

รายงานการวิจัย

การทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ของเทอร์โมไซฟอนในระบบน้ำร้อน

Experiment Investigation of Relations in a
Thermosyphon Hot Water System

โดย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ บุญนัส

แหล่งทุน

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

พ.ศ. 2549

ชื่อโครงการวิจัย : การทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ของเทอร์โมไซฟอนในระบบน้ำร้อน
ผู้วิจัย : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ บุญณะ
หน่วยงานที่สังกัด : ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องต้นกำลัง
วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยประเภท : ทุนสนับสนุนนักวิจัยทั่วไป ประจำปีงบประมาณ 2549
จำนวนเงิน : 40,000 บาท

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เพื่อหาความสัมพันธ์ของเทอร์โมไซฟอนในระบบน้ำร้อนของท่อทองแดงขนาด 3/8" และ 5/8" ที่มีความยาวเท่ากันคือ 0.5 m โดยทำการปรับเปลี่ยนค่าความร้อนต่อพื้นที่ ตั้งแต่ 0.1-0.34 kW/m² สำหรับท่อทองแดงขนาด 3/8" และ 0.3-1.3 kW/m² สำหรับขนาด 5/8" จากผลการวิจัยจะพบว่าค่าความร้อนต่อพื้นที่ที่ส่งผลโดยตรงต่อเรย์โนลด์ อัตรการไหลเชิงมวลและคุณภาพไอน้ำในระบบ ทำให้ได้ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับพารามิเตอร์ดังกล่าว เพื่อเป็นแนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรมต่อไป

Project research : Experiment Investigation of Relations in a Thermosyphon Hot Water System

Researcher : Asst. Prof. Dr. Somkiat Boonnasa

Department : Power Engineering Technology, College of Industrial Technology

Scholarship : General researcher grant 2006

Budget : 40,000 Baht

Abstract

This objective of this research was to determine important relations of parameters of a thermosyphon within a hot water system. The copper pipes of the system with 3/8" and 5/8" diameters are 0.5 m long. The heat flux through area of these pipes having diameters of 3/8" and 5/8" are 0.1-0.34 and 0.3-1.3 kW/m² respectively. The result showed that the heat flux affected directly the Reynolds number, mass flow rate and quality of steam in the system. So the mathematical relation of these parameters will be useful for an application in the industrial work.

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนนักวิจัยทั่วไป ประจำปีงบประมาณ 2549 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ โดยได้รับความสะดวกจากศูนย์วิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ผู้วิจัยจึงขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ผศ.ดร.สมเกียรติ บุญณะ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ฅ
รายการสัญลักษณ์	ฉ

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	1
1.4 ขั้นตอนการดำเนินการ	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.2 การพาความร้อนแบบบังคับ	4
2.3 กาลักความร้อนหรือเทอร์โมไซฟอน	7
2.4 การคำนวณหาความดันลด	8
2.5 กาลักความร้อนสถานะเดียว	11
2.6 กาลักความร้อนสองสถานะ	12
2.7 กาลักความร้อนแบบหมุน	13

บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 ชุดทดสอบการไหลอิสระแบบเทอร์โมไซฟอน	14
3.2 อุปกรณ์เครื่องมือวัดที่ใช้ในการเก็บข้อมูล	14
3.3 การสร้างชุดทดสอบการไหลอิสระแบบเทอร์โมไซฟอน	15

3.4 การกำหนดจุดวัดคุณหมิตที่ท่อทองแดง	17
บทที่ 4 ผลการศึกษา	
4.1 สมการที่ใช้ในการคำนวณ	18
4.2 ข้อมูลและผลการทดลอง	21
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย	
สรุปผลการวิจัย	44
บรรณานุกรม	45
ภาคผนวก	46
ประวัติผู้วิจัย	53

สารบัญตาราง

หัวข้อ	หน้า
ตารางที่ 2.1 แสดงค่าของ c และ n สำหรับสมการที่ (2-6, 2-7)	6
ตารางที่ 2.2 แสดงค่าของ b และ m สำหรับสมการที่ (2-10, 2-11)	7
ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองขนาดท่อ 3/8"	21
ตารางที่ 4.2 ผลการคำนวณขนาดท่อ 3/8"	28
ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองขนาดท่อ 5/8"	29
ตารางที่ 4.4 ผลการคำนวณขนาดท่อ 5/8"	35
ตารางที่ 4.5 ผลการคำนวณโดยใช้ความสัมพันธ์ของสมการในภาพที่ 4-2 ถึง 4-9	36
ตารางที่ ผ.1 คุณสมบัติของไอน้ำ	48

สารบัญภาพ

หัวข้อ	หน้า
ภาพที่ 2.1 การเปลี่ยนแปลงของการไหลเมื่อของไหลไหลผ่านท่อเดี่ยว	4
ภาพที่ 2.2 สำหรับหาค่าสัมประสิทธิ์แรงหน่วงเมื่อทราบค่าเรย์โนลด์	6
ภาพที่ 2.3 จุดติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล	9
ภาพที่ 2.4 กาลักความร้อนแบบเปิดแนวตั้ง	12
ภาพที่ 2.5 แบบจำลองกาลักความร้อนสองสถานะแนวตั้ง	12
ภาพที่ 2.6 กาลักความร้อนแบบร่วมศูนย์กลางในแกนหมุนมอเตอร์	13
ภาพที่ 3.1 เทอร์โมคัปเปิล	14
ภาพที่ 3.2 ตัวแสดงค่าอุณหภูมิแบบดิจิตอล	15
ภาพที่ 3.3 ลักษณะของถังพักน้ำ	15
ภาพที่ 3.4 กล่องใส่อุปกรณ์เครื่องมือวัด และสวิตช์ต่างๆ	16
ภาพที่ 3.5 ชุดฮีตเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ	16
ภาพที่ 3.6 การกำหนดจุดวัดอุณหภูมิ	17
ภาพที่ 4.1 ตำแหน่งของฮีตเตอร์และจุดวัดอุณหภูมิที่จุดต่างๆ	20
ภาพที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ Flow rate (3/8")	37
ภาพที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง Heat flux กับ Flow rate (3/8")	37
ภาพที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง Heat flux กับ Re (3/8")	38
ภาพที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง Heat flux กับ x (3/8")	38
ภาพที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ Flow rate (5/8")	39
ภาพที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง Heat flux กับ Flow rate (5/8")	39
ภาพที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง Heat flux กับ Re (5/8")	40
ภาพที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง Heat flux กับ x (5/8")	40
ภาพที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง Heat flux กับ Flow rate	41
ภาพที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง Heat flux กับ Re	41

รายการสัญลักษณ์

ตัวย่อ	ความหมาย	หน่วย
A	พื้นที่หน้าตัดของแผ่นกั้นในถัง	m^2
A_c	พื้นที่ผิวของท่อส่วนที่ได้รับความร้อน	m^2
A_s	พื้นที่ผิวของท่อส่วนที่ได้รับความร้อน	m^2
C_d	สัมประสิทธิ์เชิงหน่วง	-
D	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อที่ได้รับความร้อน	m
d_i	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อที่ได้รับความร้อน	m
d_o	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อที่ได้รับความร้อน	m
F_d	ค่าแรงหน่วงอันเนื่องมาจากของไหล	N
f	สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน	-
f_{TP}	สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของไหลที่มีสองสถานะ	-
g	อัตราเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก	m/s^2
H	ความสูงของระดับน้ำที่อยู่ภายในถังพักน้ำ	m
h_{fg}	ค่าเอนทัลปีของการเปลี่ยนสถานะ	kJ/kg
k	ค่าสภาพการนำความร้อนของเนื้อวัสดุ	$\text{W/m}^\circ\text{C}$
L	ช่วงความยาวของท่อส่วนที่ได้รับความร้อน	m
$\dot{m}$	อัตราการไหลเชิงมวลของของไหล	kg/s
q	อัตราการถ่ายเทความร้อนที่ผ่านผิวท่อต่อพื้นที่	W/m^2
Re	ตัวเลขเรย์โนลด์	-
s	ระยะทางการเคลื่อนที่	m
T	ค่าอุณหภูมิที่ได้จากการทดลอง	$^\circ\text{C}$
t	เวลาการเคลื่อนที่ของลูกกลอย	s
u	ความเร็วเฉลี่ยของของไหล	m/s
v	ความเร็วของการเคลื่อนที่	m/s
r_{area}	อัตราส่วนของขนาดท่อที่เข้าไปรับความร้อนต่อ	-
x_L	ค่าคุณภาพไอของของไหลที่ด้านทางออก	-
ρ_f	ค่าความหนาแน่นของของไหล	kg/m^3
ρ_{fg}	ค่าความหนาแน่นของการเปลี่ยนสถานะ	kg/m^3
μ	ค่าความหนืดพลศาสตร์	kg/m.s
ν	ความหนืดจลน์ศาสตร์	m^2/s

ตัวย่อ	ความหมาย	หน่วย
v_f	ปริมาตรจำเพาะของเหลวอิ่มตัว	m^3/kg
v_{fg}	ปริมาตรจำเพาะของการเปลี่ยนสถานะ	m^3/kg
v_g	ปริมาตรจำเพาะไออิ่มตัว	m^3/kg
ΔP_{Total}	ค่าความดันลดรวม	Pa
ΔP_a	ค่าความดันลดเนื่องจากความเร็วของของไหล	Pa
ΔP_f	ค่าความดันลดเนื่องจากแรงเสียดทาน	Pa
ΔP_g	ค่าความดันลดเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก	Pa

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการสร้างชุดทดลองหาค่าความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ต่างๆ ในเทอร์โมไซฟอนของระบบน้ำร้อน โดยใช้พลังงานความร้อนจากชุดทำความร้อนแบบปรับค่าได้ ซึ่งความสัมพันธ์ทางพารามิเตอร์ที่จะทำการศึกษาคืออัตราการไหลเชิงมวลของน้ำร้อนในระบบ ภายใต้เงื่อนไขความร้อนต่อพื้นที่และขนาดของท่อที่มีขนาดต่างๆกัน เพื่อนำความรู้หรือผลการวิจัยที่ได้ไปประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมผลิตหม้อไอน้ำและอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ เพราะทั้งสองอุตสาหกรรมนี้จะใช้หลักการของเทอร์โมไซฟอน โดยอุตสาหกรรมผลิตหม้อไอน้ำ จะเกี่ยวกับอัตราการผลิตไอน้ำที่มีผลต่อต้นทุนของเชื้อเพลิงที่ใช้สันดาปเพื่อสร้างพลังงานความร้อนให้แก่ในส่วนอุตสาหกรรมทางด้านอิเล็กทรอนิกส์นั้น จะต้องใช้หลักการดังกล่าวนี้ไปหล่อเย็นระบบอิเล็กทรอนิกส์ด้วยน้ำ ซึ่งจะเพิ่มเติมจากเดิมที่ใช้อากาศเพียงอย่างเดียว จากการวิจัยต่างประเทศให้บทความวิจัยดังกล่าวว่า กรณีที่เป็นด้านอิเล็กทรอนิกส์ระบบใหญ่ๆ บางครั้งใช้อากาศระบายความร้อนเพียงอย่างเดียวไม่เพียงพอ เพราะจะทำให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ร้อนและมีอายุการใช้งานสั้นลง ด้วยเหตุนี้ จึงต้องมีการระบายความร้อนด้วยน้ำร่วมด้วย โดยใช้หลักการของเทอร์โมไซฟอน

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนต่อพื้นที่กับอัตราการไหลเชิงมวลของน้ำ
2. เพื่อวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนต่อพื้นที่กับค่าเรย์โนลด์
3. เพื่อวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนต่อพื้นที่กับคุณภาพไอน้ำ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ความร้อนสูงสุด 1.3 kW/m^2 และสามารถปรับได้
2. วิเคราะห์และเปรียบเทียบต่อ 2 ขนาดที่ความยาวท่อเท่ากัน

1.4 ขั้นตอนการดำเนินการ

1. ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. สร้างชุดทดลอง

3. ทำการทดลอง
4. วิเคราะห์การทดลอง
5. สรุปผลการวิเคราะห์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงความสัมพันธ์ทางพารามิเตอร์ของเทอร์โมไซฟอน
2. สามารถนำความรู้ที่ได้ไปประยุกต์ใช้กับระบบหล่อเย็นในวงจรอิเล็กทรอนิกส์
3. สามารถนำความรู้ที่ได้ไปประยุกต์ใช้กับการออกแบบหม้อไอน้ำ

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. J. Zhang and J.Hugenroth, 2003, Exploration of the Theoretical Limit of Thermosyphon Cooling System, Volume 15(41-50).

ทำการศึกษาเกี่ยวกับการหาความสัมพันธ์ของความร้อนต่อพื้นที่และความดันลดในแต่ละช่วงในระบบของเทอร์โมไซฟอน โดยจำลองชุดทดสอบเสมือนว่าเป็นการระบายความร้อนให้แก่ชุดวงจรในคอมพิวเตอร์ในระบบใหญ่ๆที่มีการระบายความร้อนด้วยอากาศไม่เพียงพอ จากการทดสอบจะพบว่าที่ความร้อนต่อพื้นที่ตั้งแต่ 100 W/m^2 ค่าความดันลดในแต่ละส่วนในระบบค่อนข้างคงที่

2. H.Hiroshi., Z.ZhengGuo and T. Nobuo., 2004, Flow and Heat Transfer Characteristics of a Natural Circulation Evaporative Cooling System for Electronic Components., Electronic Packaging, Volume 126(317-325).

ทำการศึกษาเกี่ยวกับการไหลและการถ่ายเทของระบบหล่อเย็นแบบการไหลอิสระของระบบอิเล็กทรอนิกส์ ในวงจรทดสอบทั้งแนวนอนและแนวตั้งที่มีส่วนประกอบด้วยเครื่องระเหยและเครื่องควบแน่น

- การทดสอบมีการขยายตัวของยางที่ท่อ ทำให้ความดันบางส่วนในระบบสูญเสียไป
- อัตราการไหลของ FC-72 อยู่ในช่วง $51\text{-}72 \text{ g/min}$ ที่ความร้อน $65\text{-}270 \text{ W}$ สำหรับช่วงการระเหย สำหรับอัตราการไหลจะสัมพันธ์กับระยะความสูงคือถ้าความสูง 250 mm จะไหล 155 g/min และถ้าความสูง 450 mm จะไหล 270 g/min
- การไหลขึ้นในแนวตั้งแบบอิสระในช่วงเปลี่ยนสถานะที่ช่วงความสูงของท่อในแนวตั้งของท่อจะมีความผันผวนกว่าท่อสั้น

3. K. Rahmatollah, 2005, Pressure Drop in Riser and Evaporator in an Advanced Two-Phase Thermosyphon Loop., Refrigeration., 28 (725-734).

เป็นการทดลองเพื่อหาความดันลดของเครื่องระเหยและท่อยืนในระบบเทอร์โมไซฟอน โดยจะถูกรออกแบบเพื่อช่วยหล่อเย็น จะประกอบด้วยท่อทองแดงขึ้น 7,5,4,3 และ1 ท่อ ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $1.5, 1.9, 2.5, 3.5$ และ 6 mm เป็นต้น ทดสอบที่ 22.4 kW/m^2 สำหรับการทดสอบความดันลดของท่อยืน ความแตกต่างของฟังก์ชันความดันลดและความสัมพันธ์ของความ

เป็นไอ 2 เฟส หล่อเย็นอิเล็กทรอนิกส์ใช้ช่องเล็กและ Heat Sink ระหว่างความดันลดและอัตราการไหล

4. S.A. Nada, 2004, Performance of a Two-Phase Closed Thermosyphon Solar Collector with a Shell and Tube Heat Exchanger., Applied Thermal Engineering., 24 (1959-1968).

