bulb	°C	30	31	29			30.0	
3	% RH	%	55	53	54			54.0	
4	อุณหภูมิ wet bulb	°C							
5	ระยะห่างท่อ (s/d)	mm.	3.5						
6	ความเร็วลม cross air (v)	m/s	1.2						
7	Film pattern		liquid sheet						
8	อุณหภูมิผิวท่อ	°C	47.8	45.5	43.9	43.2		45.08	
9	อัตราการไหลน้ำร้อน (V)	kg/sec						0.1117	
10	อุณหภูมิน้ำร้อนเข้า	°C						48.1	จาก data logger
11	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 1	°C						45.8	จาก data logger
12	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 2	°C						44.2	จาก data logger
13	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 3	°C						43.5	จาก data logger
14	อัตราการไหลฟิล์ม ( $\Gamma$ )	kg/m.sec						0.3665	
15	อุณหภูมิ film น้ำเข้า1	°C	26.5	26.4	26.6	26.5		26.5	
16	อุณหภูมิ film น้ำเข้า2	°C	28.3	28.8	28.4	29.2		28.7	
17	อุณหภูมิ film น้ำเข้า3	°C	30.1	30.5	31.2	30.4		30.6	
18	อุณหภูมิ film น้ำออก	°C	31.2	31.5	31.4	32.4		31.6	
19	อุณหภูมิคุณสมบัติน้ำ							37.07	0.5*(Ts+0.5(Tfi+Tout))
20	ฟลักซ์การถ่ายเทความร้อน(q")	W/m <sup>2</sup>						35602.09	

ตารางบันทึกผล วิทยานิพนธ์

เรื่อง การศึกษาเชิงทดลองของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อโดยใช้การระเหยสำหรับชุดความแน่นของโรงน้ำแข็ง

	ข้อมูล	หน่วย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่4	ครั้งที่5	เฉลี่ย	หมายเหตุ
1	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อทองแดง (d)	mm.	12.8						
2	อุณหภูมิ dry bulb	°C	30	31	29			30.0	
3	% RH	%	55	53	54			54.0	
4	อุณหภูมิ wet bulb	°C							
5	ระยะห่างท่อ (s/d)	mm.	3.5						
6	ความเร็วลม cross air (v)	m/s	1.45						
7	Film pattern		liquid sheet						
8	อุณหภูมิผิวท่อ	°C	48.1	45.6	44.3	43.3		45.31	
9	อัตราการไหลน้ำร้อน ( V )	kg/sec						0.1117	
10	อุณหภูมิน้ำร้อนเข้า	°C						48.4	จาก data logger
11	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 1	°C						45.9	จาก data logger
12	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 2	°C						44.6	จาก data logger
13	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 3	°C						43.6	จาก data logger
14	อัตราการไหลฟิล์ม ( $\Gamma$ )	kg/m.sec						0.3633	
15	อุณหภูมิ film น้ำเข้า1	°C	26.7	26.5	26.6	26.6		26.6	
16	อุณหภูมิ film น้ำเข้า2	°C	28.7	28.7	28	27.8		28.3	
17	อุณหภูมิ film น้ำเข้า3	°C	31.4	31.1	31	31.6		31.3	
18	อุณหภูมิ film น้ำออก	°C	32	32.2	32.4	32.8		32.4	
19	อุณหภูมิคุณสมบัติน้ำ							37.39	0.5*(Ts+0.5(Tfi+Tout))
20	ฟลักซ์การถ่ายเทความร้อน(q")	W/m <sup>2</sup>						37150.01	

ตารางบันทึกผล วิทยานิพนธ์

เรื่อง การศึกษาเชิงทดลองของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อโดยใช้การระเหยสำหรับชุดควบคุมแรงดันของโรงน้ำแข็ง

	ข้อมูล	หน่วย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่4	ครั้งที่5	เฉลี่ย	หมายเหตุ
1	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อทองแดง (d)	mm.	19						
2	อุณหภูมิ dry bulb	°C	37.7	32	32.1			33.9	
3	% RH	%	40	39	42			40.3	
4	อุณหภูมิ wet bulb	°C						22.0	
5	ระยะห่างท่อ (s/d)	mm.	1.4						
6	ความเร็วลม cross air (v)	m/s	0.96						
7	Film pattern		droplet						
8	อุณหภูมิผิวท่อ	°C	49.0	47.1	46.6	45.8		47.17	
9	อัตราการไหลน้ำร้อน (V)	kg/sec						0.1353	
10	อุณหภูมิน้ำร้อนเข้า	°C						49.4	จาก data logger
11	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 1	°C						47.5	จาก data logger
12	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 2	°C						47	จาก data logger
13	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 3	°C						46.2	จาก data logger
14	อัตราการไหลฟิล์ม ( $\Gamma$ )	kg/m.sec						0.0817	
15	อุณหภูมิ film น้ำเข้า1	°C	27.5	26.9	27.2	28.1		27.4	
16	อุณหภูมิ film น้ำเข้า2	°C	32.3	32.1	32	31.8		32.1	
17	อุณหภูมิ film น้ำเข้า3	°C	36.4	36.2	36.7	35.8		36.3	
18	อุณหภูมิ film น้ำออก	°C	37.7	37.2	37.4	37.6		37.5	
19	อุณหภูมิคุณสมบัติน้ำ							39.81	$0.5*(T_s+0.5(T_{fi}+T_{out}))$
20	ฟลักซ์การถ่ายเทความร้อน(q")	W/m <sup>2</sup>						20220.93	

ตารางบันทึกผล วิทยานิพนธ์

เรื่อง การศึกษาเชิงทดลองของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อโดยใช้การระเหยสำหรับชุดความแน่นของโรงน้ำแข็ง

	ข้อมูล	หน่วย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่4	ครั้งที่5	เฉลี่ย	หมายเหตุ
1	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อทองแดง (d)	mm.	19						
2	อุณหภูมิ dry bulb	°C	37.7	32	32.1			33.9	
3	% RH	%	40	39	42			40.3	
4	อุณหภูมิ wet bulb	°C						22.0	
5	ระยะห่างท่อ (s/d)	mm.	1.4						
6	ความเร็วลม cross air (v)	m/s	1.2						
7	Film pattern		droplet						
8	อุณหภูมิผิวท่อ	°C	49.0	47.2	46.7	46.0		47.27	
9	อัตราการไหลน้ำร้อน (V)	kg/sec						0.1353	
10	อุณหภูมิน้ำร้อนเข้า	°C						49.4	จาก data logger
11	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 1	°C						47.5	จาก data logger
12	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 2	°C						47	จาก data logger
13	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 3	°C						45.8	จาก data logger
14	อัตราการไหลฟิล์ม ( $\Gamma$ )	kg/m.sec						0.0805	
15	อุณหภูมิ film น้ำเข้า1	°C	27.1	26.9	27.2	27.3		27.1	
16	อุณหภูมิ film น้ำเข้า2	°C	32	32.1	32.3	32.6		32.3	
17	อุณหภูมิ film น้ำเข้า3	°C	36.7	36.9	36.7	35.9		36.6	
18	อุณหภูมิ film น้ำออก	°C	37.7	37.2	37.6	37.8		37.6	
19	อุณหภูมิคุณสมบัติน้ำ							39.81	0.5*(Ts+0.5(Tfi+Tout))
20	ฟลักซ์การถ่ายเทความร้อน(q")	W/m <sup>2</sup>						18957.12	

ตารางบันทึกผล วิทยานิพนธ์

เรื่อง การศึกษาเชิงทดลองของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อโดยใช้การระเหยสำหรับชุดความชื้นของโรงน้ำแข็ง

	ข้อมูล	หน่วย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่4	ครั้งที่5	เฉลี่ย	หมายเหตุ
1	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อทองแดง (d)	mm.	19						
2	อุณหภูมิ dry bulb	°C	37.7	32	32.1			33.9	
3	% RH	%	40	39	42			40.3	
4	อุณหภูมิ wet bulb	°C						22.0	
5	ระยะห่างท่อ (s/d)	mm.	1.4						
6	ความเร็วลม cross air (v)	m/s	1.45						
7	Film pattern		droplet						
8	อุณหภูมิผิวท่อ	°C	49.0	47.0	46.5	45.9		47.14	
9	อัตราการไหลน้ำร้อน (V)	kg/sec						0.1353	
10	อุณหภูมิน้ำร้อนเข้า	°C						49.4	จาก data logger
11	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 1	°C						47.4	จาก data logger
12	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 2	°C						46.9	จาก data logger
13	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 3	°C						46.3	จาก data logger
14	อัตราการไหลฟิล์ม ( $\Gamma$ )	kg/m.sec						0.0821	
15	อุณหภูมิ film น้ำเข้า1	°C	27.1	27.6	27.2	27.3		27.3	
16	อุณหภูมิ film น้ำเข้า2	°C	32	32.1	32	31.8		32.0	
17	อุณหภูมิ film น้ำเข้า3	°C	36.2	36.4	36.8	35.9		36.3	
18	อุณหภูมิ film น้ำออก	°C	37.1	37.2	37.6	36.8		37.2	
19	อุณหภูมิคุณสมบัติน้ำ							39.69	0.5*(Ts+0.5(Tfi+Tout))
20	ฟลักซ์การถ่ายเทความร้อน(q")	W/m <sup>2</sup>						19589.02	



ตารางบันทึกผล วิทยานิพนธ์

เรื่อง การศึกษาเชิงทดลองของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อโดยใช้การระเหยสำหรับชุดควบคุมแรงดันของโรงน้ำแข็ง

	ข้อมูล	หน่วย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่4	ครั้งที่5	เฉลี่ย	หมายเหตุ
1	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อทองแดง (d)	mm.	19						
2	อุณหภูมิ dry bulb	°C	28	29	29.4			28.8	
3	% RH	%	64	60	65			63.0	
4	อุณหภูมิ wet bulb	°C						23.5	
5	ระยะห่างท่อ (s/d)	mm.	1.4						
6	ความเร็วลม cross air (v)	m/s	0.96						
7	Film pattern		column						
8	อุณหภูมิผิวท่อ	°C	47.5	45.4	44.2	43.7		45.24	
9	อัตราการไหลน้ำร้อน (V)	kg/sec						0.1353	
10	อุณหภูมิน้ำร้อนเข้า	°C						47.9	จาก data logger
11	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 1	°C						45.8	จาก data logger
12	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 2	°C						44.6	จาก data logger
13	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 3	°C						44.1	จาก data logger
14	อัตราการไหลฟิล์ม ( $\Gamma$ )	kg/m.sec						0.1605	
15	อุณหภูมิ film น้ำเข้า1	°C	27.3	27.9	27.9	27.6		27.7	
16	อุณหภูมิ film น้ำเข้า2	°C	30.8	29.8	31.3	31.1		30.8	
17	อุณหภูมิ film น้ำเข้า3	°C	32.8	31.3	33.1	32.4		32.4	
18	อุณหภูมิ film น้ำออก	°C	33.4	32.6	34.5	32.8		33.3	
19	อุณหภูมิคุณสมบัติน้ำ							37.87	$0.5*(T_s+0.5(T_{fi}+T_{out}))$
20	ฟลักซ์การถ่ายเทความร้อน(q")	W/m <sup>2</sup>						24012.35	

ตารางบันทึกผล วิทยานิพนธ์

เรื่อง การศึกษาเชิงทดลองของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อโดยใช้การระเหยสำหรับชุดความแน่นของโรงน้ำแข็ง

	ข้อมูล	หน่วย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่4	ครั้งที่5	เฉลี่ย	หมายเหตุ
1	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อทองแดง (d)	mm.	19						
2	อุณหภูมิ dry bulb	°C	28	29	29.4			28.8	
3	% RH	%	64	60	65			63.0	
4	อุณหภูมิ wet bulb	°C						23.5	
5	ระยะห่างท่อ (s/d)	mm.	1.4						
6	ความเร็วลม cross air (v)	m/s	1.2						
7	Film pattern		column						
8	อุณหภูมิผิวท่อ	°C	47.8	45.8	44.6	44.1		45.62	
9	อัตราการไหลน้ำร้อน (V)	kg/sec						0.1353	
10	อุณหภูมิน้ำร้อนเข้า	°C						48.2	จาก data logger
11	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 1	°C						46.2	จาก data logger
12	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 2	°C						45	จาก data logger
13	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 3	°C						44.5	จาก data logger
14	อัตราการไหลฟิล์ม ( $\Gamma$ )	kg/m.sec						0.1611	
15	อุณหภูมิ film น้ำเข้า1	°C	27	27.6	27.4	27.1		27.3	
16	อุณหภูมิ film น้ำเข้า2	°C	31.2	31.5	31	30.8		31.1	
17	อุณหภูมิ film น้ำเข้า3	°C	32	32.4	32.5	32.3		32.3	
18	อุณหภูมิ film น้ำออก	°C	34.6	34.8	34.4	34		34.5	
19	อุณหภูมิคุณสมบัติน้ำ							38.24	0.5*(Ts+0.5(Tfi+Tout))
20	ฟลักซ์การถ่ายเทความร้อน(q")	W/m <sup>2</sup>						23380.44	

ตารางบันทึกผล วิทยานิพนธ์

เรื่อง การศึกษาเชิงทดลองของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อโดยใช้การระเหยสำหรับชุดความแน่นของโรงน้ำแข็ง

	ข้อมูล	หน่วย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่4	ครั้งที่5	เฉลี่ย	หมายเหตุ
1	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อทองแดง (d)	mm.	19						
2	อุณหภูมิ dry bulb	°C	28	29	29.4			28.8	
3	% RH	%	64	60	65			63.0	
4	อุณหภูมิ wet bulb	°C						23.5	
5	ระยะห่างท่อ (s/d)	mm.	1.4						
6	ความเร็วลม cross air (v)	m/s	1.45						
7	Film pattern		column						
8	อุณหภูมิผิวท่อ	°C	48.2	46.2	45.3	44.7		46.14	
9	อัตราการไหลน้ำร้อน (V)	kg/sec						0.1353	
10	อุณหภูมิน้ำร้อนเข้า	°C						48.6	จาก data logger
11	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 1	°C						46.6	จาก data logger
12	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 2	°C						45.7	จาก data logger
13	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 3	°C						45.1	จาก data logger
14	อัตราการไหลฟิล์ม ( $\Gamma$ )	kg/m.sec						0.1624	
15	อุณหภูมิ film น้ำเข้า1	°C	27.4	27.6	27.1	28		27.5	
16	อุณหภูมิ film น้ำเข้า2	°C	33.2	31.9	32.4	33.1		32.7	
17	อุณหภูมิ film น้ำเข้า3	°C	35.1	34.8	35.4	34.6		35.0	
18	อุณหภูมิ film น้ำออก	°C	36.5	35.7	36.8	36.4		36.4	
19	อุณหภูมิคุณสมบัติน้ำ							39.04	0.5*(Ts+0.5(Tfi+Tout))
20	ฟลักซ์การถ่ายเทความร้อน(q")	W/m <sup>2</sup>						22116.64	

ตารางบันทึกผล วิทยานิพนธ์

เรื่อง การศึกษาเชิงทดลองของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อโดยใช้การระเหยสำหรับชุดควบคุมแรงดันของโรงน้ำแข็ง

	ข้อมูล	หน่วย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่4	ครั้งที่5	เฉลี่ย	หมายเหตุ
1	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อทองแดง (d)	mm.	19						
2	อุณหภูมิ dry bulb	°C	31.7	32	32.1			31.9	
3	% RH	%	38	40	39	40		39.3	
4	อุณหภูมิ wet bulb	°C						21.1	
5	ระยะห่างท่อ (s/d)	mm.	1.4						
6	ความเร็วลม cross air (v)	m/s	0.96						
7	Film pattern		liquid sheet						
8	อุณหภูมิผิวท่อ	°C	47.5	45.3	44.3	43.1		45.09	
9	อัตราการไหลน้ำร้อน (V)	kg/sec						0.1353	
10	อุณหภูมิน้ำร้อนเข้า	°C						47.9	จาก data logger
11	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 1	°C						45.7	จาก data logger
12	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 2	°C						44.7	จาก data logger
13	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 3	°C						43.5	จาก data logger
14	อัตราการไหลฟิล์ม ( $\Gamma$ )	kg/m.sec						0.3154	
15	อุณหภูมิ film น้ำเข้า1	°C	30.4	30.1	30.5	30.3		30.3	
16	อุณหภูมิ film น้ำเข้า2	°C	31.7	31.2	31.1	31.4		31.4	
17	อุณหภูมิ film น้ำเข้า3	°C	32.9	32	32.4	32.2		32.4	
18	อุณหภูมิ film น้ำออก	°C	33.4	32.8	33.1	32.6		33.0	
19	อุณหภูมิคุณสมบัติน้ำ							38.37	$0.5*(T_s+0.5(T_{fi}+T_{out}))$
20	ฟลักซ์การถ่ายเทความร้อน(q")	W/m <sup>2</sup>						27803.77	

ตารางบันทึกผล วิทยานิพนธ์

เรื่อง การศึกษาเชิงทดลองของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อโดยใช้การระเหยสำหรับชุดความแน่นของโรงน้ำแข็ง