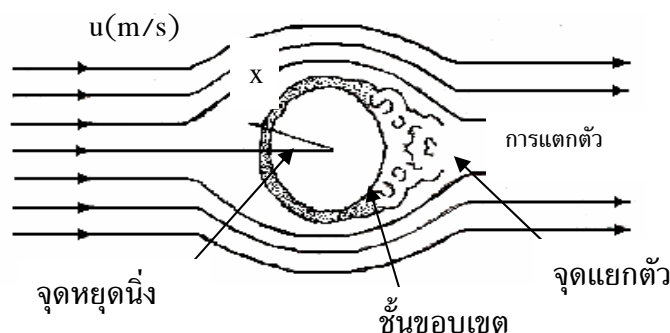
เป็นการทดลองเพื่อศึกษาเทอร์โมไซฟอน 2 เฟส ที่มีแผงรับแสงอาทิตย์ เพื่อทำระบบน้ำร้อน เพื่อศึกษาอัตราการไหลและความแตกต่างของอุณหภูมิ รวมถึงพื้นที่ของท่อ สามารถสรุปได้ดังนี้

- ทดสอบโดยใช้มาตรฐานของ ASHRAE สำหรับ Flat Plate ($\dot{m}_w = 0.02A, \text{kg/s}$)
- ทดสอบหาอัตราการไหลและจำนวนท่อที่เหมาะสม ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพของระบบสูงสุด
- เทอร์โมไซฟอนของระบบนี้เป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ ที่ใช้วัสดุที่ราคาถูก ซึ่งจากการศึกษาพบว่าได้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่เป็นแบบท่อซ้อน

2.2 การพาความร้อนแบบบังคับ

การพาความร้อนแบบบังคับที่มีการไหลผ่านภายนอกวัตถุ และการไหลภายในวัตถุนั้นย่อมมี การพาความร้อนแบบบังคับ หมายถึงการถ่ายเทความร้อนระหว่างผิววัตถุกับของไหล โดยที่อุณหภูมิของของไหลไม่เท่ากับอุณหภูมิของวัตถุ เช่น ปิ๊ม และพัดลม เป็นต้น ในนี้จะขอกล่าวถึงการไหลภายนอกผ่านผิววัตถุที่มีลักษณะที่เป็นท่อเดี่ยว

การพาความร้อนแบบบังคับผ่านผิววัตถุที่เป็นท่อเดี่ยว เป็นการไหลของของไหลที่ผ่านท่อเดี่ยวที่มีรูปร่างทรงกระบอก ซึ่งของไหลที่ผ่านท่อในทิศทางตั้งฉากกับผิวของทรงกระบอก ก็เหมือนกับการที่นำท่อไปวางขวางทางเดินของน้ำ จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของการไหล ดัง รูปที่ 2-2



ภาพที่ 2-1 การเปลี่ยนแปลงของการไหลเมื่อของไหลไหลผ่านท่อเดี่ยว

การคำนวณหาแรงหน่วงอันเนื่องมาจากของไหลไหลผ่านท่อเดี่ยวสามารถหาได้จากสมการ คือ

$$F_d = C_d A \rho \frac{u^2}{2} \quad (2-1)$$

โดยที่ C_d สามารถหาได้จากภาพที่ 2-1

การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ย กรณีที่ของไหลไม่ใช่อากาศโดย Hilpert

$$\overline{Nu} = C Re^n Pr^{1/3} \quad (2-2)$$

จะได้
$$\bar{h} = \frac{k \overline{Nu}_L}{d_o} \quad (2-3)$$

จากความสัมพันธ์เบื้องต้นในการหาอัตราการถ่ายเทความร้อน คือ

$$Q = hA(T_w - T_\infty) \quad (2-4)$$

หรือ
$$q = h(T_w - T_\infty) \quad (2-5)$$

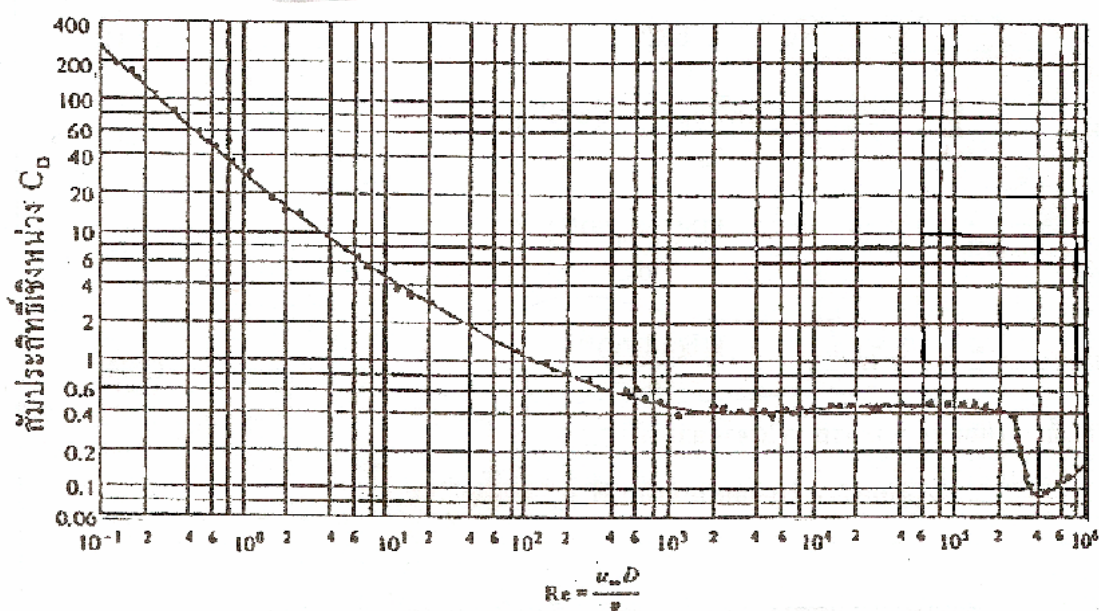
$$\bar{h} = \frac{k[c(ud_o/\mu)^n Pr^{1/3}]}{d_o} \quad (2-6)$$

หรือ
$$\bar{h} = \frac{k[c(ud_o/\nu)^n Pr^{1/3}]}{d_o} \quad (2-7)$$

ค่า c, μ, ν, Pr จากตารางภาคผนวก ผ.1 ที่ $T_f = \frac{T_w + T_\infty}{2}$

โดยที่

Q	คือ อัตราการถ่ายเทความร้อน	(W)
q	คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนต่อพื้นที่	(W/m ²)
h	คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน	(W/m ² °C , W/m ² K)
T_w	คือ อุณหภูมิที่ผิววัตถุ	(°C หรือ K)
T_∞	คือ อุณหภูมิของของไหล	(°C หรือ K)
A	คือ พื้นที่วัตถุในทิศทางที่ขนานกับการเคลื่อนที่ของของไหล	(m ²)



ภาพที่ 2-2 สำหรับหาค่าสัมประสิทธิ์แรงหน่วงเมื่อทราบค่าเรย์โนลด์

ตารางที่ 2-1 แสดงค่าของ c และ n สำหรับสมการที่ (2-6, 2-7)

Re	C	n
1- 4	0.989	0.33
4 - 40	0.911	0.385
40 – 4,000	0.683	0.466
4,000 – 40,000	0.193	0.618
40,000 – 250,000	0.0266	0.805

การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ย กรณีที่ของไหลเป็นอากาศโดย Hilpert

$$\overline{Nu} = bRe_c^m \quad (2-8)$$

จะได้
$$h = \frac{k\overline{Nu}_d}{d_o} = \frac{k[bRe^m]}{d_o} \quad (2-9)$$

จากสมการ
$$Re = \frac{u d_o}{\mu}, \nu = \frac{\mu}{\rho}$$

จะได้

$$h = \frac{k[b(ud_o / v)^m]}{d_o} \quad (2-10)$$

จากสมการ $Re = \frac{ud}{v}$ จะได้ $h = \frac{k[b(ud_o / v)^m]}{d_o} \quad (2-11)$

โดยที่ b และ m จากตารางที่ 2-2

$$k, \mu, v \text{ จากตารางภาคผนวก ผ.1 ที่ } T_f = \frac{T_w + T_\infty}{2}$$

ตารางที่ 2-2 แสดงค่าของ b และ m สำหรับสมการที่ (2-10, 2-11)

Re	b	m
1 - 4	0.891	0.33
4 - 40	0.821	0.385
40 - 4,000	0.615	0.466
4,000 - 40,000	0.174	0.618
40,000 - 250,000	0.0239	0.805

2.3 กาลักความร้อน หรือเทอร์โมไซฟอน

กาลักความร้อนเป็นกระบวนการในการพาความร้อนขึ้นไปในแนวดิ่ง คือ ความหนาแน่นของของไหลที่เคลื่อนตัวในแนวดิ่ง โดยอาศัยข้อดีของสนามแรงโน้มถ่วงของโลกที่จะเกิดขึ้นตามธรรมชาติคือ เมื่อความร้อนที่เกิดจากแสงอาทิตย์จะทำให้เกิดอากาศอุ่นขึ้น ภายใต้อากาศที่เย็นกว่า และมีความแตกต่าง ของอุณหภูมิเพียงเล็กน้อยความร้อนจะถูกส่งผ่านขึ้นไปด้านบน โดยการนำความร้อน ในกาลักความร้อนจะเป็นการพาความร้อนในรูปแบบการหมุนเวียนโดยพิจารณาถึงการควบแน่น หรือการระเหยที่เกิดขึ้นเนื่องจากความร้อน โดยของไหลที่มีความหนาแน่นมากกว่าจะถูกเร่งให้ลงด้านล่าง และของไหลที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าจะเคลื่อนที่สวนขึ้นไปในทิศทางตรงกันข้ามโดยอาศัยความแตกต่างของอุณหภูมิ เราสามารถใช้ข้อดีข้อนี้มาใช้ในการถ่ายเทความร้อนจากสถานที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งได้ เราสามารถใช้ท่อกาลักความร้อนนี้สร้างขบวนการในการพาความร้อนต่างๆ ที่มีประสิทธิภาพมาก และสามารถส่งถ่ายพลังงานได้ดี โดยความสามารถในการถ่ายเท

ความร้อนของกัลกความร้อนแบบท่อนั้น เกิดเนื่องจากการไหลเวียนที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงลอยตัว ซึ่งเป็นผลมาจาก ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างปลายทั้งสองด้าน และจะไหลทดแทนกัน คือของไหลที่เย็นกว่าจะไหลไปตามความแตกต่างของอุณหภูมิ ในขณะที่ของไหลที่ร้อนกว่านั้นจะไหลสวนทางไป

และการไหลของของไหลที่เกิดขึ้นภายในท่อก็จะพบว่ามักจะเกิดความดันลดเกิดขึ้น ซึ่งในการเกิดขึ้นแต่ละช่วงในท่อจะมีลักษณะการเกิดที่สาเหตุเนื่องจากเหตุผลที่ต่างๆ กันพอจะอธิบายและทำการคำนวณเพื่อหาค่าความดันลดได้ดังนี้

2.4 การคำนวณหาความดันลด

การคำนวณหาความดันลดทุกจุดที่เกิดขึ้นทั้งหมด ในชุดทดสอบการไหลอิสระแบบเทอร์โมไซฟอน มีการคำนวณหาความดันลดที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงดังนี้

2.4.1 คำนวณความเร็วในการไหลของลูกลอย

สมการคือ

$$v = \frac{s}{t} \quad (2-12)$$

โดยที่

v คือ ความเร็วของลูกลอย (m/s)

s คือ ระยะทางการเคลื่อนที่ลูกลอย (m)

t คือ เวลาการเคลื่อนที่ของลูกลอย (s)

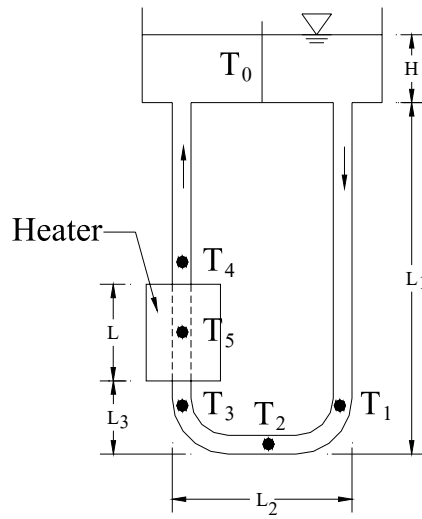
2.4.2 การคำนวณหาอัตราการถ่ายเทความร้อนที่เข้าสู่ท่อทองแดงต่อพื้นที่

$$q = \frac{\dot{Q}}{\pi \times d_o \times L} \quad (2-13)$$

$$\text{โดยที่} \quad \dot{Q} = \dot{m}C_p\Delta T \quad (2-14)$$

$$\text{และ} \quad q = \frac{\dot{m}C_p\Delta T}{\pi d_o L} \quad (2-15)$$

2.4.3 การคำนวณหาความดันดลที่เกิดขึ้นทั้งหมดภายในชุดทดสอบ



ภาพที่ 2-3 จุดติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล

สมการคือ

$$\Delta P_{\text{Total}} = \rho_{\text{fg}} (H + L_1 - L_3) \quad (2-16)$$

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{Total}} = & \Delta P_{f,0 \rightarrow 1} + \Delta P_{f,1 \rightarrow 2} + \Delta P_{f,2 \rightarrow 3} + \Delta P_{f,3 \rightarrow 4} \\ & + \Delta P_{f,4 \rightarrow 0} + \Delta P_{a,3 \rightarrow 4} + \Delta P_{g,3 \rightarrow 4} + \Delta P_{g,4 \rightarrow 0} \end{aligned} \quad (2-17)$$

$$\Delta P_{\text{Total}} = \Delta P_{f,0 \rightarrow 3} + \Delta P_{f,3 \rightarrow 4} + \Delta P_{a,3 \rightarrow 4} + \Delta P_{g,3 \rightarrow 4} + \Delta P_{f,4 \rightarrow 0} + \Delta P_{g,4 \rightarrow 0} \quad (2-17')$$

โดยที่ H คือ ความสูงของระดับน้ำที่อยู่ภายในถังพักน้ำ (m)

L_1 คือ ความยาวของท่อทองแดง (m)

L_3 คือ ความยาวของท่อทองแดงจากจุด 2-3 (m)

2.4.4 การคำนวณหาความดันตกที่เกิดขึ้นเนื่องจากความต้านทานการไหลสำหรับของไหลที่มีสถานะเดียวเกิดขึ้นในระหว่างจุด $0 \rightarrow 3$

$$\Delta P_{f,0 \rightarrow 3} = \Delta P_{f,0 \rightarrow 1} + \Delta P_{f,1 \rightarrow 2} + \Delta P_{f,2 \rightarrow 3} \quad (2-18)$$

$$\Delta P_{f,0 \rightarrow 1} + \Delta P_{f,1 \rightarrow 2} + \Delta P_{f,2 \rightarrow 3} = f \left[\frac{\rho_f}{2} \right] \left[\frac{\dot{m}}{\rho_f \frac{\pi d_i^2}{4}} \right]^2 \left[\frac{L_1 + L_2 + L_3}{d_i} \right] \quad (2-19)$$

ที่	$f = \frac{64}{Re_d}$	สำหรับของไหลที่	$Re_d < 2000$
	$f = 0.3 Re_d^{0.25}$	สำหรับของไหลที่	$2000 < Re_d < 2 \times 10^4$
	$f = [0.79 \ln Re_d - 1.64]^{-2}$	สำหรับของไหลที่	$2 \times 10^4 < Re_d < 5 \times 10^6$

2.4.5 การคำนวณหาความดันตกที่เกิดขึ้นเนื่องจากความต้านทานการไหลที่จุด $3 \rightarrow 4$
ลักษณะของของไหลที่มีสองสถานะ

$$\Delta P_{f,3 \rightarrow 4} = 2 f_{TP} v_f \left[\frac{\dot{m}}{A_c} \right]^2 \left[1 + \frac{x_L}{2} \frac{v_{fg}}{v_f} \right] \frac{L}{d_i} \quad (2-20)$$

โดยที่

A_c	คือ พื้นที่ส่วนที่ได้รับความร้อน (m^2)
d_i	คือ ขนาดของท่อที่ได้รับความร้อน (m)
f_{TP}	คือ ความต้านทานที่เกิดขึ้นกับของไหล 2 สถานะ (0.003)

2.4.6 การคำนวณหาความดันตกเนื่องจากความต้านทานที่เกิดขึ้นระหว่างจุด $4 \rightarrow 0$

$$\Delta P_{f,4 \rightarrow 0} = 2 f_{TP} v_f \left[\frac{\dot{m}}{\rho_f \frac{\pi d_i^2}{4}} \right]^2 \left[1 + x_L \frac{v_{fg}}{v_f} \right] \left[\frac{L_1 - L_3 - L}{d_i} \right] \quad (2-21)$$

2.4.7 การคำนวณหาค่าคุณภาพไอน้ำของของไหล

$$x_L = \frac{g A_s}{\dot{m} h_{fg}} \quad (2-22)$$

2.4.8 การคำนวณความดันตกเนื่องจากความเร็วที่เกิดจากความเร่งของของไหลเกิดขึ้นที่ระหว่าง
จุด 3→4

$$\Delta P_{a,3 \rightarrow 4} = \left[r_{\text{area}} v_{fg} x_L + (1 - r_{\text{area}}) v_f \right] \left[\frac{\dot{m}}{A_c} \right]^2 \quad (2-23)$$

ความดันตกลักษณะนี้จะเกิดขึ้นที่ส่วนใดส่วนหนึ่งได้รับความร้อนเท่านั้น

2.4.9 การคำนวณความดันตกเนื่องจากความเร่งของแรงโน้มถ่วงในช่วงที่เกิดการไหลของของ
ไหลแบบ 2 สถานะ

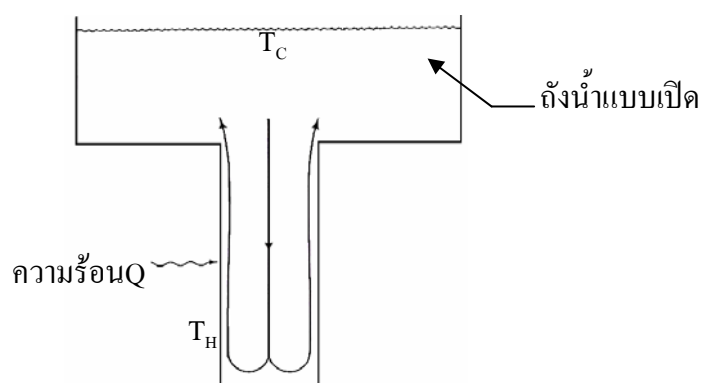
$$\Delta P_{g,3 \rightarrow 4} = \frac{gL}{v_{fg} x_L} \ln \left[1 + x_L \frac{v_{fg}}{v_f} \right] \quad (2-21)$$