	ข้อมูล	หน่วย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่4	ครั้งที่5	เฉลี่ย	หมายเหตุ
1	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อทองแดง (d)	mm.	19						
2	อุณหภูมิ dry bulb	°C	30	32				31.0	
3	% RH	%	44	43				43.5	
4	อุณหภูมิ wet bulb	°C						21.5	
5	ระยะห่างท่อ (s/d)	mm.	1.4						
6	ความเร็วลม cross air (v)	m/s	1.2						
7	Film pattern		liquid sheet						
8	อุณหภูมิผิวท่อ	°C	47.7	45.7	44.9	43.8		45.57	
9	อัตราการไหลน้ำร้อน (V)	kg/sec						0.1353	
10	อุณหภูมิน้ำร้อนเข้า	°C						48.1	จาก data logger
11	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 1	°C						46.1	จาก data logger
12	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 2	°C						45.3	จาก data logger
13	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 3	°C						44.2	จาก data logger
14	อัตราการไหลฟิล์ม ( $\Gamma$ )	kg/m.sec						0.3632	
15	อุณหภูมิ film น้ำเข้า1	°C	30.4	30.1	29.8	30		30.1	
16	อุณหภูมิ film น้ำเข้า2	°C	31.4	31.7	32.1	31.5		31.7	
17	อุณหภูมิ film น้ำเข้า3	°C	33.7	32.6	32.8	33.1		33.1	
18	อุณหภูมิ film น้ำออก	°C	36.3	33.4	33.1	32.8		33.9	
19	อุณหภูมิคุณสมบัติน้ำ							38.78	0.5*(Ts+0.5(Tfi+Tout))
20	ฟลักซ์การถ่ายเทความร้อน(q")	W/m <sup>2</sup>						24644.25	

ตารางบันทึกผล วิทยานิพนธ์

เรื่อง การศึกษาเชิงทดลองของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อโดยใช้การระเหยสำหรับชุดความแน่นของโรงน้ำแข็ง

	ข้อมูล	หน่วย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่4	ครั้งที่5	เฉลี่ย	หมายเหตุ
1	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อทองแดง (d)	mm.	19						
2	อุณหภูมิ dry bulb	°C	31.7	32	32.1			31.9	
3	% RH	%	38	40	39	40		39.3	
4	อุณหภูมิ wet bulb	°C						21.1	
5	ระยะห่างท่อ (s/d)	mm.	1.4						
6	ความเร็วลม cross air (v)	m/s	1.45						
7	Film pattern		liquid sheet						
8	อุณหภูมิผิวท่อ	°C	47.1	44.9	44.0	42.7		44.72	
9	อัตราการไหลน้ำร้อน (V)	kg/sec						0.1353	
10	อุณหภูมิน้ำร้อนเข้า	°C						47.5	จาก data logger
11	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 1	°C						45.3	จาก data logger
12	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 2	°C						44.4	จาก data logger
13	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 3	°C						43.1	จาก data logger
14	อัตราการไหลฟิล์ม ( $\Gamma$ )	kg/m.sec						0.3045	
15	อุณหภูมิ film น้ำเข้า1	°C	28.5	28.3	28.7	28.2		28.4	
16	อุณหภูมิ film น้ำเข้า2	°C	30.1	30.2	30.4	30.2		30.2	
17	อุณหภูมิ film น้ำเข้า3	°C	31.3	31.1	31.7	31		31.3	
18	อุณหภูมิ film น้ำออก	°C	32.3	32.1	32	32.4		32.2	
19	อุณหภูมิคุณสมบัติน้ำ							37.51	0.5*(Ts+0.5(Tfi+Tout))
20	ฟลักซ์การถ่ายเทความร้อน(q")	W/m <sup>2</sup>						27803.77	

ตารางบันทึกผล วิทยานิพนธ์

เรื่อง การศึกษาเชิงทดลองของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อโดยใช้การระเหยสำหรับชุดควบคุมแรงดันของโรงน้ำแข็ง

	ข้อมูล	หน่วย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่4	ครั้งที่5	เฉลี่ย	หมายเหตุ
1	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อทองแดง (d)	mm.	19						
2	อุณหภูมิ dry bulb	°C	32	31.5	32			31.8	
3	% RH	%	40	48	55			47.7	
4	อุณหภูมิ wet bulb	°C						0.0	
5	ระยะห่างท่อ (s/d)	mm.	2.5						
6	ความเร็วลม cross air (v)	m/s	0.96						
7	Film pattern		droplet						
8	อุณหภูมิผิวท่อ	°C	44.2	43.4	42.8	42.4		43.24	
9	อัตราการไหลน้ำร้อน (V)	kg/sec						0.1353	
10	อุณหภูมิน้ำร้อนเข้า	°C						44.6	จาก data logger
11	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 1	°C						43.8	จาก data logger
12	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 2	°C						43.2	จาก data logger
13	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 3	°C						42.8	จาก data logger
14	อัตราการไหลฟิล์ม ( $\Gamma$ )	kg/m.sec						0.1010	
15	อุณหภูมิ film น้ำเข้า1	°C	27	27.1	27.4	26.8		27.1	
16	อุณหภูมิ film น้ำเข้า2	°C	33.7	32.9	33	33.8		33.4	
17	อุณหภูมิ film น้ำเข้า3	°C	35.4	34.8	34.6	35.8		35.2	
18	อุณหภูมิ film น้ำออก	°C	36.7	36.4	36.5	36.6		36.6	
19	อุณหภูมิคุณสมบัติน้ำ							37.53	$0.5*(T_s+0.5(T_{fi}+T_{out}))$
20	ฟลักซ์การถ่ายเทความร้อน(q")	W/m <sup>2</sup>						11374.27	

ตารางบันทึกผล วิทยานิพนธ์

เรื่อง การศึกษาเชิงทดลองของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อโดยใช้การระเหยสำหรับชุดความแน่นของโรงน้ำแข็ง

	ข้อมูล	หน่วย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่4	ครั้งที่5	เฉลี่ย	หมายเหตุ
1	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อทองแดง (d)	mm.	19						
2	อุณหภูมิ dry bulb	°C	32	31.5	32			31.8	
3	% RH	%	40	48	55			47.7	
4	อุณหภูมิ wet bulb	°C							
5	ระยะห่างท่อ (s/d)	mm.	2.5						
6	ความเร็วลม cross air (v)	m/s	1.2						
7	Film pattern		droplet						
8	อุณหภูมิผิวท่อ	°C	43.8	42.8	42.3	41.9		42.74	
9	อัตราการไหลน้ำร้อน (V)	kg/sec						0.1353	
10	อุณหภูมิน้ำร้อนเข้า	°C						44.2	จาก data logger
11	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 1	°C						43.2	จาก data logger
12	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 2	°C						42.7	จาก data logger
13	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 3	°C						42.3	จาก data logger
14	อัตราการไหลฟิล์ม ( $\Gamma$ )	kg/m.sec						0.1018	
15	อุณหภูมิ film น้ำเข้า1	°C	28.4	28.2	28	28.6		28.3	
16	อุณหภูมิ film น้ำเข้า2	°C	32.8	32.4	32.6	33		32.7	
17	อุณหภูมิ film น้ำเข้า3	°C	35.5	35.8	36.2	35.1		35.7	
18	อุณหภูมิ film น้ำออก	°C	37.4	37	37.2	36.9		37.1	
19	อุณหภูมิคุณสมบัติน้ำ							37.73	0.5*(Ts+0.5(Tfi+Tout))
20	ฟลักซ์การถ่ายเทความร้อน(q")	W/m <sup>2</sup>						12006.17	



ตารางบันทึกผล วิทยานิพนธ์

เรื่อง การศึกษาเชิงทดลองของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อโดยใช้การระเหยสำหรับชุดความแน่นของโรงน้ำแข็ง

	ข้อมูล	หน่วย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่4	ครั้งที่5	เฉลี่ย	หมายเหตุ
1	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อทองแดง (d)	mm.	19						
2	อุณหภูมิ dry bulb	°C	32	31.5	32			31.8	
3	% RH	%	40	48	55			47.7	
4	อุณหภูมิ wet bulb	°C							
5	ระยะห่างท่อ (s/d)	mm.	2.5						
6	ความเร็วลม cross air (v)	m/s	1.45						
7	Film pattern		droplet						
8	อุณหภูมิผิวท่อ	°C	44.0	43.2	42.6	42.3		43.07	
9	อัตราการไหลน้ำร้อน (V)	kg/sec						0.1353	
10	อุณหภูมิน้ำร้อนเข้า	°C						44.4	จาก data logger
11	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 1	°C						43.6	จาก data logger
12	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 2	°C						43.0	จาก data logger
13	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 3	°C						42.7	จาก data logger
14	อัตราการไหลฟิล์ม ( $\Gamma$ )	kg/m.sec						0.1021	
15	อุณหภูมิ film น้ำเข้า1	°C	26.7	27.2	26.8	26.6		26.8	
16	อุณหภูมิ film น้ำเข้า2	°C	32.2	32.7	32.5	32.6		32.5	
17	อุณหภูมิ film น้ำเข้า3	°C	36.2	36.1	36.8	36.4		36.4	
18	อุณหภูมิ film น้ำออก	°C	37.4	37.2	37.1	37		37.2	
19	อุณหภูมิคุณสมบัติน้ำ							37.53	0.5*(Ts+0.5(Tfi+Tout))
20	ฟลักซ์การถ่ายเทความร้อน(q")	W/m <sup>2</sup>						10742.37	

ตารางบันทึกผล วิทยานิพนธ์

เรื่อง การศึกษาเชิงทดลองของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อโดยใช้การระเหยสำหรับชุดควบคุมแน่นของโรงน้ำแข็ง

	ข้อมูล	หน่วย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่4	ครั้งที่5	เฉลี่ย	หมายเหตุ
1	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อทองแดง (d)	mm.	19						
2	อุณหภูมิ dry bulb	°C	30	31	30			30.3	
3	% RH	%	60	60	65			61.7	
4	อุณหภูมิ wet bulb	°C							
5	ระยะห่างท่อ (s/d)	mm.	2.5						
6	ความเร็วลม cross air (v)	m/s	0.96						
7	Film pattern		column						
8	อุณหภูมิผิวท่อ	°C	44.1	42.8	41.4	41.1		42.39	
9	อัตราการไหลน้ำร้อน (V)	kg/sec						0.1353	
10	อุณหภูมิน้ำร้อนเข้า	°C						44.5	จาก data logger
11	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 1	°C						43.2	จาก data logger
12	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 2	°C						41.8	จาก data logger
13	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 3	°C						41.5	จาก data logger
14	อัตราการไหลฟิล์ม ( $\Gamma$ )	kg/m.sec						0.2248	
15	อุณหภูมิ film น้ำเข้า1	°C	26.6	27	26.8	27.2		26.9	
16	อุณหภูมิ film น้ำเข้า2	°C	29.8	29.6	28.8	30.1		29.6	
17	อุณหภูมิ film น้ำเข้า3	°C	32.6	32.4	32	31.8		32.2	
18	อุณหภูมิ film น้ำออก	°C	33.4	33.6	33.1	33.8		33.5	
19	อุณหภูมิคุณสมบัติน้ำ							36.29	$0.5*(T_s+0.5(T_{fi}+T_{out}))$
20	ฟลักซ์การถ่ายเทความร้อน(q")	W/m <sup>2</sup>						18957.12	

ตารางบันทึกผล วิทยานิพนธ์

เรื่อง การศึกษาเชิงทดลองของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อโดยใช้การระเหยสำหรับชุดความแน่นของโรงน้ำแข็ง

	ข้อมูล	หน่วย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่4	ครั้งที่5	เฉลี่ย	หมายเหตุ
1	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อทองแดง (d)	mm.	19						
2	อุณหภูมิ dry bulb	°C	28	29	29.4			28.8	
3	% RH	%	64	60	65			63.0	
4	อุณหภูมิ wet bulb	°C							
5	ระยะห่างท่อ (s/d)	mm.	2.5						
6	ความเร็วลม cross air (v)	m/s	1.2						
7	Film pattern		column						
8	อุณหภูมิผิวท่อ	°C	43.7	42.5	41.4	41.0		42.19	
9	อัตราการไหลน้ำร้อน (V)	kg/sec						0.1353	
10	อุณหภูมิน้ำร้อนเข้า	°C						44.1	จาก data logger
11	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 1	°C						42.9	จาก data logger
12	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 2	°C						41.8	จาก data logger
13	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 3	°C						41.4	จาก data logger
14	อัตราการไหลฟิล์ม ( $\Gamma$ )	kg/m.sec						0.2236	
15	อุณหภูมิ film น้ำเข้า1	°C	27	27.1	27.4	27		27.1	
16	อุณหภูมิ film น้ำเข้า2	°C	30.1	30.4	30.2	30		30.2	
17	อุณหภูมิ film น้ำเข้า3	°C	31.8	31.4	31.6	32		31.7	
18	อุณหภูมิ film น้ำออก	°C	33.8	33.4	33.6	33.9		33.7	
19	อุณหภูมิคุณสมบัติน้ำ							36.30	0.5*(Ts+0.5(Tfi+Tout))
20	ฟลักซ์การถ่ายเทความร้อน(q")	W/m <sup>2</sup>						17061.41	

ตารางบันทึกผล วิทยานิพนธ์

เรื่อง การศึกษาเชิงทดลองของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อโดยใช้การระเหยสำหรับชุดความแน่นของโรงน้ำแข็ง

	ข้อมูล	หน่วย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่4	ครั้งที่5	เฉลี่ย	หมายเหตุ
1	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อทองแดง (d)	mm.	19						
2	อุณหภูมิ dry bulb	°C	28	29	29.4			28.8	
3	% RH	%	64	60	65			63.0	
4	อุณหภูมิ wet bulb	°C							
5	ระยะห่างท่อ (s/d)	mm.	2.5						
6	ความเร็วลม cross air (v)	m/s	1.45						
7	Film pattern		column						
8	อุณหภูมิผิวท่อ	°C	44.1	43.0	42.0	41.5		42.69	
9	อัตราการไหลน้ำร้อน (V)	kg/sec						0.1353	
10	อุณหภูมิน้ำร้อนเข้า	°C						44.5	จาก data logger
11	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 1	°C						43.4	จาก data logger
12	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 2	°C						42.4	จาก data logger
13	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 3	°C						41.9	จาก data logger
14	อัตราการไหลฟิล์ม ( $\Gamma$ )	kg/m.sec						0.2252	
15	อุณหภูมิ film น้ำเข้า1	°C	26.9	27	26.8	26.6		26.8	
16	อุณหภูมิ film น้ำเข้า2	°C	30.7	30.2	30.8	30.9		30.7	
17	อุณหภูมิ film น้ำเข้า3	°C	31.7	30.9	31.8	32		31.6	
18	อุณหภูมิ film น้ำออก	°C	32.1	32	32.4	32.4		32.2	
19	อุณหภูมิคุณสมบัติน้ำ							36.11	0.5*(Ts+0.5(Tfi+Tout))
20	ฟลักซ์การถ่ายเทความร้อน(q")	W/m <sup>2</sup>						16429.50	

ตารางบันทึกผล วิทยานิพนธ์

เรื่อง การศึกษาเชิงทดลองของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อโดยใช้การระเหยสำหรับชุดควบคุมแรงดันของโรงน้ำแข็ง

	ข้อมูล	หน่วย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่4	ครั้งที่5	เฉลี่ย	หมายเหตุ
1	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อทองแดง (d)	mm.	19						
2	อุณหภูมิ dry bulb	°C	30	31	29			30.0	
3	% RH	%	55	53	54			54.0	
4	อุณหภูมิ wet bulb	°C							
5	ระยะห่างท่อ (s/d)	mm.	2.5						
6	ความเร็วลม cross air (v)	m/s	0.96						
7	Film pattern		liquid sheet						
8	อุณหภูมิผิวท่อ	°C	44.1	42.4	41.6	40.8		42.27	
9	อัตราการไหลน้ำร้อน (V)	kg/sec						0.1353	
10	อุณหภูมิน้ำร้อนเข้า	°C						44.5	จาก data logger
11	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 1	°C						42.8	จาก data logger
12	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 2	°C						42.0	จาก data logger
13	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 3	°C						41.2	จาก data logger
14	อัตราการไหลฟิล์ม ( $\Gamma$ )	kg/m.sec						0.3594	
15	อุณหภูมิ film น้ำเข้า1	°C	27	27.4	27.1	27.2		27.2	
16	อุณหภูมิ film น้ำเข้า2	°C	28.4	28.2	28.3	28.1		28.3	
17	อุณหภูมิ film น้ำเข้า3	°C	31.1	31	31.3	31.1		31.1	
18	อุณหภูมิ film น้ำออก	°C	32.6	32.4	32.5	32.8		32.6	
19	อุณหภูมิคุณสมบัติน้ำ							36.07	0.5*(Ts+0.5(Tfi+Tout))
20	ฟลักซ์การถ่ายเทความร้อน(q")	W/m <sup>2</sup>						20852.83	