และ

$$\Delta P_{g,4 \rightarrow 0} = \frac{g(H + L_1 - L_3 - L)}{v_f + x_L v_{fg}} \quad (2-22)$$

2.5 กาลักความร้อนสถานะเดียว

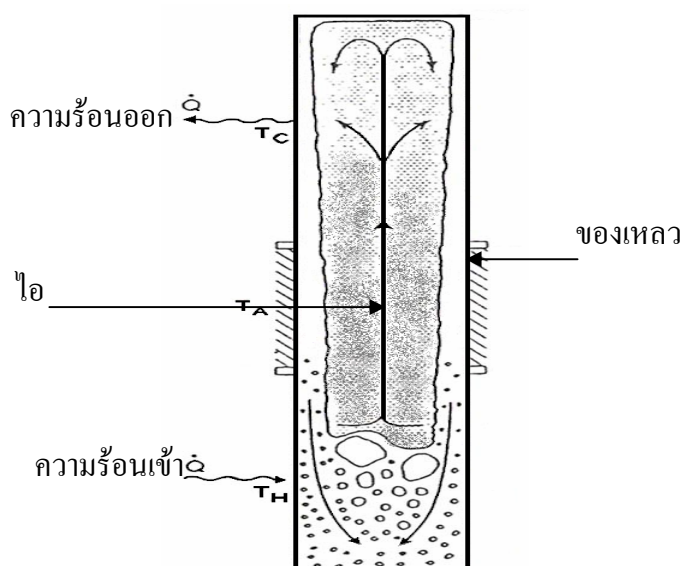
เป็นการพิจารณาถึงแรงลอยตัวเนื่องจากความร้อนโดยใช้กฎการเย็นตัวของนิวตัน ว่าอัตราการเย็นตัวของวัตถุใดๆ จะเป็นสัดส่วนกับอุณหภูมิของมันเองวัดเทียบกับสิ่งแวดล้อม พิจารณาในรูปของท่อแนวดิ่งแบบเปิด จัดว่าเป็นกาลักความร้อนแบบง่าย หรือแบบสถานะเดียวเป็นชนิดซึ่งสามารถนำไปสัมผัสกับอุปกรณ์ในรูปแบบต่าง ๆ ได้มากที่สุดตามปกติแล้วท่อในแนวดิ่งที่ปิดด้านล่าง และได้รับความร้อนแต่ด้านบนนั้นจะเปิดอยู่ ซึ่งอาจจะติดอยู่กับแหล่งของเหลวที่เย็นกว่า ดังที่แสดงในภาพที่ 2-4 ของไหลที่ร้อนกว่าที่ติดอยู่กับผนังก็จะไหลขึ้นในช่องว่างรูปวงแหวนที่เกิดขึ้น และทำให้เกิดช่องว่างแกนกลาง ซึ่งของไหลที่เย็นกว่านี้จะไหลดังลงมาในอัตราเดียวกัน การไหลเวียนทั้งหมดก็จะเกิดขึ้นเนื่องจากแรงลอยตัวเนื่องจากความร้อนสวนทางกับแรงโน้มถ่วงนั่นเอง



ภาพที่ 2-4 กลไกความร้อนแบบเปิดแนวตั้ง

2.6 กลไกความร้อนสองสถานะ

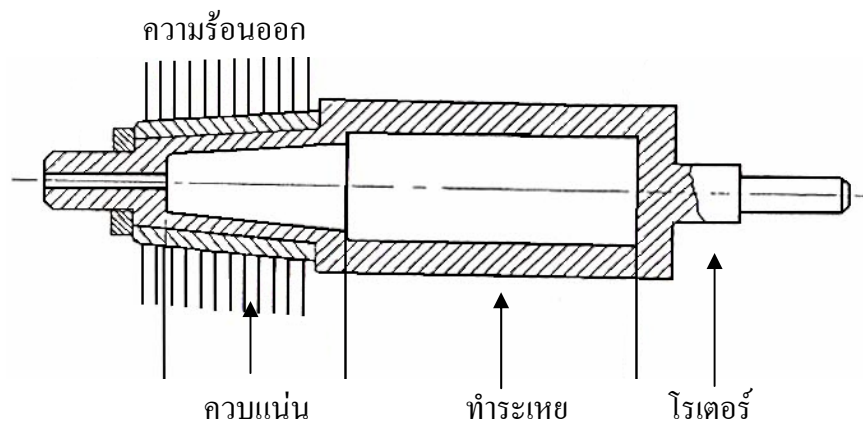
เป็นการพิจารณาถึงกลไกความร้อนที่เป็นสองสถานะ ซึ่งจะเดือด และการควบแน่นเกิดขึ้น ส่วนสำคัญแบบสองสถานะนั้นมีดังนี้ การระเหยก็มีส่วนสำคัญในส่วนรับความร้อนใน ขณะที่ส่วนทำความเย็นนั้นก็จะมีการควบแน่นขึ้น ความแตกต่างของอุณหภูมิ จะทำให้เกิดแรงลอยตัวเนื่องจากความร้อนแต่ถ้ามันค่อนข้างจะมีผลน้อยมากๆ



ภาพที่ 2-5 แบบจำลองกลไกความร้อนสองสถานะแนวตั้ง

2.7 การลักความร้อนแบบหมุน

การลักความร้อนแบบท่อที่ทำงานภายใต้สนามแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ที่เกิดขึ้นจากตัวของอุปกรณ์ทำงาน



ภาพที่ 2-6 การลักความร้อนแบบร่วมศูนย์กลางในแกนหมุนมอเตอร์

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 ชุดทดสอบการไหลอิสระแบบเทอร์โมไซฟอน

ชุดทดสอบจะอาศัยหลักการทางธรรมชาติ จะทำการศึกษา ทดลองและเปรียบเทียบความสัมพันธ์ทางพารามิเตอร์ต่างๆ ภายในท่อทองแดงในแต่ละขนาดต่อไปนี้

- ท่อทองแดงขนาด 9.52 mm (3/8 in), ความยาว 50 cm
- ท่อทองแดงขนาด 15.87 mm (5/8 in), ความยาว 50 cm

เมื่อได้ผลการทดลองแล้วจะทำการคำนวณหาค่าความดันตกที่เกิดขึ้นในแต่ละขนาด โดยการทำงานจะแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน ดังนี้คือ

- อุปกรณ์เครื่องมือวัดที่ใช้ในการเก็บข้อมูล
- การสร้างชุดทดสอบการไหลอิสระแบบเทอร์โมไซฟอน
- การกำหนดจุดวัดอุณหภูมิที่ท่อทองแดง
- คำนวณ

3.2 อุปกรณ์เครื่องมือวัดที่ใช้ในการเก็บข้อมูล

- เทอร์โมคัปเปิลชนิด K ทำหน้าที่วัดอุณหภูมิในสถานะต่างๆ ใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K



ภาพที่ 3-1 เทอร์โมคัปเปิล

- ชุดแสดงค่าอุณหภูมิแบบดิจิตอล ทำหน้าที่แสดงค่าอุณหภูมิเป็นแบบตัวเลขหรือดิจิตอล ในแต่ละจุดที่ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลและควบคุมกระแสไฟฟ้าของฮีตเตอร์ เมื่อถึงอุณหภูมิที่ตั้งค่าไว้ เช่น ตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 50°C เมื่อฮีตเตอร์มีอุณหภูมิถึงค่าที่กำหนดคือ 50°C ก็จะตัดกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับฮีตเตอร์ทันที



ภาพที่ 3-2 ตัวแสดงค่าอุณหภูมิแบบดิจิตอล

3.3 การสร้างชุดทดสอบการไหลอิสระแบบเทอร์โมไซฟอน

- ทำการติดท่อทองแดงกับถังพักน้ำ



ภาพที่ 3-3 ลักษณะของถังพักน้ำ

- ทำการสร้างกล่องใส่ชุดอุปกรณ์เครื่องมือวัดและสวิตช์ต่างๆ



ภาพที่ 3-4 กล่องใส่อุปกรณ์เครื่องมือวัด และสวิตช์ต่างๆ

- ชุดฮีตเตอร์ที่ใช้มีข้อมูลดังนี้
 - ชุดฮีตเตอร์ขนาด 770 W
 - แรงดันไฟฟ้า 220 V.
 - กระแสไฟฟ้า 3.5 Amp
 - ความถี่ 50 Hz



ภาพที่ 3-5 ชุดฮีตเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ

บทที่ 4

ผลการศึกษา

4.1 สมการที่ใช้ในการคำนวณ

ทำการเก็บผลของอัตราการไหลที่อุณหภูมิของแต่ละจุดในชุดทดสอบของท่อทองแดงทั้ง 2 ขนาด แล้วนำค่าเหล่านี้มาคำนวณหาอัตราการถ่ายเทความร้อนและค่าความดันตกที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงของท่อทองแดงแล้วนำค่าที่ได้นี้มาคำนวณและสรุปหาความสัมพันธ์

การคำนวณค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังท่อทองแดงคิดต่อพื้นที่ โดยใช้

$$q = \frac{\dot{Q}_{th}}{A} \quad (4-1)$$

$$q = \left[\frac{\dot{m}C_p\Delta T}{\pi d_o L} \right] \quad (4-2)$$

การคำนวณหาค่าความดันตกที่เกิดขึ้นภายในแต่ละช่วงของชุดทดสอบ

$$\Delta P_{Total} = \rho_{fg} (H + L_1 - L_3) \quad (4-3)$$

$$\begin{aligned} \Delta P_{Total} = & \Delta P_{f,0 \rightarrow 1} + \Delta P_{f,1 \rightarrow 2} + \Delta P_{f,2 \rightarrow 3} + \Delta P_{f,3 \rightarrow 4} \\ & + \Delta P_{f,4 \rightarrow 0} + \Delta P_{a,3 \rightarrow 4} + \Delta P_{g,3 \rightarrow 4} + \Delta P_{g,4 \rightarrow 0} \end{aligned} \quad (4-4)$$

การคำนวณหาค่าความดันตกที่เกิดขึ้นเนื่องจากความต้านทานของของไหลที่มีสถานะเดียวเกิดขึ้นระหว่างจุด 0 → 3

$$\Delta P_{f,0 \rightarrow 1} + \Delta P_{f,1 \rightarrow 2} + \Delta P_{f,2 \rightarrow 3} = f \left[\frac{\rho_f}{2} \right] \left[\frac{\dot{m}}{\rho_f \frac{\pi d_i^2}{4}} \right]^2 \left[\frac{L_1 + L_2 + L_3}{d_i} \right] \quad (4-5)$$

ที่	$f = \frac{64}{Re_d}$	สำหรับของไหลที่	$Re_d < 2000$
-----	-----------------------	-----------------	---------------

$f = 0.3 Re_d^{-0.25}$	สำหรับของไหลที่	$2000 < Re_d < 2 \times 10^4$
------------------------	-----------------	-------------------------------

$$f = [0.79 \ln \text{Re}_d - 1.64]^2 \quad \text{สำหรับของไหลที่} \quad 2 \times 10^4 < \text{Re}_d < 5 \times 10^6$$

การคำนวณหาค่าความดันตกที่เกิดขึ้นภายในท่อทองแดงระหว่างจุด 3 → 4 ลักษณะของไหลมีสองสถานะ เกิดจากสาเหตุต่างๆ ดังต่อไปนี้

การคำนวณความดันตกที่เกิดขึ้นเนื่องจากความต้านทานการไหลระหว่างจุด 3 → 4

$$\Delta P_{f,3 \rightarrow 4} = 2 f_{TP} v_f \left[\frac{\dot{m}}{A_c} \right]^2 \left[1 + \frac{x_L}{2} \frac{v_{fg}}{v_f} \right] \frac{L}{d_i} \quad (4-6)$$

การคำนวณความดันตกเนื่องจากความเร็วที่เกิดจากความเร่งของของไหลที่เกิดขึ้นระหว่างจุด 3 → 4 ความดันตกชนิดนี้จะเกิดขึ้นที่เฉพาะส่วนที่ได้รับความร้อนเท่านั้น

$$\Delta P_{a,3 \rightarrow 4} = \left[r_{area} v_{fg} x_L + (1 - r_{area}) v_f \right] \left[\frac{\dot{m}}{A_c} \right]^2 \quad (4-7)$$

การคำนวณความดันตกเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกเกิดขึ้นระหว่างจุด 3-4

$$\Delta P_{g,3 \rightarrow 4} = \frac{gL}{v_{fg} x_L} \ln \left[1 + x_L \frac{v_{fg}}{v_f} \right] \quad (4-8)$$

การคำนวณความดันตกเนื่องจากสาเหตุต่างๆ เกิดขึ้นระหว่างจุด 4 → 0 ลักษณะของของไหลมีสองสถานะ

การคำนวณความดันตกที่เกิดขึ้นเนื่องจากความต้านทานการไหลระหว่างจุด 4 → 0

$$\Delta P_{f,4 \rightarrow 0} = 2 f_{TP} v_f \left[\frac{\dot{m}}{\rho_f \frac{\pi d_i^2}{4}} \right]^2 \left[1 + x_L \frac{v_{fg}}{v_f} \right] \left[\frac{L_1 - L_3 - L}{d_i} \right] \quad (4-9)$$

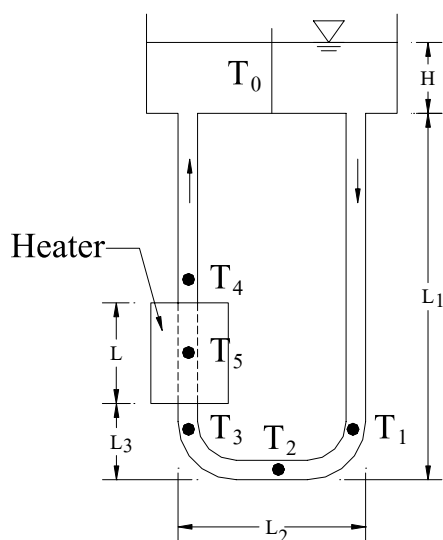
การคำนวณความดันตกเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกเกิดระหว่างจุด 4 → 0

$$\Delta P_{g,4 \rightarrow 0} = \frac{g(H + L_1 - L_3 - L)}{v_f + x_L v_{fg}} \quad (4-10)$$

$$x = \frac{qA_s}{\dot{m}h_{fg}} \quad (4-11)$$

การคำนวณหาความดันตกที่เกิดขึ้นทั้งหมดภายในชุดทดสอบ
จากสมการที่ 2.17

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{Total}} = & \Delta P_{f,0 \rightarrow 1} + \Delta P_{f,1 \rightarrow 2} + \Delta P_{f,2 \rightarrow 3} + \Delta P_{f,3 \rightarrow 4} \\ & + \Delta P_{f,4 \rightarrow 0} + \Delta P_{a,3 \rightarrow 4} + \Delta P_{g,3 \rightarrow 4} + \Delta P_{g,4 \rightarrow 0} \end{aligned} \quad (4-12)$$



ภาพที่ 4-1 ตำแหน่งของฮีตเตอร์และจุดวัดอุณหภูมิที่จุดต่างๆ

4.2 ข้อมูลและผลจากการทดลอง

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองขนาดท่อ 3/8"

ครั้งที่	พารามิเตอร์							
	$T_0 (^{\circ}\text{C})$	$T_1 (^{\circ}\text{C})$	$T_2 (^{\circ}\text{C})$	$T_3 (^{\circ}\text{C})$	$T_4 (^{\circ}\text{C})$	$T_5 (^{\circ}\text{C})$	s(cm)	t (sec)
1	36.5	35.5	35.5	36	37.5	69.5	1.5	22.66
2	36.5	35.5	35.5	36.5	38.5	79.5	1.5	17.165
3	37	35.5	35.5	37	39	90	1.5	17.47
4	37.5	35.5	35.5	37.5	40	100	1.5	22.555
5	37.5	36.5	36	38	40	110	2.5	22.695
6	37.5	36.5	36	38.5	41	120	2.5	25.75
เฉลี่ย	37.083	35.833	35.667	37.250	39.333	94.833	1.833	21.383

ตัวอย่าง : การคำนวณหาค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ผ่านผนังท่อทองแดงต่อพื้นที่และค่าความดันตกที่จุดต่างๆ ที่เกิดขึ้นภายในท่อทองแดง ดังนี้

ข้อมูล คือ

- ท่อทองแดงขนาด 9.525 mm (3/8 in) , ความยาว 50 cm
- ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน(d_i) = 1.0211 cm
- ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอก(d_o) = 1.27 cm
- อุณหภูมิ ที่จุดต่างๆ ของชุดทดสอบ

$$T_0 = 36.5 \quad ^{\circ}\text{C}$$

$$T_1 = 35.5 \quad ^{\circ}\text{C}$$

$$T_2 = 35.5 \quad ^{\circ}\text{C}$$

$$T_3 = 36.5 \quad ^{\circ}\text{C}$$

$$T_4 = 38.5 \quad ^{\circ}\text{C}$$

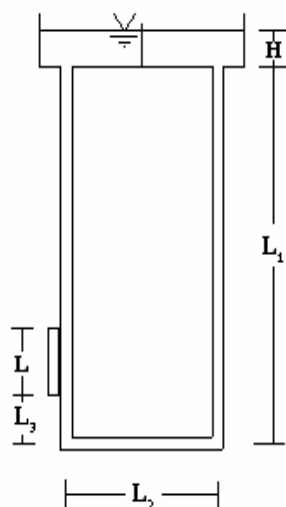
$$T_5 = 79.5 \quad ^{\circ}\text{C}$$

- เวลาเคลื่อนที่ของลูกกลอย 17.2 s
- ระยะทางเคลื่อนที่ลูกกลอย 1.5 cm

คำนวณความเร็วในการไหลของลูกกลอย

$$\begin{aligned}\text{สูตร} \quad v &= \frac{s}{t} \\ v &= \frac{1.5}{17.2 \times 100} \\ v &= 0.000907 \text{ m/s}\end{aligned}$$