ตารางบันทึกผล วิทยานิพนธ์

เรื่อง การศึกษาเชิงทดลองของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อโดยใช้การระเหยสำหรับชุดความแน่นของโรงน้ำแข็ง

	ข้อมูล	หน่วย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่4	ครั้งที่5	เฉลี่ย	หมายเหตุ
1	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อทองแดง (d)	mm.	19						
2	อุณหภูมิ dry bulb	°C	30	31	29			30.0	
3	% RH	%	55	53	54			54.0	
4	อุณหภูมิ wet bulb	°C							
5	ระยะห่างท่อ (s/d)	mm.	2.5						
6	ความเร็วลม cross air (v)	m/s	1.2						
7	Film pattern		liquid sheet						
8	อุณหภูมิผิวท่อ	°C	43.7	42.3	41.4	40.6		42.04	
9	อัตราการไหลน้ำร้อน (V)	kg/sec						0.1353	
10	อุณหภูมิน้ำร้อนเข้า	°C						44.1	จาก data logger
11	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 1	°C						42.7	จาก data logger
12	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 2	°C						41.8	จาก data logger
13	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 3	°C						41.0	จาก data logger
14	อัตราการไหลฟิล์ม ( $\Gamma$ )	kg/m.sec						0.3588	
15	อุณหภูมิ film น้ำเข้า1	°C	28.5	28.2	28.6	28.8		28.5	
16	อุณหภูมิ film น้ำเข้า2	°C	29.8	29.6	29.5	29.8		29.7	
17	อุณหภูมิ film น้ำเข้า3	°C	30.6	30.4	30.5	30.7		30.6	
18	อุณหภูมิ film น้ำออก	°C	32.2	32.1	32	32.3		32.2	
19	อุณหภูมิคุณสมบัติน้ำ							36.19	0.5*(Ts+0.5(Tfi+Tout))
20	ฟลักซ์การถ่ายเทความร้อน(q")	W/m <sup>2</sup>						19589.02	

ตารางบันทึกผล วิทยานิพนธ์

เรื่อง การศึกษาเชิงทดลองของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อโดยใช้การระเหยสำหรับชุดความแน่นของโรงน้ำแข็ง

	ข้อมูล	หน่วย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่4	ครั้งที่5	เฉลี่ย	หมายเหตุ
1	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อทองแดง (d)	mm.	19						
2	อุณหภูมิ dry bulb	°C	30	31	29			30.0	
3	% RH	%	55	53	54			54.0	
4	อุณหภูมิ wet bulb	°C							
5	ระยะห่างท่อ (s/d)	mm.	2.5						
6	ความเร็วลม cross air (v)	m/s	1.45						
7	Film pattern		liquid sheet						
8	อุณหภูมิผิวท่อ	°C	43.6	42.1	41.3	40.5		41.92	
9	อัตราการไหลน้ำร้อน ( V )	kg/sec						0.1353	
10	อุณหภูมิน้ำร้อนเข้า	°C						44.0	จาก data logger
11	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 1	°C						42.5	จาก data logger
12	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 2	°C						41.7	จาก data logger
13	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 3	°C						40.9	จาก data logger
14	อัตราการไหลฟิล์ม ( $\Gamma$ )	kg/m.sec						0.3591	
15	อุณหภูมิ film น้ำเข้า1	°C	28.8	28.9	28.4	28.8		28.7	
16	อุณหภูมิ film น้ำเข้า2	°C	29.2	29.8	29.4	29.1		29.4	
17	อุณหภูมิ film น้ำเข้า3	°C	30.4	30.6	30.2	30.4		30.4	
18	อุณหภูมิ film น้ำออก	°C	32.2	32.1	32	32		32.1	
19	อุณหภูมิคุณสมบัติน้ำ							36.16	0.5*(Ts+0.5(Tfi+Tout))
20	ฟลักซ์การถ่ายเทความร้อน(q")	W/m <sup>2</sup>						19589.02	

ตารางบันทึกผล วิทยานิพนธ์

เรื่อง การศึกษาเชิงทดลองของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อโดยใช้การระเหยสำหรับชุดควบคุมแน่นของโรงน้ำแข็ง

	ข้อมูล	หน่วย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่4	ครั้งที่5	เฉลี่ย	หมายเหตุ
1	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อทองแดง (d)	mm.	19						
2	อุณหภูมิ dry bulb	°C	30	30.5	31			30.5	
3	% RH	%	35	40	35			36.7	
4	อุณหภูมิ wet bulb	°C						0.0	
5	ระยะห่างท่อ (s/d)	mm.	3.5						
6	ความเร็วลม cross air (v)	m/s	0.96						
7	Film pattern		droplet						
8	อุณหภูมิผิวท่อ	°C	49.3	48.0	47.1	46.8		47.84	
9	อัตราการไหลน้ำร้อน (V)	kg/sec						0.1353	
10	อุณหภูมิน้ำร้อนเข้า	°C						49.7	จาก data logger
11	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 1	°C						48.4	จาก data logger
12	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 2	°C						47.5	จาก data logger
13	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 3	°C						47.2	จาก data logger
14	อัตราการไหลฟิล์ม ( $\Gamma$ )	kg/m.sec						0.0582	
15	อุณหภูมิ film น้ำเข้า1	°C	27.3	27.6	27.4	27.2		27.4	
16	อุณหภูมิ film น้ำเข้า2	°C	31.4	30.9	31.6	32.1		31.5	
17	อุณหภูมิ film น้ำเข้า3	°C	32.8	33.4	32.1	32.6		32.7	
18	อุณหภูมิ film น้ำออก	°C	35.1	35	35.7	35.4		35.3	
19	อุณหภูมิคุณสมบัติน้ำ							39.59	$0.5*(T_s+0.5(T_{fi}+T_{out}))$
20	ฟลักซ์การถ่ายเทความร้อน(q")	W/m <sup>2</sup>						15797.60	



ตารางบันทึกผล วิทยานิพนธ์

เรื่อง การศึกษาเชิงทดลองของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อโดยใช้การระเหยสำหรับชุดความแน่นของโรงน้ำแข็ง

	ข้อมูล	หน่วย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่4	ครั้งที่5	เฉลี่ย	หมายเหตุ
1	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อทองแดง (d)	mm.	19						
2	อุณหภูมิ dry bulb	°C	30	30.5	31			30.5	
3	% RH	%	35	40	35			36.7	
4	อุณหภูมิ wet bulb	°C							
5	ระยะห่างท่อ (s/d)	mm.	3.5						
6	ความเร็วลม cross air (v)	m/s	1.2						
7	Film pattern		droplet						
8	อุณหภูมิผิวท่อ	°C	47.9	46.8	46.2	45.9		46.74	
9	อัตราการไหลน้ำร้อน ( V )	kg/sec						0.1353	
10	อุณหภูมิน้ำร้อนเข้า	°C						48.3	จาก data logger
11	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 1	°C						47.2	จาก data logger
12	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 2	°C						46.6	จาก data logger
13	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 3	°C						46.3	จาก data logger
14	อัตราการไหลฟิล์ม ( $\Gamma$ )	kg/m.sec						0.0578	
15	อุณหภูมิ film น้ำเข้า1	°C	23.4	23.5	24	23.8		23.7	
16	อุณหภูมิ film น้ำเข้า2	°C	29.2	28.1	29.4	28.8		28.9	
17	อุณหภูมิ film น้ำเข้า3	°C	33.9	33.4	33.8	33.5		33.7	
18	อุณหภูมิ film น้ำออก	°C	39.3	37.6	38.9	39.1		38.7	
19	อุณหภูมิคุณสมบัติน้ำ							38.97	0.5*(Ts+0.5(Tfi+Tout))
20	ฟลักซ์การถ่ายเทความร้อน(q")	W/m <sup>2</sup>						12638.08	

ตารางบันทึกผล วิทยานิพนธ์

เรื่อง การศึกษาเชิงทดลองของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อโดยใช้การระเหยสำหรับชุดความแน่นของโรงน้ำแข็ง

	ข้อมูล	หน่วย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่4	ครั้งที่5	เฉลี่ย	หมายเหตุ
1	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อทองแดง (d)	mm.	19						
2	อุณหภูมิ dry bulb	°C	30	30.5	31			30.5	
3	% RH	%	35	40	35			36.7	
4	อุณหภูมิ wet bulb	°C							
5	ระยะห่างท่อ (s/d)	mm.	3.5						
6	ความเร็วลม cross air (v)	m/s	1.45						
7	Film pattern		droplet						
8	อุณหภูมิผิวท่อ	°C	48.6	47.4	46.8	46.4		47.34	
9	อัตราการไหลน้ำร้อน (V)	kg/sec						0.1353	
10	อุณหภูมิน้ำร้อนเข้า	°C						49.0	จาก data logger
11	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 1	°C						47.8	จาก data logger
12	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 2	°C						47.2	จาก data logger
13	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 3	°C						46.8	จาก data logger
14	อัตราการไหลฟิล์ม ( $\Gamma$ )	kg/m.sec						0.0588	
15	อุณหภูมิ film น้ำเข้า1	°C	23.3	24.1	23.7	23.5		23.7	
16	อุณหภูมิ film น้ำเข้า2	°C	30.6	33.4	29.1	32.8		31.5	
17	อุณหภูมิ film น้ำเข้า3	°C	33.3	32.5	33.8	33.4		33.3	
18	อุณหภูมิ film น้ำออก	°C	36.4	39.9	39.6	38.6		38.6	
19	อุณหภูมิคุณสมบัติน้ำ							39.24	0.5*(Ts+0.5(Tfi+Tout))
20	ฟลักซ์การถ่ายเทความร้อน(q")	W/m <sup>2</sup>						13901.89	

ตารางบันทึกผล วิทยานิพนธ์

เรื่อง การศึกษาเชิงทดลองของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อโดยใช้การระเหยสำหรับชุดควบคุมแรงดันของโรงน้ำแข็ง

	ข้อมูล	หน่วย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่4	ครั้งที่5	เฉลี่ย	หมายเหตุ
1	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อทองแดง (d)	mm.	19						
2	อุณหภูมิ dry bulb	°C	31	31	32			31.3	
3	% RH	%	35	35	35			35.0	
4	อุณหภูมิ wet bulb	°C							
5	ระยะห่างท่อ (s/d)	mm.	3.5						
6	ความเร็วลม cross air (v)	m/s	0.96						
7	Film pattern		column						
8	อุณหภูมิผิวท่อ	°C	46.1	44.7	44.0	43.6		44.64	
9	อัตราการไหลน้ำร้อน (V)	kg/sec						0.1353	
10	อุณหภูมิน้ำร้อนเข้า	°C						46.5	จาก data logger
11	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 1	°C						45.1	จาก data logger
12	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 2	°C						44.4	จาก data logger
13	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 3	°C						44.0	จาก data logger
14	อัตราการไหลฟิล์ม ( $\Gamma$ )	kg/m.sec						0.1574	
15	อุณหภูมิ film น้ำเข้า1	°C	26.3	26.5	26.6	26.2		26.4	
16	อุณหภูมิ film น้ำเข้า2	°C	29.7	30.1	29.8	29.9		29.9	
17	อุณหภูมิ film น้ำเข้า3	°C	32	32.7	32.4	32.6		32.4	
18	อุณหภูมิ film น้ำออก	°C	34.1	33.6	33.9	33.8		33.9	
19	อุณหภูมิคุณสมบัติน้ำ							37.38	$0.5*(T_s+0.5(T_{fi}+T_{out}))$
20	ฟลักซ์การถ่ายเทความร้อน(q")	W/m <sup>2</sup>						15797.60	

ตารางบันทึกผล วิทยานิพนธ์

เรื่อง การศึกษาเชิงทดลองของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อโดยใช้การระเหยสำหรับชุดความแน่นของโรงน้ำแข็ง

	ข้อมูล	หน่วย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่4	ครั้งที่5	เฉลี่ย	หมายเหตุ
1	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อทองแดง (d)	mm.	19						
2	อุณหภูมิ dry bulb	°C	31	31	32			31.3	
3	% RH	%	35	35	35			35.0	
4	อุณหภูมิ wet bulb	°C							
5	ระยะห่างท่อ (s/d)	mm.	3.5						
6	ความเร็วลม cross air (v)	m/s	1.2						
7	Film pattern		column						
8	อุณหภูมิผิวท่อ	°C	46.1	45.0	44.0	43.7		44.74	
9	อัตราการไหลน้ำร้อน ( V )	kg/sec						0.1353	
10	อุณหภูมิน้ำร้อนเข้า	°C						46.5	จาก data logger
11	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 1	°C						45.4	จาก data logger
12	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 2	°C						44.4	จาก data logger
13	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 3	°C						44.1	จาก data logger
14	อัตราการไหลฟิล์ม ( $\Gamma$ )	kg/m.sec						0.1571	
15	อุณหภูมิ film น้ำเข้า1	°C	24.4	24.5	24.6	24.5		24.5	
16	อุณหภูมิ film น้ำเข้า2	°C	29.4	29.7	29.6	27.6		29.1	
17	อุณหภูมิ film น้ำเข้า3	°C	32	33.8	32.8	33		32.9	
18	อุณหภูมิ film น้ำออก	°C	35.2	35.1	35.4	35.2		35.2	
19	อุณหภูมิคุณสมบัติน้ำ							37.30	$0.5*(T_s+0.5(T_{fi}+T_{out}))$
20	ฟลักซ์การถ่ายเทความร้อน(q")	W/m <sup>2</sup>						15165.69	

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางบันทึกผล วิทยานิพนธ์

เรื่อง การศึกษาเชิงทดลองของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อโดยใช้การระเหยสำหรับชุดความแน่นของโรงน้ำแข็ง

	ข้อมูล	หน่วย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่4	ครั้งที่5	เฉลี่ย	หมายเหตุ
1	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อทองแดง (d)	mm.	19						
2	อุณหภูมิ dry bulb	°C	31	31	32			31.3	
3	% RH	%	35	35	35			35.0	
4	อุณหภูมิ wet bulb	°C							
5	ระยะห่างท่อ (s/d)	mm.	3.5						
6	ความเร็วลม cross air (v)	m/s	1.45						
7	Film pattern		column						
8	อุณหภูมิผิวท่อ	°C	45.5	44.4	43.6	43.1		44.19	
9	อัตราการไหลน้ำร้อน (V)	kg/sec						0.1353	
10	อุณหภูมิน้ำร้อนเข้า	°C						45.9	จาก data logger
11	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 1	°C						44.8	จาก data logger
12	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 2	°C						44.0	จาก data logger
13	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 3	°C						43.5	จาก data logger
14	อัตราการไหลฟิล์ม ( $\Gamma$ )	kg/m.sec						0.1580	
15	อุณหภูมิ film น้ำเข้า1	°C	24.9	25.6	25.3	25.2		25.3	
16	อุณหภูมิ film น้ำเข้า2	°C	27.1	28	27.9	27.4		27.6	
17	อุณหภูมิ film น้ำเข้า3	°C	29.5	29.8	30.1	30.4		30.0	
18	อุณหภูมิ film น้ำออก	°C	31.7	34.1	32.1	32.8		32.7	
19	อุณหภูมิคุณสมบัติน้ำ							36.58	0.5*(Ts+0.5(Tfi+Tout))
20	ฟลักซ์การถ่ายเทความร้อน(q")	W/m <sup>2</sup>						15165.69	

ตารางบันทึกผล วิทยานิพนธ์

เรื่อง การศึกษาเชิงทดลองของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อโดยใช้การระเหยสำหรับชุดควบคุมแรงดันของโรงน้ำแข็ง

	ข้อมูล	หน่วย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่4	ครั้งที่5	เฉลี่ย	หมายเหตุ
1	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อทองแดง (d)	mm.	19						
2	อุณหภูมิ dry bulb	°C	30	30	32			30.7	
3	% RH	%	35	35	35			35.0	
4	อุณหภูมิ wet bulb	°C							
5	ระยะห่างท่อ (s/d)	mm.	3.5						
6	ความเร็วลม cross air (v)	m/s	0.96						
7	Film pattern		liquid sheet						
8	อุณหภูมิผิวท่อ	°C	44.4	42.8	41.9	41.1		42.59	
9	อัตราการไหลน้ำร้อน (V)	kg/sec						0.1353	
10	อุณหภูมิน้ำร้อนเข้า	°C						44.8	จาก data logger
11	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 1	°C						43.2	จาก data logger
12	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 2	°C						42.3	จาก data logger
13	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 3	°C						41.5	จาก data logger
14	อัตราการไหลฟิล์ม ( $\Gamma$ )	kg/m.sec						0.3613	
15	อุณหภูมิ film น้ำเข้า1	°C	26.8	26.6	26.7	26.9		26.8	
16	อุณหภูมิ film น้ำเข้า2	°C	27.5	27.4	27.8	27		27.4	
17	อุณหภูมิ film น้ำเข้า3	°C	29.5	29.4	30.1	29.7		29.7	
18	อุณหภูมิ film น้ำออก	°C	30.2	30.4	30	30.5		30.3	
19	อุณหภูมิคุณสมบัติน้ำ							35.55	$0.5*(T_s+0.5(T_{fi}+T_{out}))$
20	ฟลักซ์การถ่ายเทความร้อน(q")	W/m <sup>2</sup>						20852.83	

ตารางบันทึกผล วิทยานิพนธ์

เรื่อง การศึกษาเชิงทดลองของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อโดยใช้การระเหยสำหรับชุดความแน่นของโรงน้ำแข็ง

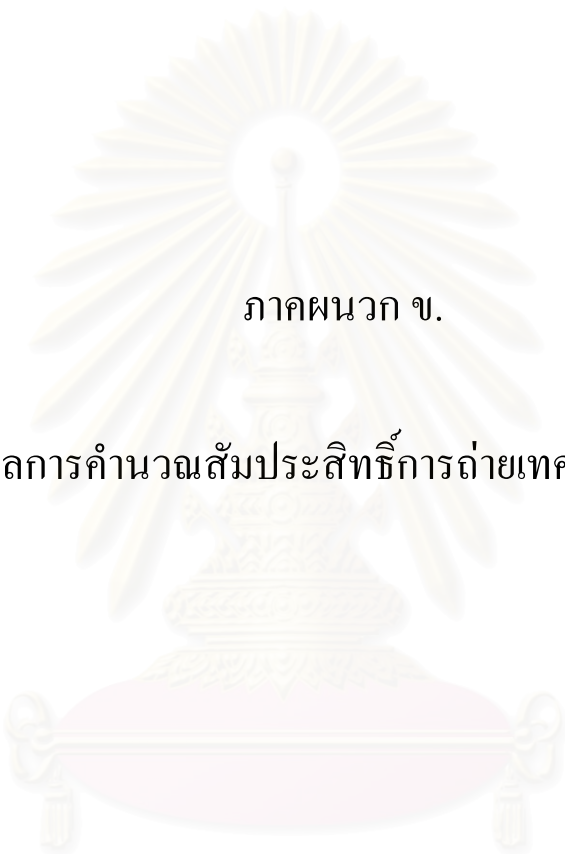
	ข้อมูล	หน่วย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่4	ครั้งที่5	เฉลี่ย	หมายเหตุ
1	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อทองแดง (d)	mm.	19						
2	อุณหภูมิ dry bulb	°C	30	31	29			30.0	
3	% RH	%	55	53	54			54.0	
4	อุณหภูมิ wet bulb	°C							
5	ระยะห่างท่อ (s/d)	mm.	3.5						
6	ความเร็วลม cross air (v)	m/s	1.2						
7	Film pattern		liquid sheet						
8	อุณหภูมิผิวท่อ	°C	43.6	42.3	41.3	40.5		41.97	
9	อัตราการไหลน้ำร้อน ( V )	kg/sec						0.1353	
10	อุณหภูมิน้ำร้อนเข้า	°C						44.0	จาก data logger
11	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 1	°C						42.7	จาก data logger
12	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 2	°C						41.7	จาก data logger
13	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 3	°C						40.9	จาก data logger
14	อัตราการไหลฟิล์ม ( $\Gamma$ )	kg/m.sec						0.3620	
15	อุณหภูมิ film น้ำเข้า1	°C	25	25	25.1	25.2		25.1	
16	อุณหภูมิ film น้ำเข้า2	°C	27.4	27.8	27.6	28		27.7	
17	อุณหภูมิ film น้ำเข้า3	°C	28.7	29	28.8	29.1		28.9	
18	อุณหภูมิ film น้ำออก	°C	32.1	32.4	32.8	32.4		32.4	
19	อุณหภูมิคุณสมบัติน้ำ							35.36	0.5*(Ts+0.5(Tfi+Tout))
20	ฟลักซ์การถ่ายเทความร้อน(q")	W/m <sup>2</sup>						19589.02	

ตารางบันทึกผล วิทยานิพนธ์

เรื่อง การศึกษาเชิงทดลองของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อโดยใช้การระเหยสำหรับชุดความแน่นของโรงน้ำแข็ง

	ข้อมูล	หน่วย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่4	ครั้งที่5	เฉลี่ย	หมายเหตุ
1	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อทองแดง (d)	mm.	19						
2	อุณหภูมิ dry bulb	°C	30	31	29			30.0	
3	% RH	%	55	53	54			54.0	
4	อุณหภูมิ wet bulb	°C							
5	ระยะห่างท่อ (s/d)	mm.	3.5						
6	ความเร็วลม cross air (v)	m/s	1.45						
7	Film pattern		liquid sheet						
8	อุณหภูมิผิวท่อ	°C	42.7	41.6	40.8	40.1		41.34	
9	อัตราการไหลน้ำร้อน (V)	kg/sec						0.1353	
10	อุณหภูมิน้ำร้อนเข้า	°C						43.1	จาก data logger
11	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 1	°C						42.0	จาก data logger
12	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 2	°C						41.2	จาก data logger
13	อุณหภูมิน้ำร้อนออก 3	°C						40.5	จาก data logger
14	อัตราการไหลฟิล์ม ( $\Gamma$ )	kg/m.sec						0.3607	
15	อุณหภูมิ film น้ำเข้า1	°C	25	25.4	25.2	25.5		25.3	
16	อุณหภูมิ film น้ำเข้า2	°C	27.8	27.1	27.6	27.8		27.6	
17	อุณหภูมิ film น้ำเข้า3	°C	29	29.3	29.4	29.2		29.2	
18	อุณหภูมิ film น้ำออก	°C	31.4	31.2	31.4	31.3		31.3	
19	อุณหภูมิคุณสมบัติน้ำ							34.82	0.5*(Ts+0.5(Tfi+Tout))
20	ฟลักซ์การถ่ายเทความร้อน(q")	W/m <sup>2</sup>						16429.50	





ภาคผนวก ข.

ผลการคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางแสดงผลการคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของฟิล์มน้ำบนท่อเรียบแนวนอนโดยใช้การระเหย

droplet s/d 1.4 12.8 mm.

ค่าคงที่และคุณสมบัติของน้ำ	สัญลักษณ์	หน่วย	v1	v2	v3
อุณหภูมิผิวท่อ	$T_s$	$^{\circ}\text{C}$	47.5	47.3	47.7
อุณหภูมิฟิล์มน้ำเข้า	$T_{fi}$	$^{\circ}\text{C}$	21.4	22.7	22.1
อุณหภูมิฟิล์มน้ำออก	$T_{fo}$	$^{\circ}\text{C}$	41.4	38.3	40.6
อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำ	$T_b$	$^{\circ}\text{C}$	39.5	38.9	39.5
แรงตึงผิวของน้ำ	$\sigma$	N/m	0.07020	0.07030	0.07018
ความหนาแน่นฟิล์มน้ำ	$\rho$	$\text{kg/m}^3$	994.752	994.922	994.729
แรงโน้มถ่วงโลก	$g$	$\text{m/s}^2$	9.81	9.81	9.81
ความหนืดไดนามิกส์ film	$\mu$	$\text{N.s/m}^2$	6.655E-04	6.755E-04	6.642E-04
ความหนืดคิเนมาติกส์ film	$\nu$	$\text{m}^2/\text{s}$	6.675E-07	6.775E-07	6.662E-07
Thermal conductivity ของน้ำ	$k_L$	W/m.K	0.6272	0.6263	0.6273
เอนทัลปีที่อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำ	$h_{fg} @ T_b$	(J/kg)	165261.9	162858.4	165575.4
พรมแดนเทิลมันเบอร์	$Pr_L$	-	4.4130	4.4901	4.4030
ระยะห่างระหว่างท่อ	$s$	m	0.0179	0.0179	0.0179
เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ	$d$	m	0.0128	0.0128	0.0128
heat flux	$q^*$	( $\text{W/m}^2$ )	27088.6	23992.7	24766.7
อัตราการไหลฟิล์ม	$\Gamma$	kg/m.s	0.0712	0.0723	0.0704

ตัวแปร	การคำนวณ				
$Re_L$	$\Gamma/\mu$	-	106.9856	107.0249	105.9919
Ka	$\sigma^3 \cdot \rho / g \cdot \mu^4$	-	1.7879E+11	1.6916E+11	1.8010E+11
A	$Re_L / Ka^{0.25}$	-	0.1645	0.1669	0.1627
n	$Ka^{0.092} / 3(1 + Ka^{0.092})$	-	0.3052	0.3051	0.3052
m	$0.16 [Re_L \cdot Ka^{0.025} - 5.25] / (Re_L \cdot Ka^{0.025} + 1)$	-	0.1551	0.1551	0.1551
F	$0.0135[1 - 0.05 \exp\{-0.46 \cdot Ka^{0.26} / Re_L^{12}\}]$	-	0.0135	0.0135	0.0135
Ga	$(\pi \eta)^3 \cdot g \cdot \nu^2$	-	1.7897E+08	1.7372E+08	1.7967E+08
Nui 1	$0.5 Re_L Pr_L Ga^{-1/3}$	-	0.4189	0.4306	0.4135
Nui 2	$F \cdot Re_L^{0.2} \cdot Pr_L^{0.3} \cdot (1 + [0.5(q^* \cdot \nu^2 / g) / Re_L \cdot h_{fg} \cdot \mu]^{0.75})$		0.1937	0.1958	0.1928
Nui	$Nui1 \cdot [1 + (Nui1/Nui2)^{1/4}]^{-1/4} \cdot (s/d)^m$	-	0.2018	0.2041	0.2008
$h_f$	$Nui \cdot k_L \cdot (g/\nu^2)^{1/3}$	W/m <sup>2</sup> . K	3547.28	3546.94	3534.75
$h_{act}$	$q^* / (T_s - T_{fi})$	W/m <sup>2</sup> . K	4905.37	4138.31	4662.33
$\Delta h$	$ h_{act} - h_f  \cdot 100 / h_f$	%	38.29	16.67	31.90

ตารางแสดงผลการคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของฟิล์มน้ำมันที่เรียบแนวนอนโดยใช้การระเหย

column s/d 1.4 12.8 mm.

ค่าคงที่และคุณสมบัติของน้ำ	สัญลักษณ์	หน่วย	v1	v2	v3
อุณหภูมิผิวท่อ	$T_s$	$^{\circ}\text{C}$	45.6	46.2	46.9
อุณหภูมิฟิล์มน้ำเข้า	$T_{fi}$	$^{\circ}\text{C}$	22.6	22.9	22.5
อุณหภูมิฟิล์มน้ำออก	$T_{fo}$	$^{\circ}\text{C}$	32.4	30.8	31.1
อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำ	$T_b$	$^{\circ}\text{C}$	36.5	36.5	36.9
แรงตึงผิวของน้ำ	$\sigma$	N/m	0.07071	0.07071	0.07065
ความหนาแน่นฟิล์มน้ำ	$\rho$	$\text{kg/m}^3$	995.616	995.619	995.522
แรงโน้มถ่วงโลก	$g$	$\text{m/s}^2$	9.81	9.81	9.81
ความหนืดไดนามิกส์ film	$\mu$	N.s/m <sup>2</sup>	7.164E-04	7.166E-04	7.109E-04
ความหนืดคิเนมาติกส์ film	$\nu$	$\text{m}^2/\text{s}$	7.182E-07	7.184E-07	7.127E-07
Thermal conductivity ของน้ำ	$k_L$	W/m.K	0.6226	0.6226	0.6231
เอนทาลปีที่อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำ	$h_{fg} @ T_b$	(J/kg)	153077.2	153035.4	154393.9
พารามิเตอร์เทิลนัมเบอร์	$Pr_L$	-	4.8036	4.8050	4.7614
ระยะห่างระหว่างท่อ	$s$	m	0.0179	0.0179	0.0179
เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ	$d$	m	0.0128	0.0128	0.0128
heat flux	$q''$	(W/m <sup>2</sup> )	41019.8	35602.1	33280.2
อัตราการไหลฟิล์ม	$\Gamma$	kg/m.s	0.1824	0.1806	0.1887

ตัวแปร	การคำนวณ				
$Re_L$	$\Gamma/\mu$	-	254.6145	252.0405	265.4456
$Ka$	$\sigma^3 \cdot \rho / g \cdot \mu^4$	-	1.3621E+11	1.3609E+11	1.4013E+11
$A$	$Re_L / Ka^{0.25}$	-	0.4191	0.4150	0.4339
$n$	$Ka^{0.092} / 3(1 + Ka^{0.092})$	-	0.3045	0.3045	0.3046
$m$	$0.16 [Re_L \cdot Ka^{0.025} - 5.25] / (Re_L \cdot Ka^{0.025} + 1)$	-	0.1579	0.1579	0.1580
$F$	$0.0135 \{1 - 0.05 \exp \{-[0.46 \cdot Ka^{0.25} / Re_L]^{12}\}$	-	0.0135	0.0135	0.0134
$Ga$	$(\pi r)^3 \cdot g / \nu^2$	-	1.5458E+08	1.5451E+08	1.5697E+08
$Nui_1$	$0.5 Re_L Pr_L Ga^{-1/3}$	-	1.1395	1.1284	1.1715
$Nui_2$	$F \cdot Re_L^n \cdot Pr_L^{2/3} \cdot \{1 + [0.5(q'' \cdot \nu^2 / g) / Re_L \cdot h_{fg} \cdot \mu]^{0.075}\}$		0.2626	0.2619	0.2629
$Nui$	$Nui_1 \cdot [1 + (Nui_1 / Nui_2)^4]^{-1/4} \cdot (s/d)^m$	-	0.2767	0.2759	0.2770
$h_i$	$Nui \cdot k_L \cdot (g / \nu^2)^{1/3}$	W/m <sup>2</sup> . K	4598.83	4585.24	4631.22
$h_{act}$	$q'' / (T_s - T_{fi})$	W/m <sup>2</sup> . K	5867.51	5338.84	4945.43
$\Delta h$	$i h_{act} - h_i \cdot i \cdot 100 / h_i$	%	27.59	16.44	6.78

ตารางแสดงผลการคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของฟิล์มน้ำบนท่อเรียบแนวนอนโดยใช้การระเหย

liquid sheet s/d 1.4 12.8 mm.

ค่าคงที่และคุณสมบัติของน้ำ	สัญลักษณ์	หน่วย	v1	v2	v3
อุณหภูมิผิวท่อ	$T_s$	$^{\circ}\text{C}$	46.6	46.9	46.0
อุณหภูมิฟิล์มน้ำเข้า	$T_{fi}$	$^{\circ}\text{C}$	23.7	22.4	22.8
อุณหภูมิฟิล์มน้ำออก	$T_{fo}$	$^{\circ}\text{C}$	32.8	31.2	30.6
อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำ	$T_b$	$^{\circ}\text{C}$	37.4	36.8	36.4
แรงตึงผิวของน้ำ	$\sigma$	N/m	0.07055	0.07065	0.07074
ความหนาแน่นฟิล์มน้ำ	$\rho$	$\text{kg/m}^3$	995.356	995.530	995.668
แรงโน้มถ่วงโลก	$g$	$\text{m/s}^2$	9.81	9.81	9.81
ความหนืดไดนามิกส์ film	$\mu$	$\text{N.s/m}^2$	7.011E-04	7.113E-04	7.194E-04
ความหนืดคินแมติกส์ film	$\nu$	$\text{m}^2/\text{s}$	7.030E-07	7.132E-07	7.212E-07
Thermal conductivity ของน้ำ	$k_L$	W/m.K	0.6240	0.6231	0.6224
เอนทาลปีที่อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำ	$h_{fg} @ T_b$	(J/kg)	156734.7	154289.4	152345.7
พารามิเตอร์เพิลนิมเบอร์	$Pr_L$	-	4.6864	4.7648	4.8271
ระยะห่างระหว่างท่อ	$s$	m	0.0179	0.0179	0.0179
เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ	$d$	m	0.0128	0.0128	0.0128
heat flux	$q''$	$(\text{W/m}^2)$	41793.8	48759.4	50307.3
อัตราการไหลฟิล์ม	$\Gamma$	kg/m.s	0.3661	0.3684	0.3659

ตัวแปร	การคำนวณ				
$Re_L$	$\Gamma/\mu$	-	522.1733	517.9129	508.5966
$Ka$	$\sigma^3 \cdot \rho / g \cdot \mu^4$	-	1.4747E+11	1.3982E+11	1.3410E+11
$A$	$Re_L / Ka^{0.25}$	-	0.8426	0.8470	0.8405
$n$	$Ka^{0.092} / 3(1 + Ka^{0.092})$	-	0.3047	0.3046	0.3045
$m$	$0.16 [Re_L \cdot Ka^{0.025} - 5.25] / (Re_L \cdot Ka^{0.025} + 1)$	-	0.1590	0.1590	0.1590
$F$	$0.0135(1 - 0.05 \exp\{-0.46 \cdot Ka^{0.25} / Re_L^{12}\})$	-	0.0128	0.0128	0.0128
$Ga$	$(\pi \cdot g^3 \cdot \rho^2)$	-	1.6135E+08	1.5678E+08	1.5328E+08
$Nui_1$	$0.5 Re_L Pr_L Ga^{-1/3}$	-	2.2475	2.2883	2.2937
$Nui_2$	$F \cdot Re_L^m \cdot Pr_L^{0.29} \cdot (1 + [0.5(q'' \cdot \nu^2 / g) / Re_L \cdot h_{fg} \cdot \mu]^{0.075})$		0.3031	0.3058	0.3067
$Nui$	$Nui1 \cdot [1 + (Nui1/Nui2)^4]^{-0.14} \cdot (s/d)^m$	-	0.3196	0.3225	0.3235
$h_i$	$Nui \cdot k_L \cdot (g/\nu^2)^{1/3}$	W/m <sup>2</sup> . K	5400.64	5388.71	5358.57
$h_{act}$	$q'' / (T_s - T_{fi})$	W/m <sup>2</sup> . K	6552.57	7225.96	7303.12
$\Delta h$	$ h_{act} - h_i  \cdot 100 / h_i$	%	21.33	34.09	36.29

ตารางแสดงผลการคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของฟิล์มน้ำบนท่อเรียบแนวนอนโดยใช้การระเหย

droplet s/d 2.5 12.8 mm.