ค่าตัวแปรจากชุดทดสอบ



$$\begin{aligned}H &= 2.7 \text{ cm} \\ L_1 &= 50 \text{ cm} \\ L_2 &= 14 \text{ cm} \\ L_3 &= 7.5 \text{ cm} \\ L &= 14 \text{ cm}\end{aligned}$$

การหาค่าพื้นที่หน้าตัดของช่องนำผ่าน (ก x ย) (A)

$$A = 0.03 \times 0.006$$

$$A = 0.00018 \text{ m}^2$$

จากสมการที่ (2-15) การคำนวณหาอัตราการถ่ายเทความร้อนที่เข้าสู่ท่อทองแดงต่อหน่วยพื้นที่

$$q = \left[\frac{\dot{m} C_p \Delta T}{\pi d_o L} \right] \quad (4-2)$$

$$q = \left[\frac{0.00018 \times 0.000163 \times 1000 \times 4.18 \times (38.5 - 36.5)}{\pi \times 0.01905 \times 0.14} \right]$$

$$q = 0.244552 \text{ kW/m}^2 \text{ (0.0244552 W/cm}^2 \text{)}$$

จากสมการที่ (2-18,2-19) การคำนวณหาค่าความดันตกเนื่องจากแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างจุด 0→3 ของไหลจะเป็นสถานะเดียว

$$\Delta P_{f,0 \rightarrow 1} + \Delta P_{f,1 \rightarrow 2} + \Delta P_{f,2 \rightarrow 3} = f \left[\frac{\rho_f}{2} \right] \left[\frac{\dot{m}}{\rho_f \frac{\pi d_i^2}{4}} \right]^2 \left[\frac{L_1 + L_2 + L_3}{d_i} \right] \quad (4-5)$$

$$\Delta P_{f,0 \rightarrow 3} = 4.867 \left[\frac{993.43}{2} \right] \left[\frac{0.000163}{993.43 \times \left(\frac{\pi \times 0.010211^2}{4} \right)} \right]^2 \left[\frac{50 + 14 + 7.5}{1.0211} \right]$$

$$\Delta P_{f,0 \rightarrow 3} = 340 \text{ Pa}$$

การคำนวณหาค่าโรโนลย์

$$Re = \frac{v d_i}{\nu}$$

โดยที่ ค่าที่เป็ดได้จากตารางไอน้ำ (จากตารางภาคผนวก ผ.1)

$$\Delta T_{0 \rightarrow 3} = \frac{T_0 + T_3}{2}$$

$$\Delta T_{0 \rightarrow 3} = \frac{36.5 + 36.5}{2} = 36.5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\rho_f = 993.43 \text{ kg/m}^3$$

$$\nu = 7.05 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\text{ดังนั้น} \quad Re = \frac{0.000907 \times 1.0211 \times 10^{-2}}{7.05 \times 10^{-7}}$$

$$Re = 13.15$$

$$f = \frac{64}{Re} \quad \text{ที่ของไหล } Re < 2000$$

$$f = \frac{64}{13.15}$$

$$f = 4.867$$

การหาค่าพื้นที่ผิวในส่วนที่ท่อทองแดงได้รับความร้อน (A_s)

$$A_s = \pi d_o L$$

$$A_s = \pi \times 0.0127 \times 0.14$$

$$A_s = 0.005583 \text{ m}^2$$

การคำนวณหาค่าพื้นที่หน้าตัดของท่อทองแดงที่ได้รับความร้อน (A_c)

$$A_c = \frac{\pi}{4} d_i^2$$

$$A_c = \frac{\pi}{4} \times 0.010211^2$$

$$A_c = 8.18 \times 10^{-5} \text{ m}^2$$

การคำนวณหาค่าความดันลดเนื่องจากสาเหตุต่างๆ ที่เกิดขึ้นในระหว่างจุด 3 → 4

จากสมการที่ (2-20) การคำนวณหาค่าความดันลดเนื่องจากแรงเสียดทานในระหว่างจุด 3 → 4

$$\Delta P_{f,3 \rightarrow 4} = 2 f_{TP} v_f \left[\frac{\dot{m}}{A_c} \right]^2 \left[1 + \frac{x_L}{2} \frac{v_{fg}}{v_f} \right] \frac{L}{d_i} \quad (4-6)$$

$$\Delta P_{f,3 \rightarrow 4} = 2 \times 0.003 \times 0.001007 \left[\frac{0.000163}{8.18 \times 10^{-5}} \right]^2 \left[1 + \frac{0.003456}{2} \times \frac{22.369}{0.001007} \right] \frac{14}{1.0211}$$

$$\Delta P_{f,3 \rightarrow 4} = 0.012717 \text{ Pa}$$

จากสมการที่ (2-23) การคำนวณหาค่าความดันลดเนื่องจากความเร็วของของไหลในระหว่างจุด 3 → 4

$$\Delta P_{a,3 \rightarrow 4} = \left[r_{area} v_{fg} x_L + (1 - r_{area}) v_f \right] \left[\frac{\dot{m}}{A_c} \right]^2 \quad (4-7)$$

$$\Delta P_{a,3 \rightarrow 4} = \left[1 \times 22.369 \times 0.003465 + (1 - 1) \times 0.001007 \right] \left[\frac{0.000163}{8.18 \times 10^{-5}} \right]^2$$

$$\Delta P_{a,3 \rightarrow 4} = 0.3068 \text{ Pa}$$

จากสมการที่ (2-24) การคำนวณหาค่าความดันตกเนื่องจากความเร่งของแรงโน้มถ่วงในระหว่างจุด 3 → 4

$$\Delta P_{g,3 \rightarrow 4} = \frac{gL}{v_{fg} x_L} \ln \left[1 + x_L \frac{v_{fg}}{v_f} \right] \quad (4-8)$$

$$\Delta P_{g,3 \rightarrow 4} = \frac{9.81 \times 0.14}{22.369 \times 0.003465} \ln \left[1 + 0.003465 \times \frac{22.369}{0.001007} \right]$$

$$\Delta P_{g,3 \rightarrow 4} = 77.19 \text{ Pa}$$

โดยที่ ค่าที่เปิดได้จากตารางไอน้ำ (จากตารางภาคผนวก ผ.1)

$$\text{ที่} \quad \Delta T_{3 \rightarrow 4} = \frac{T_3 + T_4}{2}$$

$$\Delta T_{3 \rightarrow 4} = \frac{36.5 + 38.5}{2} = 37.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$v_f = 0.001007 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$v_{fg} = 22.369 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$h_{fg} = 2412.65 \text{ kJ/kg}$$

หาค่าคุณภาพไอน้ำของของไหลที่เกิดขึ้นในระหว่างจุดที่ 3 → 4

$$x_{L,3 \rightarrow 4} = \frac{gA_s}{mh_{fg}}$$

$$x_{L,3 \rightarrow 4} = \frac{9.81 \times 5.583 \times 10^{-3}}{0.000163 \times 2412.65}$$

$$x_{L,3 \rightarrow 4} = 0.003465 \text{ (0.3465\%)}$$

อัตราส่วนขนาดของพื้นที่ท่อทางเข้ารับความร้อนต่อพื้นที่ท่อทางออก

$$r_{\text{area}} = \frac{A_{\text{in}}}{A_{\text{out}}}$$

$$r_{\text{area}} = \frac{1.27 \times 10^{-4}}{1.27 \times 10^{-4}}$$

$$r_{\text{area}} = 1$$

การคำนวณความดันลดเนื่องจากสาเหตุต่างๆ เกิดขึ้นระหว่างจุด 4 → 0

จากสมการที่ (2-18) การคำนวณความดันลดที่เกิดขึ้นเนื่องจากความต้านทานการไหลระหว่างจุด 4 → 0

$$\Delta P_{f,4 \rightarrow 0} = 2f_{\text{TP}} v_f \left[\frac{\dot{m}}{\rho_f \frac{\pi d_i^2}{4}} \right]^2 \left[1 + x_L \frac{v_{fg}}{v_f} \right] \left[\frac{L_1 - L_3 - L}{d_i} \right] \quad (4-9)$$

$$\Delta P_{f,4 \rightarrow 0} = 2 \times 0.003 \times 0.001007 \left[\frac{0.000163}{993.05 \times \frac{\pi \times 0.010211^2}{4}} \right]^2 \left[1 + 0.003465 \times \frac{22.369}{0.001007} \right] \left[\frac{50 - 7.5 - 14}{1.0211} \right]$$

$$\Delta P_{f,4 \rightarrow 0} = 0.000325 \text{ Pa}$$

จากสมการที่ (2-25) การคำนวณความดันลดเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกเกิดระหว่าง

จุด 4 → 0

$$\Delta P_{g,4 \rightarrow 0} = \frac{g(H + L_1 - L_3 - L)}{v_f + x_L v_{fg}} \quad (4-10)$$

$$\Delta P_{g,4 \rightarrow 0} = \frac{9.81(2.7 + 50 - 7.5 - 14)}{0.001007 + (0.003465 \times 22.369) \times 100}$$

$$\Delta P_{g,4 \rightarrow 0} = 38.981 \text{ Pa}$$

โดยที่ค่าที่เปิดได้จากตารางไอน้ำ (จากตารางภาคผนวก ผ.1)

$$\text{ที่} \quad \Delta T_{4 \rightarrow 0} = \frac{T_4 + T_0}{2}$$

$$\Delta T_{4 \rightarrow 0} = \frac{38.5 + 36.5}{2} = 37.5^\circ \text{C}$$

$$v_f = 0.001007 \quad \text{m}^3/\text{kg}$$

$$v_{fg} = 22.369 \quad \text{m}^3/\text{kg}$$

$$\rho_f = 993.05 \quad \text{kg/m}^3$$

$$\rho_g = 0.04545 \quad \text{kg/m}^3$$

หาค่าคุณภาพไอของของไหลที่เกิดขึ้นในระหว่างจุดที่ 4 → 0

$$x_{L,4 \rightarrow 0} = \frac{gA_s}{mh_{fg}} \quad (4-11)$$

$$x_{L,4 \rightarrow 0} = \frac{9.81 \times 5.583 \times 10^{-3}}{0.000163 \times 2412.65}$$

$$x_{L,4 \rightarrow 0} = 0.003465 \quad (0.2465\%)$$

จากสมการที่ 2.17'

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{Total}} &= \Delta P_{f,0 \rightarrow 3} + \Delta P_{f,3 \rightarrow 4} + \Delta P_{a,3 \rightarrow 4} + \Delta P_{g,3 \rightarrow 4} + \Delta P_{f,4 \rightarrow 0} + \Delta P_{g,4 \rightarrow 0} \quad (2-17') \\ &= 340 + 0.012717 + 0.3068 + 77.19 + 0.000325 + 38.981 \\ &= 379.3 \text{ Pa} \end{aligned}$$

ตารางที่ 4.2 ผลการคำนวณขนาดท่อ 3/8"

พารามิเตอร์		การทดลองที่					
สัญลักษณ์	หน่วย	1	2	3	4	5	6
T_0	$^{\circ}\text{C}$	36.5	36.5	37.0	37.5	37.5	37.5
T_1	$^{\circ}\text{C}$	35.5	35.5	35.5	35.5	36.5	36.5
T_2	$^{\circ}\text{C}$	35.5	35.5	35.5	35.5	36.0	36.0
T_3	$^{\circ}\text{C}$	36.0	36.5	37.0	37.5	38.0	38.5
T_4	$^{\circ}\text{C}$	37.5	38.5	39.0	40.0	40.0	41.0
T_5	$^{\circ}\text{C}$	69.5	79.5	90.0	100.0	110.0	120.0
s	cm	1.5	1.5	1.5	1.5	2.5	2.5
t	sec	22.7	17.2	17.5	22.6	22.7	25.8
v	m/s	0.000662	0.000907	0.000891	0.000781	0.001133	0.001003
$\dot{m}$	kg/s	0.000119	0.000163	0.00016	0.000141	0.000204	0.000181
$\dot{Q}$	kW_{th}	0.000747	0.001365	0.00134	0.001469	0.001704	0.001887
q	kW/m^2	0.133817	0.244552	0.240045	0.263072	0.305296	0.337974
q	W/cm^2	0.013382	0.024455	0.024005	0.026307	0.03053	0.033797
ΔT_{0-3}	$^{\circ}\text{C}$	36.25	36.5	37	37.5	37.75	38
ρ_f	kg/m^3	993.62	993.43	993.24	993.05	993.05	992.86
v	m^3/kg	7.11×10^{-7}	7.05×10^{-7}	6.98×10^{-7}	6.91×10^{-7}	6.91×10^{-7}	6.85×10^{-7}
Re	-	9.504873	13.1499	13.02985	11.53308	16.73028	14.95999
f	-	6.733388	4.866956	4.9118	5.549253	3.825399	4.278077
$\Delta P_{f,0-3}$	Pa	343.1935	340.0044	336.814	333.6224	333.6224	330.4296
ΔT_{3-4}	$^{\circ}\text{C}$	36.75	37.5	38	38.75	39	39.75
v_f	m^3/kg	0.001007	0.001007	0.001007	0.001007	0.001008	0.001008
v_{fg}	m^3/kg	23.51	22.36899	21.79899	21.22899	20.65899	20.08899
h_{fg}	kJ/kg	2415.03	2412.65	2411.46	2410.27	2409.08	2407.89
$X_{L,3-4}$	-	0.002596	0.003465	0.003467	0.004336	0.00347	0.00434
$\Delta P_{f,3-4}$	Pa	0.005333	0.012717	0.011947	0.011181	0.018335	0.017482
$\Delta P_{A,3-4}$	Pa	0.129352	0.308601	0.289898	0.271397	0.444842	0.42431
$\Delta P_{g,3-4}$	Pa	92.73519	77.18992	78.7115	67.53161	81.96903	70.44278
ΔT_{4-0}	$^{\circ}\text{C}$	37	37.5	38	38.75	38.75	39.25
v_f	m^3/kg	0.001007	0.001007	0.001007	0.001007	0.001007	0.001008
v_{fg}	m^3/kg	22.93899	22.36899	21.79899	21.22899	21.22899	20.65899
h_{fg}	kJ/kg	2413.84	2412.65	2411.46	2410.27	2410.27	2409.08

$X_{L,4-0}$	-	0.002598	0.003465	0.003467	0.004336	0.003468	0.004338
ρ_f	kg/m ³	993.24	993.05	992.86	992.67	992.67	992.48
ρ_g	kg/m ³	0.0443	0.04545	0.0466	0.04775	0.04775	0.0489
$\Delta P_{f,4-0}$	Pa	0.000183	0.000325	0.000311	0.000332	0.000386	0.000415
$\Delta P_{g,4-0}$	Pa	50.51418	38.98157	39.96788	32.89395	41.00645	33.77486
ΔP_{Total}	Pa	486.5778	456.4975	455.7955	434.3309	457.0614	435.0894

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองขนาดท่อ 5/8"

ครั้งที่	พารามิเตอร์							
	$T_0 (^{\circ}\text{C})$	$T_1 (^{\circ}\text{C})$	$T_2 (^{\circ}\text{C})$	$T_3 (^{\circ}\text{C})$	$T_4 (^{\circ}\text{C})$	$T_5 (^{\circ}\text{C})$	s(cm)	t (sec)
1	40	39.5	39.5	40.5	42	70	6.5	26.715
2	41.5	40.5	40	41.5	43.5	80	6.5	21.45
3	42.5	41	40.5	42	44	90	9.75	31.295
4	42	41.5	41.5	43	45.5	100	9.75	27.835
5	42.5	42	41.5	43	46.5	110	9.75	25.31
6	43	42.5	42	43.5	47	120	9.75	23.55
เฉลี่ย	41.92	41.17	40.83	42.25	44.75	95	8.67	26.02

ตัวอย่าง การคำนวณหาค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ผ่านผนังท่อทองแดงต่อพื้นที่และค่าความดันลดที่จุดต่างๆ ที่เกิดขึ้นภายในท่อทองแดง ดังนี้