ค่าคงที่และคุณสมบัติของน้ำ	สัญลักษณ์	หน่วย	v1	v2	v3
อุณหภูมิผิวท่อ	$T_s$	$^{\circ}\text{C}$	47.5	47.8	47.1
อุณหภูมิฟิล์มน้ำเข้า	$T_{fi}$	$^{\circ}\text{C}$	22.1	21.9	21.5
อุณหภูมิฟิล์มน้ำออก	$T_{fo}$	$^{\circ}\text{C}$	36.6	35.5	40.9
อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำ	$T_b$	$^{\circ}\text{C}$	38.4	38.3	39.2
แรงตึงผิวของน้ำ	$\sigma$	N/m	0.07038	0.07040	0.07025
ความหนาแน่นฟิล์มน้ำ	$\rho$	$\text{kg/m}^3$	995.060	995.104	994.838
แรงโน้มถ่วงโลก	$g$	$\text{m/s}^2$	9.81	9.81	9.81
ความหนืดไดนามิกส์ film	$\mu$	$\text{N.s/m}^2$	6.837E-04	6.863E-04	6.706E-04
ความหนืดคิเนมาติกส์ film	$\nu$	$\text{m}^2/\text{s}$	6.856E-07	6.882E-07	6.725E-07
Thermal conductivity ของน้ำ	$k_L$	W/m.K	0.6255	0.6253	0.6267
เอนทาลปีที่อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำ	$h_{fg} @ T_b$	(J/kg)	160914.7	160287.7	164049.7
พรมแดนเทิลันด์เบอร์	$Pr_L$	-	4.5524	4.5725	4.4519
ระยะห่างระหว่างท่อ	$s$	m	0.0320	0.0320	0.0320
เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ	$d$	m	0.0128	0.0128	0.0128
heat flux	$q''$	( $\text{W/m}^2$ )	27088.6	22444.8	27088.6
อัตราการไหลฟิล์ม	$\Gamma$	kg/m.s	0.0683	0.0690	0.0688

ตัวแปร	การคำนวณ				
$Re_L$	$\Gamma/\mu$	-	99.9037	100.5427	102.5992
$Ka$	$\sigma^3 \cdot \rho / g \cdot \mu^4$	-	1.6185E+11	1.5958E+11	1.7385E+11
$A$	$Re_L / Ka^{0.25}$	-	0.1575	0.1591	0.1589
$n$	$Ka^{0.092} / 3(1 + Ka^{0.092})$	-	0.3050	0.3049	0.3051
$m$	$0.16 [Re_L \cdot Ka^{0.025} - 5.25] / (Re_L \cdot Ka^{0.025} + 1)$	-	0.1548	0.1548	0.1549
$F$	$0.0135 \{1 - 0.05 \exp \{-0.46 \cdot Ka^{0.25} / Re_L\}^2\}$	-	0.0135	0.0135	0.0135
$Ga$	$(\pi r)^3 \cdot g / \nu^2$	-	1.6965E+08	1.6836E+08	1.7629E+08
$Nui_1$	$0.5 Re_L Pr_L Ga^{-1/3}$	-	0.4108	0.4163	0.4073
$Nui_2$	$F \cdot Re_L^n \cdot Pr_L^{2/3} \cdot \{1 + [0.5(q'' \cdot \nu^2 / g)^{1/3} / Re_L \cdot h_{fg} \cdot \mu]^{0.075}\}$		0.1938	0.1945	0.1925
$Nui$	$Nui_1 \cdot [1 + (Nui_1 / Nui_2)^4]^{-1/4} \cdot (s/d)^m$	-	0.2206	0.2215	0.2192
$h_i$	$Nui \cdot k_L \cdot (g / \nu^2)^{1/3}$	$\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$	3799.35	3803.91	3830.20
$h_{act}$	$q'' / (T_s - T_{fi})$	$\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$	3931.5	3283.81	4484.63
$\Delta h$	$ h_{act} - h_i  \cdot 100 / h_i$	%	3.48	13.67	17.09

ตารางแสดงผลการคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของฟิล์มน้ำบนท่อเรียบแนวนอนโดยใช้การแทน

column s/d 2.5 12.8 mm.

ค่าคงที่และคุณสมบัติของน้ำ	สัญลักษณ์	หน่วย	v1	v2	v3
อุณหภูมิผิวท่อ	$T_s$	$^{\circ}\text{C}$	46.5	47.9	46.8
อุณหภูมิฟิล์มน้ำเข้า	$T_{fi}$	$^{\circ}\text{C}$	23.2	22.7	23.2
อุณหภูมิฟิล์มน้ำออก	$T_{fo}$	$^{\circ}\text{C}$	31.3	32.3	30.8
อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำ	$T_b$	$^{\circ}\text{C}$	36.9	37.7	36.9
แรงตึงผิวของน้ำ	$\sigma$	N/m	0.07065	0.07050	0.07064
ความหนาแน่นฟิล์มน้ำ	$\rho$	$\text{kg/m}^3$	995.522	995.275	995.508
แรงโน้มถ่วงโลก	$g$	$\text{m/s}^2$	9.81	9.81	9.81
ความหนืดไดนามิกส์ film	$\mu$	$\text{N.s/m}^2$	7.109E-04	6.963E-04	7.100E-04
ความหนืดคิเนมาติกส์ film	$\nu$	$\text{m}^2/\text{s}$	7.127E-07	6.982E-07	7.119E-07
Thermal conductivity ของน้ำ	$k_L$	W/m.K	0.6231	0.6244	0.6232
เอนทาลปีที่อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำ	$h_{fg} @ T_b$	(J/kg)	154393.9	157884.2	154602.9
พรมต์เทิลนัมเบอร์	$Pr_L$	-	4.7614	4.6495	4.7547
ระยะห่างระหว่างท่อ	$s$	m	0.0320	0.0320	0.0320
เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ	$d$	m	0.0128	0.0128	0.0128
heat flux	$q''$	( $\text{W/m}^2$ )	34828.1	34054.2	35602.1
อัตราการไหลฟิล์ม	$\Gamma$	kg/m.s	0.1260	0.1271	0.1263

ตัวแปร	การคำนวณ				
$Re_L$	$\Gamma/\mu$	-	177.2450	182.5338	177.8854
$Ka$	$\sigma^3 \cdot \rho / g \cdot \mu^4$	-	1.4013E+11	1.5126E+11	1.4077E+11
$A$	$Re_L / Ka^{0.25}$	-	0.2897	0.2927	0.2904
$n$	$Ka^{0.092} / 3(1 + Ka^{0.092})$	-	0.3046	0.3048	0.3046
$m$	$0.16 (Re_L \cdot Ka^{0.025} - 5.25) / (Re_L \cdot Ka^{0.025} + 1)$	-	0.1570	0.1571	0.1570
$F$	$0.0135 [1 - 0.05 \exp \{- (0.46 \cdot Ka^{0.25} / Re_L)^{1/2} \}]$	-	0.0135	0.0135	0.0135
$Ga$	$(\pi \cdot d^3 \cdot g \cdot \rho^2)$	-	1.5697E+08	1.6357E+08	1.5735E+08
$Nui_1$	$0.5 Re_L Pr_L Ga^{-1/3}$	-	0.7822	0.7759	0.7833
$Nui_2$	$F \cdot Re_L^n \cdot Pr_L^{0.3} \cdot \{1 + [0.5(q'' \cdot \nu^2 / g) / Re_L \cdot h_{fg} \cdot \mu]^{0.075}\}$	-	0.2356	0.2340	0.2356
$Nui$	$Nui_1 \cdot [1 + (Nui_1 / Nui_2)^4]^{1/4} \cdot (s/d)^m$	-	0.2715	0.2697	0.2716
$h_i$	$Nui \cdot k_L \cdot (g/U)^{1/3}$	$\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$	4538.59	4580.06	4544.12
$h_{act}$	$q'' / (T_s - T_{fi})$	$\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$	5971.24	4604.86	4794.21
$\Delta h$	$ h_{act} - h_i  \cdot 100 / h_i$	%	31.57	0.54	5.50

ตารางแสดงผลการคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของฟิล์มน้ำที่เย็นบนท่อเรียบแนวนอนโดยใช้การระเหย

liquid sheet s/d 2.5 12.8 mm.

ค่าคงที่และคุณสมบัติของน้ำ	สัญลักษณ์	หน่วย	v1	v2	v3
อุณหภูมิผิวท่อ	$T_s$	$^{\circ}\text{C}$	46.5	46.2	46.1
อุณหภูมิฟิล์มน้ำเข้า	$T_{fi}$	$^{\circ}\text{C}$	24.9	23.9	25.5
อุณหภูมิฟิล์มน้ำออก	$T_{fo}$	$^{\circ}\text{C}$	30	30.2	29.6
อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำ	$T_b$	$^{\circ}\text{C}$	37.0	36.6	36.8
แรงตึงผิวของน้ำ	$\sigma$	N/m	0.07063	0.07069	0.07065
ความหนาแน่นฟิล์มน้ำ	$\rho$	$\text{kg/m}^3$	995.490	995.597	995.527
แรงโน้มถ่วงโลก	$g$	$\text{m/s}^2$	9.81	9.81	9.81
ความหนืดไดนามิกส์ film	$\mu$	$\text{N.s/m}^2$	7.090E-04	7.152E-04	7.111E-04
ความหนืดคิเนมาติกส์ film	$\nu$	$\text{m}^2/\text{s}$	7.108E-07	7.171E-07	7.130E-07
Thermal conductivity ของน้ำ	$k_L$	W/m.K	0.6233	0.6227	0.6231
เอนทาลปีที่อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำ	$h_{fg} @ T_b$	(J/kg)	154853.7	153348.9	154331.2
พรมแดนเทิลนัมเบอร์	$Pr_L$	-	4.7467	4.7949	4.7634
ระยะห่างระหว่างท่อ	$s$	m	0.0320	0.0320	0.0320
เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ	$d$	m	0.0128	0.0128	0.0128
heat flux	$q''$	$(\text{W/m}^2)$	44115.6	44889.6	44115.6
อัตราการไหลฟิล์ม	$\Gamma$	$\text{kg/m.s}$	0.2823	0.3069	0.2931

ตัวแปร	การคำนวณ				
$Re_L$	$\Gamma/\mu$	-	398.1885	429.0851	412.1540
$Ka$	$\sigma^3 \cdot \rho / g \cdot \mu^4$	-	1.4154E+11	1.3701E+11	1.3994E+11
$A$	$Re_L / Ka^{0.25}$	-	0.6492	0.7053	0.6739
$n$	$Ka^{0.092} / 3(1 + Ka^{0.092})$	-	0.3046	0.3046	0.3046
$m$	$0.16 [Re_L \cdot Ka^{0.025} - 5.25] / (Re_L \cdot Ka^{0.025} + 1)$	-	0.1587	0.1588	0.1587
$F$	$0.0135 [1 - 0.05 \exp \{- (0.46 \cdot Ka^{0.25} / Re_L)^{12}\}]$	-	0.0128	0.0128	0.0128
$Ga$	$(\pi \cdot r)^3 \cdot g / \nu^2$	-	1.5782E+08	1.5507E+08	1.5686E+08
$Nui_1$	$0.5 Re_L Pr_L Ga^{-1/3}$	-	1.7488	1.9148	1.8202
$Nui_2$	$F \cdot Re_L^n \cdot Pr_L^{0.25} \cdot [1 + (0.5(q'' \cdot \nu^2 / g) / Re_L \cdot h_{fg} \cdot \mu)^{0.075}]$		0.2828	0.2907	0.2862
$Nui$	$Nui_1 \cdot [1 + (Nui_1 / Nui_2)^4]^{-0.14} \cdot (s/d)^n$	-	0.3270	0.3361	0.3309
$h_i$	$Nui \cdot k_L \cdot (g / \nu^2)^{-1/3}$	$\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$	5477.65	5593.50	5530.50
$h_{act}$	$q'' / (T_s - T_{fi})$	$\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$	5928.71	5699.71	6125.22
$\Delta h$	$ h_{act} - h_i  / 100 / h_i$	%	8.23	1.90	10.75

ตารางแสดงผลการคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของฟิล์มที่ด้านบนท่อเรียบแนวนอนโดยใช้การระเหย

droplet s/d 3.5 12.8 mm.

ค่าคงที่และคุณสมบัติของน้ำ	สัญลักษณ์	หน่วย	v1	v2	v3
อุณหภูมิผิวท่อ	$T_s$	$^{\circ}\text{C}$	47.7	47.4	47.1
อุณหภูมิฟิล์มน้ำเข้า	$T_{fi}$	$^{\circ}\text{C}$	26	25.6	25.6
อุณหภูมิฟิล์มน้ำออก	$T_{fo}$	$^{\circ}\text{C}$	40.4	42.4	41.8
อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำ	$T_b$	$^{\circ}\text{C}$	40.5	40.7	40.4
แรงตึงผิวของน้ำ	$\sigma$	N/m	0.07002	0.06998	0.07003
ความหนาแน่นฟิล์มน้ำ	$\rho$	$\text{kg}/\text{m}^3$	994.452	994.381	994.477
แรงโน้มถ่วงโลก	$g$	$\text{m}/\text{s}^2$	9.81	9.81	9.81
ความหนืดไดนามิกส์ film	$\mu$	$\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$	6.479E-04	6.437E-04	6.494E-04
ความหนืดคินเนมาติกส์ film	$\nu$	$\text{m}^2/\text{s}$	6.499E-07	6.457E-07	6.514E-07
Thermal conductivity ของน้ำ	$k_L$	W/m.K	0.6287	0.6291	0.6286
เอนทาลปีที่อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำ	$h_{fg} @ T_b$	(J/kg)	169483.7	170486.9	169128.4
พรมนต์เทิลนัมเบอร์	$Pr_L$	-	4.2777	4.2455	4.2891
ระยะห่างระหว่างท่อ	$s$	m	0.0448	0.0448	0.0448
เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ	$d$	m	0.0128	0.0128	0.0128
heat flux	$q''$	$(\text{W}/\text{m}^2)$	16253.1	18575.0	12383.3
อัตราการไหลฟิล์ม	$\Gamma$	$\text{kg}/\text{m}\cdot\text{s}$	0.0448	0.0482	0.0454

ตัวแปร	การคำนวณ				
$Re_L$	$\Gamma/\mu$	-	69.1480	74.8799	69.9140
$Ka$	$\sigma^3 \cdot \rho / g \cdot \mu^4$	-	1.9750E+11	2.0231E+11	1.9583E+11
$A$	$Re_L / Ka^{0.25}$	-	0.1037	0.1117	0.1051
$n$	$Ka^{0.092} / 3(1 + Ka^{0.092})$	-	0.3054	0.3055	0.3054
$m$	$0.16 [Re_L \cdot Ka^{0.025} - 5.25] / (Re_L \cdot Ka^{0.025} + 1)$	-	0.1525	0.1531	0.1526
$F$	$0.0135[1 - 0.05 \exp\{-[0.46 \cdot Ka^{0.25} / Re_L]^{12}\}]$	-	0.0135	0.0135	0.0135
$Ga$	$(\pi \cdot r)^3 \cdot g / \nu^2$	-	1.8878E+08	1.9123E+08	1.8792E+08
$Nui_1$	$0.5 Re_L Pr_L Ga^{-1/3}$	-	0.2578	0.2759	0.2618
$Nui_2$	$F \cdot Re_L^n \cdot Pr_L^{2/3} \cdot [1 + (0.5(q'' \cdot \nu^2 / g) / Re_L \cdot h_{fg} \cdot \mu)^{0.075}]$		0.1669	0.1701	0.1675
$Nui$	$Nui_1 \cdot [1 + (Nui_1 / Nui_2)^4]^{-1/4} \cdot (s/d)^m$	-	0.1941	0.1992	0.1951
$h_i$	$Nui \cdot k_L \cdot (g / \nu^2)^{1/3}$	$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$	3481.18	3591.59	3493.34
$h_{act}$	$q'' / (T_s - T_{fi})$	$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$	2714.02	3567.88	2665.84
$\Delta h$	$ h_{act} - h_i  \cdot 100 / h_i$	%	22.04	0.66	23.69



ตารางแสดงผลการคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของฟิล์มน้ำมันที่เรียบแนวนอนโดยใช้การระเหย

column s/d 3.5 12.8 mm.

ค่าคงที่และคุณสมบัติของน้ำ	สัญลักษณ์	หน่วย	v1	v2	v3
อุณหภูมิผิวท่อ	$T_s$	$^{\circ}\text{C}$	46.4	46.5	46.9
อุณหภูมิฟิล์มน้ำเข้า	$T_{fi}$	$^{\circ}\text{C}$	25.4	26.5	26.3
อุณหภูมิฟิล์มน้ำออก	$T_{fo}$	$^{\circ}\text{C}$	36.6	36.1	34.9
อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำ	$T_b$	$^{\circ}\text{C}$	38.7	38.9	38.7
แรงตึงผิวของน้ำ	$\sigma$	N/m	0.07032	0.07029	0.07032
ความหนาแน่นที่ฟิล์มน้ำ	$\rho$	$\text{kg/m}^3$	994.971	994.919	994.967
แรงโน้มถ่วงโลก	$g$	$\text{m/s}^2$	9.81	9.81	9.81
ความหนืดไดนามิกส์ film	$\mu$	$\text{N.s/m}^2$	6.784E-04	6.754E-04	6.782E-04
ความหนืดคินมาติกส์ film	$\nu$	$\text{m}^2/\text{s}$	6.804E-07	6.773E-07	6.801E-07
Thermal conductivity ของน้ำ	$k_L$	W/m.K	0.6260	0.6263	0.6260
เอนทาลปีที่อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำ	$h_{fg} @ T_b$	(J/kg)	162168.7	162900.2	162231.4
พรมณ์เคลย์มเบอร์	$Pr_L$	-	4.5122	4.4887	4.5102
ระยะห่างระหว่างท่อ	$s$	m	0.0448	0.0448	0.0448
เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ	$d$	m	0.0128	0.0128	0.0128
heat flux	$q''$	( $\text{W/m}^2$ )	18575.0	22444.8	20896.88
อัตราการไหลฟิล์ม	$\Gamma$	kg/m.s	0.1037	0.1120	0.1064

ตัวแปร	การคำนวณ				
$Re_L$	$\Gamma/\mu$	-	152.8544	165.8351	156.8948
$Ka$	$\sigma^3 \cdot \rho / g \cdot \mu^4$	-	1.6652E+11	1.6932E+11	1.6676E+11
$A$	$Re_L / Ka^{0.25}$	-	0.2393	0.2585	0.2455
$n$	$Ka^{0.092} / 3(1 + Ka^{0.092})$	-	0.3050	0.3051	0.3050
$m$	$0.16 (Re_L \cdot Ka^{0.025} - 5.25) / (Re_L \cdot Ka^{0.025} + 1)$	-	0.1566	0.1569	0.1567
$F$	$0.0135(1 - 0.05 \exp(-[0.46 \cdot Ka^{0.25} / Re_L]^{1.2}))$	-	0.0135	0.0135	0.0135
$Ga$	$(\pi d^3 \cdot g / \nu^2)$	-	1.7226E+08	1.7381E+08	1.7239E+08
$Nui_1$	$0.5 Re_L Pr_L Ga^{-1/3}$	-	0.6198	0.6669	0.6357
$Nui_2$	$F \cdot Re_L^n \cdot Pr_L^{0.25} \cdot (1 + [0.5(q'' \cdot U^2 / g) / Re_L \cdot h_{fg} \cdot \mu]^{0.075})$	-	0.2174	0.2221	0.2191
$Nui$	$Nui_1 \cdot [1 + (Nui_1 / Nui_2)^{1/4}]^{-1/4} \cdot (s/d)^m$	-	0.2635	0.2694	0.2657
$h_i$	$Nui \cdot k_L \cdot (g / U^2)^{1/3}$	W/m <sup>2</sup> . K	4564.88	4683.76	4604.03
$h_{act}$	$q'' / (T_s - T_{fi})$	W/m <sup>2</sup> . K	3368.91	4081.24	3806.75
$\Delta h$	$ h_{act} - h_i  * 100 / h_i$	%	26.20	12.86	17.32

ตารางแสดงผลการคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของฟิล์มที่คำนวณโดยเขียนโปรแกรมโดยใช้การวนซ้ำ

liquid sheet s/d 3.5 12.8 mm.

ค่าคงที่และคุณสมบัติของน้ำ	สัญลักษณ์	หน่วย	v1	v2	v3
อุณหภูมิผิวท่อ	$T_s$	$^{\circ}\text{C}$	45.6	45.1	45.3
อุณหภูมิฟิล์มน้ำเข้า	$T_{fi}$	$^{\circ}\text{C}$	26.4	26.5	26.6
อุณหภูมิฟิล์มน้ำออก	$T_{fo}$	$^{\circ}\text{C}$	31.2	31.6	32.4
อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำ	$T_b$	$^{\circ}\text{C}$	37.2	37.1	37.4
แรงตึงผิวของน้ำ	$\sigma$	N/m	0.07059	0.07061	0.07055
ความหนาแน่นฟิล์มน้ำ	$\rho$	$\text{kg/m}^3$	995.423	995.460	995.359
แรงโน้มถ่วงโลก	$g$	$\text{m/s}^2$	10.81	11.81	12.81
ความหนืดไดนามิกส์ film	$\mu$	$\text{N.s/m}^2$	7.050E-04	7.072E-04	7.013E-04
ความหนืดคินแมติกส์ film	$\nu$	$\text{m}^2/\text{s}$	7.069E-07	7.091E-07	7.032E-07
Thermal conductivity ของน้ำ	$k_L$	W/m.K	0.6236	0.6235	0.6240
เอนทาลปีที่อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำ	$h_{fg} @ T_b$	(J/kg)	155794.2	155271.7	156692.9
พารามิเตอร์เทิลด์มเบอร์	$Pr_L$	-	4.7165	4.7333	4.6877
ระยะห่างระหว่างท่อ	$s$	m	0.0448	0.0448	0.0448
เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ	$d$	m	0.0128	0.0128	0.0128
heat flux	$q^*$	( $\text{W/m}^2$ )	33280.22	35602.09	37150.01
อัตราการไหลฟิล์ม	$\Gamma$	kg/m.s	0.3646	0.3665	0.3633

ตัวแปร	การคำนวณ				
$Re_L$	$\Gamma/\mu$	-	517.1378	518.2294	518.0507
$Ka$	$\sigma^3 \cdot \rho / g \cdot \mu^4$	-	1.3110E+11	1.1864E+11	1.1283E+11
$A$	$Re_L / Ka^{0.25}$	-	0.8594	0.8830	0.8939
$n$	$Ka^{0.002} / 3(1 + Ka^{0.002})$	-	0.3044	0.3042	0.3041
$m$	$0.16 (Re_L \cdot Ka^{0.025} - 5.25) / (Re_L \cdot Ka^{0.025} + 1)$	-	0.1590	0.1590	0.1590
$F$	$0.0135(1 - 0.05 \exp\{-[0.46 \cdot Ka^{0.25} / Re_L]^2\})$	-	0.0128	0.0128	0.0128
$Ga$	$(\pi \cdot d^3 \cdot g / \nu^2)$	-	1.7584E+08	1.9092E+08	2.1059E+08
$Nui_1$	$0.5 Re_L Pr_L Ga^{-1/2}$	-	2.1769	2.1299	2.0409
$Nui_2$	$F \cdot Re_L^{0.25} \cdot Pr_L^{0.25} \cdot \{1 + [0.5(q^* \cdot \nu^3 / g) / Re_L \cdot h_{fg} \cdot \mu]^{0.025}\}$	-	0.3025	0.3029	0.3006
$Nui$	$Nui_1 \cdot [1 + (Nui_1 / Nui_2)^4]^{-0.14} \cdot (s/d)^m$	-	0.3691	0.3696	0.3668
$h_i$	$Nui \cdot k_L \cdot (g / \nu^2)^{1/3}$	$\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$	6414.48	6599.91	6773.06
$h_{act}$	$q^* / (T_s - T_{fi})$	$\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$	5577.84	6223.13	6537.41
$\Delta h$	$1 h_{act} - h_i \cdot 100 / h_i$	%	13.04	5.71	3.48

ตารางแสดงผลการคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของฟิล์มน้ำมันที่เทียบแนวนอนโดยใช้การระเหย

droplet s/d 1.4 19 mm.

ค่าคงที่และคุณสมบัติของน้ำ	สัญลักษณ์	หน่วย	v1	v2	v3
อุณหภูมิผิวท่อ	$T_s$	$^{\circ}\text{C}$	47.2	47.3	47.1
อุณหภูมิฟิล์มน้ำเข้า	$T_{fi}$	$^{\circ}\text{C}$	27.4	27.1	27.3
อุณหภูมิฟิล์มน้ำออก	$T_{fo}$	$^{\circ}\text{C}$	37.5	37.6	37.2
อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำ	$T_b$	$^{\circ}\text{C}$	39.8	39.8	39.7
แรงตึงผิวของน้ำ	$\sigma$	N/m	0.07013	0.07013	0.07015
ความหนาแน่นฟิล์มน้ำ	$\rho$	$\text{kg/m}^3$	994.646	994.646	994.680
แรงโน้มถ่วงโลก	$g$	$\text{m/s}^2$	9.81	9.81	9.81
ความหนืดไดนามิกส์ film	$\mu$	$\text{N.s/m}^2$	6.593E-04	6.593E-04	6.613E-04
ความหนืดคิเนมาติกส์ film	$\nu$	$\text{m}^2/\text{s}$	6.613E-07	6.613E-07	6.633E-07
Thermal conductivity ของน้ำ	$k_L$	W/m.K	0.6277	0.6277	0.6275
เอนทาลปีที่อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำ	$h_{fg} @ T_b$	(J/kg)	166745.8	166745.8	166265.1
พารามิเตอร์เทิลด์ไมเบอร์	$Pr_L$	-	4.3655	4.3655	4.3809
ระยะห่างระหว่างท่อ	$s$	m	0.0268	0.0268	0.0268
เส้นผ่านศูนย์กลางกลางท่อ	$d$	m	0.019	0.019	0.019
heat flux	$q^*$	( $\text{W/m}^2$ )	20220.9	18957.1	19589.0
อัตราการไหลฟิล์ม	$\Gamma$	kg/m.s	0.0817	0.0805	0.0821

ตัวแปร	การคำนวณ				
$Re_L$	$\Gamma/\mu$	-	123.9164	122.0963	124.1452
$Ka$	$\sigma^3 \cdot \rho / g \cdot \mu^4$	-	1.8510E+11	1.8510E+11	1.8302E+11
$A$	$Re_L / Ka^{0.25}$	-	0.1889	0.1861	0.1898
$n$	$Ka^{0.092} / 3(1 + Ka^{0.092})$	-	0.3053	0.3053	0.3052
$m$	$0.16 [Re_L \cdot Ka^{0.025} - 5.25] / (Re_L \cdot Ka^{0.025} + 1)$	-	0.1558	0.1557	0.1558
$F$	$0.0135(1 - 0.05 \exp\{-[0.46 \cdot Ka^{0.26} / Re_L]^{12}\})$	-	0.0135	0.0135	0.0135
$Ga$	$(\pi r)^3 \cdot g / \nu^2$	-	5.9633E+08	5.9633E+08	5.9273E+08
$Nui_1$	$0.5 Re_L Pr_L Ga^{-1/2}$	-	0.3213	0.3166	0.3237
$Nui_2$	$F \cdot Re_L^{0.25} \cdot Pr_L^{0.25} \cdot (1 + [0.5(q^* \cdot \nu^2 / g) / Re_L \cdot h_{fg} \mu]^{0.075})$		0.2004	0.1995	0.2009
$Nui$	$Nui_1 \cdot (1 + (Nui_1/Nui_2)^{1/4})^{-1/4} \cdot (s/d)^m$	-	0.2041	0.2029	0.2048
$h_f$	$Nui \cdot k_L \cdot (g / \nu^2)^{1/4}$	$\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$	3613.58	3591.93	3616.97
$h_{act}$	$q^* / (T_s - T_{fi})$	$\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$	3901.41	4666.23	3613.03
$\Delta h$	$ h_{act} - h_f  \cdot 100 / h_f$	%	7.97	29.91	0.11

ตารางแสดงผลการคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของฟิล์มน้ำบนท่อเรียบแนวนอนโดยใช้การระเหย

column s/d 1.4 19 mm.

ค่าคงที่และคุณสมบัติของน้ำ	สัญลักษณ์	หน่วย	v1	v2	v3
อุณหภูมิผิวท่อ	$T_s$	$^{\circ}\text{C}$	45.2	45.6	46.1
อุณหภูมิฟิล์มน้ำเข้า	$T_{fi}$	$^{\circ}\text{C}$	27.7	27.3	27.5
อุณหภูมิฟิล์มน้ำออก	$T_{fo}$	$^{\circ}\text{C}$	33.3	34.5	36.3
อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำ	$T_b$	$^{\circ}\text{C}$	37.9	38.3	39.0
แรงตึงผิวของน้ำ	$\sigma$	N/m	0.07047	0.07040	0.07027
ความหนาแน่นฟิล์มน้ำ	$\rho$	$\text{kg/m}^3$	995.222	995.106	994.881
แรงโน้มถ่วงโลก	$g$	$\text{m/s}^2$	9.81	9.81	9.81
ความหนืดไดนามิกส์ film	$\mu$	$\text{N.s/m}^2$	6.932E-04	6.864E-04	6.731E-04
ความหนืดคิเนมาติกส์ film	$\nu$	$\text{m}^2/\text{s}$	6.951E-07	6.883E-07	6.751E-07
Thermal conductivity ของน้ำ	$k_L$	W/m.K	0.6247	0.6253	0.6265
เอนทาลปีที่อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำ	$h_{fg} @ T_b$	(J/kg)	158636.6	160266.8	163443.6
แฟรนด์เทิลล์เบอร์	$Pr_L$	-	4.6254	4.5732	4.4713
ระยะห่างระหว่างท่อ	$s$	m	0.0268	0.0268	0.0268
เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ	$d$	m	0.019	0.019	0.019
heat flux	$q''$	$(\text{W/m}^2)$	24012.4	23380.4	22116.6
อัตราการไหลฟิล์ม	$\Gamma$	kg/m.s	0.1605	0.1611	0.1624

ตัวแปร	การคำนวณ				
$Re_L$	$\Gamma/\mu$	-	231.5454	234.7154	241.2714
$Ka$	$\sigma^3 \cdot \rho / g \cdot \mu^4$	-	1.5380E+11	1.5951E+11	1.7144E+11
$A$	$Re_L / Ka^{0.25}$	-	0.3697	0.3714	0.3750
$n$	$Ka^{0.092} / 3(1 + Ka^{0.092})$	-	0.3048	0.3049	0.3051
$m$	$0.16 [Re_L \cdot Ka^{0.025} - 5.25] / (Re_L \cdot Ka^{0.025} + 1)$	-	0.1577	0.1578	0.1578
$F$	$0.0135(1 - 0.05 \exp\{-[0.46 \cdot Ka^{0.25} / Re_L]^{12}\})$	-	0.0135	0.0135	0.0135
$Ga$	$(\pi \cdot r)^3 \cdot g / \nu^2$	-	5.3981E+08	5.5051E+08	5.7229E+08
$Nui_1$	$0.5 Re_L Pr_L Ga^{-1/3}$	-	0.6577	0.6548	0.6497
$Nui_2$	$F \cdot Re_L^n \cdot Pr_L^{2/9} \cdot \{1 + [0.5(q'' \cdot \nu^2 / g) / Re_L \cdot h_{fg} \cdot \mu]^{0.075}\}$		0.2493	0.2485	0.2469
$Nui$	$Nui1 \cdot [1 + (Nui1/Nui2)^4]^{-1/4} \cdot (s/d)^m$	-	0.2619	0.2610	0.2593
$h_i$	$Nui \cdot k_L \cdot (g / \nu^2)^{1/3}$	$\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$	4463.54	4481.81	4518.78
$h_{act}$	$q'' / (T_s - T_{fi})$	$\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$	4545.66	4331.1	4349.2
$\Delta h$	$ h_{act} - h_i  \cdot 100 / h_i$	%	1.84	3.36	3.75

ตารางแสดงผลการคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของฟิล์มน้ำบนท่อเรียบแนวนอนโดยใช้การระเหย

liquid sheet s/d 1.4 19 mm.