ข้อมูล คือ

- ท่อทองแดงขนาด 15.875 mm (5/8 in) , ความยาว 50 cm
- ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใน(d_i) = 1.656 cm
- ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอก(d_o) = 1.905 cm
- อุณหภูมิที่จุดต่างๆ ของชุดทดสอบ

$$T_0 = 41.5 \quad ^{\circ}\text{C}$$

$$T_1 = 40.5 \quad ^{\circ}\text{C}$$

$$T_2 = 40 \quad ^{\circ}\text{C}$$

$$T_3 = 41.5 \quad ^{\circ}\text{C}$$

$$T_4 = 43.5 \quad ^{\circ}\text{C}$$

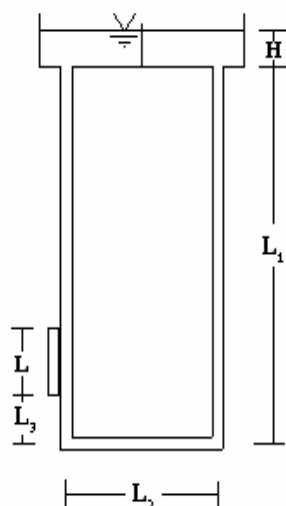
$$T_5 = 80 \quad ^{\circ}\text{C}$$

- เวลาเคลื่อนที่ของลูกลอย 21.45 s
- ระยะทางเคลื่อนที่ลูกลอย 6.5 cm

คำนวณความเร็วในการไหลของลูกลอย

$$\begin{aligned}\text{สูตร} \quad v &= \frac{s}{t} \\ v &= \frac{6.5}{21.45 \times 100} \\ v &= 0.003471 \text{ m/s}\end{aligned}$$

ค่าตัวแปรจากชุดทดสอบ



$$\begin{aligned}H &= 2.7 \text{ cm} \\ L_1 &= 50 \text{ cm} \\ L_2 &= 14 \text{ cm} \\ L_3 &= 7.5 \text{ cm} \\ L &= 14 \text{ cm}\end{aligned}$$

การหาค่าพื้นที่หน้าตัดของช่องน้ำผ่าน (ก x ย) (A)

$$A = 0.03 \times 0.006$$

$$A = 0.00018 \text{ m}^2$$

จากสมการที่ (2-15) การคำนวณหาอัตราการถ่ายเทความร้อนที่เข้าสู่ท่อทองแดงต่อหน่วยพื้นที่

$$q = \left[\frac{\dot{m} C_p \Delta T}{\pi d_o L} \right] \quad (4-12)$$

$$q = \left[\frac{0.00018 \times 0.000625 \times 1000 \times 4.18 \times (43.5 - 41.5)}{\pi \times 0.01905 \times 0.14} \right]$$

$$q = 0.62375 \text{ kW/m}^2 \text{ (0.062375 W/cm}^2\text{)}$$

จากสมการที่ (2-19) การคำนวณหาค่าความดันลดเนื่องจากแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างจุด 0→3 ของไหลจะเป็นสถานะเดียว

$$\Delta P_{f,0 \rightarrow 1} + \Delta P_{f,1 \rightarrow 2} + \Delta P_{f,2 \rightarrow 3} = f \left[\frac{\rho_f}{2} \right] \left[\frac{\dot{m}}{\rho_f \frac{\pi d_i^2}{4}} \right]^2 \left[\frac{L_1 + L_2 + L_3}{d_i} \right] \quad (4-13)$$

$$\Delta P_{f,0 \rightarrow 3} = 0.7141 \left[\frac{991.5}{2} \right] \left[\frac{0.000625}{991.5 \times \left(\frac{\pi \times 0.01656^2}{4} \right)} \right]^2 \left[\frac{50 + 14 + 7.5}{1.656} \right]$$

$$\Delta P_{f,0 \rightarrow 3} = 44.73 \text{ Pa}$$

โดยที่ $Re = \frac{v d_i}{\nu}$

และค่าที่ปัดได้จากตารางไอน้ำ (จากตารางภาคผนวก ผ.1)

$$\Delta T_{0 \rightarrow 3} = \frac{T_0 + T_3}{2}$$

$$\Delta T_{0 \rightarrow 3} = \frac{41.5 + 41.5}{2} = 41.5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\rho_f = 991.5 \text{ kg/m}^3$$

$$\nu = 6.41 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\text{ดังนั้น} \quad Re = \frac{6.41 \times 10^{-3} \times 1.656 \times 10^{-2}}{6.41 \times 10^{-7}}$$

$$Re = 89.635$$

$$f = \frac{64}{Re} \quad \text{ที่ของไหล } Re < 2000$$

$$f = \frac{64}{89.635}$$

$$f = 0.714$$

การหาค่าพื้นที่ผิวในส่วนที่ท่อทองแดงได้รับความร้อน (A_s)

$$A_s = \pi d_o L \quad m^2$$

$$A_s = \pi \times 0.01905 \times 0.14$$

$$A_s = 0.0083744 \quad m^2$$

การคำนวณหาค่าพื้นที่หน้าตัดของท่อทองแดงที่ได้รับความร้อน (A_c)

$$A_c = \frac{\pi}{4} d_i^2 \quad m^2$$

$$A_c = \frac{\pi}{4} \times 0.01656^2$$

$$A_c = 0.0002153 \quad m^2$$

การคำนวณหาค่าความดันลดเนื่องจากสาเหตุต่างๆ ที่เกิดขึ้นในระหว่างจุด 3 → 4

จากสมการที่ (2-20) การคำนวณหาค่าความดันลดเนื่องจากแรงเสียดทานในระหว่างจุด 3 → 4

$$\Delta P_{f,3 \rightarrow 4} = 2 f_{TP} v_f \left[\frac{\dot{m}}{A_c} \right]^2 \left[1 + \frac{x_L}{2} \frac{v_{fg}}{v_f} \right] \frac{L}{d_i} \quad (4-14)$$

$$\Delta P_{f,3 \rightarrow 4} = 2 \times 0.003 \times 0.001009 \left[\frac{0.000625}{0.0002153} \right]^2 \left[1 + \frac{0.003473}{2} \times \frac{17.524}{0.001009} \right] \frac{14}{1.656}$$

$$\Delta P_{f,3 \rightarrow 4} = 0.01305 \quad Pa$$

จากสมการที่ (2-23) การคำนวณหาค่าความดันลดเนื่องจากความเร็วของของไหลในระหว่างจุด 3 → 4

$$\Delta P_{a,3 \rightarrow 4} = \left[r_{area} v_{fg} x_L + (1 - r_{area}) v_f \right] \left[\frac{\dot{m}}{A_c} \right]^2 \quad (4-15)$$

$$\Delta P_{a,3 \rightarrow 4} = \left[1 \times 17.524 \times 0.003473 + (1 - 1) \times 0.001009 \right] \left[\frac{0.000625}{0.0002153} \right]^2$$

$$\Delta P_{a,3 \rightarrow 4} = 0.51262 \quad Pa$$

จากสมการที่ (2-24) การคำนวณหาค่าความดันตกเนื่องจากความเร่งของแรงโน้มถ่วงในระหว่างจุด 3 → 4

$$\Delta P_{g,3 \rightarrow 4} = \frac{gL}{v_{fg} x_L} \ln \left[1 + x_L \frac{v_{fg}}{v_f} \right] \quad (4-16)$$

$$\Delta P_{g,3 \rightarrow 4} = \frac{9.81 \times 0.14}{17.524 \times 0.003473} \ln \left[1 + 0.003473 \times \frac{17.524}{0.001009} \right]$$

$$\Delta P_{g,3 \rightarrow 4} = 92.88 \text{ Pa}$$

โดยที่ ค่าที่เปิดได้จากตารางไอน้ำ (จากตารางภาคผนวก ผ.1)

$$\begin{aligned} \text{ที่} \quad \Delta T_{3 \rightarrow 4} &= \frac{T_3 + T_4}{2} \\ \Delta T_{3 \rightarrow 4} &= \frac{41.5 + 43.5}{2} = 42.5 \text{ }^{\circ}\text{C} \\ v_f &= 0.001009 \text{ m}^3/\text{kg} \\ v_{fg} &= 17.524 \text{ m}^3/\text{kg} \\ h_{fg} &= 2407 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

หาค่าคุณภาพไอน้ำของของไหลที่เกิดขึ้นในระหว่างจุดที่ 3 → 4

$$x_{L,3 \rightarrow 4} = \frac{gA_s}{\dot{m}h_{fg}}$$

$$x_{L,3 \rightarrow 4} = \frac{9.81 \times 8.374 \times 10^{-3}}{0.000625 \times 2407}$$

$$x_{L,3 \rightarrow 4} = 0.003473 \text{ (0.3473\%)}$$

อัตราส่วนขนาดของพื้นที่ท่อทางเข้ารับความร้อนต่อพื้นที่ท่อทางออก

$$\begin{aligned} r_{\text{area}} &= \frac{A_{\text{in}}}{A_{\text{out}}} \\ r_{\text{area}} &= \frac{2.8514 \times 10^{-4}}{2.8514 \times 10^{-4}} \\ r_{\text{area}} &= 1 \end{aligned}$$

การคำนวณความดันลดเนื่องจากสาเหตุต่างๆ เกิดขึ้นระหว่างจุด 4 → 0

จากสมการที่ (2-21) การคำนวณความดันลดที่เกิดขึ้นเนื่องจากความต้านทานการไหลระหว่าง

จุด 4 → 0

$$\Delta P_{f,4 \rightarrow 0} = 2f_{TP} v_f \left[\frac{\dot{m}}{\rho_f \frac{\pi d_i^2}{4}} \right]^2 \left[1 + x_L \frac{v_{fg}}{v_f} \right] \left[\frac{L_1 - L_3 - L}{d_i} \right] \quad (4-17)$$

$$\Delta P_{f,4 \rightarrow 0} = 2 \times 0.003 \times 0.001009 \left[\frac{0.000625}{991.1 \times \frac{\pi \times 0.01656^2}{4}} \right]^2 \left[1 + 0.003473 \times \frac{17.524}{0.001009} \right] \left[\frac{50 - 7.5 - 14}{1.656} \right]$$

$$\Delta P_{f,4 \rightarrow 0} = 0.0000877 \text{ Pa}$$

จากสมการที่ (2-25) การคำนวณความดันลดเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกเกิดระหว่าง

จุด 4 → 0

$$\Delta P_{g,4 \rightarrow 0} = \frac{g(H + L_1 - L_3 - L)}{v_f + x_L v_{fg}} \quad (4-18)$$

$$\Delta P_{g,4 \rightarrow 0} = \frac{9.81(2.7 + 50 - 7.5 - 14)/100}{0.001009 + (0.003473 \times 17.524)}$$

$$\Delta P_{g,4 \rightarrow 0} = 49.467 \text{ Pa}$$

โดยที่ค่าที่เปิดได้จากตารางไอน้ำ (จากตารางภาคผนวก ผ.1)

$$\begin{aligned} \text{ที่} \quad \Delta T_{4 \rightarrow 0} &= \frac{T_4 + T_0}{2} \\ \Delta T_{4 \rightarrow 0} &= \frac{43.5 + 41.5}{2} = 42.5^\circ \text{C} \\ v_f &= 0.001009 \text{ m}^3/\text{kg} \\ v_{fg} &= 17.524 \text{ m}^3/\text{kg} \\ \rho_f &= 991.8 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

หาค่าคุณภาพไอลของของไหลที่เกิดขึ้นในระหว่างจุดที่ 4 → 0

$$\begin{aligned} x_{L,4 \rightarrow 0} &= \frac{g A_s}{\dot{m} h_{fg}} \\ x_{L,4 \rightarrow 0} &= \frac{9.81 \times 8.374 \times 10^{-3}}{0.000625 \times 2407} \\ x_{L,4 \rightarrow 0} &= 0.003473 \text{ (0.3473\%)} \end{aligned}$$

จากสมการที่ 2.17'

$$\begin{aligned}\Delta P_{\text{Total}} &= \Delta P_{f,0 \rightarrow 3} + \Delta P_{f,3 \rightarrow 4} + \Delta P_{a,3 \rightarrow 4} + \Delta P_{g,3 \rightarrow 4} + \Delta P_{f,4 \rightarrow 0} + \Delta P_{g,4 \rightarrow 0} \quad (2-19) \\ &= 340 + 0.012717 + 0.3086 + 77.19 + 0.000325 + 38.981 \\ &= 379.3 \text{ Pa}\end{aligned}$$

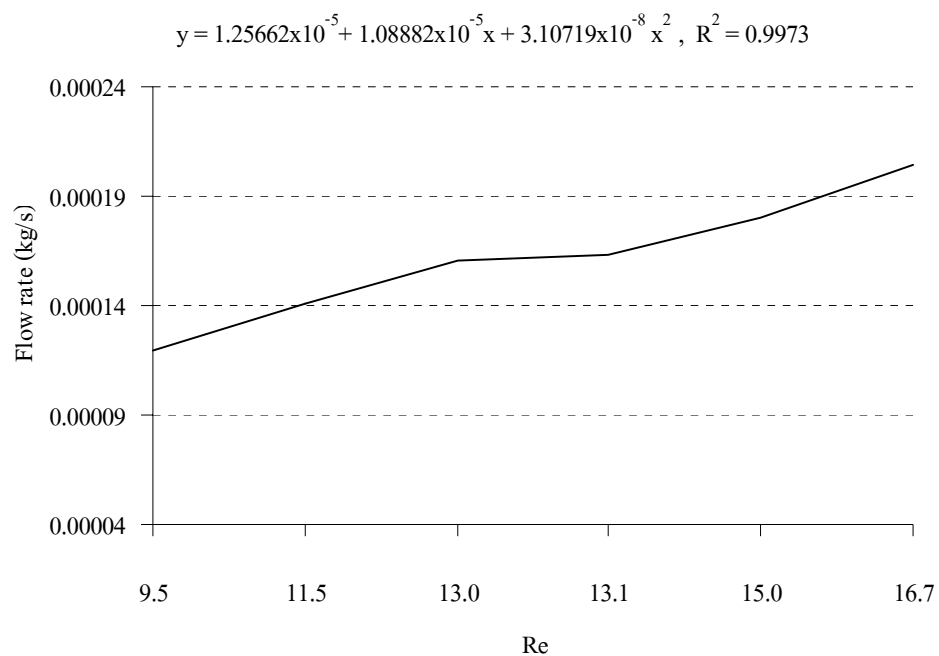
ตารางที่ 4.4 ผลการคำนวณขนาดท่อ 5/8"

พารามิเตอร์		การทดลองที่					
สัญลักษณ์	หน่วย	1	2	3	4	5	6
T_0	°C	40.00	41.50	42.50	42.00	42.50	43.00
T_1	°C	39.50	40.50	41.00	41.50	42.00	42.50
T_2	°C	39.50	40.00	40.50	41.50	41.50	42.00
T_3	°C	40.50	41.50	42.00	43.00	43.00	43.50
T_4	°C	42.00	43.50	44.00	45.50	46.50	47.00
T_5	°C	70	80	90	100	110	120
s	cm	6.5	6.5	9.75	9.75	9.75	9.75
t	sec	26.715	21.45	31.295	27.835	25.31	23.55
v	m/s	0.00252195	0.0034713	0.00310393	0.00350709	0.003829252	0.004102095
$\dot{m}$	kg/s	0.00045395	0.0006248	0.00055871	0.00063128	0.000689265	0.000738377
$\dot{Q}$	kW _{th}	0.00284628	0.0052236	0.0046708	0.00659684	0.010083952	0.010802456
q	kW/m ²	0.339879	0.6237543	0.55774879	0.78774032	1.204143167	1.289941032
q	W/cm ²	0.0339879	0.0623754	0.05577488	0.07877403	0.120414317	0.128994103
ΔT_{0-3}	°C	40.25	41.5	42.25	42.5	42.75	43.25
ρ_f	kg/m ³	992.1	991.5	991.3	991.1	991.1	990.9
v	m ³ /kg	6.582E-07	6.414E-07	6.3573E-07	6.3011E-07	6.30108E-07	6.24483E-07
Re	-	63.4549902	89.635053	80.8585195	92.1761437	100.6434576	108.7856899
f	-	1.00858892	0.7140064	0.79150596	0.69432282	0.6359082	0.588312673
$\Delta P_{f,0-3}$	Pa	45.9060972	44.731014	44.3390039	43.9468353	43.94683533	43.55450842
ΔT_{3-4}	Pa	41.25	42.5	43	44.25	44.75	45.25
v_f	m ³ /kg	0.0010084	0.001009	0.0010092	0.0010096	0.0010098	0.00101
v_{fg}	m ³ /kg	18.72099	17.52399	16.96299	16.32699	15.92799	15.25899
h_{fg}	kJ/kg	2404.3	2407	2399.56	2397.1	2395.9	2394.8
$X_{L,3-4}$	-	0.00260783	0.0034732	0.00348397	0.00435943	0.006106265	0.00610907
$\Delta P_{f,3-4}$	Pa	0.00553122	0.0130515	0.01013387	0.01557067	0.02534266	0.027877015