ค่าคงที่และคุณสมบัติของน้ำ	สัญลักษณ์	หน่วย	v1	v2	v3
อุณหภูมิผิวท่อ	$T_s$	$^{\circ}\text{C}$	45.1	45.6	44.7
อุณหภูมิฟิล์มน้ำเข้า	$T_{fi}$	$^{\circ}\text{C}$	30.3	30.1	28.4
อุณหภูมิฟิล์มน้ำออก	$T_{fo}$	$^{\circ}\text{C}$	33	33.9	32.2
อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำ	$T_b$	$^{\circ}\text{C}$	38.4	38.8	37.5
แรงตึงผิวของน้ำ	$\sigma$	N/m	0.07039	0.07031	0.07054
ความหนาแน่นฟิล์มน้ำ	$\rho$	$\text{kg/m}^3$	995.073	994.950	995.328
แรงโน้มถ่วงโลก	$g$	$\text{m/s}^2$	9.81	9.81	9.81
ความหนืดไดนามิกส์ film	$\mu$	$\text{N.s/m}^2$	6.844E-04	6.772E-04	6.995E-04
ความหนืดคินematic film	$\nu$	$\text{m}^2/\text{s}$	6.864E-07	6.791E-07	7.013E-07
Thermal conductivity ของน้ำ	$k_L$	W/m.K	0.6255	0.6261	0.6241
เอนทาลปีที่อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำ	$h_{fg} @ T_b$	(J/kg)	160726.6	162461.3	157131.8
พารามิเตอร์เทิลนัมเบอร์	$Pr_L$	-	4.5584	4.5028	4.6737
ระยะห่างระหว่างท่อ	$s$	m	0.0268	0.0268	0.0268
เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ	$d$	m	0.019	0.019	0.019
heat flux	$q''$	$(\text{W/m}^2)$	27803.7	24644.3	27803.8
อัตราการไหลฟิล์ม	$\Gamma$	kg/m.s	0.3154	0.3632	0.3045

ตัวแปร	การคำนวณ				
$Re_L$	$\Gamma/\mu$	-	460.8123	536.3247	435.3417
$Ka$	$\sigma^3 \cdot \rho / g \cdot \mu^4$	-	1.6117E+11	1.6763E+11	1.4876E+11
$A$	$Re_L / Ka^{0.25}$	-	0.7273	0.8382	0.7010
$n$	$Ka^{0.092} / 3(1 + Ka^{0.092})$	-	0.3049	0.3050	0.3048
$m$	$0.16 [Re_L \cdot Ka^{0.025} - 5.25] / (Re_L \cdot Ka^{0.025} + 1)$	-	0.1589	0.1590	0.1588
$F$	$0.0135 \{1 - 0.05 \exp \{-[0.46 \cdot Ka^{0.25} / Re_L]^{12}\}$	-	0.0128	0.0128	0.0128
$Ga$	$(\pi r)^3 \cdot g / \nu^2$	-	5.5358E+08	5.6542E+08	5.3021E+08
$Nui_1$	$0.5 Re_L Pr_L Ga^{-1/3}$	-	1.2791	1.4602	1.2569
$Nui_2$	$F \cdot Re_L^n \cdot Pr_L^{2/3} \cdot \{1 + [0.5(q'' \cdot \nu^2 / g) / Re_L \cdot h_{fg} \cdot \mu]^{0.075}\}$		0.2867	0.2971	0.2865
$Nui$	$Nui_1 \cdot [1 + (Nui_1 / Nui_2)^4]^{-1/4} \cdot (s/d)^m$	-	0.3026	0.3136	0.3024
$h_l$	$Nui \cdot k_L \cdot (g / \nu^2)^{1/3}$	$\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$	5207.61	5441.03	5118.66
$h_{act}$	$q'' / (T_s - T_{fi})$	$\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$	5991.56	5220.86	5594.72
$\Delta h$	$ h_{act} - h_l  \cdot 100 / h_l$	%	15.05	4.05	9.30

ตารางแสดงผลการคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของฟิล์มน้ำบนท่อเรียบแนวนอนโดยใช้การระเหย

droplet s/d 2.5 19 mm.

ค่าคงที่และคุณสมบัติของน้ำ	สัญลักษณ์	หน่วย	v1	v2	v3
อุณหภูมิผิวท่อ	$T_s$	$^{\circ}\text{C}$	43.2	42.7	43.1
อุณหภูมิฟิล์มน้ำเข้า	$T_{fi}$	$^{\circ}\text{C}$	27.1	28.3	26.8
อุณหภูมิฟิล์มน้ำออก	$T_{fo}$	$^{\circ}\text{C}$	36.6	37.1	37.2
อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำ	$T_b$	$^{\circ}\text{C}$	37.5	37.7	37.6
แรงตึงผิวของน้ำ	$\sigma$	N/m	0.07053	0.07050	0.07053
ความหนาแน่นฟิล์มน้ำ	$\rho$	$\text{kg/m}^3$	995.318	995.266	995.316
แรงโน้มถ่วงโลก	$g$	$\text{m/s}^2$	9.81	9.81	9.81
ความหนืดไดนามิกส์ film	$\mu$	$\text{N.s/m}^2$	6.988E-04	6.958E-04	6.988E-04
ความหนืดคิเนมาติกส์ film	$\nu$	$\text{m}^2/\text{s}$	7.007E-07	6.977E-07	7.006E-07
Thermal conductivity ของน้ำ	$k_L$	W/m.K	0.6242	0.6245	0.6242
เอนทาลปีที่อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำ	$h_{fg} @ T_b$	(J/kg)	157278.1	158009.6	157299.0
พารามิเตอร์เทิลันด์เบอร์	$Pr_L$	-	4.6690	4.6455	4.6683
ระยะห่างระหว่างท่อ	$s$	m	0.0473	0.0473	0.0473
เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ	$d$	m	0.019	0.019	0.019
heat flux	$q''$	$(\text{W/m}^2)$	11374.3	12006.2	10742.4
อัตราการไหลฟิล์ม	$\Gamma$	kg/m.s	0.1010	0.1018	0.1021

ตัวแปร	การคำนวณ				
$Re_L$	$\Gamma/\mu$	-	144.5253	146.3094	146.1175
$Ka$	$\sigma^3 \cdot \rho / g \cdot \mu^4$	-	1.4924E+11	1.5168E+11	1.4931E+11
$A$	$Re_L / Ka^{0.25}$	-	0.2325	0.2344	0.2351
$n$	$Ka^{0.092} / 3(1 + Ka^{0.092})$	-	0.3048	0.3048	0.3048
$m$	$0.16 [Re_L \cdot Ka^{0.025} - 5.25] / (Re_L \cdot Ka^{0.025} + 1)$	-	0.1564	0.1564	0.1564
$F$	$0.0135(1 - 0.05 \exp\{-[0.46 \cdot Ka^{0.25} / Re_L]^{12}\})$	-	0.0135	0.0135	0.0135
$Ga$	$(\pi r)^3 \cdot g / \nu^2$	-	5.3113E+08	5.3578E+08	5.3127E+08
$Nui_1$	$0.5 Re_L Pr_L Ga^{-1/3}$	-	0.4166	0.4184	0.4211
$Nui_2$	$F \cdot Re_L^n \cdot Pr_L^{2/3} \cdot \{1 + [0.5(q'' \cdot \nu^2 / g) / Re_L \cdot h_{fg} \cdot \mu]^{0.75}\}$		0.2180	0.2182	0.2186
$Nui$	$Nui_1 \cdot [1 + (Nui_1 / Nui_2)^4]^{-1/4} \cdot (s/d)^m$	-	0.2470	0.2472	0.2478
$h_i$	$Nui \cdot k_L \cdot (g / \nu^2)^{1/3}$	$\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$	4182.71	4200.54	4197.16
$h_{act}$	$q'' / (T_s - T_{fi})$	$\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$	3077.11	3385.34	2919.8
$\Delta h$	$ h_{act} - h_i  \cdot 100 / h_i$	%	26.43	19.41	30.43

ตารางแสดงผลการคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของฟิล์มน้ำมันที่เรียบแนวนอนโดยใช้การระเหย

column s/d 2.5 19 mm.

ค่าคงที่และคุณสมบัติของน้ำ	สัญลักษณ์	หน่วย	v1	v2	v3
อุณหภูมิผิวท่อ	$T_s$	$^{\circ}\text{C}$	42.4	42.2	42.7
อุณหภูมิฟิล์มน้ำเข้า	$T_{fi}$	$^{\circ}\text{C}$	26.9	27.1	26.8
อุณหภูมิฟิล์มน้ำออก	$T_{fo}$	$^{\circ}\text{C}$	33.5	33.7	32.2
อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำ	$T_b$	$^{\circ}\text{C}$	36.3	36.3	36.1
แรงตึงผิวของน้ำ	$\sigma$	N/m	0.07075	0.07075	0.07078
ความหนาแน่นฟิล์มน้ำ	$\rho$	$\text{kg/m}^3$	995.689	995.689	995.748
แรงโน้มถ่วงโลก	$g$	$\text{m/s}^2$	9.81	9.81	9.81
ความหนืดไดนามิกส์ film	$\mu$	$\text{N.s/m}^2$	7.207E-04	7.207E-04	7.241E-04
ความหนืดคิเนมาติกส์ film	$\nu$	$\text{m}^2/\text{s}$	7.225E-07	7.225E-07	7.259E-07
Thermal conductivity ของน้ำ	$k_L$	W/m.K	0.6223	0.6223	0.6219
เอนทาลปีที่อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำ	$h_{fg @ T_b}$	(J/kg)	152053.1	152053.1	151217.1
พรันด์เทิลนัมเบอร์	$Pr_L$	-	4.8365	4.8365	4.8633
ระยะห่างระหว่างท่อ	$s$	m	0.0473	0.0473	0.0473
เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ	$d$	m	0.019	0.019	0.019
heat flux	$q''$	( $\text{W/m}^2$ )	18957.1	17061.4	16429.5
อัตราการไหลฟิล์ม	$\Gamma$	$\text{kg/m.s}$	0.2248	0.2236	0.2252

ตัวแปร	การคำนวณ				
$Re_L$	$\Gamma/\mu$	-	311.9396	310.2745	310.9886
$Ka$	$\sigma^3 \cdot \rho / g \cdot \mu^4$	-	1.3326E+11	1.3326E+11	1.3091E+11
$A$	$Re_L / Ka^{0.25}$	-	0.5163	0.5135	0.5170
$n$	$Ka^{0.092} / 3(1 + Ka^{0.092})$	-	0.3045	0.3045	0.3044
$m$	$0.16 [Re_L \cdot Ka^{0.025} - 5.25] / (Re_L \cdot Ka^{0.025} + 1)$	-	0.1583	0.1583	0.1583
$F$	$0.0135(1 - 0.05 \exp\{-[0.46 \cdot Ka^{0.25} / Re_L]^{12}\})$	-	0.0130	0.0130	0.0130
$Ga$	$(\pi r^3 \cdot g / \nu^2)$	-	4.9964E+08	4.9964E+08	4.9486E+08
$Nui_1$	$0.5 Re_L Pr_L Ga^{-1/3}$	-	0.9506	0.9456	0.9561
$Nui_2$	$F \cdot Re_L^{0.25} \cdot Pr_L^{0.25} \cdot (1 + [0.5(q'' \cdot \nu^2 / g) / Re_L \cdot h_{fg} \cdot \mu]^{0.075})$		0.2684	0.2680	0.2688
$Nui$	$Nui_1 \cdot [1 + (Nui_1 / Nui_2)^4]^{-1/4} \cdot (s/d)^m$	-	0.3096	0.3091	0.3101
$h_i$	$Nui \cdot k_L \cdot (g / \nu^2)^{1/3}$	$\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$	5121.29	5113.84	5111.20
$h_{act}$	$q'' / (T_s - T_{fi})$	$\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$	4220.99	3978.02	3766.28
$\Delta h$	$ h_{act} - h_i  \cdot 100 / h_i$	%	17.58	22.21	26.31

ตารางแสดงผลการคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของฟิล์มน้ำบนท่อเรียบแนวนอนโดยใช้การระเหย

liquid sheet s/d 2.5 19 mm.

ค่าคงที่และคุณสมบัติของน้ำ	สัญลักษณ์	หน่วย	v1	v2	v3
อุณหภูมิผิวท่อ	$T_s$	$^{\circ}\text{C}$	42.3	42.0	41.9
อุณหภูมิฟิล์มน้ำเข้า	$T_{fi}$	$^{\circ}\text{C}$	27.2	28.5	28.7
อุณหภูมิฟิล์มน้ำออก	$T_{fo}$	$^{\circ}\text{C}$	32.6	32.2	32.1
อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำ	$T_b$	$^{\circ}\text{C}$	36.1	36.2	36.2
แรงตึงผิวของน้ำ	$\sigma$	N/m	0.07079	0.07077	0.07077
ความหนาแน่นฟิล์มน้ำ	$\rho$	$\text{kg/m}^3$	995.751	995.718	995.729
แรงโน้มถ่วงโลก	$g$	$\text{m/s}^2$	9.81	9.81	9.81
ความหนืดไดนามิกส์ film	$\mu$	$\text{N.s/m}^2$	7.243E-04	7.224E-04	7.230E-04
ความหนืดคิเนมาติกส์ film	$\nu$	$\text{m}^2/\text{s}$	7.261E-07	7.242E-07	7.248E-07
Thermal conductivity ของน้ำ	$k_L$	W/m.K	0.6219	0.6221	0.6220
เอนทาลปีที่อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำ	$h_{fg} @ T_b$	(J/kg)	151175.3	151635.1	151488.8
พรมแดนเทิลนัมเบอร์	$Pr_L$	-	4.8646	4.8499	4.8546
ระยะห่างระหว่างท่อ	$s$	m	0.0473	0.0473	0.0473
เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ	$d$	m	0.019	0.019	0.019
heat flux	$q''$	( $\text{W/m}^2$ )	20852.8	19589.0	19589.0
อัตราการไหลฟิล์ม	$\Gamma$	kg/m.s	0.3594	0.3588	0.3591

ตัวแปร	การคำนวณ				
$Re_L$	$\Gamma/\mu$	-	496.1918	496.6796	496.6750
$Ka$	$\sigma^3 \cdot \rho / g \cdot \mu^4$	-	1.3080E+11	1.3208E+11	1.3167E+11
$A$	$Re_L / Ka^{0.25}$	-	0.8251	0.8239	0.8245
$n$	$Ka^{0.092} / 3(1 + Ka^{0.092})$	-	0.3044	0.3045	0.3045
$m$	$0.16 [Re_L \cdot Ka^{0.025} - 5.25] / (Re_L \cdot Ka^{0.025} + 1)$	-	0.1589	0.1589	0.1589
$F$	$0.0135[1 - 0.05 \exp\{-[0.46 \cdot Ka^{0.25} / Re_L]^{12}\}]$	-	0.0128	0.0128	0.0128
$Ga$	$(\pi r)^3 \cdot g / \nu^2$	-	4.9462E+08	4.9724E+08	4.9640E+08
$Nui_1$	$0.5 Re_L Pr_L Ga^{-1/3}$	-	1.5261	1.5203	1.5226
$Nui_2$	$F \cdot Re_L^n \cdot Pr_L^{2/3} \cdot (1 + [0.5(q'' \cdot \nu^2 / g) / Re_L \cdot h_{fg} \cdot \mu]^{0.75})$		0.3047	0.3041	0.3042
$Nui$	$Nui_1 \cdot [1 + (Nui_1 / Nui_2)^{1/4}]^{-4} \cdot (s/d)^m$	-	0.3520	0.3514	0.3516
$h_i$	$Nui \cdot k_L \cdot (g/\nu^2)^{1/3}$	$\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$	5801.63	5802.18	5801.94
$h_{act}$	$q'' / (T_s - T_{fi})$	$\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$	4596.34	4668.33	4670.22
$\Delta h$	$1 h_{act} - h_i \cdot 100 / h_i$	%	20.77	19.54	19.51



ตารางแสดงผลการคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของฟิล์มที่สัมน้ำบนท่อเรียบแนวนอนโดยใช้การระเหย

droplet s/d 3.5 19 mm.