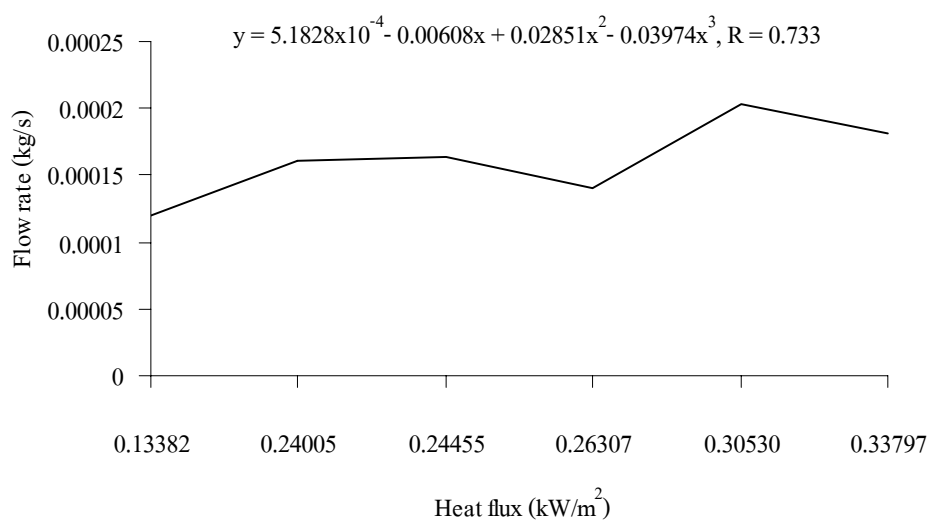
$\Delta P_{A, 3-4}$	Pa	0.21704065	0.5126223	0.3979803	0.61191292	0.99683665	1.096406781
$\Delta P_{g, 3-4}$	Pa	109.718779	92.880163	94.9779157	82.3867504	64.6447641	66.82625997
ΔT_{4-0}	°C	41	42.5	43.25	43.75	44.5	45
v_f	m ³ /kg	0.0010084	0.001009	0.0010092	0.0010094	0.0010098	0.00101
v_{ig}	m ³ /kg	18.72099	17.52399	16.96299	16.72599	15.92799	15.25899
h_{ig}	kJ/kg	2404.3	2407	2399.56	2398.3	2395.9	2394.8
$X_{L,4-0}$	-	0.00260783	0.0034732	0.00348397	0.00435725	0.006106265	0.00610907
ρ_f	kg/m ³	991.7	991.1	990.9	990.7	990.3	990.1
ρ_g	kg/m ³	0.05406	0.05835	5.98E-02	6.12E-02	6.41E-02	6.55E-02
$\Delta P_{f, 4-0}$	Pa	5.1234x10 ⁻⁵	8.767 x10 ⁻⁵	7.6187E-05	0.00010586	0.000153851	0.000158098
$\Delta P_{g, 4-0}$	Pa	61.4238366	49.467479	50.920527	41.4233443	31.145923	32.48198456
ΔP_{Total}	Pa	217.271336	187.60442	190.645637	168.384519	140.7598556	143.9871948

ตารางที่ 4.5 ผลการคำนวณโดยใช้ความสัมพันธ์ของสมการในภาพที่ 4-2 ถึง 4-9

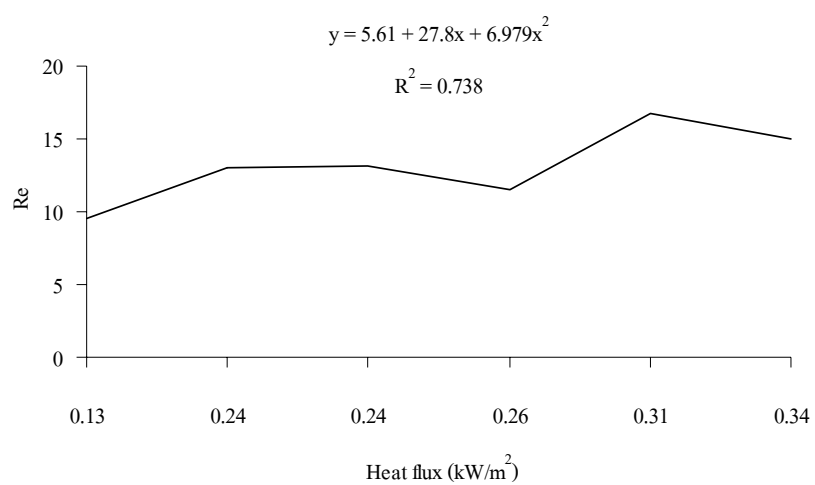
q	$\dot{m}$ (kg/s)		Re	
(kW/m ²)	3/8"	5/8"	3/8"	5/8"
0.1	0.000721	0.000141	8.46	13.50
0.35	0.007111	0.000462	16.19	64.37
1.1	0.043907	0.000677	44.63	97.17
1.35	0.049629	0.000786	55.86	113.75
1.6	0.045871	0.001056	67.96	155.94
1.85	0.028906	0.001575	80.93	237.41



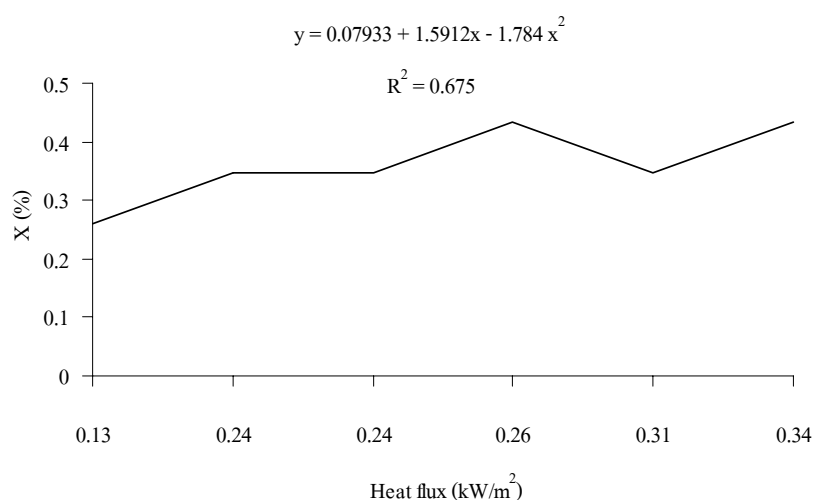
ภาพที่ 4-2 ความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ Flow rate (3/8")



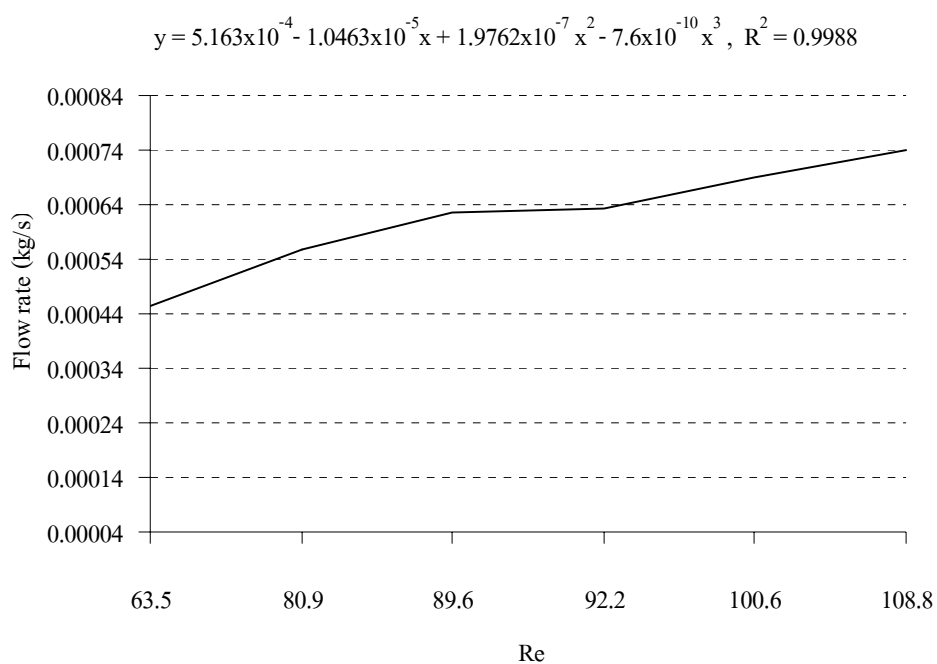
ภาพที่ 4-3 ความสัมพันธ์ระหว่าง Heat flux กับ Flow rate (3/8")



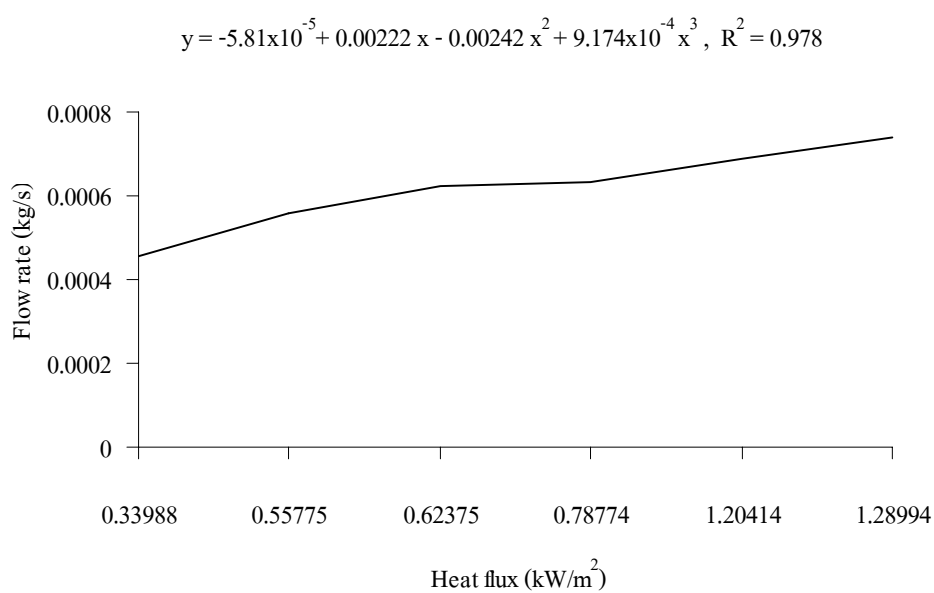
ภาพที่ 4-4 ความสัมพันธ์ระหว่าง Heat flux กับ Re (3/8'')



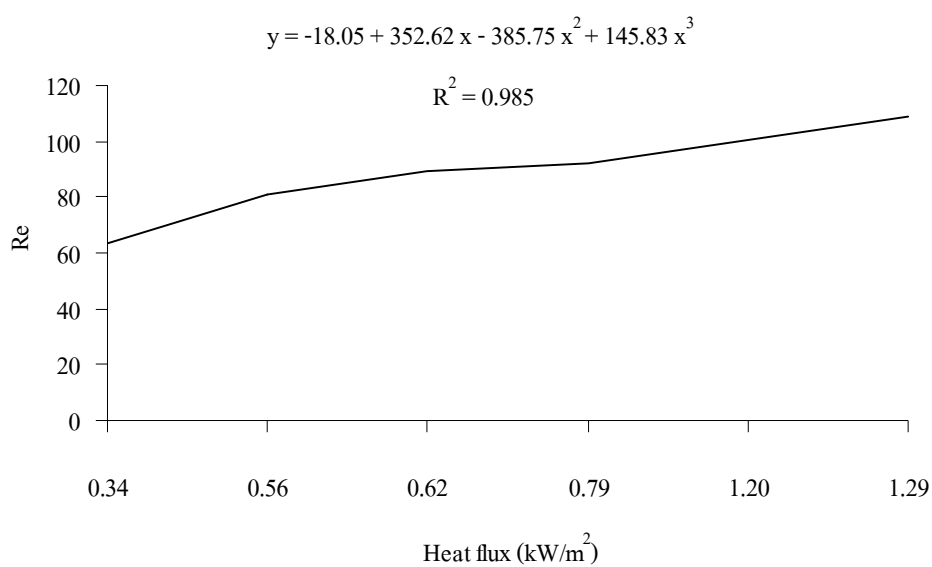
ภาพที่ 4-5 ความสัมพันธ์ระหว่าง Heat flux กับ x (3/8'')



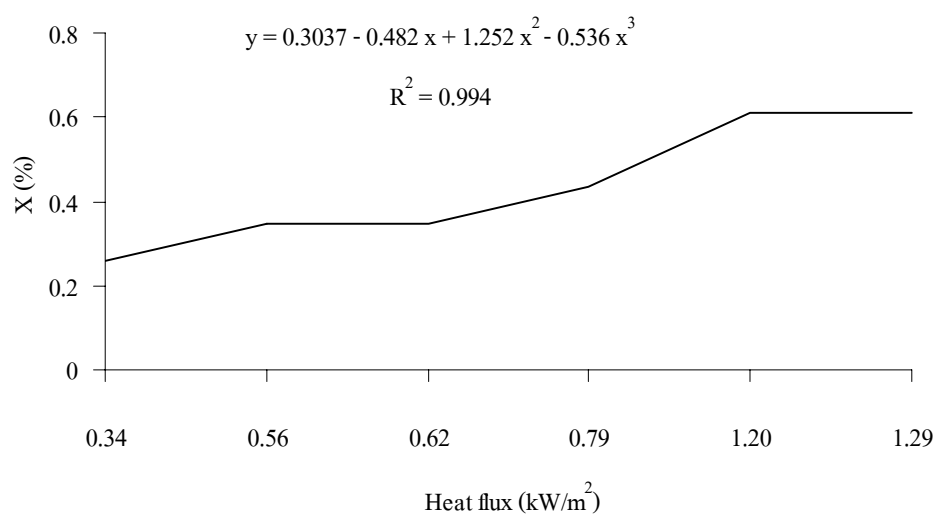
ภาพที่ 4-6 ความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ Flow rate (5/8")



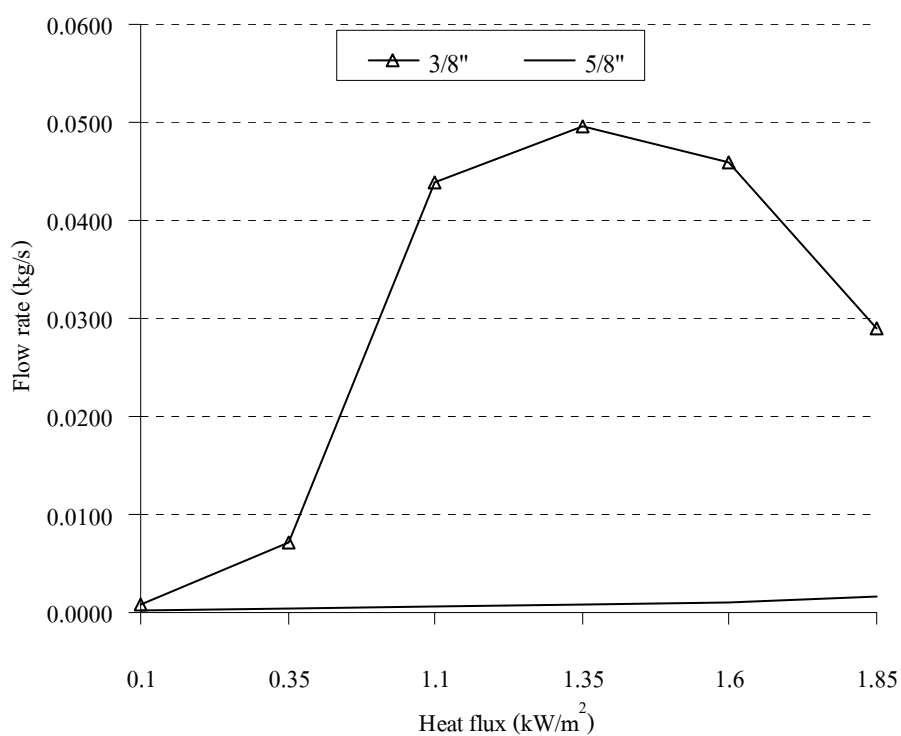
ภาพที่ 4-7 ความสัมพันธ์ระหว่าง Heat flux กับ Flow rate (5/8")



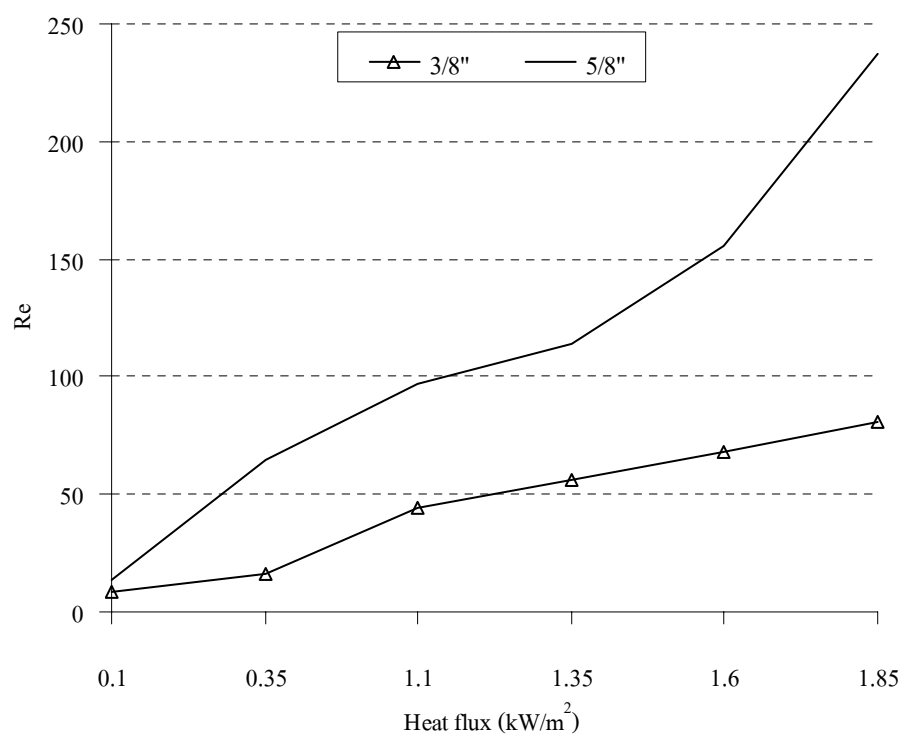
ภาพที่ 4-8 ความสัมพันธ์ระหว่าง Heat flux กับ Re (5/8")



ภาพที่ 4-9 ความสัมพันธ์ระหว่าง Heat flux กับ x (5/8")



ภาพที่ 4-10 ความสัมพันธ์ระหว่าง Heat flux กับ Flow rate



ภาพที่ 4-11 ความสัมพันธ์ระหว่าง Heat flux กับ Re

จากภาพที่ 4-2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเรย์โนลด์และอัตราการไหลเชิงมวลของน้ำอุ่นในระบบเทอร์โมไฮฟอนจะพบว่าค่าทั้งสองจะแปรผันตามกันและอยู่ในรูปของความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์คือ $\dot{m} = 1.25662 \times 10^{-5} + 1.08882 \times 10^{-5} \text{Re} + 3.10719 \times 10^{-8} \text{Re}^2$, $R^2 = 0.9973$

จากภาพที่ 4-3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความร้อนต่อพื้นที่กับอัตราการไหลเชิงมวลของน้ำอุ่นในระบบเทอร์โมไฮฟอน จะพบว่า เมื่อให้ความร้อนต่อระบบมากขึ้น (ที่ระหว่างจุด 3, 4) จะทำให้อุณหภูมิของน้ำสูงขึ้น ส่งผลให้เกิดการเคลื่อนที่ของน้ำอุ่น โดยน้ำที่มีอุณหภูมิสูงจะลอยขึ้น เพราะความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมิสูงจะมีน้อยกว่าแลลอยขึ้นบน ในขณะที่เดียวกันน้ำอุณหภูมิที่ต่ำกว่าจะไหลมาแทนที่ในทิศทางเคลื่อนที่ตามเข็มนาฬิกา ทำให้อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำอุ่นเพิ่มมากขึ้นตามอัตราความร้อน และอยู่ในรูปของความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ คือ

$$\dot{m} = 5.1828 \times 10^{-4} - 0.00608q + 0.02851q^2 - 0.03974q^3, R^2 = 0.733$$

จากภาพที่ 4-4 และ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความร้อนต่อพื้นที่ที่ส่งผลต่อค่า Re และคุณภาพไคคือ อัตราความร้อนเพิ่มขึ้น จะทำให้น้ำอุ่นหมุนเวียนในระบบสูงขึ้น และค่าเรย์โนลด์จะเพิ่มขึ้นตามความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์คือ

$$\text{Re} = 5.61 + 27.8q + 6.979q^2, R^2 = 0.738$$

$$\text{และ } x = 0.07933 + 1.5912q - 1.784q^2, R^2 = 0.675$$

จากภาพที่ 4-6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเรย์โนลด์และอัตราการไหลเชิงมวลของน้ำอุ่นในระบบเทอร์โมไฮฟอนจะพบว่าค่าทั้งสองจะแปรผันตามกันและอยู่ในรูปของความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์คือ

$$\dot{m} = 5.163 \times 10^{-4} - 1.0463 \times 10^{-5} \text{Re} + 1.9762 \times 10^{-7} \text{Re}^2 - 7.6 \times 10^{-10} \text{Re}^3, R^2 = 0.9988$$

จากภาพที่ 4-7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความร้อนต่อพื้นที่กับอัตราการไหลเชิงมวลของน้ำอุ่นในระบบเทอร์โมไฮฟอน จะพบว่า เมื่อให้ความร้อนต่อระบบมากขึ้น (ที่ระหว่างจุด 3, 4) จะทำให้อุณหภูมิของน้ำสูงขึ้น ส่งผลให้เกิดการเคลื่อนที่ของน้ำอุ่น โดยน้ำที่มีอุณหภูมิสูงจะลอยขึ้น เพราะความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมิสูงจะมีน้อยกว่าแลลอยขึ้นบน ในขณะที่เดียวกันน้ำอุณหภูมิที่ต่ำกว่าจะไหลมาแทนที่ในทิศทางเคลื่อนที่ตามเข็มนาฬิกา ทำให้อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำอุ่นเพิ่มมากขึ้นตามอัตราความร้อน และอยู่ในรูปของความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ คือ

$$\dot{m} = -5.81 \times 10^{-5} + 0.00222 \text{Re} - 0.00242 \text{Re}^2 + 9.174 \times 10^{-4} \text{Re}^3, R^2 = 0.978$$

จากภาพที่ 4-8 และ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความร้อนต่อพื้นที่ที่ส่งผลต่อค่า Re และคุณภาพไอคือ อัตราความร้อนเพิ่มขึ้น จะทำให้น้ำอุ่นหมุนเวียนในระบบสูงขึ้น และค่าเรย์โนลด์ จะเพิ่มขึ้นตามความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์คือ

$$Re = -18.05 + 352.62q - 385.75q^2 + 145.83q^3, R^2 = 0.985$$

และ $x = 0.3037 - 0.482q + 1.252q^2 - 0.536q^3, R^2 = 0.994$

จากภาพที่ 4-10, 4-11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อนต่อพื้นที่กับ Re และอัตราการไหลเชิงมวลของน้ำในระบบของท่อทองแดงขนาด 3/8" และ 5/8" จะพบว่าที่อัตราการถ่ายเทความร้อนต่อพื้นที่เท่ากัน ค่าเรย์โนลด์และอัตราการไหลเชิงมวลจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามขนาดของท่อ โดยค่า Re จะเพิ่มขึ้นและจะแตกต่างกันเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามการเพิ่มขึ้นของค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนต่อพื้นที่ของท่อทองแดงทั้ง 2 ขนาด

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

สำหรับท่อทองแดงขนาด 3/8" ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนต่อพื้นที่ที่ผ่านผนังท่อ อยู่ระหว่าง 0.1-0.34 kW/m² และ 5/8" อยู่ระหว่าง 0.3-1.3 kW/m²

1. ค่าความร้อนต่อพื้นที่ที่มีผลต่ออัตราการไหลเชิงมวลของน้ำในระบบ โดยจะแปรผันตามกันในรูปแบบของความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ คือ

สำหรับท่อ 3/8"

$$\dot{m} = 5.1828 \times 10^{-4} - 0.00608q + 0.02851q^2 - 0.03974q^3, \quad R^2 = 0.733$$

สำหรับท่อ 5/8"

$$\dot{m} = -5.81 \times 10^{-5} + 0.00222q - 0.00242q^2 + 9.174 \times 10^{-4}q^3, \quad R^2 = 0.978$$

2. ค่าความร้อนต่อพื้นที่ที่จะส่งผลโดยตรงต่อค่าเรย์โนลด์และอัตราการไหลเชิงมวลของน้ำในระบบ ซึ่งจะขึ้นกับขนาดท่อ ตามความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ คือ

สำหรับท่อ 3/8"

$$Re = 5.61 + 27.8q + 6.979q^2, \quad R^2 = 0.738$$

$$\dot{m} = 1.25662 \times 10^{-5} + 1.08882 \times 10^{-5}Re + 3.10719 \times 10^{-8}Re^2, \quad R^2 = 0.9973$$

สำหรับท่อ 5/8"

$$Re = -18.05 + 352.62q - 385.75q^2 + 145.83q^3, \quad R^2 = 0.985$$

$$\dot{m} = 5.163 \times 10^{-4} - 1.0463 \times 10^{-5}Re + 1.9762 \times 10^{-7}Re^2 - 7.6 \times 10^{-10}Re^3, \quad R^2 = 0.9988$$

3. ผลจากการเพิ่มหรือลดค่าความร้อนต่อพื้นที่ จะส่งผลโดยตรงต่ออุณหภูมิของน้ำในระบบรวมถึงคุณภาพของไอน้ำ จะแปรผันตามกันตามความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ คือ

สำหรับท่อ 3/8"

$$x = 0.07933 + 1.5912q - 1.784q^2, \quad R^2 = 0.675$$

สำหรับท่อ 5/8"

$$x = 0.3037 - 0.482q + 1.252q^2 - 0.536q^3, \quad R^2 = 0.994$$

เอกสารอ้างอิง

ประดิษฐ์ เกิดมูล. กลไกความร้อน. เชียงใหม่, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2538.

สมเกียรติ บุญนาค. การถ่ายเทความร้อน. กรุงเทพมหานคร โรงพิมพ์พิทักษ์อักษร, 2550.

Jinson Zhang, Jasoo Hugenroth. Exploration of the Theoretical Limit of Thermosyphon Cooling System. Department of Mechanical Engineering Purdue University USA, 1999.

M.Necati Bejan, CONVECTION HEAT TRANSFER. JOHN WILEY, 1995.

ภาคผนวก

ตารางที่ ผ.1 คุณสมบัติของไอน้ำ

Temp (°C)	ปริมาตรจำเพาะ (m ³ /kg)			เอนทาลปี (kJ/kg)	ความหนาแน่น (kg/m ³)		ความหนืดพลศาสตร์ (kg/m.s)	ความหนืดจลศาสตร์ (m ² /s)
T	v _f	v _{fg}	v _g	h _{fg}	ρ _f	ρ _g	μ	ν
5	1×10 ⁻³	147.1190	147.120	2489.600	999.90	6.8×10 ⁻³	1.519×10 ⁻³	1.5192×10 ⁻⁶
10	1×10 ⁻³	106.3790	106.380	2477.700	999.70	9.4×10 ⁻³	1.307×10 ⁻³	1.3074×10 ⁻⁶
15	1.001×10 ⁻³	77.9290	77.930	2465.900	999.10	1.28×10 ⁻²	1.138×10 ⁻³	1.139×10 ⁻⁶
20	1.002×10 ⁻³	57.7890	57.790	2454.100	998.00	1.73×10 ⁻²	1.002×10 ⁻³	1.004×10 ⁻⁷
23	1.0026×10 ⁻³	49.1310	49.132	2447.020	997.40	2.078×10 ⁻²	9.35×10 ⁻⁴	9.378×10 ⁻⁷
25	1.003×10 ⁻³	43.3590	43.360	2442.300	997.00	2.31×10 ⁻²	8.91×10 ⁻⁴	8.936×10 ⁻⁷
28	1.0036×10 ⁻³	37.0770	37.078	2435.220	996.40	2.748×10 ⁻²	8.35×10 ⁻⁴	8382×10 ⁻⁷
30	1.004×10 ⁻³	32.8890	32.890	2430.500	996.00	3.04×10 ⁻²	7.98×10 ⁻⁴	8.012×10 ⁻⁷
30.5	1.0042×10 ⁻³	32.1219	32.123	2429.310	995.80	3.133×10 ⁻²	7.9×10 ⁻⁴	7.935×10 ⁻⁷
31	1.0044×10 ⁻³	31.3540	31.356	2428.120	995.60	3.226×10 ⁻²	7.82×10 ⁻⁴	7.858×10 ⁻⁷
31.5	01.0046×10 ⁻³	29.0539	30.589	2426.930	995.40	3.319×10 ⁻²	7.82×10 ⁻⁴	7.860×10 ⁻⁷
32	1.0048×10 ⁻³	29.8209	29.822	2425.740	995.20	3.412×10 ⁻²	7.67×10 ⁻⁴	7.70×10 ⁻⁷
32.5	1.005×10 ⁻³	29.0539	29.055	2424.550	995.00	3.505×10 ⁻²	7.59×10 ⁻⁴	7.628×10 ⁻⁷
33	1.0052×10 ⁻³	28.2870	28.288	2423.360	994.80	3.598×10 ⁻²	7.43×10 ⁻⁴	7.472×10 ⁻⁷
33.5	1.0054×10 ⁻³	27.5199	27.521	2422.170	994.60	3.691×10 ⁻²	7.43×10 ⁻⁴	7.474×10 ⁻⁷
34	1.0056×10 ⁻³	26.7529	26.754	2420.980	994.40	3.784×10 ⁻²	7.36×10 ⁻⁴	7.397×10 ⁻⁷

ตาราง ผ.1 คุณสมบัติของไอน้ำ (ต่อ)

Temp (°C)	ปริมาตรจำเพาะ (m ³ /kg)			เอนทาลปี (kJ/kg)	ความหนาแน่น (kg/m ³)		ความหนืดพลศาสตร์ (kg/m.s)	ความหนืดจลศาสตร์ (m ² /s)
T	V _f	V _{fg}	V _g	h _{fg}	ρ _f	ρ _g	μ	ν
34.5	1.006×10 ⁻³	25.9859	25.987	2419.79	994.20	3.8770×10 ⁻²	7.278×10 ⁻⁴	7.32×10 ⁻⁷
35	1.006×10 ⁻³	25.2190	25.22	2418.60	994.00	3.9700×10 ⁻²	7.2×10 ⁻⁴	7.24×10 ⁻⁷
35.5	1.006×10 ⁻³	24.4519	24.65	2417.41	993.80	4.0630×10 ⁻²	7.133×10 ⁻⁴	7.18×10 ⁻⁷
36	1.006×10 ⁻³	24.0790	24.08	2416.22	993.62	4.2000×10 ⁻²	7.066×10 ⁻⁴	7.11×10 ⁻⁷
36.5	1.007×10 ⁻³	23.5090	23.51	2415.03	993.43	4.3150×10 ⁻²	6.999×10 ⁻⁴	7.05×10 ⁻⁷
37	1.007×10 ⁻³	22.9390	22.94	2413.84	993.24	4.4300×10 ⁻²	6.932×10 ⁻⁴	6.98×10 ⁻⁷
37.5	1.007×10 ⁻³	22.3690	22.37	2412.65	993.05	4.5450×10 ⁻²	6.865×10 ⁻⁴	6.91×10 ⁻⁷
38	1.007×10 ⁻³	21.7990	21.80	2411.46	992.86	4.6600×10 ⁻²	6.798×10 ⁻⁴	6.85×10 ⁻⁷
38.5	1.007×10 ⁻³	21.2290	21.23	2410.27	992.67	4.7750×10 ⁻²	6.731×10 ⁻⁴	6.78×10 ⁻⁷
39	1.008×10 ⁻³	20.6590	20.66	2409.08	992.48	4.8900×10 ⁻²	6.664×10 ⁻⁴	6.71×10 ⁻⁷
39.5	1.008×10 ⁻³	20.0890	20.09	2407.89	992.29	5.0050×10 ⁻²	6.597×10 ⁻⁴	6.65×10 ⁻⁷
40	1.008×10 ⁻³	19.5190	19.52	2406.70	992.10	5.1200×10 ⁻²	0.0006530	6.58×10 ⁻⁷
40.5	1.008×10 ⁻³	19.1200	19.12	2405.50	991.90	5.2630×10 ⁻²	6.473×10 ⁻⁴	6.53×10 ⁻⁷
41	1.008×10 ⁻³	18.7210	18.72	2404.30	991.70	5.4060×10 ⁻²	6.416×10 ⁻⁴	6.47×10 ⁻⁷
41.5	1.009×10 ⁻³	18.3220	18.32	2403.10	991.50	5.5490×10 ⁻²	6.359×10 ⁻⁴	6.41×10 ⁻⁷
42	1.009×10 ⁻³	17.9230	17.92	2401.90	991.30	0.056920	6.302×10 ⁻⁴	6.36×10 ⁻⁷

ตาราง ผ.1 คุณสมบัติของไอน้ำ (ต่อ)

Temp (°C)	ปริมาตรจำเพาะ (m ³ /kg)			เอนทาลปี (kJ/kg)	ความหนาแน่น (kg/m ³)		ความหนืดพลศาสตร์ (kg/m.s)	ความหนืดจลศาสตร์ (m ² /s)
T	v _f	v _{fg}	v _g	h _{fg}	ρ _f	T	v _f	v _{fg}
43	1.009×10 ⁻³	16.9630	16.96	2399.56	990.90	5.9780×10 ⁻²	0.0006188	6.24×10 ⁻⁷
43.5	1.009×10 ⁻³	16.7260	16.73	2398.30	990.70	6.1210×10 ⁻²	0.0006131	6.19×10 ⁻⁷
44	1.010×10 ⁻³	16.3270	16.33	2397.10	990.50	6.1210×10 ⁻²	0.0006074	6.13×10 ⁻⁷
44.5	1.010×10 ⁻³	15.9280	15.93	2395.90	990.30	6.4070×10 ⁻²	0.0006017	6.08×10 ⁻⁷
45	1.010×10 ⁻³	15.2590	15.26	2394.80	990.10	6.5500×10 ⁻²	0.0005960	6.02×10 ⁻⁷
45.5	1.020×10 ⁻³	15.1790	15.18	2393.50	989.90	6.7260×10 ⁻²	0.0005911	5.97×10 ⁻⁷
46	1.040×10 ⁻³	14.8290	14.83	2392.30	989.70	6.9020×10 ⁻²	0.0005862	5.92×10 ⁻⁷
46.5	1.060×10 ⁻³	14.4790	14.48	2391.10	989.50	7.0778×10 ⁻²	0.0005813	5.87×10 ⁻⁷
47	1.080×10 ⁻³	14.1290	14.13	2389.90	989.30	7.2540×10 ⁻²	0.0005764	5.83×10 ⁻⁷
47.5	1.011×10 ⁻³	13.7790	13.78	2388.70	989.10	7.4800×10 ⁻²	0.0005715	5.78×10 ⁻⁷
48	1.011×10 ⁻³	13.3210	13.32	2387.54	988.90	7.6060×10 ⁻²	0.0005666	5.73×10 ⁻⁷
50	1.012×10 ⁻³	12.0290	12.03	2382.70	988.10	8.3100×10 ⁻²	0.0005470	5.54×10 ⁻⁷
53	1.014×10 ⁻³	10.5518	10.55	2375.50	986.36	9.5940×10 ⁻²	0.0005212	5.28×10 ⁻⁷
55	1.015×10 ⁻³	9.5670	9.57	2370.70	985.20	0.104500	0.0005040	5.12×10 ⁻⁷
58	1.016×10 ⁻³	8.4288	8.43	2363.38	984.06	0.120040	0.0004818	4.90×10 ⁻⁷
60	1.017×10 ⁻³	7.6700	7.67	2358.50	983.30	0.130400	0.0004670	4.75×10 ⁻⁷

ตาราง ผ.1 คุณสมบัติของไอน้ำ (ต่อ)

Temp (°C)	ปริมาตรจำเพาะ (m ³ /kg)			เอนทาลปี (kJ/kg)	ความหนาแน่น (kg/m ³)		ความหนืดพลศาสตร์ (kg/m.s)	ความหนืดจลศาสตร์ (m ² /s)
T	v _f	v _{fg}	v _g	h _{fg}	ρ _f	T	v _f	v _{fg}
65	1.020×10 ⁻³	6.1960	6.20	2346.20	980.40	0.161400	4.330×10 ⁻⁴	4.42×10 ⁻⁷
68	1.022×10 ⁻³	5.5030	5.50	2338.76	978.66	0.183540	4.156×10 ⁻⁴	4.25×10 ⁻⁷
70	1.023×10 ⁻³	5.0410	5.04	2333.80	977.50	0.198300	4.040×10 ⁻⁴	4.13×10 ⁻⁷
73	1.025×10 ⁻³	4.4944	4.50	2326.36	975.82	0.224580	3.884×10 ⁻⁴	3.98×10 ⁻⁷
75	1.026×10 ⁻³	4.1300	4.13	2321.40	974.70	0.242100	3.780×10 ⁻⁴	3.88×10 ⁻⁷
78	1.028×10 ⁻³	3.6956	3.70	2313.84	972.96	0.272940	3.642×10 ⁻⁴	3.74×10 ⁻⁷
80	1.029×10 ⁻³	3.4060	3.41	2308.80	971.80	0.293500	3.550×10 ⁻⁴	3.65×10 ⁻⁷
83	1.031×10 ⁻³	3.0586	3.06	2301.12	969.58	0.329560	3.418×10 ⁻⁴	3.53×10 ⁻⁷
85	1.033×10 ⁻³	2.8270	2.83	2296.00	968.10	0.353600	3.330×10 ⁻⁴	3.44×10 ⁻⁷
88	1.035×10 ⁻³	2.5468	2.55	2288.32	966.42	0.395540	3.222×10 ⁻⁴	3.33×10 ⁻⁷
90	1.036×10 ⁻³	2.3600	2.36	2283.20	965.30	0.423500	3.150×10 ⁻⁴	3.26×10 ⁻⁷
93	1.038×10 ⁻³	2.1326	2.13	2275.40	963.02	0.472100	3.042×10 ⁻⁴	3.16×10 ⁻⁷
95	1.040×10 ⁻³	1.9810	1.98	2270.20	961.50	0.504500	2.970×10 ⁻⁴	3.09×10 ⁻⁷
98	1.042×10 ⁻³	1.7955	1.80	2262.28	959.34	0.560480	2.880×10 ⁻⁴	3.00×10 ⁻⁷
100	1.044×10 ⁻³	1.6719	1.67	2257.00	957.90	0.597800	2.820×10 ⁻⁴	2.94×10 ⁻⁷
103	1.046×10 ⁻³	1.5198	1.52	2249.02	957.90	0.666350	2.739×10 ⁻⁴	2.86×10 ⁻⁷

ตาราง ผ.1 คุณสมบัติของไอน้ำ (ต่อ)

Temp (°C)	ปริมาตรจำเพาะ (m ³ /kg)			เอนทาลปี (kJ/kg)	ความหนาแน่น (kg/m ³)		ความหนืดพลศาสตร์ (kg/m.s)	ความหนืดจลศาสตร์ (m ² /s)
T	v _f	v _{fg}	v _g	h _{fg}	ρ _f	T	v _f	v _{fg}
108	1.050×10 ⁻³	1.2928	1.29	2235.60	952.06	0.780600	2.604×10 ⁻⁴	2.74×10 ⁻⁷
110	1.052×10 ⁻³	1.2091	1.21	2230.20	950.60	0.826300	2.550×10 ⁻⁴	2.68×10 ⁻⁷
113	1.054×10 ⁻³	1.1050	1.11	2221.98	951.32	0.914710	2.481×10 ⁻⁴	2.61×10 ⁻⁷
115	1.056×10 ⁻³	1.0355	1.04	2216.50	947.00	0.97365	2.435×10 ⁻⁴	2.57×10 ⁻⁷
118	1.058×10 ⁻³	0.9487	0.95	2208.16	945.56	1.062060	2.366×10 ⁻⁴	2.50×10 ⁻⁷
120	1.060×10 ⁻³	0.8908	0.89	2202.60	943.40	1.121000	2.320×10 ⁻⁴	2.46×10 ⁻⁷
123	1.063×10 ⁻³	0.8181	0.82	2194.14	941.64	1.233500	2.263×10 ⁻⁴	2.40×10 ⁻⁷
125	1.065×10 ⁻³	0.7695	0.77	2188.50	939.00	1.308500	2.225×10 ⁻⁴	2.37×10 ⁻⁷
128	1.068×10 ⁻³	0.7083	0.71	2179.92	937.24	1.421000	2.168×10 ⁻⁴	2.31×10 ⁻⁷
130	1.070×10 ⁻³	0.6674	0.67	2174.20	934.60	1.496000	2.130×10 ⁻⁴	2.28×10 ⁻⁷
133	1.073×10 ⁻³	0.6156	0.62	2165.44	932.02	1.636700	2.082×10 ⁻⁴	2.23×10 ⁻⁷
135	1.075×10 ⁻³	0.5811	0.58	2159.60	928.15	1.730500	2.050×10 ⁻⁴	2.21×10 ⁻⁷
138	1.078×10 ⁻³	0.5371	0.54	2150.66	925.57	1.871200	2.002×10 ⁻⁴	2.16×10 ⁻⁷
140	1.080×10 ⁻³	0.5078	0.51	2144.70	921.70	1.965000	1.970×10 ⁻⁴	2.14×10 ⁻⁷
143	1.083×10 ⁻³	0.4703	0.47	2135.64	920.68	2.139300	1.928×10 ⁻⁴	2.09×10 ⁻⁷
145	1.085×10 ⁻³	0.4452	0.45	2129.60	919.15	2.255500	0.0001900	2.07×10 ⁻⁷

ตาราง ผ.1 คุณสมบัติของไอน้ำ (ต่อ)

Temp (°C)	ปริมาตรจำเพาะ (m ³ /kg)			เอนทาลปี (kJ/kg)	ความหนาแน่น (kg/m ³)		ความหนืดพลศาสตร์ (kg/m.s)	ความหนืดจลศาสตร์ (m ² /s)
T	v _f	v _{fg}	v _g	h _{fg}	ρ _f	T	v _f	v _{fg}
150	1.091×10 ⁻³	0.3917	0.39	2114.30	916.60	2.546000	1.830×10 ⁻⁴	2.00×10 ⁻⁷
153	1.094×10 ⁻³	0.3733	0.37	2108.02	913.84	2.759000	1.791×10 ⁻⁴	1.96×10 ⁻⁷
155	1.096×10 ⁻³	0.3457	0.35	2098.60	912.00	2.901000	1.765×10 ⁻⁴	1.94×10 ⁻⁷
158	1.100×10 ⁻³	0.3298	0.33	2092.20	910.16	3.114000	1.726×10 ⁻⁴	1.90×10 ⁻⁷
160	1.102×10 ⁻³	0.3060	0.31	2082.60	907.40	3.256000	1.700×10 ⁻⁴	1.87×10 ⁻⁷
163	1.098×10 ⁻³	0.2922	0.29	2076.04	905.46	3.514900	1.670×10 ⁻⁴	1.84×10 ⁻⁷
165	1.108×10 ⁻³	0.2716	0.27	2066.20	902.55	3.687500	1.650×10 ⁻⁴	1.83×10 ⁻⁷
168	1.112×10 ⁻³	0.2596	0.26	2059.52	900.61	3.946400	1.620×10 ⁻⁴	1.80×10 ⁻⁷
170	1.114×10 ⁻³	0.2417	0.24	2049.50	897.70	4.119000	1.600×10 ⁻⁴	1.78×10 ⁻⁷
173	1.118×10 ⁻³	0.2313	0.23	2042.66	895.62	4.429200	1.570×10 ⁻⁴	1.75×10 ⁻⁷
175	1.121×10 ⁻³	0.2157	0.22	2032.40	892.50	4.636000	1.550×10 ⁻⁴	1.74×10 ⁻⁷
178	1.125×10 ⁻³	0.2066	0.21	2025.44	890.42	4.946200	1.520×10 ⁻⁴	1.71×10 ⁻⁷
180	1.127×10 ⁻³	0.1929	0.19	2015.00	887.30	5.153000	1.500×10 ⁻⁴	1.69×10 ⁻⁷
183	1.131×10 ⁻³	0.1849	0.19	2007.84	885.12	5.523500	1.476×10 ⁻⁴	1.67×10 ⁻⁷
185	1.134×10 ⁻³	0.1730	0.17	1997.10	881.85	5.770500	1.460×10 ⁻⁴	1.66×10 ⁻⁷
188	1.138×10 ⁻³	0.1659	0.17	1989.78	879.67	6.141000	1.436×10 ⁻⁴	1.63×10 ⁻⁷

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ บุญชนะ

ประวัติการศึกษา : วศ.ม.(วิศวกรรมเครื่องกล) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

: ปริญญาโท (ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ประวัติการทำงาน : วิศวกรออกแบบและที่ปรึกษา บริษัทสร้างสรรค์ จำกัด พ.ศ.2536 – 2542

: อาจารย์ประจำภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล

: วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ พ.ศ. 2542-ปัจจุบัน

วิชาที่สอน : Industrial Boiler, Industrial Energy Management, Heat Transfer, Power - Plant Engineering)

ผลงานวิชาการ

ก. บทความวิชาการ

1. บทความวิชาการพิมพ์เผยแพร่ในวารสารเทคนิคเครื่องกล-ไฟฟ้าอุตสาหกรรม ของบริษัท เอ็ม แอนด์อี จำกัด

1. เรื่อง “เทคนิคการออกแบบระบบท่อไอน้ำ” ฉบับที่ 181 /ก.พ./2543
2. เรื่อง “การคำนวณคอนเดนเซอร์สำหรับโรงไฟฟ้า” ฉบับที่ 183 /เม.ย./2543
3. เรื่อง “การคำนวณคูลลิ่งทาวเวอร์สำหรับโรงไฟฟ้า” ฉบับที่ 185 /มิ.ย./2543
4. เรื่อง “การประหยัดพลังงานในหม้อไอน้ำ” ฉบับที่ 188 /ก.ย./2543
5. เรื่อง “กฎหมายหม้อไอน้ำในประเทศไทย” ฉบับที่ 194 /มี.ค./2544
6. เรื่อง “การวิเคราะห์การสันดาป (ตอนที่ 1)” ฉบับที่ 195 /เม.ย./2544
7. เรื่อง “การวิเคราะห์การสันดาป (ตอนที่ 2)” ฉบับที่ 196 /พ.ค./2544

2. บทความวิชาการ พิมพ์เผยแพร่ในวารสาร Industrial ของบริษัท ซีอีดีเคชั่น(มหาชน) จำกัด

1. เรื่อง “การนำ VSD มาใช้ในระบบปรับอากาศ” ฉบับที่ 70 /พ.ค./2543
2. เรื่อง “การทำน้ำร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์” ฉบับที่ 73 /ก.ค./2543

3. บทความวิชาการ พิมพ์เผยแพร่ในวารสารประสิทธิภาพพลังงานของศูนย์อนุรักษ์พลังงานแห่งประเทศไทย

1. เรื่อง “การนำพลังงานความร้อนกลับมาใช้ใหม่” ฉบับที่ 50 /ก.ค.-ก.ย./2543

4. บทความวิชาการ พิมพ์เผยแพร่ในวารสารเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น)

1. เรื่อง “พลังงานแสงอาทิตย์กับการนำมาใช้” ฉบับที่ 156 /เม.ย.-พ./2544

บทความวิชาการ พิมพ์เผยแพร่ในวารสารวิศวกรรมสาร,วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์(ว.ส.ท.), ฉบับที่ 669-670, 2546.

1. เรื่อง “การคำนวณหาต้นทุนพลังงานไอน้ำ”

ข. งานวิจัยที่ตีพิมพ์

1. Boonnasa, S., Namprakai, P. (2006) Optimization in Operation of Absorption Chiller for Chiller Water Storage, 32nd Congress on Science and Technology of Thailand (STT.32).

2. Boonnasa, S., Namprakai, P. and Muangnapoh, T. (2005) Performance Improvement of the Combined Cycle Power Plant by Intake Air Cooling Using an Absorption Chiller, Energy Journal.

3. Boonnasa, S. and Namprakai, P. (2003) Predicting the effects of Ambient on Combined Cycle Power Plant of the EGAT (South Bangkok Block 1), Proceedings of the 1st Int. Conference on Sustainable Energy and Green Architecture, Thailand, pp. 162-167.

4. Boonnasa, S. and Namprakai, P. (2004) Exergy Evaluation of the EGAT (Block 1) Combined Cycle Power Plant. Conference on Sustainable Energy and Environment, Thailand, pp. 437-441.

5. สมเกียรติ บุญนสะ. “The Effect of Waste Heat Recovery Efficiency on the Cost Reduction of the Electric Generation Fueled by a Paddy Husk”. การประชุมวิชาการเรื่องการถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อน ครั้งที่ 6, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จังหวัดเชียงใหม่, 15-16 มีนาคม 2550.

6. สมเกียรติ บุญนสะ. “การเปรียบเทียบอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ผ่านผนังระหว่างอิฐ Block ธรรมดาและอิฐ Cool Block”. (Comparison of Heat Transfer through the Wall Made of the Conventional Concrete Block and Cool Block) การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 2, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา, วันที่ 27-29 กรกฎาคม 2549, หน้า 26-31

7. สมเกียรติ บุญนสะ. “การวิเคราะห์ประสิทธิภาพและอัตราส่วนระหว่างพลังงานความร้อนต่อกำลังไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังกลบ”. (An Analysis of Efficiency and Heat to Power Ratio of a Paddy Husk Power Plant) การประชุมวิชาการเครือข่าย

พลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 2, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา, วันที่ 27-29 กรกฎาคม 2549, หน้า 97-100

8. สมเกียรติ บุญณะ. “การวิเคราะห์หาต้นทุนทางด้านพลังงานและประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำที่ใช้ถ่านหินบิทูมินัสเป็นเชื้อเพลิง”. (Analysis of Capital Cost for Energy and the Efficiency of Boiler using Bituminous Coal) การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 2, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา, วันที่ 27-29 กรกฎาคม 2549, หน้า 108-111

9. สมเกียรติ บุญณะ. “การอนุรักษ์พลังงานใน KMITNB โดยการสะสมน้ำเย็น”. (A Case Study of Energy Conservation in KMITNB using Chilled Water Storage) การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 1, โรงแรมแอมบาสซาเดอร์ ซิตี้ จอมเทียน จังหวัดชลบุรี วันที่ 11-13 พฤษภาคม 2548, หน้า 238-243

10. สมเกียรติ บุญณะ. “การประเมินพลังงานที่ประหยัดได้ของการนำความร้อนทิ้งกลับใช้ใหม่จากเครื่องอัดอากาศ”. (Energy Saving Evaluation in Waste Heat Recovery from Air Compressor) การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 1, โรงแรมแอมบาสซาเดอร์ ซิตี้ จอมเทียน จังหวัดชลบุรี, วันที่ 11-13 พฤษภาคม 2548, หน้า 284-287

ค. หนังสือและตำรา

1. วิศวกรรมโรงจักรต้นกำลัง พ.ศ. 2544
2. การสิ้นสละเทียนเชิงกล พ.ศ. 2544
3. การจัดการพลังงานในโรงงานอุตสาหกรรม พ.ศ. 2546
4. คู่มือการประหยัดพลังงานในโรงงานอุตสาหกรรมทอผ้า ให้กับ บ. Team Energy & Management Co., Ltd. พ.ศ. 2547
5. การถ่ายเทความร้อน พ.ศ. 2548