ค่าคงที่และคุณสมบัติของน้ำ	สัญลักษณ์	หน่วย	v1	v2	v3
อุณหภูมิผิวท่อ	$T_s$	$^{\circ}\text{C}$	47.8	46.7	47.3
อุณหภูมิฟิล์มน้ำเข้า	$T_{fi}$	$^{\circ}\text{C}$	27.4	23.7	23.7
อุณหภูมิฟิล์มน้ำออก	$T_{fo}$	$^{\circ}\text{C}$	35.3	38.7	38.6
อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำ	$T_b$	$^{\circ}\text{C}$	39.6	39.0	39.2
แรงตึงผิวของน้ำ	$\sigma$	N/m	0.07017	0.07028	0.07023
ความหนาแน่นฟิล์มน้ำ	$\rho$	$\text{kg/m}^3$	994.710	994.895	994.814
แรงโน้มถ่วงโลก	$g$	$\text{m/s}^2$	9.81	9.81	9.81
ความหนืดไดนามิกส์ film	$\mu$	$\text{N.s/m}^2$	6.631E-04	6.740E-04	6.692E-04
ความหนืดคิเนมาติกส์ film	$\nu$	$\text{m}^2/\text{s}$	6.650E-07	6.759E-07	6.711E-07
Thermal conductivity ของน้ำ	$k_L$	W/m.K	0.6274	0.6264	0.6268
เอนทาลปีที่อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำ	$h_{fg} @ T_b$	(J/kg)	165847.1	163234.6	164384.1
พรมณ์เคลย์มเบอร์	$Pr_L$	-	4.3943	4.4780	4.4412
ระยะห่างระหว่างท่อ	$s$	m	0.067	0.067	0.067
เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ	$d$	m	0.019	0.019	0.019
heat flux	$q''$	$(\text{W/m}^2)$	15797.6	12638.1	13901.9
อัตราการไหลฟิล์ม	$\Gamma$	$\text{kg/m.s}$	0.0582	0.0578	0.0588

ตัวแปร	การคำนวณ				
$Re_L$	$\Gamma/\mu$	-	87.7739	85.7600	87.8694
$Ka$	$\sigma^3 \cdot \rho / g \cdot \mu^4$	-	1.8125E+11	1.7062E+11	1.7520E+11
$A$	$Re_L / Ka^{0.25}$	-	0.1345	0.1334	0.1358
$n$	$Ka^{0.092} / 3(1 + Ka^{0.092})$	-	0.3052	0.3051	0.3051
$m$	$0.16 [Re_L \cdot Ka^{0.025} - 5.25] / (Re_L \cdot Ka^{0.025} + 1)$	-	0.1541	0.1539	0.1541
$F$	$0.0135[1 - 0.05 \exp\{-0.46 \cdot Ka^{0.25} / Re_L^{12}\}]$	-	0.0135	0.0135	0.0135
$Ga$	$(\pi \cdot \eta^3 \cdot g / \nu^2)$	-	5.8964E+08	5.7082E+08	5.7898E+08
$Nui_1$	$0.5 Re_L Pr_L Ga^{-1/2}$	-	0.2300	0.2315	0.2341
$Nui_2$	$F \cdot Re_L^0 \cdot Pr_L^{0.25} \cdot [1 + 0.5(q'' \cdot \nu^2 / g) / Re_L \cdot h_{fg} \cdot \mu]^{0.075}$	-	0.1819	0.1827	0.1831
$Nui$	$Nui_1 \cdot [1 + (Nui_1 / Nui_2)^4]^{-1/4} \cdot (s/d)^m$	-	0.2034	0.2043	0.2054
$h_i$	$Nui \cdot k_L \cdot (g / \nu^2)^{1/3}$	$\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$	3585.32	3557.79	3594.76
$h_{act}$	$q'' / (T_s - T_{fi})$	$\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$	2613.78	1979.26	2223.86
$\Delta h$	$ h_{act} - h_i  \cdot 100 / h_i$	%	27.10	44.37	38.14

ตารางแสดงผลการคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของฟิล์มให้น้ำบนท่อเรียบแนวนอนโดยใช้การระเหย

column s/d 3.5 19 mm.

ค่าคงที่และคุณสมบัติของน้ำ	สัญลักษณ์	หน่วย	v1	v2	v3
อุณหภูมิผิวท่อ	$T_s$	$^{\circ}\text{C}$	44.6	44.7	44.2
อุณหภูมิฟิล์มน้ำเข้า	$T_{fi}$	$^{\circ}\text{C}$	26.4	24.5	25.3
อุณหภูมิฟิล์มน้ำออก	$T_{fo}$	$^{\circ}\text{C}$	33.9	35.2	32.7
อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำ	$T_b$	$^{\circ}\text{C}$	37.4	37.3	36.6
แรงตึงผิวของน้ำ	$\sigma$	N/m	0.07056	0.07057	0.07070
ความหนาแน่นฟิล์มน้ำ	$\rho$	$\text{kg/m}^3$	995.362	995.392	995.600
แรงโน้มถ่วงโลก	$g$	$\text{m/s}^2$	9.81	9.81	9.81
ความหนืดไดนามิกส์ film	$\mu$	$\text{N.s/m}^2$	7.015E-04	7.032E-04	7.154E-04
ความหนืดคินมาติกส์ film	$\nu$	$\text{m}^2/\text{s}$	7.033E-07	7.051E-07	7.172E-07
Thermal conductivity ของน้ำ	$k_L$	W/m.K	0.6240	0.6238	0.6227
เอนทาลปีที่อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำ	$h_{fg} @ T_b$	(J/kg)	156651.1	156233.1	153307.1
พรมดเทิลนัมเบอร์	$Pr_L$	-	4.6891	4.7025	4.7963
ระยะห่างระหว่างท่อ	$s$	m	0.067	0.067	0.067
เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ	$d$	m	0.019	0.019	0.019
heat flux	$q''$	( $\text{W/m}^2$ )	15797.6	15165.69	15165.69
อัตราการไหลฟิล์ม	$\Gamma$	kg/m.s	0.1574	0.1571	0.1580

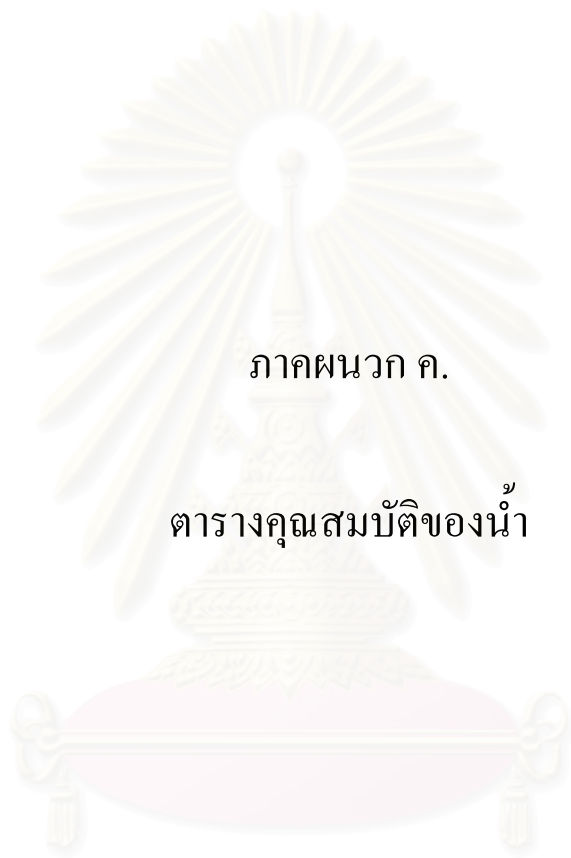
ตัวแปร	การคำนวณ				
$Re_L$	$\Gamma/\mu$	-	224.3900	223.4066	220.8501
$Ka$	$\sigma^3 \cdot \rho / g \cdot \mu^4$	-	1.4720E+11	1.4586E+11	1.3689E+11
$A$	$Re_L / Ka^{0.25}$	-	0.3623	0.3615	0.3631
$n$	$Ka^{0.092} / 3(1 + Ka^{0.092})$	-	0.3047	0.3047	0.3046
$m$	$0.16 [Re_L \cdot Ka^{0.025} - 5.25] / (Re_L \cdot Ka^{0.025} + 1)$	-	0.1577	0.1577	0.1576
$F$	$0.0135 \{1 - 0.05 \exp \{-[0.46 \cdot Ka^{0.25} / Re_L]^{12}\}\}$	-	0.0135	0.0135	0.0135
$Ga$	$(\pi r)^3 \cdot g / \nu^2$	-	5.2720E+08	5.2460E+08	5.0693E+08
$Nui_1$	$0.5 Re_L Pr_L Ga^{-1/3}$	-	0.6512	0.6513	0.6642
$Nui_2$	$F \cdot Re_L^n \cdot Pr_L^{2/3} \cdot \{1 + [0.5(q'' \cdot \nu^2 / g) / Re_L \cdot h_{fg} \cdot \mu]^{0.075}\}$	-	0.2487	0.2488	0.2511
$Nui$	$Nui_1 \cdot [1 + (Nui_1 / Nui_2)^{1/4}]^{-1/4} \cdot (s/d)^m$	-	0.3018	0.3019	0.3047
$h_i$	$Nui \cdot k_L \cdot (g / \nu^2)^{1/3}$	$\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$	5096.65	5088.58	5069.45
$h_{act}$	$q'' / (T_s - T_{fi})$	$\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$	2970.76	2730.52	2682.61
$\Delta h$	$ h_{act} - h_i  \cdot 100 / h_i$	%	41.71	46.34	47.08

ตารางแสดงผลการคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของฟิล์มน้ำมันที่เทียบแนวนอนโดยใช้การระเหย

liquid sheet s/d 3.5 19 mm.

ค่าคงที่และคุณสมบัติของน้ำ	สัญลักษณ์	หน่วย	v1	v2	v3
อุณหภูมิผิวท่อ	$T_s$	$^{\circ}\text{C}$	42.6	42.0	41.3
อุณหภูมิฟิล์มน้ำเข้า	$T_{fi}$	$^{\circ}\text{C}$	26.8	25.1	25.3
อุณหภูมิฟิล์มน้ำออก	$T_{fo}$	$^{\circ}\text{C}$	30.3	32.4	31.3
อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำ	$T_b$	$^{\circ}\text{C}$	35.6	35.4	34.8
แรงตึงผิวของน้ำ	$\sigma$	N/m	0.07088	0.07091	0.07101
ความหนาแน่นฟิล์มน้ำ	$\rho$	$\text{kg/m}^3$	995.903	995.966	996.126
แรงโน้มถ่วงโลก	$g$	$\text{m/s}^2$	10.81	11.81	12.81
ความหนืดไดนามิกฟิล์ม	$\mu$	$\text{N.s/m}^2$	7.333E-04	7.370E-04	7.464E-04
ความหนืดคิงแมติคฟิล์ม	$\nu$	$\text{m}^2/\text{s}$	7.351E-07	7.387E-07	7.481E-07
Thermal conductivity ของน้ำ	$k_L$	W/m.K	0.6211	0.6208	0.6200
เอนทาลปีที่อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำ	$h_{fg} @ T_b$	(J/kg)	149022.6	148144.8	145887.6
พารามิเตอร์เทิลมเบอร์	$Pr_L$	-	4.9336	4.9618	5.0341
ระยะห่างระหว่างท่อ	$s$	m	0.067	0.067	0.067
เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ	$d$	m	0.019	0.019	0.019
heat flux	$q''$	$(\text{W/m}^2)$	20852.83	19589.02	16429.5
อัตราการไหลฟิล์ม	$\Gamma$	$\text{kg/m.s}$	0.3613	0.3620	0.3607

ตัวแปร	การคำนวณ				
$Re_L$	$\Gamma/\mu$	-	492.7019	491.2018	483.2588
$Ka$	$\sigma^3 \cdot \rho / g \cdot \mu^4$	-	1.1343E+11	1.0194E+11	8.9700E+10
$A$	$Re_L / Ka^{0.25}$	-	0.8490	0.8693	0.8830
$n$	$Ka^{0.092} / 3(1 + Ka^{0.092})$	-	0.3041	0.3038	0.3035
$m$	$0.16 [Re_L \cdot Ka^{0.025} - 5.25] / (Re_L \cdot Ka^{0.025} + 1)$	-	0.1589	0.1589	0.1589
$F$	$0.0135(1 - 0.05 \exp\{-[0.46 \cdot Ka^{0.25} / Re_L]^{12}\})$	-	0.0128	0.0128	0.0128
$Ga$	$(\pi \cdot g^3 \cdot \rho^2 / \nu^2)$	-	5.3183E+08	5.7530E+08	6.0843E+08
$Nui_1$	$0.5 Re_L Pr_L Ga^{-1/3}$	-	1.5001	1.4652	1.4355
$Nui_2$	$F \cdot Re_L^n \cdot Pr_L^{2/3} \cdot (1 + [0.5(q'' \cdot U^2/g)^{1/3} / Re_L \cdot h_{fg} \cdot \mu]^{0.075})$		0.3061	0.3063	0.3069
$Nui$	$Nui_1 \cdot [1 + (Nui_1/Nui_2)^4]^{-1/4} \cdot (s/d)^m$	-	0.3739	0.3741	0.3747
$h_i$	$Nui \cdot k_L \cdot (g/U^2)^{1/3}$	$\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$	6303.90	6471.18	6596.00
$h_{act}$	$q'' / (T_s - T_{fi})$	$\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$	4211.74	3973.68	3518.64
$\Delta h$	$ h_{act} - h_i  \cdot 100 / h_i$	%	33.19	38.59	46.65



ภาคผนวก ค.

ตารางคุณสมบัติของน้ำ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$T, ^\circ\text{C}$	$\rho,$ $\text{kg}/\text{m}^3$	$c_p,$ $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$	$\nu,$ $\text{m}^2/\text{s}$	$k,$ $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$	$\alpha,$ $\text{m}^2/\text{s}\times 10^7$	Pr	$\beta, \text{K}^{-1}$
<b>Air</b>							
200	13,144.94	0.1360	0.0802	12.34	69.08	0.0116	
250	13,025.60	0.1357	0.0765	13.07	74.06	0.0103	
315.5	12,847	0.134	0.0673	14.02	8.15	0.0083	
<b>Methyl chloride, <math>\text{CH}_3\text{Cl}</math></b>							
-50	1,052.58	1.4759	$0.320 \times 10^{-6}$	0.215	1.388	2.31	
-40	1,033.35	1.4826	0.318	0.209	1.368	2.32	
-30	1,016.53	1.4922	0.314	0.202	1.337	2.35	
-20	999.39	1.5043	0.309	0.196	1.301	2.38	
-10	981.45	1.5194	0.306	0.187	1.257	2.43	
0	962.39	1.5378	0.302	0.178	1.213	2.49	
10	942.36	1.5600	0.297	0.171	1.166	2.55	
20	923.31	1.5860	0.293	0.163	1.112	2.63	
30	903.12	1.6161	0.288	0.154	1.058	2.72	
40	883.10	1.6504	0.281	0.144	0.996	2.83	
50	861.15	1.6890	0.274	0.133	0.921	2.97	
<b>Sulfur dioxide, <math>\text{SO}_2</math></b>							
-50	1,560.84	1.3595	$0.484 \times 10^{-6}$	0.242	1.141	4.24	
-40	1,536.81	1.3607	0.424	0.235	1.130	3.74	
-30	1,520.64	1.3616	0.371	0.230	1.117	3.31	
-20	1,488.60	1.3624	0.324	0.225	1.107	2.93	
-10	1,463.61	1.3628	0.288	0.218	1.097	2.62	
0	1,438.46	1.3636	0.257	0.211	1.081	2.38	
10	1,412.51	1.3645	0.232	0.204	1.066	2.18	
20	1,386.40	1.3653	0.210	0.199	1.050	2.00	$1.94 \times 10^{-3}$
30	1,359.33	1.3662	0.190	0.192	1.035	1.83	
40	1,329.22	1.3674	0.173	0.185	1.019	1.70	
50	1,299.10	1.3683	0.162	0.177	0.999	1.61	
<b>Water, <math>\text{H}_2\text{O}</math></b>							
0	1,002.28	4.2178	$1.788 \times 10^{-6}$	0.552	1.308	13.6	
20	1,000.52	4.1818	1.006	0.597	1.430	7.02	$0.18 \times 10^{-3}$
40	994.59	4.1784	0.658	0.628	1.512	4.34	
60	985.46	4.1843	0.478	0.651	1.554	3.02	
80	974.08	4.1964	0.364	0.668	1.636	2.22	
100	960.63	4.2161	0.294	0.680	1.680	1.74	
120	945.25	4.250	0.247	0.685	1.708	1.446	
140	928.27	4.283	0.214	0.684	1.724	1.241	
160	909.69	4.342	0.190	0.680	1.729	1.099	
180	889.03	4.417	0.173	0.675	1.724	1.004	

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Properties of Water

Temperature (°C)	Density $\rho$ , (kg/m <sup>3</sup> )	Specific weight $\gamma$ , (N/m <sup>3</sup> )	Viscosity $\mu$ , (N · s/m <sup>2</sup> )	Kinematic viscosity $\nu$ , (m <sup>2</sup> /s)	Bulk modulus $B$ , (Pa)	Surface tension $\sigma$ , (N/m)	Vapor pressure, (kPa)
0	999.9	9809	$1.792 \times 10^{-3}$	$1.792 \times 10^{-6}$	$204 \times 10^7$	$7.62 \times 10^{-2}$	0.610
5	1000.0	9810	1.519	1.519	206	7.54	0.872
10	999.7	9807	1.308	1.308	211	7.48	1.13
15	999.1	9801	1.140	1.141	214	7.41	1.60
20	998.2	9792	1.005	1.007	220	7.36	2.34
30	995.7	9768	0.801	0.804	223	7.18	4.24
40	992.2	9733	0.656	0.661	227	7.01	7.38
50	988.1	9693	0.549	0.556	230	6.82	12.3
60	983.2	9645	0.469	0.477	228	6.68	19.9
70	977.8	9592	0.406	0.415	225	6.50	31.2
80	971.8	9533	0.357	0.367	221	6.30	47.3
90	965.3	9470	0.317	0.328	216	6.12	70.1
100	958.4	9402	$0.284 \times 10^{-3}$	$0.296 \times 10^{-6}$	$207 \times 10^7$	$5.94 \times 10^{-2}$	101.3

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย อธิกร วงศชนวริศ เกิดเมื่อวันที่ 15 กรกฎาคม พ.ศ. 2521 ที่จังหวัดกรุงเทพฯ สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เมื่อ (ภาคต้น) ปีการศึกษา 2543 และ เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2546



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย