



ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

ภาควิชาครุศาสตร์เครื่องกล คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

เรื่อง ชุดทดลองการพาความร้อน

โดย นายอนากุล เกิดแก่นแก้ว
นางสาวมลชนก เพชรรัตน์
นางสาวมลชนก กลทิพย์

โดยรับอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

.....หัวหน้าภาควิชาครุศาสตร์เครื่องกล

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรวิทย์ ยะนิล)

คณะกรรมการสอบปริญญาานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ต้องชนะ ทองทิพย์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์

(อาจารย์ดร.ปิยะ กรกชจินตนาการ)

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.กิตติวุฒิ ศุทธิวิโรจน์)

.....กรรมการ

(อาจารย์ ดร.ธีรภาพ อมรสวัสดิ์รักษ์)

ชื่อ : นายอนากุล เกิดแก่นแก้ว
นางสาวกมลชนก เพชรรัตน์
นางสาวมลชนก กลทิพย์
ชื่อปริญญาบัตร : ชุดการทดลองการพาความร้อน
สาขาวิชา : วิศวกรรมเครื่องกล
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาบัตร : อาจารย์ ดร.ปิยะ กรกชจินตนาการ
ปีการศึกษา : 2565

บทคัดย่อ

ปริญญาบัตรนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างชุดการทดลองการพาความร้อนให้สามารถใช้งานได้ และผลการทดลองมีความผิดพลาดน้อยที่สุด โดยชุดการทดลองการพาความร้อนนั้นใช้ทดลองได้ทั้งการพาแบบบังคับและการพาแบบอิสระโดยใช้อากาศเป็นตัวพาความร้อน การพาแบบบังคับจะมีพัดลมดูดอากาศเป็นตัวบังคับลมจะเคลื่อนผ่านตัวฮีตเตอร์ที่มีสองลักษณะ คือ ทรงกระบอก และทรงสี่เหลี่ยม ในการทดลองการพาแบบบังคับจะแบ่งความเร็วลมเป็น 4 ระดับ ได้แก่ 0.6, 1.0, 2.0 และ 2.7 หน่วย m/s และเปลี่ยนอุณหภูมิในการทดลอง ได้แก่ 50, 75, 100, 125 และ 150 หน่วย C ตามลำดับ ส่วนการพาแบบอิสระจะทำในลักษณะเดิมแต่ไม่เปิดพัดลมดูดอากาศ เมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการทดลองมาเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์การพาที่ได้จากทฤษฎี การทดลองของทรงกระบอกมีค่าสัมประสิทธิ์การพาที่ผิดพลาดน้อยกว่าทรงสี่เหลี่ยม ค่าความผิดพลาดจากการทดลองเนื่องจากในอุณหภูมิใดอุณหภูมิหนึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การพาที่ตรงกันข้ามกับทางทฤษฎี

(ปริญญาบัตรนี้มีทั้งสิ้น 116 หน้า)

คำสำคัญ : สัมประสิทธิ์การพา, การพาความร้อน



อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาบัตรหลัก

Name : Mr. Anakun Kerdkankaew
Ms. Kamonchanok Petcharat
Ms. Monchanok Gonthip
Project Title : Convection Laboratory Equipment
Major Field : Mechanical Engineering
King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Project Advisor. : Dr. Piya Korakochjintanakarn
Academic Year. : 2022

Abstract

The objective of research was to build a Convection Laboratory Equipment it can use, and experimental results are least mistake. Convection Experiment can be used for Force and Free convection experiment. Force convection uses air for heat transfer by exhaust fan and air will move through heater, we have 2 types of heaters is Cylinder heater and Cuboid heater. For the experiment we will separate the air flow into 4 levels namely 0.6, 1.0, 2.0 and 2.7 m/s and change the temperature for one experiment namely 50, 75, 100, 125 and 150 °C. Free convection does the same as force convection but doesn't use exhaust fan. When we bring convection coefficient from experiment to compare with convection coefficient from theory, Cylinder heater's experiment have an error less than Cuboid heater's experiment. The error from experiment caused by some temperatures has a convection coefficient opposite a convection coefficient from theory.

(Total 116 pages)

Keyword : convection coefficient, convection



Project Advisor

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี และคณะผู้จัดทำสามารถที่จะผ่านอุปสรรคที่ได้แก้ไขจนเกิดความสำเร็จ โดยได้รับความอนุเคราะห์ และช่วยเหลือในการดำเนินงานปริญญาบัตรฉบับนี้มาโดยตลอด อันได้แก่ ครอบครัว ที่มอบโอกาสทางการศึกษาและให้กำลังใจรวมถึงการช่วยเหลือทางการเงินทุนต่าง ๆ อาจารย์ปิยะ กรกขจินตนาการ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาบัตร ที่ช่วยแนะนำ รวมทั้งช่วยแก้ไขเพื่อให้ปริญญาบัตรสมบูรณ์ และผ่านลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ทางคณะผู้จัดทำปริญญาบัตรฉบับนี้ขอขอบคุณทุกท่านเป็นอย่างสูง ตลอดจนเพื่อนที่คอยให้กำลังใจ ช่วยเหลือ และสนับสนุนต่อคณะผู้จัดทำเสมอมา จนทำให้ปริญญาบัตรนี้เสร็จสมบูรณ์ด้วยดี

อนากุล เกิดแก่นแก้ว

กมลชนก เพชรรัตน์

มลชนก กลทีพย์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ฑ
คำอธิบายสัญลักษณ์	ณ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ประวัติความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตการศึกษา	1
1.4 ประโยชน์จากการศึกษา	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 หลักการถ่ายเทความร้อน	3
2.2 การถ่ายเทความร้อนพื้นฐาน	3
2.3 การวิเคราะห์หิมิตี	5
2.4 อุปกรณ์ให้ความร้อน	7
2.5 พัดลมและมอเตอร์	8
2.6 เครื่องมือวัด	10
2.7 อุปกรณ์ทางไฟฟ้า	11
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	12
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงาน	14
3.1 ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับการพาความร้อนแบบบังคับ	16
3.2 ออกแบบและพัฒนาชุดทดลอง	16
3.3 ดำเนินการสร้างชุดทดลอง	21
3.4 ขั้นตอนดำเนินงานติดตั้งอุปกรณ์การวัด	24

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.5 ทดสอบและเก็บผลทดลอง	25
3.6 ระยะเวลาดำเนินการ	29
บทที่ 4 ผลการทดลอง	30
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การพาและเรย์โนลด์์นัมเบอร์ของทรงกระบอก	30
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การพาและเรย์โนลด์์นัมเบอร์ของทรงสี่เหลี่ยม	34
บทที่ 5 สรุปผลและอภิปราย	39
5.1 สรุปผลการดำเนินงาน	39
5.2 อภิปรายผลการทดลอง	40
5.3 ข้อเสนอแนะ	40
เอกสารอ้างอิง	41
ภาคผนวก ก	43
คู่มือการใช้งานและการทดลอง	44
ภาคผนวก ข	47
ใบบันทึกผลการทดลองทรงกระบอกการพาความร้อนแบบบังคับ	48
ใบบันทึกผลการทดลองทรงกระบอกการพาความร้อนแบบอิสระ	69
ใบบันทึกผลการทดลองทรงสี่เหลี่ยมการพาความร้อนแบบบังคับ	75
ใบบันทึกผลการทดลองทรงสี่เหลี่ยมการพาความร้อนแบบอิสระ	96

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2-1 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของของไหลบางชนิด	4
2-2 แสดงตัวแปรและมิติต่าง ๆ ที่สำคัญของการถ่ายเทความร้อน	5
2-3 แสดงคุณลักษณะและการทำงานของพัดลมแบบอากาศไหลตามแนวแกน	9
3-1 ตารางบันทึกผลการพาความร้อนแบบบังคับ	26
3-2 ตารางประกอบการคำนวณการพาความร้อนแบบบังคับ	26
3-3 ตารางบันทึกผลการพาความร้อนแบบอิสระ	28
3-4 ตารางประกอบการคำนวณการพาความร้อนแบบอิสระ	28
3-5 ตารางระยยะการดำเนินงาน	29
ข-1 บันทึกการทดลองการพาแบบบังคับความเร็วลม 0.6 m/s อุณหภูมิผิว 50 °C	48
ข-2 ตารางประกอบการคำนวณการพาแบบบังคับความเร็วลม 0.6 m/s อุณหภูมิผิว 50 °C	48
ข-3 บันทึกการทดลองการพาแบบบังคับความเร็วลม 0.6 m/s อุณหภูมิผิว 75 °C	49
ข-4 ตารางประกอบการคำนวณการพาแบบบังคับความเร็วลม 0.6 m/s อุณหภูมิผิว 50 °C	49
ข-5 บันทึกการทดลองการพาแบบบังคับความเร็วลม 0.6 m/s อุณหภูมิผิว 100 °C	50
ข-6 ตารางประกอบการคำนวณการพาแบบบังคับความเร็วลม 0.6 m/s อุณหภูมิผิว 100 °C	50
ข-7 บันทึกการทดลองการพาแบบบังคับความเร็วลม 0.6 m/s อุณหภูมิผิว 125 °C	51
ข-8 ตารางประกอบการคำนวณการพาแบบบังคับความเร็วลม 0.6 m/s อุณหภูมิผิว 125 °C	51
ข-9 บันทึกการทดลองการพาแบบบังคับความเร็วลม 0.6 m/s อุณหภูมิผิว 150 °C	52
ข-11 บันทึกการทดลองการพาแบบบังคับความเร็วลม 1.0 m/s อุณหภูมิผิว 50 °C	53
ข-12 ตารางประกอบการคำนวณการพาแบบบังคับความเร็วลม 1.0 m/s อุณหภูมิผิว 50 °C	53
ข-13 บันทึกการทดลองการพาแบบบังคับความเร็วลม 1.0 m/s อุณหภูมิผิว 75 °C	54
ข-14 ตารางประกอบการคำนวณการพาแบบบังคับความเร็วลม 1.0 m/s อุณหภูมิผิว 75 °C	54
ข-15 บันทึกการทดลองการพาแบบบังคับความเร็วลม 1.0 m/s อุณหภูมิผิว 100 °C	55
ข-16 ตารางประกอบการคำนวณการพาแบบบังคับความเร็วลม 1.0 m/s อุณหภูมิผิว 100 °C	55
ข-17 บันทึกการทดลองการพาแบบบังคับความเร็วลม 1.0 m/s อุณหภูมิผิว 125 °C	56
ข-18 ตารางประกอบการคำนวณการพาแบบบังคับความเร็วลม 1.0 m/s อุณหภูมิผิว 125 °C	56

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข-94 ตารางประกอบการคำนวณการพาแบบอิสระอุณหภูมิผิว 75 °C	97
ข-95 บันทึกการทดลองการพาแบบอิสระอุณหภูมิผิว 100 °C	98
ข-96 ตารางประกอบการคำนวณการพาแบบอิสระอุณหภูมิผิว 100 °C	98
ข-97 บันทึกการทดลองการพาแบบอิสระอุณหภูมิผิว 125 °C	99
ข-98 ตารางประกอบการคำนวณการพาแบบอิสระอุณหภูมิผิว 125 °C	99
ข-99 บันทึกการทดลองการพาแบบอิสระอุณหภูมิผิว 150 °C	100
ข-100 ตารางประกอบการคำนวณการพาแบบอิสระอุณหภูมิผิว 150 °C	100

สารบัญรูปภาพ

ภาพที่	หน้า
2-1 แสดงการถ่ายเทความร้อนโดยการนำ การพา และแผ่รังสี	4
3-1 ขั้นตอนการดำเนินงาน	15
3-2 ตำแหน่งของอุปกรณ์ในชุดทดลอง	17
3-3 แสดงตัวเครื่องของชุดทดลอง	17
3-4 ฮีตเตอร์ที่รอบนอกเป็นเกลียวสำหรับสวม	18
3-5 ฮีตเตอร์ทรงกระบอกแท่งเดียว	18
3-6 ฮีตเตอร์ทรงสี่เหลี่ยม	19
3-8 ตู้คอนโทรล	20
3-9 พาวเวอร์ซัพพลายและเบรกเกอร์	20
3-10 เครื่องวัดความเร็วลม	21
3-11 โครงสร้างชุดทดลองการพาความร้อนแบบบังคับ	21
3-12 ฮีตเตอร์ที่ออกแบบให้เป็นเกลียวสำหรับสวม	22
3-13 อลูมิเนียมทรงกระบอกสำหรับสวมบนฮีตเตอร์	22
3-14 อลูมิเนียมทรงสี่เหลี่ยมสำหรับสวมบนฮีตเตอร์	23
3-15 ตู้ควบคุมไฟฟ้าสำหรับฮีตเตอร์	23
3-16 พัดลมดูดอากาศ	24
3-17 ตำแหน่งของเครื่องวัดความเร็วลม	24
4-1 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การพาและเรย์โนลด์์นัมเบอร์ ของทรงกระบอกที่อุณหภูมิผิว 50 °C	30
4-2 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การพาและเรย์โนลด์์นัมเบอร์ ของทรงกระบอกที่อุณหภูมิ 75 °C	31
4-3 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การพาและเรย์โนลด์์นัมเบอร์ ของทรงกระบอกที่อุณหภูมิผิว 100 °C	31
4-4 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การพาและเรย์โนลด์์นัมเบอร์ ของทรงกระบอกที่อุณหภูมิผิว 125 °C	32
4-5 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การพาและเรย์โนลด์์นัมเบอร์ ของทรงกระบอกที่อุณหภูมิผิว 150 °C	33

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-6 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การพาความร้อนและเรย์โนลด์นัมเบอร์ ของทรงกระบอกที่อุณหภูมิผิว 50, 75, 100, 125 และ 150 °C	34
4-7 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การพาและเรย์โนลด์นัมเบอร์ ของทรงสี่เหลี่ยมที่อุณหภูมิผิว 50 °C	35
4-8 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การพาและเรย์โนลด์นัมเบอร์ ของทรงสี่เหลี่ยมที่อุณหภูมิผิว 75 °C	35
4-9 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การพาและเรย์โนลด์นัมเบอร์ ของทรงสี่เหลี่ยมที่อุณหภูมิผิว 100 °C	36
4-10 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การพาและเรย์โนลด์นัมเบอร์ ของทรงสี่เหลี่ยมที่อุณหภูมิผิว 125 °C	36
4-11 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การพาและเรย์โนลด์นัมเบอร์ ของทรงสี่เหลี่ยมที่อุณหภูมิผิว 150 °C	37
4-12 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การพาและเรย์โนลด์นัมเบอร์ ของทรงสี่เหลี่ยมที่อุณหภูมิผิว 50, 75, 100, 125 และ 150 °C	38
ก-1 ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์การวัด	44
ก-2 ตัวตั้งอุณหภูมิ	44
ก-3 การติดตั้งอุปกรณ์การวัด	45
ก-4 ตัวปรับความเร็วลม	46

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์		หน่วย
V	หน่วยเรียกขนาดแรงดันไฟฟ้า	volt
A	หน่วยเรียกขนาดกระแสไฟฟ้า	amp
V_{∞}	ค่าความเร็วลมคงที่	m/s
$T_{\infty,in}$	อุณหภูมิขณะลมเข้า	°C
$T_{\infty,out}$	อุณหภูมิขณะลมออก	°C
$T_{s,heater}$	อุณหภูมิคงที่ของฮีตเตอร์	°C
$T_{initial}$	อุณหภูมิภายนอก	°C
$T_{s,1}$	อุณหภูมิผิววัตถุที่1	°C
$T_{s,2}$	อุณหภูมิผิววัตถุที่2	°C
Δt	เวลา	sec.
$T_{ave,s}$	อุณหภูมิเฉลี่ย	°C
T_f	อุณหภูมิเฉลี่ยระกวางผิวกับอากาศ	K
Nu	ตัวเลขนัสเซิลล์	
h	สัมประสิทธิ์การพาความร้อน	
\dot{Q}_{conv}	อัตราการพาความร้อน	kJ/s
C	ค่าคงที่	
m	ค่าคงที่	
n	ค่าคงที่	

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

การพาความร้อน คือ วิธีการที่ความร้อนเคลื่อนที่ระหว่างผิวของของแข็ง และของไหล ซึ่งของไหลจะเป็นตัวพาความร้อนจากผิวของของแข็ง กลไกที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของความร้อนโดยการพาเกิดจากผลรวมของการนำความร้อน การสะสมพลังงาน และการเคลื่อนที่ของของไหล โดยการพาแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ การพาตามธรรมชาติ และ การพาแบบบังคับ

เนื่องจากปัจจุบันทางสถานศึกษาได้มีการศึกษาเรื่องการพาความร้อน โดยในการศึกษาจะใช้ชุดทดลองการพาความร้อน ซึ่งขั้นตอนการทดลองนั้นจะเริ่มจากติดตั้งฮีตเตอร์ที่มีรูปทรงต่าง ๆ ตามที่ต้องการศึกษา ซึ่งรูปทรงของฮีตเตอร์จะมีได้หลายรูปแบบด้วยกัน เช่น ทรงกระบอก ทรงกลม ครีบ ฯลฯ จากนั้นปรับตั้งอุณหภูมิตามที่โจทย์กำหนด การพาความร้อนแบบบังคับจะเปิดพัดลม หรือโบลเวอร์ที่เป็นกลไกภายนอกเพื่อให้ของไหลเกิดการเคลื่อนที่ผ่านตัวฮีตเตอร์ที่เกิดความร้อนแล้วพาความร้อนไป ส่วนการพาความร้อนแบบอิสระจะไม่ใช่พัดลม แล้วใช้เครื่องมือวัดวัดค่าที่ต้องการเพื่อนำไปคำนวณตามสมการ จากการสำรวจราคาชุดทดลองการพาความร้อนที่ใช้ในการทดลองนั้นโดยทั่วไปมีราคาที่สูง ดังนั้นสำหรับวิทยานิพนธ์นี้จึงจะทำการศึกษา และสร้างชุดทดลองสำหรับทดลองในเรื่องการพาความร้อนให้สามารถใช้งานได้ และหาค่าได้โดยมีค่าความผิดพลาดน้อยที่สุด ซึ่งการสร้างชุดทดลองนี้ขึ้นเพื่อจะลดต้นทุนในการซื้อชุดทดลองการพาความร้อน และสามารถใช้ในการศึกษาและพัฒนาต่อไปได้

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อสร้างชุดการทดลองการพาความร้อนให้สามารถใช้งานได้
- 1.2.2 ชุดทดลองการพาความร้อนเมื่อใช้ในการทดลองแล้วผลการทดลองมีความผิดพลาดน้อยที่สุด

1.3 ขอบเขตปริญญาณิพนธ์

- 1.3.1 สร้างชุดการทดลองการพาความร้อนโดยใช้อากาศเป็นตัวพา
- 1.3.2 อุณหภูมิของผิววัสดุที่ใช้ทดลองอยู่ระหว่างช่วง 50°C ถึง 150°C
- 1.3.3 ความเร็วลมปรับระดับค่าได้มากกว่า 3 ระดับ อยู่ในช่วงไม่เกิน 4 m/s
- 1.3.4 รูปทรงของวัสดุที่ใช้ในการทดลอง มีลักษณะเป็นทรงสี่เหลี่ยมและทรงกระบอก

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ได้ชุดการทดลองการพาความร้อนเพื่อใช้ในการศึกษา
- 1.4.2 ลดทุนในการซื้อชุดการทดลองการพาความร้อน
- 1.4.3 เพื่อเป็นรูปแบบสำหรับการศึกษา และพัฒนาต่อไป

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 หลักการถ่ายเทความร้อน (Principle of Heat Transfer) [1]

การถ่ายเทความร้อน คือ การส่งพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิ เมื่อมีความต่างของอุณหภูมิเกิดขึ้นที่ภายในหรือระหว่างตัวกลาง การถ่ายเทความร้อนก็จะเกิดขึ้นได้ ดังนั้นพื้นฐานของการถ่ายเทความร้อน คือ ความต่างของอุณหภูมิ (Temperature Different) ถ้าตัวกลางทั้งสองมีอุณหภูมิที่เท่ากันการถ่ายเทความร้อนจะไม่เกิดขึ้น เพราะความต่างของอุณหภูมิจะเป็นแรงขับเคลื่อน (Driving force) ที่ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อน อัตราการถ่ายเทความร้อนจะขึ้นอยู่กับอัตราการลดลงของอุณหภูมิหรือเกรเดียนต์อุณหภูมิ

2.2 การถ่ายเทความร้อนพื้นฐาน [17]

การถ่ายเทความร้อนแบ่งออกเป็น 3 ชนิด

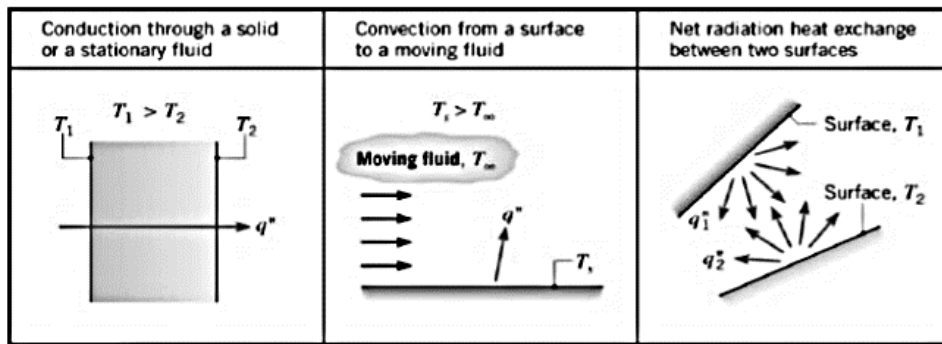
2.2.1 การนำความร้อน คือ วิธีการที่ความร้อนเคลื่อนที่จากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำภายในตัวกลางเดียวกัน หรือเป็นการเคลื่อนที่ของความร้อนระหว่างตัวกลางที่ติดกันแต่มีอุณหภูมิต่างกัน ในการนำความร้อน ความร้อนจะเคลื่อนที่ผ่านโมเลกุลของสารโดยที่โมเลกุลไม่เคลื่อนที่ การนำความร้อนจะเกิดขึ้นได้ดีในตัวกลางที่เป็นของแข็ง การเคลื่อนที่ของความร้อนแบบการนำเกิดขึ้นบ้างในของเหลวและก๊าซแต่มักไม่แยกออกจากการเคลื่อนที่ของความร้อนแบบการพา ความร้อนเคลื่อนที่โดยการนำได้โดยการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากจุดที่มีอุณหภูมิไปสู่จุดที่มีอุณหภูมิต่ำ นอกจากนี้ความร้อนยังเคลื่อนที่ไปได้โดยการสั่นสะเทือนของโมเลกุลภายในของแข็งในลักษณะของพลังงานของความสั่นสะเทือนอีกด้วย

2.2.2 การพาความร้อน คือ การที่ความร้อนเคลื่อนที่ระหว่างผิวของของแข็งและของไหล ของไหลจะเป็นตัวพาความร้อนมาให้ กลไกที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของความร้อนโดยการพานั้นเกิดจากผลรวมของการนำความร้อน การสะสมพลังงาน และการเคลื่อนที่ของของไหล การพาแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่

2.2.2.1 การพาความร้อนแบบบังคับ คือ การเคลื่อนที่ของความร้อนระหว่างผิวของของแข็งและของไหลโดยที่ของไหลถูกบังคับให้เคลื่อนที่ไปสัมผัสกับผิวของของแข็งโดยกลไกภายนอก เช่น พัดลม เครื่องสูบน้ำ

2.2.2.2 การพาความร้อนตามธรรมชาติ คือ การเคลื่อนที่ของความร้อนระหว่างผิวของแข็งและของไหล โดยไม่มีกลไกใด ๆ ที่ทำให้ของไหลเคลื่อนที่ แต่ของไหลที่อยู่ใกล้กับผิวของของแข็งอาจจะเคลื่อนที่ได้โดยแรงลอยตัวของของไหลเอง

2.2.3 การแผ่รังสี จากความร้อนที่เคลื่อนที่ได้โดยไม่ต้องอาศัยตัวกลางอย่างการนำ และการพา ในการแผ่รังสีความร้อนจะเคลื่อนที่ได้ดีที่สุดในสุญญากาศ การที่จะอธิบายว่าความร้อนเคลื่อนที่ได้อย่างไรเป็นสิ่งที่ยากที่จะอธิบายให้เห็นพฤติกรรมทางกายภาพได้ มีผู้พยายามเสนอทฤษฎีเกี่ยวกับการแผ่รังสีแต่ไม่ค่อยเป็นที่น่าพอใจนัก ทฤษฎีที่เป็นที่ยอมรับมากที่สุดในขณะนี้ เป็นทฤษฎีที่เสนอโดย ไอส์ไตน์ ซึ่งกล่าวว่า ในการแผ่รังสีความร้อนเคลื่อนที่ได้โดยอาศัยกลไกของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า



ภาพที่ 2-1 แสดงการถ่ายเทความร้อนโดยการนำ การพา และแผ่รังสี [1]

ประเภทการพาความร้อนและชนิดของการไหล	ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ย (W/m^2K)
การพาความร้อนแบบอิสระ, อากาศ	5-25
การพาความร้อนแบบอิสระ, น้ำ	20-100
การพาความร้อนแบบบังคับ, อากาศ	10-200
การพาความร้อนแบบบังคับ, น้ำ	50-10,000
น้ำกำลังเดือด	3,000-100,000
ไอของน้ำที่กำลังอีมตัว	5,000-100,000

ตารางที่ 2-1 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของของไหลบางชนิด [1]

2.3 การวิเคราะห์มิติ [2]

การวิเคราะห์มิติเป็นเทคนิคทางคณิตศาสตร์ที่ใช้สำหรับศึกษาเกี่ยวกับหน่วยต่าง ๆ มีความสัมพันธ์คล้ายคลึงกันแต่ใช้งานแตกต่างกันออกไป การวิเคราะห์มิติจะช่วยให้เข้าใจถึงปรากฏการณ์ของของไหล และผลกระทบต่อของไหล ช่วยในการรวมตัวแปรเข้าเป็นกลุ่มตัวแปรที่ไร้มิติ เพราะจะให้แนวทางของตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อปรากฏการณ์ที่เกิดจากการไหล

ความหมาย	สัญลักษณ์	หน่วย	ขนาด MLtT
มวล	m	kg	M
ความยาว, ระยะ	L, x, y	m	L
เวลา	t	sec	t
อุณหภูมิ	T	°C, K	T
แรง	F	N	MLt^{-2}
การถ่ายเทความร้อน	Q	N . m, J	ML^2t^{-2}
พลังงาน	P,W	W	ML^2t^{-3}
ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน	h	$W/m^2 . ^\circ C$	$Mt^{-3}T^{-1}$
การนำพาความร้อน	k	$W/m . ^\circ C$	$MLt^{-3}T^{-1}$
ค่าความร้อนเพิ่มขึ้น	h	J/kg	L^2t^{-2}
อัตราการไหลของมวล	m	Kg/s	Mt^{-1}
ความเร็ว	u, v, u infinity	m/s	Lt^{-1}
อัตราเร่ง	a, g	m/s^2	Lt^{-2}
ความดัน	P	N/m^2	$ML^{-1}t^{-2}$
ความหนาแน่น	ρ	Kg/m^3	ML^{-3}
ความร้อนจำเพาะ	c	$J/kg . ^\circ C$	$L^2t^{-2}T^{-1}$
ความหนืดสัมบูรณ์	μ	Kg/m.s	$ML^{-1}t^{-1}$
ความหนืดจลนศาสตร์	ν	m^2/s	L^2t^{-1}
การแพร่กระจายความร้อน	α	m^2/s	L^2t^{-1}
ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัว	β	K^{-1}	T^{-1}
แรงตึงผิว	σ	N/m	Mt^{-2}

ตารางที่ 2-2 แสดงตัวแปรและมิติต่าง ๆ ที่สำคัญของการถ่ายเทความร้อน [2]

2.3.1 การหาสัมประสิทธิ์การพาแบบบังคับ

สมมติว่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h) ขึ้นอยู่กับตัวแปร ดังนี้

- ขนาดของวัตถุ (l)
- ความเร็วของไหล (v)

และคุณสมบัติของไหลต่าง ๆ เช่น ความหนาแน่น (ρ) ความหนืด (μ) ค่าการนำความร้อน (k) และค่าความจุความร้อนจำเพาะ (C_p)

สัมประสิทธิ์การพาความร้อน $h = f[l, V, \rho, \mu, k, C_p]$

$$h = Al^a, V^b, \rho^c, \mu^d, k^e, C_p^f$$

เมื่อ A คือค่าคงที่

วิเคราะห์มิติตัวแปรต่าง ๆ

$$\begin{aligned}h &= Mt^{-3}T^{-1} ; l^a = (L)^a \\V^b &= (Lt^{-1})^b ; \rho^c = (ML^{-3})^c \\ \mu^d &= (ML^{-1}t^{-1})^d ; k^e = (MLt^{-3}T^{-1})^e \\C_p^f &= (L^2t^{-2}T^{-1})^f\end{aligned}$$

แก้สมการจะได้ค่าคงที่ต่าง ๆ ดังนี้

$$\begin{aligned}a &= c - 1 , b = c \\d &= -c + f , e = 1 - f\end{aligned}$$

แทนค่ากลับในสมการ h

$$h = Al^{c-1}, V^c, \rho^c, \mu^{-c+f}, k^{1-f}, C_p^f$$

$$h = A \left(\frac{k}{l}\right) \left(\frac{Vl\rho}{\mu}\right)^c \left(\frac{C_p\mu}{k}\right)^f$$

$$\frac{hl}{k} = A \left(\frac{Vl\rho}{\mu}\right)^c \left(\frac{C_p\mu}{k}\right)^f$$

$$Nu = ARe^c Pr^f$$

และจะเขียนออกมาได้เป็นสมการดังนี้

$$Nu = CRe^m Pr^n$$

ค่าคงที่ C, m และ n เป็นค่าที่ได้จากการทดลองขึ้นอยู่กับรูปร่างของวัตถุ รูปแบบการไหลและลักษณะการให้ความร้อน เมื่อ

$$Nu = \frac{hl}{k} = \text{Nusselt Number}$$
$$Pr = \frac{C_p \mu}{k} = \text{Prandtl Number}$$
$$Re = \frac{V \rho l}{\mu} = \text{Reynolds Number}$$

2.4 อุปกรณ์ให้ความร้อน (Heater) [3]

2.4.1 หลักการทำงานของฮีตเตอร์ คือการที่กระแสไฟฟ้าได้ไหลเข้าไปในขดลวดของฮีตเตอร์ซึ่งส่วนใหญ่ทำจากขดลวดความร้อนนิเกิล-โครมที่มีความต้านทานสูง กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านจะสูญเสียพลังงานแปลเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนซึ่งตัวพลังงานความร้อนนั้นจะถูกถ่ายเทไปยังวัตถุที่มีความร้อนน้อยกว่า หรือวัตถุเป้าหมายที่เราต้องการให้ความร้อน

2.4.2 ระบบทำความร้อนโดยไฟฟ้าแต่ละชนิด

2.4.2.1 ฮีตเตอร์แท่ง (Cartridge Heater) ใช้ให้ความร้อนกับวัสดุที่เป็นของแข็งแบ่งออกเป็นสองชนิดคือ High Density และ Low Density ลักษณะการใช้งาน คือ ใส่ไว้ในช่องบนวัตถุความร้อนจะส่งผ่านจากฮีตเตอร์ไปยังวัตถุที่ต้องการให้ความร้อน

2.4.2.2 ฮีตเตอร์ครีป (Finned Heater) และฮีตเตอร์ท่อกลม (Tubular Heater) โครงสร้างของฮีตเตอร์ท่อกลมมีขดลวดร้อนบรรจุอยู่ในท่อโลหะช่องว่างระหว่างขดลวดความร้อนและท่อโลหะจะถูกอัดแน่นด้วยผงแมกนีเซียมออกไซด์และถูกรีดให้มีความหนาตามมาตรฐาน ส่วนฮีตเตอร์ครีปนั้นทำมาจากฮีตเตอร์ที่กลม ที่ตัดมาเป็นรูปต่างๆ และเพิ่มแผ่นครีปม้วนติดกับฮีตเตอร์อย่างต่อเนื่องจากปลายด้านหนึ่งไปอีกด้าน ส่วนของแผ่นครีปที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ถ่ายเทความร้อนได้เร็วขึ้น

2.4.2.3 ฮีตเตอร์จุ่ม (Immersion Heater) ใช้ให้ความร้อนกับของเหลวทุกชนิด ทำจากฮีตเตอร์ท่อกลมที่ตัดเป็นรูปตัวอยู่และเชื่อมติดกับเกลียว

2.4.2.4 ฮีตเตอร์รัดท่อ (Band Heater) ออกแบบมาสำหรับท่อหรือถังรูปทรงกระบอกเหมาะสำหรับให้ความร้อนกับเครื่องฉีดพลาสติก

2.4.2.5 ฮีตเตอร์แผ่น (Strip Heater) โครงสร้างแบบเดียวกันกับฮีตเตอร์รัดท่อแต่รูปทรงจะเป็นสี่เหลี่ยม เหมาะสำหรับให้ความร้อนกับแม่พิมพ์

2.4.2.6 ฮีตเตอร์อินฟราเรด (Infrared Heater) การทำงานส่งความร้อนแบบแผ่รังสีสามารถให้ความร้อนวัตถุได้ถึงเนื้อในมีขนาดเล็กกว่าแบบทั่วไปทำให้ประหยัดเนื้อที่

2.4.2.7 ฮีตเตอร์เส้น (Cable Heater) มีด้วยกันสองแบบ คือ Self-Regulating ทำงานโดยการปรับกำลัง output เหมาะสมเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น output จะลดลง ฮีตเตอร์เส้นแบบนี้ไม่สามารถทำให้เกิดความร้อนสูงได้จึงเหมาะที่ประยุกต์ใช้งานเพื่อป้องกันการจับตัวเป็นน้ำแข็งและสภาวะอุณหภูมิต่ำ ส่วน Zone-parallel ทำงานด้วยหลักการลดความร้อนเป็นฉนวนไฟฟ้าภายนอกหุ้มด้วยซิลิโคนมีความยืดหยุ่นดัดงอได้ตามความต้องการ

2.4.2.8 ระบบไฟฟ้าเฟสเดียว

$$\text{กำลังไฟฟ้า } P \text{ (Watt)} = I^2 R = V \cdot I = \frac{V^2}{R}$$

P คือ กำลังไฟฟ้า (W)

V คือ แรงดันไฟฟ้า (Volt)

I คือ กระแสไฟฟ้า (Amp)

R คือ ความต้านทานไฟฟ้า (Ω)

2.5 พัดลมและมอเตอร์ [4]

2.5.1 พัดลมแบบหอยโข่งหรือแบบใช้แรงเหวี่ยง (Centrifugal or Radial fan)

ทำงานโดยการดึงอากาศเข้าทางด้านข้างและเหวี่ยงออกในแนวรัศมี ทำให้อากาศมีความเร็วสูงขึ้นแล้วบังคับให้อากาศผ่านหน้าตัดที่ขยายขึ้นในลักษณะก้นหอยและมีเสียงที่ค่อนข้างเงียบ ซึ่งพัดลมลักษณะนี้แบ่งออกเป็นหลายชนิด ดังนี้

2.5.1.1 พัดลมเซอร์รอกโค (Sirocco fan) หรือพัดลมแบบหลายใบเป็นชนิดที่มีใบโค้งไปทางเดียวกับการหมุน เหมาะสำหรับงานที่มีความเร็วลมต่ำและอัตราการไหลของลมไม่มีการเปลี่ยนแปลงมาก

2.5.1.2 พัดลมภาระจำกัด (Limit-Load fan) มีใบ Chrome ไปทางตรงกันข้ามกับการหมุน เหมาะสำหรับใช้ในอุปกรณ์การปรับอากาศที่ต้องการความดันสถิตต่ำ

2.5.1.3 พัดลมแบบใบพัดเครื่องบิน (Aerofoil fan) มีใบคล้ายปีกเครื่องบินและโค้งไปทางตรงกันข้ามกับการหมุน เหมาะสำหรับงานที่ต้องการความเร็วลมสูง

2.5.1.4 พัดลมแบบใบตรง (Radial fan) มีใบตรงตามแนวรัศมีมีโครงสร้างง่ายแข็งแรงมีประสิทธิภาพการใช้งานต่ำ

2.4.2 พัดลมแบบอากาศไหลตามแนวแกน (Axial flow fan) ไม่นิยมใช้ในอุปกรณ์ของระบบปรับอากาศเพราะมีเสียงดังและประสิทธิภาพการใช้งานต่ำ ทำงานโดยการดูดลมเข้าทางด้านหลังใบพัดและส่งลมผ่านใบพัดออกไปตามแนวแกน แบ่งออกได้เป็นดังนี้

2.5.2.1 พัดลมแบบใบพัด (Propeller fan) ใช้ส่งลมแบบไม่มีท่อลม ความต้านทานต่อการเคลื่อนที่ของลมน้อยนิยมใช้เป็นพัดลมถ่ายเทอากาศ

2.5.2.2 พัดลมไหลตามแกนแบบมีท่อครอบ (Tube axial fan) มีการไหลของอากาศตามแนวแกนจากด้านหลังไปด้านหน้าแต่ชุดใบพัดจะอยู่ในท่อ

2.5.2.3 พัดลมไหลตามแนวแกนแบบมีท่อครอบและมีครีบริบนำ (Vane axial fan) เป็นชนิดเดียวกับพัดลมใบตามแกนแบบมีท่อครอบ ต่างกันที่จะมีครีบริบนำทางเพื่อป้องกันการปั่นป่วนลม

ชนิด	รูปร่างของใบพัด		ประสิทธิภาพ อะเดียติคักรม (%)	ปริมาตรอากาศ (m ³ /min)	ความดัน (mmAq)	ความเหมาะสมในการใช้งาน
	ทิศทางการหมุน	ทิศทางการไหล				
- พัดลม หลายใบ (Sirroco fan)			45-60	10-2,000	10-125	การปรับอากาศ การระบายอากาศ งานอุตสาหกรรม
- โบลเวอร์ ใบโค้งหลัง - พัดลมแอร์ โรฟอลย์			โบลเวอร์ 50-65	โบลเวอร์ 20-3,200	โบลเวอร์ 10-150	ท่อลมความเร็วสูงงานอุตสาหกรรม การปรับอากาศขนาดกลางและ ใหญ่
			พัดลม 70-80	พัดลม 60-300	พัดลม 125-250	
- พัดลม เวเตียล			40-50	3-20	1-8	งานอุตสาหกรรม

ตารางที่ 2-3 แสดงคุณลักษณะและการทำงานของพัดลมแบบอากาศไหลตามแนวแกน

2.6 เครื่องมือวัด

2.6.1 เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) [5]

คือเซ็นเซอร์สำหรับวัดอุณหภูมิประกอบด้วยลวดโลหะที่แตกต่างกันสองเส้นต่อเข้าที่ปลายด้านหนึ่ง และเชื่อมต่อกับเครื่องมือวัดอุณหภูมิหรืออุปกรณ์ที่รองรับการใช้งานชนิดต่างๆ เมื่อกำหนดค่าอย่างถูกต้องด้วยคุณสมบัติเฉพาะทำให้สามารถวัดระดับความร้อนได้สูง หลักการทำงาน เทอร์โมคัปเปิลประกอบด้วยโลหะที่แตกต่างกันที่ปลายทั้งสองข้างและปลายด้านหนึ่งจะถูกให้ความร้อนและมีกระแสต่อเนื่องซึ่งไหลในวงจรเทอร์โมอิเล็กทริก ปรากฏการณ์นี้เรียกว่าซีเบค (Seebeck effect) ซึ่งคือเมื่อ เชื่อมต่อของโลหะทั้งสองถูกทำให้ร้อนหรือเย็นลงจะเกิดแรงดันไฟฟ้าที่สามารถเชื่อมโยงและรู้ค่าระดับความร้อนได้ ประเภทของเทอร์โมคัปเปิลมีดังนี้

2.6.1.1 ชนิด E (Type E) มีเอาต์พุตสูง เหมาะในการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำนอกจากนี้ยังไม่ใช้แม่เหล็กช่วงกว้างคือ -50 C ถึง +740 C และช่วงแคบคือ -110 C ถึง +140 C

2.6.1.2 ชนิด J (Type J) มีช่วงที่จำกัดระหว่าง -40 C ถึง +750 C แต่มีความไวสูงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในลักษณะที่ราบรื่น

2.6.1.3 ชนิด K (Type K) เป็นชนิดที่ใช้งานทั่วไปมากที่สุดมีราคาไม่แพงและมีหัววัดที่หลากหลายในช่วง -200 C ถึง + 1350 C

2.6.1.4 ชนิด M (Type M) เป็นโลหะผสมใช้เน็ตเต่าสุญญากาศเหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับการวัดอุณหภูมิที่สูงว่าสามารถวัดได้ที่ 1400 C

2.6.1.5 ชนิด N (Type N) เหมาะสำหรับใช้งานระหว่าง -270 C ถึง +1,300 C เนื่องจากความเสถียรและความต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชันที่ 900 C กว่าเล็กน้อยเมื่อเทียบกับประเภท K

2.6.1.6 ชนิด T (Type T) เหมาะสำหรับการวัดในช่วง -200 C ถึง +350 C. มักใช้เป็นการวัดความแตกต่างเนื่องจากมีเพียงลวดทองแดงเท่านั้นที่สัมผัสกับโพรบ

2.6.2 เครื่องวัดความเร็วลม (Hot wire anemometer) [7]

เป็นอุปกรณ์ใช้วัดการไหลที่นิยมใช้ในการวัดความเร็วลม โครงสร้างเป็นแบบเส้นลวดความร้อนประกอบด้วยเส้นลวดความต้านทานติดตั้งที่โพรบ อุปกรณ์ชิ้นนี้ทำงานโดยอาศัยหลักการสูญเสียความร้อนของเส้นลวดที่ได้รับความร้อนเมื่อมีลมผ่านเส้นลวดความร้อนจะเย็นตัวลง อัตราการเปลี่ยนแปลงความร้อนที่เกิดขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอัตราเร็วของลมที่เคลื่อนที่ผ่านตัววัดประเภทของเครื่องวัดความเร็วลมแบบเทอร์โมอิเล็กทริกมีดังนี้

2.6.2.1 แอนนิโมมิเตอร์แบบเส้นลวดความร้อนชนิดควบคุมกระแสไฟฟ้าคงที่ เส้นลวดจะถูกทำให้ร้อนโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าที่คงที่เมื่อมีลมพัดผ่านจะทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนจากเส้นลวดในลักษณะการพาความร้อนทำให้อุณหภูมิของเส้นลวดต่ำลงส่งผลให้ค่าความต้านทานภายในลวดมีค่าลดลง ส่งผลให้อัตราการไหลดังกล่าวสัมพันธ์กับค่าอัตราไหลของการไหลที่ผ่านเครื่องมือวัด

2.6.2.2 แอนนิโมมิเตอร์แบบเส้นลวดความร้อนชนิดควบคุมอุณหภูมิคงที่ เมื่อมีลมพัดผ่านเส้นลวดความร้อนจะเย็นตัวลงเนื่องจากกลไกการพาความร้อน หากต้องการรักษาอุณหภูมิเส้นลวดให้คงที่ที่ต้องจ่ายกระแสไฟฟ้าเพิ่มให้กับเส้นลวดเพื่อจะชดเชยความร้อนที่สูญเสียโดยพลังงานไฟฟ้าที่ต้องจ่ายให้กับเครื่องมือวัดแปรผันตามความเร็วลมที่พัดผ่าน

2.7 อุปกรณ์ทางไฟฟ้า

2.7.1 ตัวควบคุมอุณหภูมิ (Temperature Controller) [6]

หลักการการทำงานของตัวควบคุมอุณหภูมิ เรียกว่า การควบคุมแบบ On – Off Control ซึ่งตัวควบคุมอุณหภูมิจะรับค่า SV การตั้งค่าอุณหภูมิที่เราต้องการและทำการเปรียบเทียบกับ PV ค่าที่เกิดจากการอ่านค่าอุณหภูมิที่กำลังควบคุมอยู่ ในกระบวนการผลิตกับ SV ค่าอุณหภูมิที่เราตั้งไว้ หากค่าของอุณหภูมิที่ควบคุมมากกว่าค่าอุณหภูมิที่เราตั้งไว้ก็จะสั่งให้ Control Signal Output จ่ายสัญญาณไปควบคุมอุปกรณ์ขยายสัญญาณ Output ถ้าน้อยกว่า ก็จะจ่ายสัญญาณไปควบคุมอุปกรณ์ให้ทำการลดสัญญาณ

2.7.2 เบรกเกอร์ (Circuit Breaker) [7]

คือ สวิตช์ไฟฟ้าอัตโนมัติที่ออกแบบมาเพื่อป้องกันวงจรไฟฟ้าจากความเสียหายที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าส่วนเกินหรือไฟฟ้าลัดวงจรการทำงานคือตัดกระแสไฟฟ้าหลังจากตรวจพบความผิดปกติในวงจรแบ่งประเภทของเซอร์กิตเบรกเกอร์ได้ดังนี้

2.7.2.1 เซอร์กิตเบรกเกอร์แรงดันไฟฟ้าต่ำ เป็นเบรกเกอร์แบบที่ใช้งานทั่วไปทั้งในเชิงพาณิชย์และอุตสาหกรรมติดตั้งในตู้คอนซูมเมอร์ยูนิต ตู้ DB หรือตู้โหลดเซ็นเตอร์ ได้รับการรับรองมาตรฐานสากล

2.7.2.2 เซอร์กิตเบรกเกอร์แรงดันไฟฟ้าปานกลาง ประกอบเข้าไปในตู้เหล็กสวิตขนาดใหญ่สำหรับใช้ในอาคารหรืออาจใช้เป็นชั้นส่วนติดตั้งภายนอกในสถานีย่อย สำหรับใช้งานภายนอกอาคาร เบรกเกอร์เหล่านี้ทำงานโดยรีเลย์ตรวจจับกระแสไฟฟ้าที่ทำงานผ่านหม้อแปลงกระแสไฟฟ้าได้รับการรับรองจากมาตรฐาน IEC 62271 และ เบรกเกอร์ชนิดนี้มักใช้เซ็นเซอร์กระแสสลับและรีเลย์ป้องกันแทนการใช้เซ็นเซอร์วัดความร้อน

2.7.2.3 เซอร์กิตเบรกเกอร์แรงดันไฟฟ้าสูง เครือข่ายการส่งกำลังไฟฟ้ามีการป้องกันและควบคุม โดยเซอร์กิตเบรกเกอร์แรงดันไฟฟ้าสูงจะทำงานด้วยขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีรีเลย์ตรวจจับกระแสไฟที่ทำงานผ่านหม้อแปลงกระแสไฟฟ้า ในส่วนของชุดรีเลย์ป้องกันที่ซับซ้อนช่วยป้องกันอุปกรณ์จากโหลดเกินหรือไฟรั่วลงดิน

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

อนุสรณ์ และคณะ [8] ศึกษาเรื่องการถ่ายเทความร้อนโดยการพาของกลุ่มครีบแท่งทรงกรวย ปี 2550 จากการศึกษาการถ่ายเทความร้อนโดยการพาของชุดครีบ โดยให้สัญลักษณ์ความร้อนคงที่จากการทดลองและคำนวณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งผลที่ได้จากสองวิธี มีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดีและพบว่าการเพิ่มขึ้นของความเข้ม ความร้อนอัตราการไหลของอากาศมีผลทำให้สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของครีบสูงขึ้น เนื่องจากการเพิ่มขึ้นจากค่าทั้งสองทำให้การกระจายตัวของความร้อนและอากาศดีขึ้น ส่งผลโดยรวมให้ประสิทธิภาพการระบายความร้อนสูงขึ้น

วัชระ [9] ศึกษาเรื่องการศึกษาลักษณะการไหล และการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนแบบไหลในแนวรัศมี ในปี 2558 จากการศึกษาลักษณะการไหล และถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนจากท่อแหวน และท่อที่กำหนดให้เจ็ทไหลในแนวรัศมี โดยเทียบผลการศึกษากับเจ็ทจากท่อปกติ โดยสรุปว่า

1. กรณีเจ็ทจากท่อวงแหวน และเจ็ทจากท่อที่บังคับให้เจ็ทไหลในแนวรัศมีที่ระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนต่ำ พบว่าบริเวณที่มีการถ่ายเทความร้อนสูงมีขนาดกว้างกว่าที่เงื่อนไขอื่น
2. กรณีเจ็ทจากท่อวงแหวน และเจ็ทจากท่อที่บังคับให้เจ็ทไหลในแนวรัศมีที่ระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิว ที่เจ็ทพุ่งชนต่ำ มีการถ่ายเทความร้อนสูงขึ้นที่ตำแหน่งศูนย์กลางท่อเจ็ทและพบว่าเจ็ทไม่มีการไหลรวมตัวก่อนพุ่งชนพื้นผิว

สันติภาพ และจตุผล [10] ศึกษาเรื่องคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของการไหลสถานะเดียวภายในท่อตรงและท่อขดเกลียวขนาดเล็ก จากการศึกษาได้ศึกษาเชิงทดลองเพื่อศึกษาคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของไหลผ่านท่อกลมขนาดเล็กที่เป็นท่อเส้นตรงและท่อขดเกลียว ซึ่งทำจากสแตนเลสและสรุปได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์และฟลักซ์ แต่ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิมีค่าลดลง

มักตาร์ และชยุต [11] ศึกษาเรื่องการเพิ่มความสามารถการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวโดยรอยเว้าและรอย จากการศึกษากการทำให้พื้นผิวเป็นรอยเว้าหรือรอยนูน สามารถช่วยเพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวเนื่องจากกลไกการถ่ายเทความร้อนที่มีรอยเว้าหรือรอยนูนจะเกิดการไหลแบบแยกตัว การไหลเกาะติดผนังอีกครั้งและการไหลหมุนวนทำให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วนที่ไปทำลายชั้นขอบเขตการไหลบนพื้นผิวสูงขึ้น

ภาณุวัฒน์ และคณะ [12] ศึกษาเรื่องการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสโดยใช้ครีบเอียงทำมุม จากการศึกษากการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดันในท่อจัตุรัสโดยใช้ครีบเอียงติดตั้งที่ผิวบน-ล่างของส่วนทดลอง โดยอัตราการถ่ายเทความร้อนเมื่อเทียบกับผนังเรียบมีแนวโน้มเกือบคงที่เมื่อเรย์โนลด์์เพิ่มสูงขึ้น และจะพบว่าการประยุกต์ใช้ครีบเอียงให้ค่าสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนสูงขึ้นโดยพบค่าสูงสุดที่เลขเรย์โนลด์์ค่าต่ำสุด

บทที่ 3

ขั้นตอนการดำเนินงาน

การทำปริญญานิพนธ์เรื่องการพาความร้อนบังคับมีวัตถุประสงค์ เพื่อสร้างชุดการทดลองการพาความร้อนแบบบังคับให้สามารถใช้งานได้ตามเป้าหมายที่กำหนด และผลการทดลองมีความผิดพลาดน้อยที่สุด ซึ่งมีวิธีการดำเนินงานดังนี้

3.1 ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับการพาความร้อน

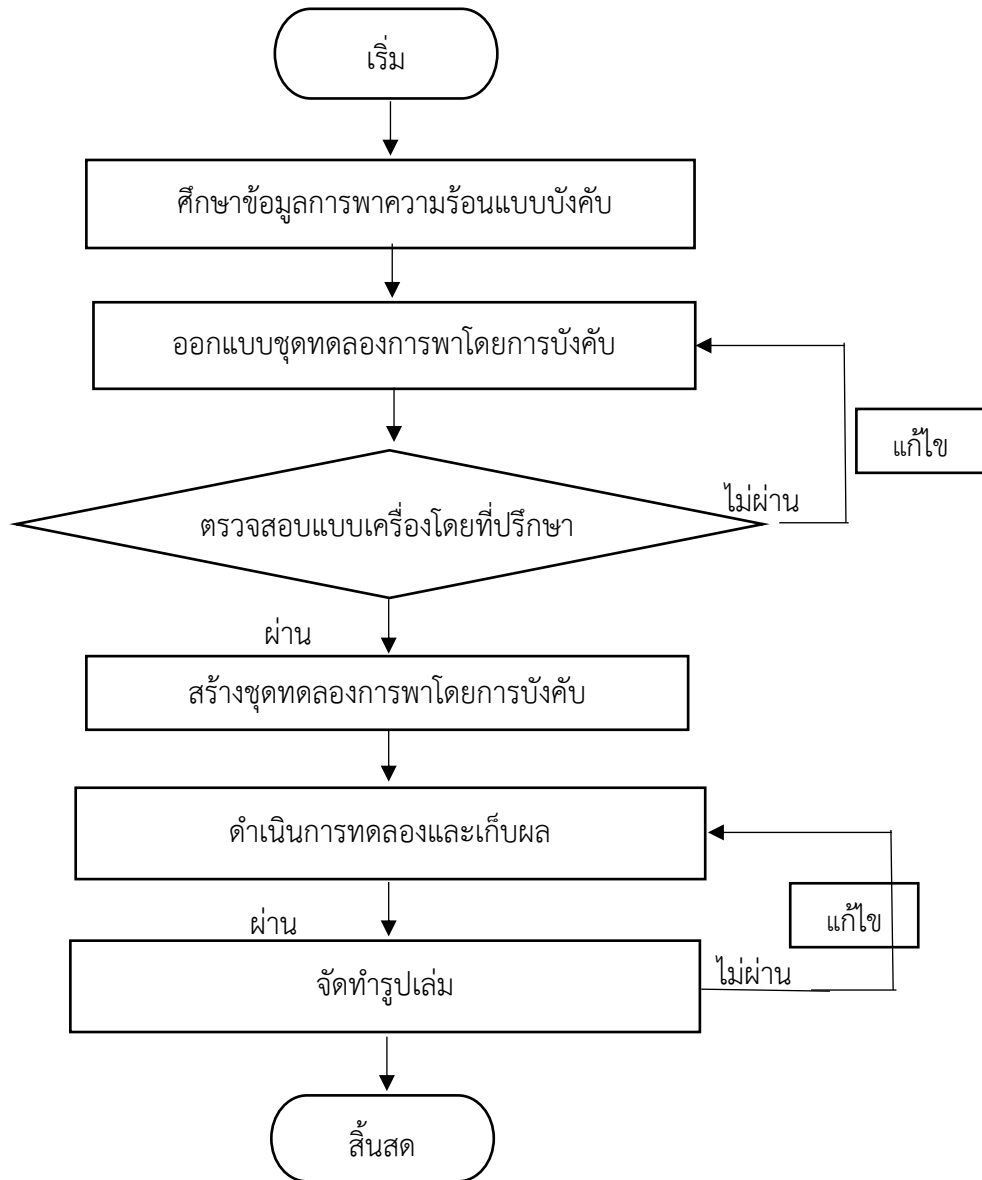
3.2 ออกแบบและพัฒนาชุดทดลอง

3.3 ดำเนินการสร้างชุดทดลอง

3.4 ขั้นตอนดำเนินงานติดตั้งอุปกรณ์การวัด

3.5 ทดสอบและเก็บผลทดลอง

3.6 ระยะเวลาดำเนินการ



ภาพที่ 3-1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

3.1 ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับการพาความร้อนแบบบังคับ

3.1.1 ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพาแบบบังคับและแบบอิสระ ในการศึกษาเรื่องนี้มีการศึกษาโดยใช้ชุดทดลองสำหรับการทดลองเพื่อวัดค่าที่ต้องการ การวางแผนอาจมีข้อผิดพลาดและการเก็บข้อมูลจากวิชาหรือทฤษฎีต่างๆ ตามงานวิจัยอื่นๆที่เกี่ยวข้องเพื่อนำมาศึกษาการวางแผนต้องเริ่มต้นด้วยการหาข้อมูล การหาทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1.2 ให้อาจารย์ที่ปรึกษาคอยแนะนำ ตรวจสอบความถูกต้อง จากนั้นทำการสร้างชุดทดลองการพาความร้อนแบบบังคับ ถ้าออกแบบผิดให้ทำการแก้ไข และออกแบบใหม่แล้วส่งให้ที่ปรึกษาตรวจสอบอีกครั้ง

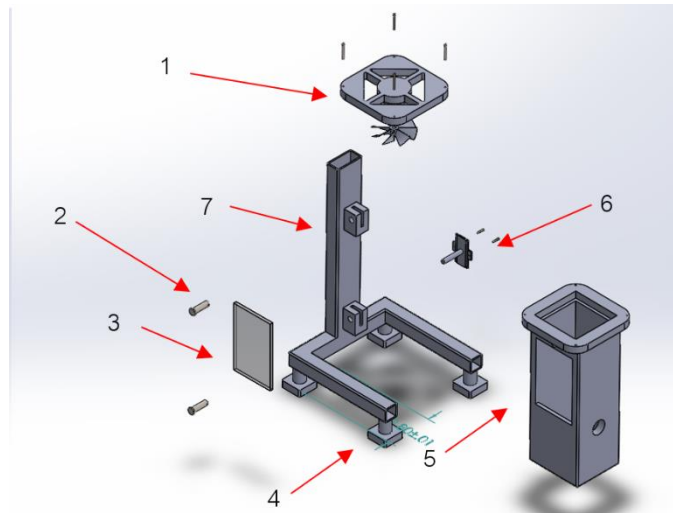
3.1.3 ทำการสร้างชุดทดลองการพาความร้อนแบบบังคับ จากนั้นตรวจสอบว่ามีข้อผิดพลาดหรือไม่ ถ้าไม่มีให้ดำเนินการทดลองต่อไป

3.1.4 เก็บผลการทดลอง และดำเนินการจัดทำรูปเล่ม

3.2 ออกแบบและพัฒนาชุดทดลอง

3.2.1 ทำการศึกษาข้อมูลเพื่อดำเนินการสร้างชุดทดลองการพาความร้อนโดยดูเอกสารข้อมูล (Data Sheet) ของบริษัทที่มีการสร้างชุดทดลองการพาโดยการบังคับและแบบอิสระ โดยเริ่มจากการศึกษาวัสดุภายในเอกสารข้อมูล (Data Sheet) และนำข้อมูลที่ได้มาเปรียบเทียบกับวัสดุที่มีเพื่อนำมาปรับใช้

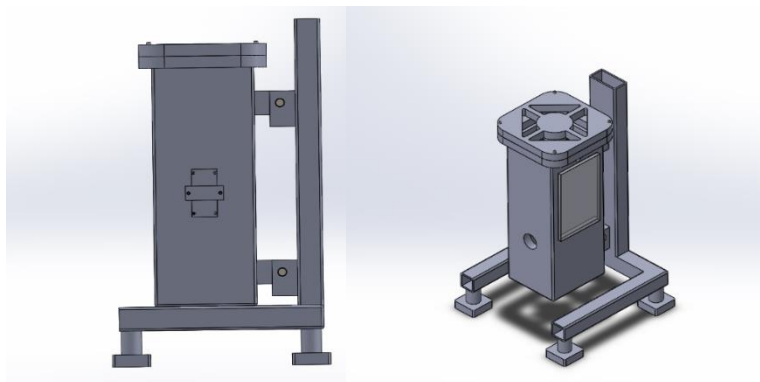
3.2.2 เริ่มออกแบบชุดทดลองการพาความร้อน โดยการเขียนแบบสามมิติ ทำการเลือกชนิดเหล็กที่จะใช้สร้างโครงสร้างทดลอง ชนิดและขนาดของพัดลม และกำหนดขนาดของชุดทดลองตามที่ได้พูดคุยสอบถามกับอาจารย์ที่ปรึกษา



ภาพที่ 3-2 ตำแหน่งของอุปกรณ์ในชุดทดลอง

- โดย หมายเลข 1 คือ พัดลมดูดอากาศ (Exhaust Fan)
 หมายเลข 2 คือ สลักยึด (Exhaust Fan)
 หมายเลข 3 คือ บานกระจก (Glass)
 หมายเลข 4 คือ ขาปรับระดับ (Adjustable Feet)
 หมายเลข 5 คือ ท่อลม (Air Duct)
 หมายเลข 6 คือ ฮีตเตอร์ (Heater)

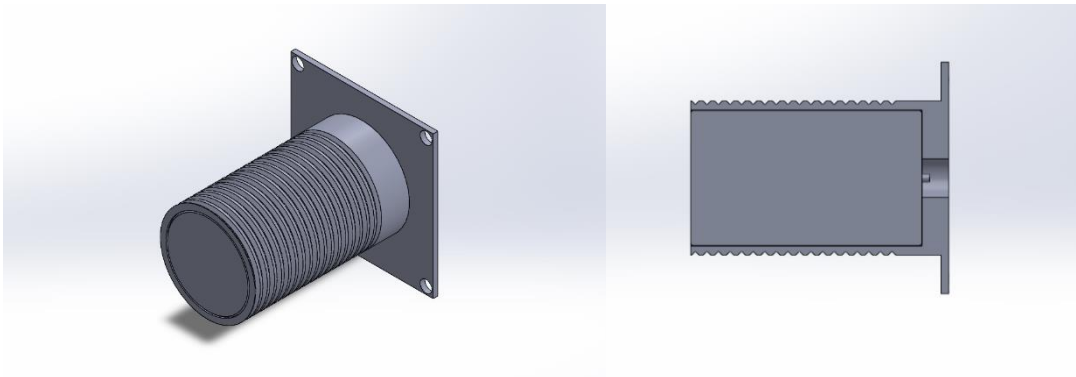
3.2.3 ขนาดของตัวเครื่องนั้นจะมีท่รูปร่างสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีความสูง 175 เซนติเมตร และความกว้าง 30 x 35 ทำจากวัสดุเหล็ก จะแสดงดังภาพ 3-3



ภาพที่ 3-3 แสดงตัวเครื่องของชุดทดลอง

เมื่อออกแบบสำเร็จแล้วให้อาจารย์ที่ปรึกษาทำการตรวจสอบความถูกต้องว่าต้องแก้ไขหรือไม่ ถ้าไม่มีข้อผิดพลาดอื่น ๆ แล้วให้นำแบบไปดำเนินการผลิตชุดทดลองการพาความร้อนแบบบังคับ

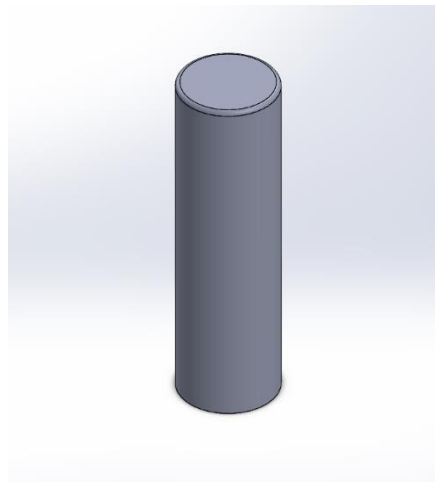
3.2.4 ออกแบบรูปแบบของฮีตเตอร์ตามที่ต้องการ โดยตัวฮีตเตอร์สามารถถอดจากตัวชุดทดลองได้ เพื่อให้สะดวกต่อการทดลอง และรอบนอกเป็นเกลียวสำหรับสวมวัสดุลูมิเนียม



ภาพที่ 3-4 ฮีตเตอร์ที่รอบนอกเป็นเกลียวสำหรับสวม

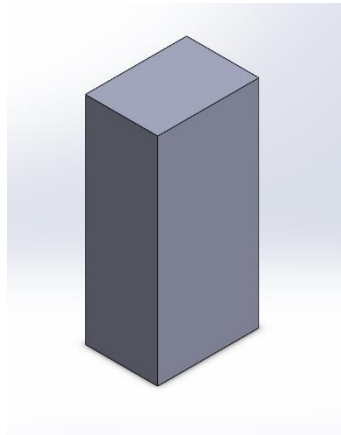
จะมีวัสดุลูมิเนียมสำหรับสวมเข้ากับตัวฮีตเตอร์ทั้งหมด 2 รูปทรง ดังนี้

2.2.4.1 ทรงกระบอกแท่งเดียว



ภาพที่ 3-5 ฮีตเตอร์ทรงกระบอกแท่งเดียว

2.2.3.3 ฮีตเตอร์ทรงสี่เหลี่ยม ดังภาพ 3-5



ภาพที่ 3-6 ฮีตเตอร์ทรงสี่เหลี่ยม

โดยฮีตเตอร์นั้นภายในจะเป็นแท่งฮีตเตอร์ซึ่งจะมีวัสดุรูปทรงกระบอก ทรงกลม และทรงสี่เหลี่ยมที่ทำจากอลูมิเนียมมาสวมครอบตัวฮีตเตอร์

3.2.5 ติดตั้งพัดลมดูดอากาศ โดยพัดลมมีขนาดอยู่ที่ 12 นิ้ว สามารถปรับระดับความแรงของลมได้ และมีความเร็วลมอยู่ที่ไม่ต่ำกว่า 0.2 m/s



ภาพที่ 3-7 พัดลมดูดอากาศ

3.2.6 ติดตั้งตู้คอนโทรลแบบตู้สำเร็จ โดยจะมีตัวควบคุมอุณหภูมิ สปีดคอนโทรลพร้อมทั้งพาวเวอร์ซัพพลาย (Power Supply) 200V AC to 12V DC และเบรกเกอร์ DC



ภาพที่ 3-8 ตู้คอนโทรล



ภาพที่ 3-9 พาวเวอร์ซัพพลายและเบรกเกอร์

3.2.7 ติดตั้งเครื่องมือวัดต่าง ๆ ที่จำเป็นคือ เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) Type K และเครื่องวัดความเร็วลม (Hot Wire Anemometer) ที่ตัวชุดทดลอง



ภาพที่ 3-10 เครื่องวัดความเร็วลม

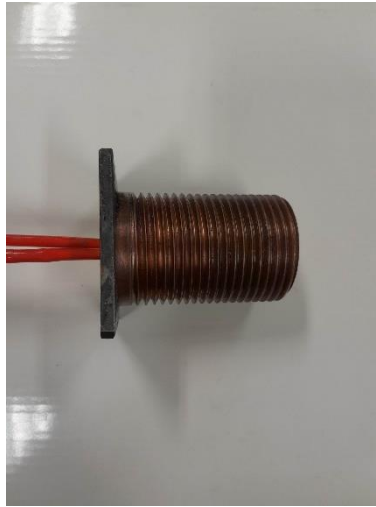
3.3 ดำเนินสร้างชุดทดลอง

3.3.1 สร้างโครงสร้างชุดทดลองการพาความร้อนแบบบังคับตามที่ได้เขียนแบบสามมิติ และมีการตรวจสอบโดยอาจารย์ที่ปรึกษา



ภาพที่ 3-11 โครงสร้างชุดทดลองการพาความร้อนแบบบังคับ

3.3.2 ผลิตภัณฑ์ตามแบบที่ต้องการ โดยตัวฮีตเตอร์จะมีลักษณะเป็นเกลียวที่สามารถนำอลูมิเนียมที่เป็นทรงสี่เหลี่ยม และทรงกลมมาสวมครอบได้



ภาพที่ 3-12 ฮีตเตอร์ที่ออกแบบให้เป็นเกลียวสำหรับสวม



ภาพที่ 3-13 อลูมิเนียมทรงกระบอกสำหรับสวมบนฮีตเตอร์



ภาพที่ 3-14 อลูมิเนียมทรงสี่เหลี่ยมสำหรับสวมบนฮีตเตอร์

3.3.3 ประกอบและติดตั้งตู้ควบคุมไฟฟ้าสำหรับฮีตเตอร์ที่มีกำลังไฟฟ้าที่ 220 โวลต์ 1 แอมป์ เข้าที่ตัว
โครงสร้างของชุดทดลอง



ภาพที่ 3-15 ตู้ควบคุมไฟฟ้าสำหรับฮีตเตอร์

3.3.4 ติดตั้งพัดลมสำหรับดูดอากาศขนาด 12 นิ้วเหนือช่องลมของตัวชุดทดลองโดยทำการยึดด้วยน็อต
ทั้งสี่ด้าน และพัดลมมีการต่อดั้วตัวปรับระดับพัดลมเพื่อใช้ปรับระดับความเร็วลมในการทดลองในแต่ละครั้ง



ภาพที่ 3-16 พัดลมดูดอากาศ

3.4 ขั้นตอนดำเนินงานติดตั้งอุปกรณ์การวัด

3.4.1 ติดตั้งเครื่องวัดความเร็วลมให้อยู่ในระดับต่ำกว่าฮีตเตอร์



ภาพที่ 3-17 ตำแหน่งของเครื่องวัดความเร็วลม

3.4.2 ติดตั้งตัววัดอุณหภูมิโดยใช้เทอร์โมคัปเปิลติดที่ส่วนต้น และปลายของฮีตเตอร์ อีกจุดจะอยู่เหนือตัวฮีตเตอร์เพื่อวัดอุณหภูมิขาออก

3.5 ทดสอบและเก็บผลทดลอง

3.5.1 การทดลองการพาความร้อนแบบบังคับ

เริ่มจากเลือกรูปทรงอลูมิเนียมที่ต้องการจากนั้นทำการสวมเข้าฮีตเตอร์แล้วตั้งอุณหภูมิที่ต้องการทดลองครั้งที่ 1 ตั้งฮีตเตอร์ให้ผิววัสดุมีอุณหภูมิอยู่ที่ 50 °C การทดลองที่ 2 อยู่ที่ 75 °C การทดลองที่ 3 อยู่ที่ 100 °C การทดลองที่ 4 อยู่ที่ 125 °C การทดลองที่ 5 อยู่ที่ 150 °C ในแต่ละการทดลองจะเปิดพัดลมดูดอากาศโดยเปลี่ยนระดับความเร็วลม 4 ระดับ คือ 0.6 m/s 1.0 m/s 2.0 m/s และ 2.7 m/s ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

3.5.1 สวมวัสดุอลูมิเนียมเข้ากับฮีตเตอร์ ตั้งอุณหภูมิตามที่ต้องการทดลอง

3.5.2 ตั้งระดับความเร็วของพัดลมดูดอากาศ

3.5.3 เมื่อพื้นผิววัสดุอุณหภูมิถึงเท่าที่ต้องการ บันทึกค่า T_1 T_2

3.5.4 จากนั้นปิดฮีตเตอร์แล้วจับเวลาระหว่างที่ผิววัสดุอุณหภูมิลดลงไป 10 °C

3.5.5 บันทึกเวลาในหน่วยวินาที

ในแต่ละการทดลองจะเปลี่ยนระดับความเร็วลมไปจนครบ 4 ระดับ โดย 1 การทดลองจะทำการเก็บผล 5 รอบ รอบละ 4 ครั้ง เมื่อบันทึกผลครบแล้วนำค่าที่ได้มาวิเคราะห์ และคำนวณตามสมการการพาความร้อนแบบบังคับ ดังนี้

1) หาค่า $T_{ave, s}$ จากสมการ $\frac{T_{s,1}+T_{s,2}}{2}$

2) หาค่า T_f จากสมการ $\frac{T_{ave, s}+T_{\infty, in}}{2}$

3) จากนั้นนำค่า T_f ที่ได้มา Interpolate หาค่า C_p, ν, k และ Pr จากตารางอากาศ

4) หาค่า Re จากสมการ $\frac{V_{\infty}L}{\nu}$

5) หาค่า Nu จากสมการ $0.683(Re^{0.466})(Pr^{\frac{1}{3}})$

6) จากนั้นหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h) จากสมการ $(\frac{hD}{k})$

7) หา Q_{conv} จาก $hA(T_{ave, s}-T_{in})$

ตัวแปร	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
V	volt				
A	amp				
V_{∞}	m/s				
$T_{\infty,in}$	°C				
$T_{\infty,out}$	°C				
$T_{s,heater}$	°C				
$T_{initial}$	°C				
$T_{s,1}$	°C				
$T_{s,2}$	°C				
Δt	sec.				

ตารางที่ 3-1 ตารางบันทึกผลการพาความร้อนแบบบังคับ

ตัวแปร	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
$T_{ave,s}$	°C				
T_f	°C				
C_p	J/kg·°C				
v	m^2/s				
k	W/m·°C				
Pr	-				
Re	-				
Q_{heater}	W				

ตารางที่ 3-2 ตารางประกอบการคำนวณการพาความร้อนแบบบังคับ

3.5.2 การทดลองการพาความร้อนแบบอิสระ

เริ่มจากเลือกรูปทรงอลูมิเนียมที่ต้องการจากนั้นทำการสวมเข้าฮีตเตอร์แล้วตั้งอุณหภูมิที่ต้องการทดลองครั้งที่ 1 ตั้งฮีตเตอร์ให้ผิววัสดุมีอุณหภูมิอยู่ที่ 50 °C การทดลองที่ 2 อยู่ที่ 75 °C การทดลองที่ 3 อยู่ที่ 100 °C การทดลองที่ 4 อยู่ที่ 125 °C การทดลองที่ 5 อยู่ที่ 150 °C ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

3.5.1 สวมวัสดุอลูมิเนียมเข้ากับฮีตเตอร์ ตั้งอุณหภูมิตามที่ต้องการทดลอง

3.5.2 เมื่อพื้นผิววัสดุอุณหภูมิถึงเท่าที่ต้องการ บันทึกค่า T_1 T_2

3.5.3 จากนั้นปิดฮีตเตอร์แล้วจับเวลาระหว่างที่ผิววัสดุอุณหภูมิลดลงไป 10 °C

3.5.4 บันทึกเวลาในหน่วยวินาที

การทดลองการพาความร้อนแบบอิสระจะมีวิธีการทดลองคล้ายกันกับการทดลองการพาความร้อนแบบบังคับเพียงแต่จะไม่ใช้พัดลมในการพาความร้อน การทดลองจะทำการเก็บผล 5 รอบ รอบละ 4 ครั้ง เมื่อบันทึกผลครบแล้วนำค่าที่ได้มาวิเคราะห์ และคำนวณตามสมการการพาความร้อนแบบอิสระ ดังนี้

1) หาค่า $T_{ave, s}$ จากสมการ $\frac{T_{s,1}+T_{s,2}}{2}$

2) หาค่า T_f จากสมการ $\frac{T_{ave,s}+T_{\infty,in}}{2}$

3) จากนั้นนำค่า T_f ที่ได้มา Interpolate หาค่า ν , k และ Pr จากตารางอากาศ

4) หาค่า Ra จากสมการ $\frac{g\beta(T_{ave,s}-T_{\infty,in})L_c^3}{\nu^2}$

5) หาค่า Nu จากสมการ $0.59(Ra^{\frac{1}{4}})$

6) จากนั้นหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h) จากสมการ $(\frac{hL_c}{k})$

7) หา Q_{conv} จาก $hA(T_{ave, s}-T_{in})$

ตัวแปร	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
V	volt				
A	amp				
$T_{\infty,in}$	°C				
$T_{\infty,out}$	°C				
$T_{s,heater}$	°C				
$T_{initial}$	°C				
$T_{s,1}$	°C				
$T_{s,2}$	°C				
Δt	sec.				

ตารางที่ 3-3 ตารางบันทึกผลการพาความร้อนแบบอิสระ

ตัวแปร	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
$T_{ave,s}$	°C				
T_f	°C				
C_p	J/kg·°C				
v	m^2/s				
k	W/m·°C				
β	K^{-1}				
Pr	-				
L_c	m				
Ra	-				
Gr	-				
Q_{heater}	W				

ตารางที่ 3-4 ตารางประกอบการคำนวณการพาความร้อนแบบอิสระ

3.6 ระยะเวลาดำเนินการ

ขั้นตอนการดำเนินงาน	2564						2565											
	ก.ค	ส.ค	ก.ย	ต.ค	พ.ย	ธ.ค	ม.ค	ก.พ	มี.ค	พ.ค	มี.ย	ก.ค	ส.ค	ก.ย	ต.ค	พ.ย	ธ.ค	
1.ศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้อง																		
2.วางแผนและออกแบบ																		
3.ดำเนินการสร้าง																		
4.เก็บผลการทดลอง																		
5.จัดทำบริษัณยานิพนธ์																		

ตารางที่ 3-5 ตารางระยะการดำเนินงาน

บทที่ 4

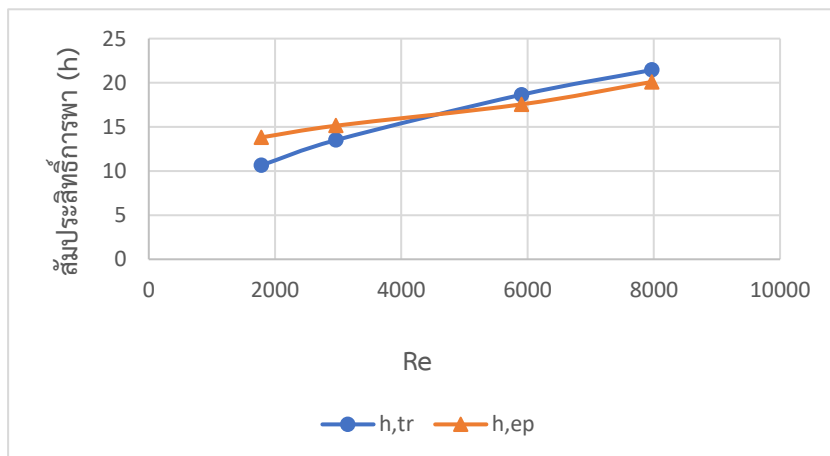
ผลการทดลอง

จากการทดลองการพาความร้อนแบบบังคับ และการพาความร้อนแบบอิสระโดยมีวัสดุทรงกระบอก และทรงสี่เหลี่ยม ได้มีการดำเนินการทดลองโดยตั้งอุณหภูมิฮีตเตอร์ที่ทำให้ผิววัสดุอุณหภูมิอยู่ที่ 50, 75, 100, 125 และ 150 °C ในการทดลองการพาความร้อนแบบบังคับแต่ละอุณหภูมิจะปรับความเร็วลมที่ 0.6, 1.0, 2.0 และ 2.7 m/s ตามลำดับ ส่วนการพาความร้อนแบบอิสระจะไม่ใช้พัดลมดูดอากาศระหว่างการทดลอง

4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การพาและเรย์โนลด์นัมเบอร์ของทรงกระบอก

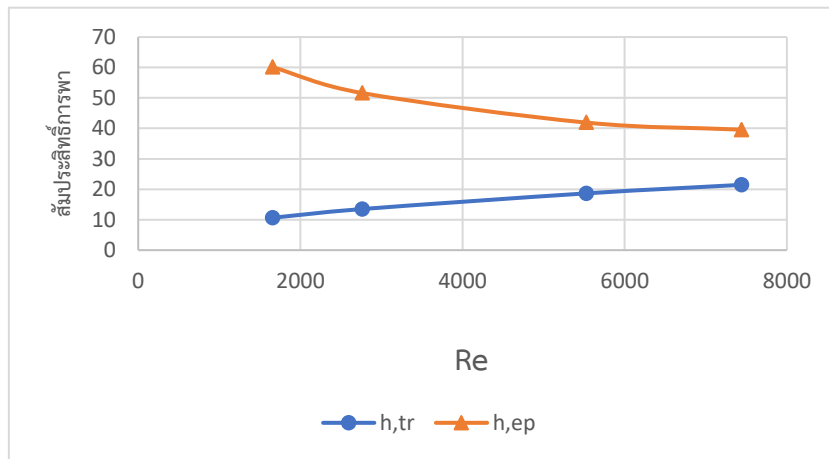
4.1.1 ผลการทดลองการพาแบบบังคับ

จากการทดลองตั้งอุณหภูมิฮีตเตอร์ที่ทำให้ผิววัสดุมีอุณหภูมิ 50, 75, 100, 125 และ 150 °C และเปิดพัดลมโดยมีความเร็วของลมอยู่ที่ 0.6, 1.0, 2.0 และ 2.7 m/s จากนั้นทำการบันทึกผลสัมประสิทธิ์การพาความร้อน และคำนวณผลเพื่อเปรียบเทียบกับทางทฤษฎีแล้วนำผลที่ได้มาพล็อตกราฟ



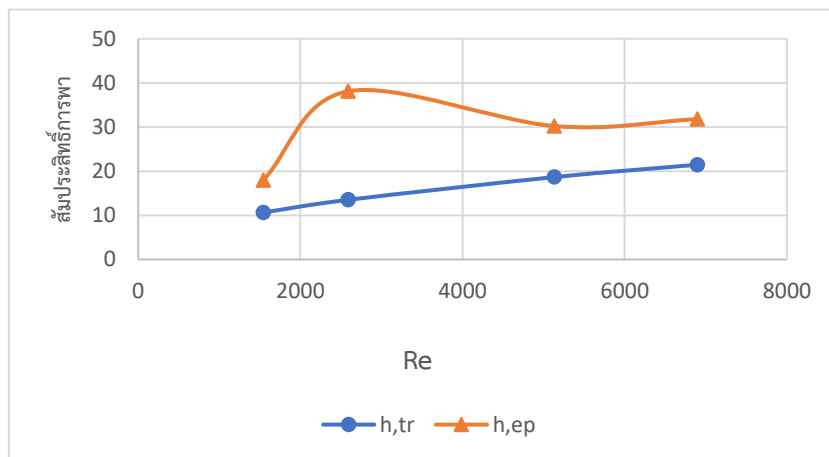
ภาพที่ 4-1 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การพาและเรย์โนลด์นัมเบอร์
ของทรงกระบอกที่อุณหภูมิผิว 50 °C

จากภาพที่ 4-1 การเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การพาของทรงกระบอกที่อุณหภูมิผิว 50 °C ที่ความเร็วลม 0.6, 1.0, 2.0 และ 2.7 m/s จากกราฟจะแสดงให้เห็นว่าเมื่อค่าความเร็วลมมากขึ้นทำให้สัมประสิทธิ์การพาเพิ่มขึ้นด้วย และค่าที่ได้จากการเก็บผลเมื่อเทียบกับทฤษฎี มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน



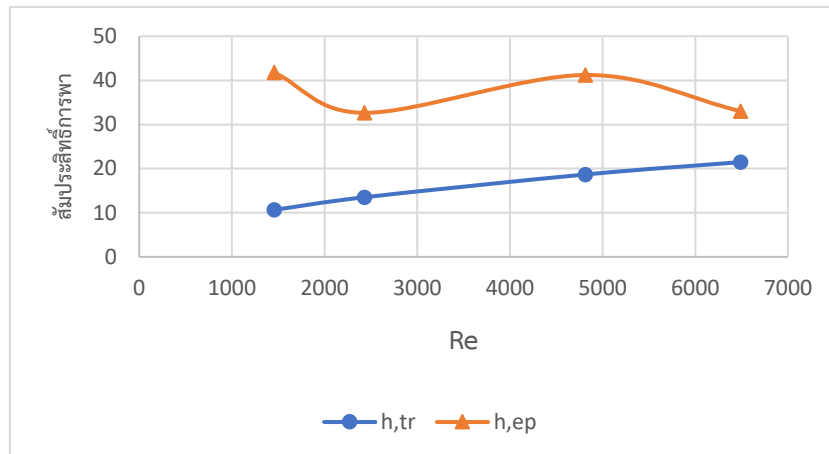
ภาพที่ 4-2 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การพาและเรย์โนลด์นัมเบอร์
ของทรงกระบอกที่อุณหภูมิ 75 °C

จากภาพที่ 4-2 การเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การพาของทรงกระบอกที่อุณหภูมิผิว 75 °C ที่ความเร็วลม 0.6, 1.0, 2.0 และ 2.7 m/s ค่าที่ได้จากการเก็บผลเมื่อเทียบกับทฤษฎี มีทิศทางตรงกันข้ามกันโดยผลที่เก็บจากการทดลองนั้นเมื่อความเร็วลมมากขึ้นค่าสัมประสิทธิ์การพาก็ลดลง ซึ่งตามทฤษฎีควรที่จะเพิ่มขึ้น



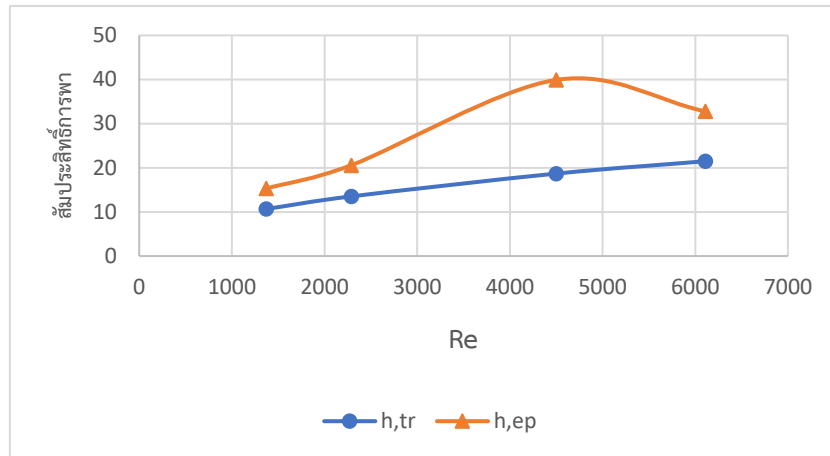
ภาพที่ 4-3 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การพาและเรย์โนลด์นัมเบอร์
ของทรงกระบอกที่อุณหภูมิผิว 100 °C

จากภาพที่ 4-3 การเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การพาของทรงกระบอกที่อุณหภูมิผิว 100 °C ที่ความเร็วลม 0.6, 1.0, 2.0 และ 2.7 m/s ค่าที่ได้จากการเก็บผลเมื่อเทียบกับทฤษฎี ในช่วงความเร็วลม 1.0 m/s ค่าสัมประสิทธิ์การพาที่ได้มากกว่าความเร็วลม 2.0 และ 2.7 m/s ซึ่งไม่เป็นไปตามทฤษฎี



ภาพที่ 4-4 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การพาและเรย์โนลด์นัมเบอร์ของทรงกระบอกที่อุณหภูมิผิว 125 °C

จากภาพที่ 4-4 การเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การพาของทรงกระบอกที่อุณหภูมิผิว 125 °C ที่ความเร็วลม 0.6, 1.0, 2.0 และ 2.7 m/s ค่าที่ได้จากการเก็บผลเมื่อเทียบกับทฤษฎี ที่ความเร็วลม 0.6 m/s มีสัมประสิทธิ์การพาสูงกว่าความเร็วลม 1.0, 2.0, 2.7 m/s และที่ความเร็วลม 2.0 m/s ก็มีสัมประสิทธิ์การพาสูงกว่าความเร็วลมที่ 2.7 m/s ซึ่งไม่ตรงตามทฤษฎี

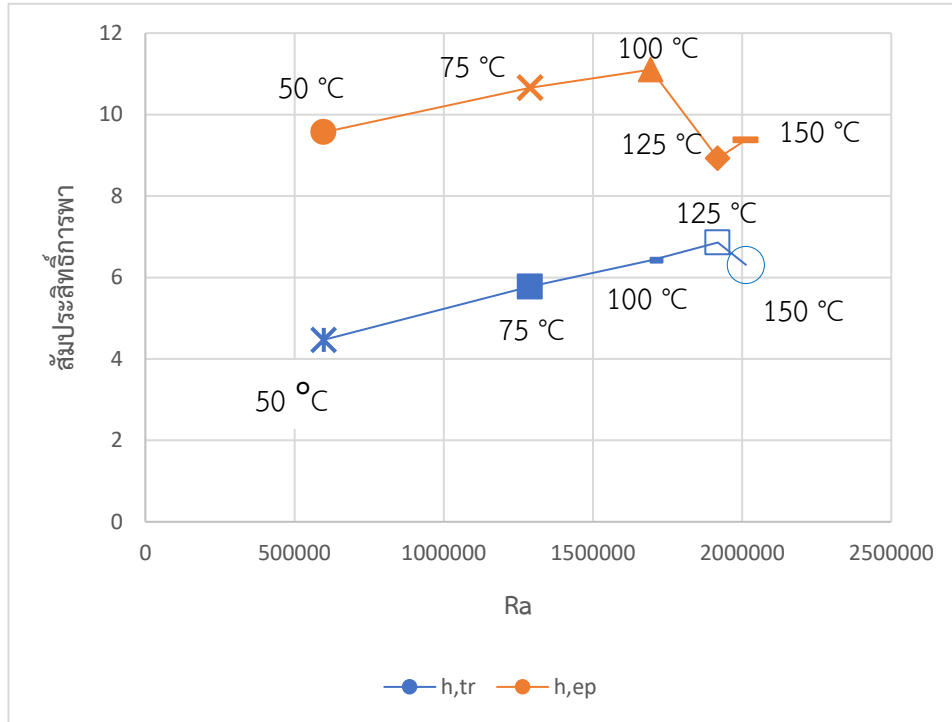


ภาพที่ 4-5 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การพาและเรย์โนลด์นัมเบอร์
ของทรงกระบอกที่อุณหภูมิผิว 150 °C

จากภาพที่ 4-5 การเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การพาของทรงกระบอกที่อุณหภูมิผิว 150 °C ที่ความเร็วลม 0.6, 1.0, 2.0 และ 2.7 m/s ค่าที่ได้จากการเก็บผลเมื่อเทียบกับทฤษฎี ที่ค่าความเร็วลม 0.6, 1.0 และ 2.7 m/s ใกล้เคียงจามทฤษฎี แต่ที่ความเร็วลม 2.0 m/s ไม่เป็นไปตามทฤษฎี

4.1.2 ผลการทดลองการพาแบบอิสระ

จากการทดลองตั้งอุณหภูมิผิววัสดุที่ 50, 75, 100, 125 และ 150 °C โดยไม่มีการเปิดพัดลม จากนั้นทำการบันทึกผลสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบอิสระ และคำนวณผลเพื่อเปรียบเทียบผลกับทางทฤษฎีแล้วนำผลที่ได้มาพล็อตกราฟ



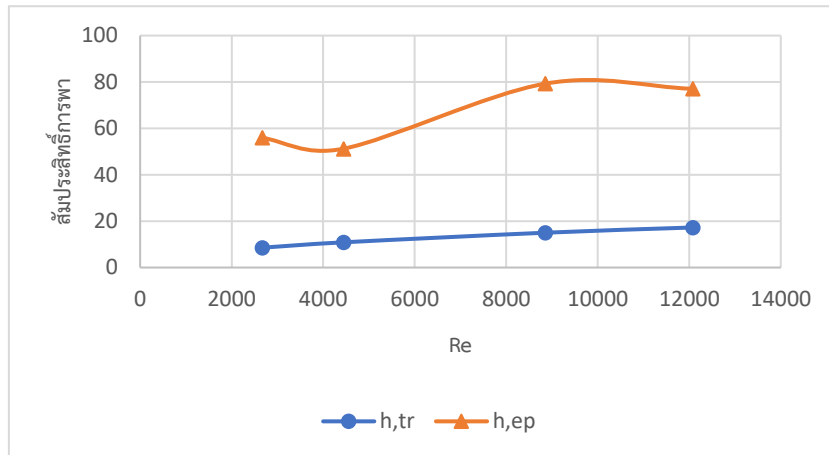
ภาพที่ 4-6 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การพาความร้อนและเรย์โนลด์นัมเบอร์ของทรงกระบอกที่อุณหภูมิผิว 50, 75, 100, 125 และ 150 °C

จากภาพที่ 4-6 การเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การพาของทรงกระบอกที่อุณหภูมิผิวต่าง ๆ พบว่าในช่วงที่อุณหภูมิผิว 125 °C ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้ และค่าที่ได้จากทฤษฎี มีความใกล้เคียงกันมากกว่าช่วงอุณหภูมิอื่น ๆ

4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การพาและเรย์โนลด์นัมเบอร์ของทรงสี่เหลี่ยม

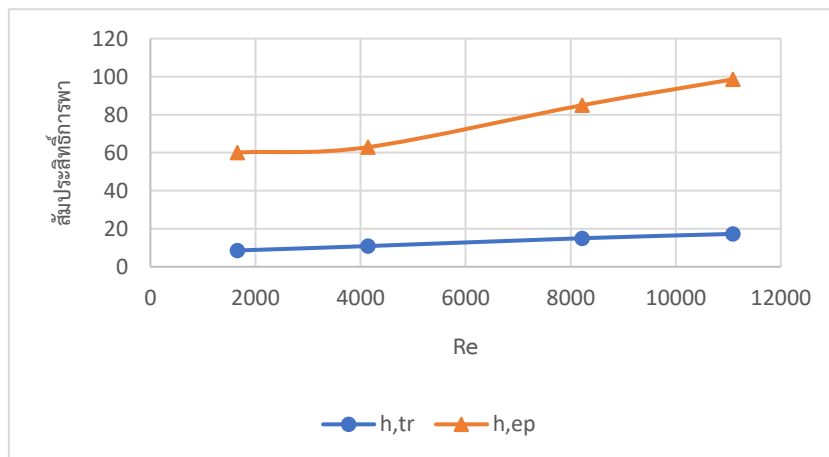
4.2.1 ผลการทดลองการพาแบบบังคับ

จากการทดลองตั้งอุณหภูมิฮีตเตอร์ให้อุณหภูมิผิวอยู่ที่ 50, 75, 100, 125 และ 150 °C และเปิดพัดลมโดยมีความเร็วของลมอยู่ที่ 0.6, 1.0, 2.0 และ 2.7 m/s จากนั้นทำการบันทึกผลสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบบังคับ และคำนวณผลเพื่อเปรียบเทียบผลกับทางทฤษฎีแล้วนำผลที่ได้มาพล็อตกราฟ



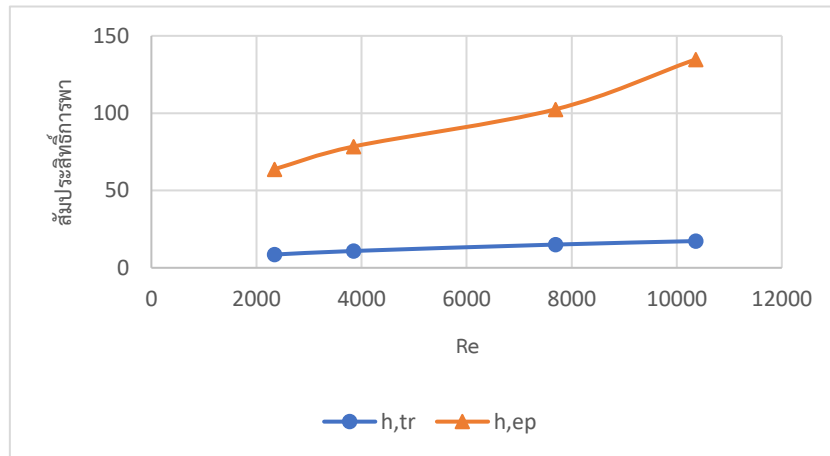
ภาพที่ 4-7 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การพาและเรย์โนลด์นัมเบอร์
ของทรงสี่เหลี่ยมที่อุณหภูมิผิว 50 °C

จากภาพที่ 4-7 การเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การพาของทรงสี่เหลี่ยมที่อุณหภูมิผิว 50 °C ที่ความเร็วลม 0.6, 1.0, 2.0 และ 2.7 m/s จากผลที่ได้ค่าสัมประสิทธิ์การพาที่ความเร็วลม 0.6 m/s สูงกว่าที่ความเร็วลม 1.0 m/s และที่ที่ความเร็วลม 2.0 m/s สูงกว่าที่ความเร็วลม 2.7 m/s ซึ่งไม่เป็นไปตามทฤษฎี แต่ค่าสัมประสิทธิ์การพาความเร็วลม 1.0 m/s มีความใกล้เคียงกับค่าสัมประสิทธิ์การพาที่จากทฤษฎี



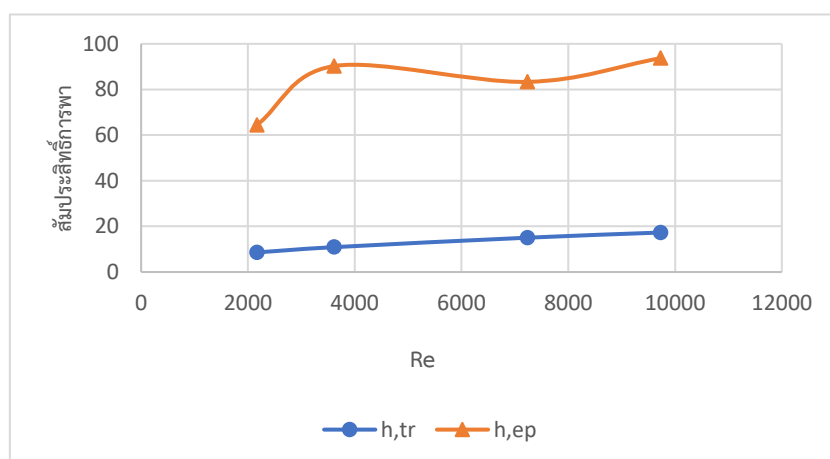
ภาพที่ 4-8 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การพาและเรย์โนลด์นัมเบอร์
ของทรงสี่เหลี่ยมที่อุณหภูมิผิว 75 °C

จากภาพที่ 4-8 การเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การพาของทรงสี่เหลี่ยมที่อุณหภูมิผิว 75 °C ที่ความเร็วลม 0.6, 1.0, 2.0 และ 2.7 m/s ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการทดลองเมื่อเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากทฤษฎีนั้นไปในทิศทางเดียวกันคือเมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้นสัมประสิทธิ์การพาที่เพิ่มตาม แต่มีค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้กับทฤษฎีค่อนข้างห่างกัน



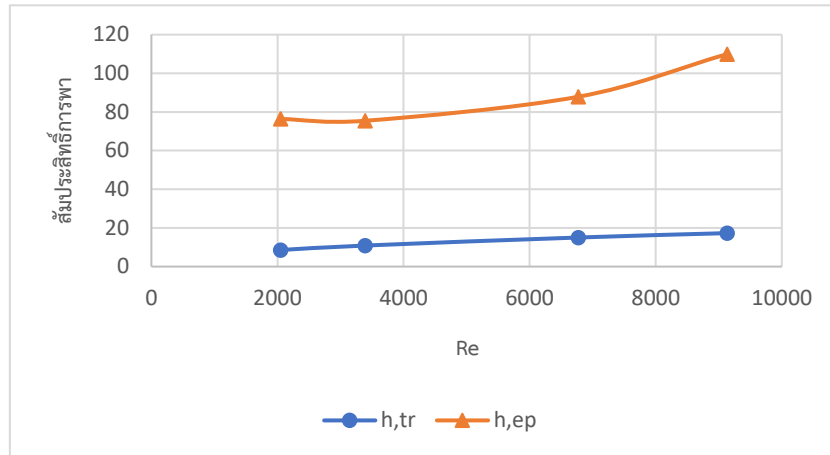
ภาพที่ 4-9 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การพาและเรย์โนลด์นัมเบอร์ของทรงสี่เหลี่ยมที่อุณหภูมิผิว 100 °C

จากภาพที่ 4-9 การเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การพาของทรงสี่เหลี่ยมที่อุณหภูมิผิว 100 °C ที่ความเร็วลม 0.6, 1.0, 2.0 และ 2.7 m/s ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการทดลองเมื่อเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากทฤษฎีนั้นไปในทิศทางเดียวกันคือเมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้นสัมประสิทธิ์การพาที่เพิ่มขึ้น



ภาพที่ 4-10 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การพาและเรย์โนลด์นัมเบอร์ของทรงสี่เหลี่ยมที่อุณหภูมิผิว 125 °C

จากภาพที่ 4-10 การเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การพาของทรงสี่เหลี่ยมที่อุณหภูมิผิว 125 °C ที่ความเร็วลม 0.6, 1.0, 2.0 และ 2.7 m/s ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการทดลอง ในช่วงค่าความเร็วลม 1.0 m/s^2 เมื่อเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากทฤษฎี ได้ผลที่มีความต่างกันมาก และไม่เป็นไปตามทฤษฎี

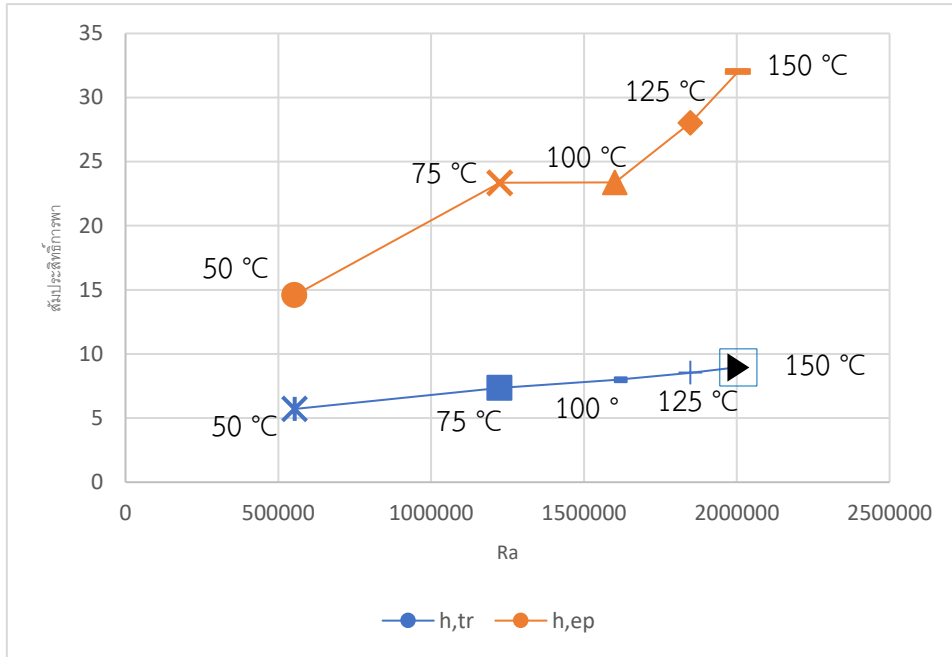


ภาพที่ 4-11 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การพาและเรย์โนลด์นัมเบอร์ของทรงสี่เหลี่ยมที่อุณหภูมิผิว 150 °C

จากภาพที่ 4-11 การเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การพาของทรงสี่เหลี่ยมที่อุณหภูมิผิว 125 °C ที่ความเร็วลม 0.6, 1.0, 2.0 และ 2.7 m/s ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการทดลอง ในช่วงค่าความเร็วลม 0.6 m/s^2 สูงกว่าค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการทดลอง ในช่วงค่าความเร็วลมที่มากกว่า ซึ่งไม่ตรงตามทฤษฎี

4.2.2 ผลการทดลองการพาแบบอิสระ

จากการทดลองตั้งอุณหภูมิฮีตเตอร์ให้ผิววัสดุอุณหภูมิอยู่ที่ 50, 75, 100, 125 และ 150 °C โดยไม่มีการเปิดพัดลม จากนั้นทำการบันทึกผลสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบอิสระ และคำนวณผลเพื่อเปรียบเทียบผลกับทางทฤษฎีแล้วนำผลที่ได้มาพล็อตกราฟ



ภาพที่ 4-12 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การพาและเรย์โนลด์นัมเบอร์
ของทรงสี่เหลี่ยมที่อุณหภูมิผิว 50, 75, 100, 125 และ 150 °C

จากภาพที่ 4-12 การเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การพาของทรงสี่เหลี่ยมที่อุณหภูมิผิวต่าง ๆ พบว่า ในช่วงที่อุณหภูมิ 50 °C ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้ (จุด ก) และค่าที่ได้จากทฤษฎี (จุด ข) มีความใกล้เคียงกันมากกว่า ช่วงอุณหภูมิอื่น ๆ

บทที่ 5

สรุปผล อภิปรายผลการดำเนินงาน และข้อเสนอแนะ

การจัดทำปฏิญานิพนธ์ เรื่อง ชุดการทดลองการพาความร้อนแบบบังคับสามารถสรุปผลการดำเนินการและมีข้อเสนอแนะดังนี้

5.1 สรุปผลการดำเนินงาน

การทดสอบการใช้ชุดการทดลองการพาความร้อนแบบบังคับได้ทำการทดลอง 2 แบบคือ แบบบังคับและแบบอิสระ โดยให้อุณหภูมิของผิววัสดุที่ใช้ทดลองอยู่ระหว่างช่วง 50°C 75°C 100°C 125°C 150°C ตามลำดับ และมีการใช้ความเร็วลมเพื่อลดอุณหภูมิของวัตถุ โดยปรับค่าความเร็วลมได้มากกว่า 3 ระดับ แต่อยู่ในช่วงไม่เกินระดับที่ 4 สามารถสรุปผลได้ดังนี้

5.1.1 การพาความร้อนที่ผิวทรงกระบอกที่อุณหภูมิ 50°C ที่ความเร็วลม 0.6, 1.0, 2.0 และ 2.7 m/s มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับทฤษฎี

5.1.2 การพาความร้อนที่ผิวทรงกระบอกที่อุณหภูมิ 75°C ที่ความเร็วลม 0.6, 1.0, 2.0 และ 2.7 m/s โดยค่าที่ได้มีทิศทางตรงกันข้ามกับทฤษฎีซึ่งตามทฤษฎีแล้วควรที่จะเพิ่มขึ้น

5.1.3 การพาความร้อนที่ผิวทรงกระบอกที่อุณหภูมิ 100°C ที่ความเร็วลม 0.6, 1.0, 2.0 และ 2.7 m/s โดยอุณหภูมินี้ไม่เป็นไปตามทฤษฎี

5.1.4 การพาความร้อนที่ผิวทรงกระบอกที่อุณหภูมิ 125°C ที่ความเร็วลม 0.6, 1.0, 2.0 และ 2.7 m/s โดยช่วงความเร็วลมที่ 1.0 เมตรต่อวินาทีกำลังสองไม่เป็นไปตามทฤษฎี

5.1.5 การพาความร้อนที่ผิวทรงกระบอกที่อุณหภูมิ 150°C ที่ความเร็วลม 0.6, 1.0, 2.0 และ 2.7 m/s โดยช่วงที่ความเร็วลม 2.0 เมตรต่อวินาทีกำลังสอง โดยค่าที่ได้ไม่เป็นไปตามทฤษฎี

5.1.6 การพาความร้อนที่ผิวทรงสี่เหลี่ยมที่อุณหภูมิ 50°C ที่ความเร็วลม 0.6, 1.0, 2.0 และ 2.7 m/s ซึ่งอุณหภูมินี้มีค่าใกล้เคียงตรงกับทฤษฎี

5.1.7 การพาความร้อนที่ผิวทรงสี่เหลี่ยมที่อุณหภูมิ 75°C ที่ความเร็วลม 0.6, 1.0, 2.0 และ 2.7 m/s ซึ่งอุณหภูมินี้มีค่าที่ค่อนข้างห่างกับทฤษฎี

5.1.8 การพาความร้อนที่ผิวทรงสี่เหลี่ยมที่อุณหภูมิ 100°C ที่ความเร็วลม 0.6, 1.0, 2.0 และ 2.7 m/s มีค่าไปในทิศทางเดียวกับทฤษฎี

5.1.9 การพาความร้อนที่ผิวทรงสี่เหลี่ยมที่อุณหภูมิ 125 °C ที่ความเร็วลม 0.6, 1.0, 2.0 และ 2.7 m/s ค่าที่ได้มีความต่างและไม่เป็นไปตามทฤษฎี

5.1.10 การพาความร้อนที่ผิวทรงสี่เหลี่ยมที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วลม 0.6, 1.0, 2.0 และ 2 m/s โดยค่าที่ได้ไม่เป็นตามทฤษฎี

5.2 อภิปรายผลการทดลอง

5.2.1 แบบบังคับ

5.2.1.1 วัสดุทรงกระบอกมีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนใกล้เคียงทฤษฎีมากกว่าวัสดุทรงสี่เหลี่ยม เนื่องจากพื้นที่ผิวมีขนาดต่างกัน

5.2.1.2 ช่วงความเร็วลมไม่คงที่มีส่วนทำให้การทดลองมีผลออกมาตรงข้ามกับทฤษฎี

5.2.1.3 การปรับโครงสร้างของชุดการทดลองและออกแบบกระจกปิดให้มีความแน่นหนามากขึ้น อาจทำให้อุณหภูมิคงที่และผลการทดลองเป็นไปตามทฤษฎี

5.2.2 แบบอิสระ

5.2.2.1 ค่าที่ได้ช่วงอุณหภูมิผิวต่ำมีความใกล้เคียงมากกว่าช่วงอุณหภูมิผิวสูง

5.2.2.2 ในบางช่วงของอุณหภูมิผิวมีความใกล้เคียงกับทฤษฎี

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 เนื่องจากหน้าตัดของตัวกล่องของเครื่องมีขนาดที่กว้างมากเกินไปทำให้ค่า Re ที่ได้น้อยจนทำให้เกิดความผิดพลาดในการทดลอง ควรจะปรับขนาดหน้าตัดให้เล็กลง

5.2.2 เปลี่ยนพัดลมดูดอากาศให้มีกำลังมากขึ้นเพื่อเพิ่มกำลังความเร็วลมเนื่องจากหน้าตัดกล่องเครื่องมีขนาดใหญ่กำลังเลยไม่พอในการทดลอง

เอกสารอ้างอิง

1. Dr. Chanchai. [ออนไลน์]. [สืบค้นเมื่อวันที่ 15 พฤษภาคม 2564]. จาก
http://www.researchsystem.siam.edu/images/Mechanical_Engineering/Dr.chanchai
2. สุนันท์ ศรีณนิตย์. (2536). กลศาสตร์ของไทย คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. พิมพ์ครั้งที่ 6
3. Electrical Heating System. [ออนไลน์]. [สืบค้นเมื่อวันที่ 8 สิงหาคม 2564].จาก
www.dip.go.th/Portals/0/electrical%20handbook/21ระบบทำความร้อนด้วยไฟฟ้า.pdf
4. ienergyguru. [ออนไลน์]. [สืบค้นเมื่อวันที่ 8 สิงหาคม 2564].จาก
<https://ienergyguru.com/2015/09/fan/>
5. วิศิษฐ์ จาตุมาน ขวัญชัย สันทิพย์สมบุรณ์. (2521). กลศาสตร์ของไทย แผนกวิชาช่างยนต์ สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตเทคนิคกรุงเทพฯ
6. Temperature Controller. [ออนไลน์]. [สืบค้นเมื่อวันที่ 9 สิงหาคม 2564].จาก
<http://torterakit.com/wp/blog/article/temperature-controller>
7. Circuit Breaker. [ออนไลน์]. [สืบค้นเมื่อวันที่ 9 สิงหาคม 2564].จาก
<https://mall.factomart.com/circuit-breaker/principle-of-circuit-breaker/>
8. Anusorn. [ออนไลน์]. [สืบค้นเมื่อวันที่ 9 สิงหาคม 2564].จาก
http://thesis.swu.ac.th/swuthesis/Mech_Eng/Anusorn_S.pdf
9. Watchara. [ออนไลน์]. [สืบค้นเมื่อวันที่ 9 สิงหาคม 2564].จาก
<http://kb.psu.ac.th:8080/psukb/bitstream/2016/10435/1/404534.pdf>

10. Santiphap. [ออนไลน์]. [สืบค้นเมื่อวันที่ 9 สิงหาคม 2564]. จาก
[file:///D:/Users/acer/Downloads/43011-Article%20Text-99531-1-10-20151126%20\(6\).pdf](file:///D:/Users/acer/Downloads/43011-Article%20Text-99531-1-10-20151126%20(6).pdf)
11. Chayut. [ออนไลน์]. [สืบค้นเมื่อวันที่ 9 สิงหาคม 2564]. จาก
<https://cmudc.library.cmu.ac.th/frontend>
12. Heat Transfer Enhancement in A Square Channel Using Angled Ribs. [ออนไลน์].
[สืบค้นเมื่อวันที่ 9 สิงหาคม 2564]. จาก
<http://www.tsae.asia/data/2012conf/pdf/EAE/EAE05.pdf>
13. นักสิทธิ์ คุ้มณาชัย. (2522). การถ่ายเทความร้อนกลศาสตร์ของไทย คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์. พิมพ์ครั้งที่ 1

ภาคผนวก ก

คู่มือการใช้งานและการทดลอง

คู่มือการใช้งาน

ขั้นตอนการทดลอง

1. เบื้องต้นต้องตรวจสอบเช็คความพร้อมของอุปกรณ์
2. นำอุปกรณ์วัดอุณหภูมิใส่ในชุดการทดลอง



ภาพที่ ก-1 ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์การวัด

2. ตั้งอุณหภูมิให้กับฮีตเตอร์ที่ 50°C 75°C 100°C 125°C และ 150°C ตามลำดับ



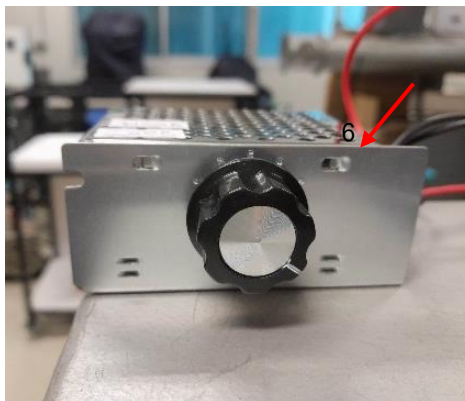
ภาพที่ ก-2 ตัวตั้งอุณหภูมิ

- นำวัดอุณหภูมิที่ติดอยู่กับวัตถุต่อเข้ากับเครื่อง Thermometer
- นำสายของ Hot-Wire Anemometer ต่อเข้ากับเครื่อง



ภาพที่ ก-3 การติดตั้งอุปกรณ์การวัด

- เปิดเครื่องให้ทำงานจนถึงอุณหภูมิที่ตั้งไว้ตามลำดับ
- เปิดพัดลมที่ความเร็วลมคงที่ 0.6 – 2 m/s (กรณีการพาแบบอิสระจะไม่ใช่พัดลม)
- จับเวลาเมื่ออุณหภูมิลดลงตามต้องการ



ภาพที่ ก-4 ตัวปรับความเร็วลม

ภาคผนวก ข

ใบบันทึกผลการทดลองเพื่อศึกษาชุดการทดลองการพาความร้อนแบบบังคับ

ใบบันทึกผลการทดลองทรงกระบอก
การพาความร้อนแบบบังคับ

ชนิดของวัสดุ อลูมิเนียม ทรงกระบอก ขนาดของวัสดุ 0.05 * 0.1 เมตร

ตัวแปร	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
V	volt	220	220	220	220
A	amp	1	1	1	1
V_{∞}	m/s	0.6	0.6	0.6	0.6
$T_{\infty,in}$	°C	24.9	24.3	23.9	25.1
$T_{\infty,out}$	°C	26.1	25.9	25.9	24.8
$T_{s,heater}$	°C	50	50	50	50
$T_{initial}$	°C	25	25	25	25
$T_{s,1}$	°C	53.4	56.8	58.7	48.5
$T_{s,2}$	°C	49.8	50.4	49.8	49
Δt	sec.	1331.4	1387.8	1413.6	1086

ตารางที่ ข-1 บันทึกการทดลองการพาแบบบังคับความเร็วลม 0.6 m/s อุณหภูมิผิว 50 °C

$$T_{ave,s} = \frac{T_{s,1} + T_{s,2}}{2}$$

$$T_f = \frac{T_{ave,s} + T_{\infty,in}}{2}$$

$$Re = \frac{V_{\infty} L}{\nu}$$

$$Nu = \frac{hD}{k} = CRe^m Pr^n$$

ค่า C, m, n เป็นค่าคงที่

$$\dot{Q}_{conv} = hA(T_{ave,s} - T_{\infty,in})$$

$$\dot{Q}_{conv} = AV$$

ตัวแปร	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
$T_{ave,s}$	°C	51.6	53.6	54.25	48.5
T_f	°C	38.25	38.95	39.075	36.125
C_p	J/kg·°C	1007	1007	1007	1007
ν	m^2/s	1.68555E-05	1.69213E-05	1.69331E-05	1.66558E-05
k	W/m·°C	0.0264905	0.0265423	0.02655155	0.02633325
Pr	-	0.725955	0.725773	0.7257405	0.7265075
Re	-	1779.83448	1772.913429	1771.68319	1801.17977
Q_{heater}	W	220	220	220	220

ตารางที่ ข-2 ตารางประกอบการคำนวณการพาแบบบังคับความเร็วลม 0.6 m/s อุณหภูมิผิว 50 °C

ชนิดของวัสดุ อลูมิเนียม ทรงกระบอก ขนาดของวัสดุ 0.05 * 0.1 เมตร

ตัวแปร	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
V	volt	220	220	220	220
A	amp	1	1	1	1
V_{∞}	m/s	0.6	0.6	0.6	0.6
$T_{\infty,in}$	°C	27.8	26.5	26.9	27.8
$T_{\infty,out}$	°C	28.2	27.2	27.2	27.4
$T_{s,heater}$	°C	75	75	75	75
$T_{initial}$	°C	25	25	25	25
$T_{s,1}$	°C	76.2	75.8	76.9	77.8
$T_{s,2}$	°C	73.8	74.7	75.3	76.2
Δt	sec.	241.2	253.8	214.8	213.6

ตารางที่ ข-3 บันทึกการทดลองการพาแบบบังคับความเร็วลม 0.6 m/s อุณหภูมิผิว 75 °C

$$T_{ave,s} = \frac{T_{s,1} + T_{s,2}}{2} \quad T_f = \frac{T_{ave,s} + T_{\infty,in}}{2} \quad Re = \frac{V_{\infty} L}{\nu}$$

$$Nu = \frac{hD}{k} = CRe^m Pr^n \quad \text{ค่า } C, m, n \text{ เป็นค่าคงที่}$$

$$\dot{Q}_{conv} = hA(T_{ave,s} - T_{\infty,in}) \quad \dot{Q}_{conv} = AV$$

ตัวแปร	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
$T_{ave,s}$	°C	75	75.25	76.1	77
T_f	°C	51.4	50.875	51.5	52.4
C_p	J/kg·°C	1007	1007	1007	1007
ν	m^2/s	1.81172E-05	1.80658E-05	0.000018127	1.82152E-05
k	W/m·°C	0.0274522	0.02741388	0.0274595	0.0275252
Pr	-	0.722436	0.7225725	0.72241	0.722176
Re	-	1655.88502	1660.60086	1654.98979	1646.97615
Q_{heater}	W	220	220	220	220

ตารางที่ ข-4 ตารางประกอบการคำนวณการพาแบบบังคับความเร็วลม 0.6 m/s อุณหภูมิผิว 75 °C

ชนิดของวัสดุ อลูมิเนียม ทรงกระบอก ขนาดของวัสดุ 0.05 * 0.1 เมตร

ตัวแปร	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
V	volt	220	220	220	220
A	amp	1	1	1	1
V_{∞}	m/s	0.6	0.6	0.6	0.6
$T_{\infty,in}$	°C	27.2	27.1	27.4	27.4
$T_{\infty,out}$	°C	30.1	30.8	30.7	30.9
$T_{s,heater}$	°C	100	100	100	100
$T_{initial}$	°C	25	25	25	25
$T_{s,1}$	°C	53.4	56.8	58.7	48.5
$T_{s,2}$	°C	49.8	50.4	49.8	49
Δt	sec.	1331.4	1387.8	1413.6	1086

ตารางที่ ข-5 บันทึกการทดลองการพาแบบบังคับความเร็วลม 0.6 m/s อุณหภูมิผิว 100 °C

$$T_{ave,s} = \frac{T_{s,1} + T_{s,2}}{2} \quad T_f = \frac{T_{ave,s} + T_{\infty,in}}{2} \quad Re = \frac{V_{\infty} L}{\nu}$$

$$Nu = \frac{hD}{k} = CRe^m Pr^n \quad \text{ค่า } C, m, n \text{ เป็นค่าคงที่}$$

$$\dot{Q}_{conv} = hA(T_{ave,s} - T_{\infty,in}) \quad \dot{Q}_{conv} = AV$$

ตัวแปร	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
$T_{ave,s}$	°C	51.6	53.6	54.25	48.5
T_f	°C	38.25	38.95	39.075	36.125
C_p	J/kg·°C	1007	1007	1007	1007
ν	m^2/s	1.68555E-05	1.69213E-05	1.69331E-05	1.66558E-05
k	W/m·°C	0.0264905	0.0265423	0.02655155	0.02633325
Pr	-	0.725955	0.725773	0.7257405	0.7265075
Re	-	1779.83448	1772.913429	1771.68319	1801.17977
Q_{heater}	W	220	220	220	220

ตารางที่ ข-6 ตารางประกอบการคำนวณการพาแบบบังคับความเร็วลม 0.6 m/s อุณหภูมิผิว 100 °C

ชนิดของวัสดุ อลูมิเนียม ทรงกระบอก ขนาดของวัสดุ 0.05 * 0.1 เมตร

ตัวแปร	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
V	volt	220	220	220	220
A	amp	1	1	1	1
V_{∞}	m/s	0.6	0.6	0.6	0.6
$T_{\infty,in}$	°C	26	26.2	26.4	26.5
$T_{\infty,out}$	°C	30.8	28.7	28.9	28.9
$T_{s,heater}$	°C	125	125	125	125
$T_{initial}$	°C	25	25	25	25
$T_{s,1}$	°C	115.3	110.8	112.1	110.8
$T_{s,2}$	°C	113.5	99	99.6	99.1
Δt	sec.	209.4	215.4	215.4	199.2

ตารางที่ ข-7 บันทึกการทดลองการพาแบบบังคับความเร็วลม 0.6 m/s อุณหภูมิผิว 125 °C

$$T_{ave,s} = \frac{T_{s,1} + T_{s,2}}{2} \quad T_f = \frac{T_{ave,s} + T_{\infty,in}}{2} \quad Re = \frac{V_{\infty} L}{\nu}$$

$$Nu = \frac{hD}{k} = CRe^m Pr^n \quad \text{ค่า } C, m, n \text{ เป็นค่าคงที่}$$

$$\dot{Q}_{conv} = hA(T_{ave,s} - T_{\infty,in}) \quad \dot{Q}_{conv} = AV$$

ตัวแปร	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
$T_{ave,s}$	°C	126.1	126.55	126.85	126.05
T_f	°C	76.05	76.375	76.625	76.275
C_p	J/kg·°C	1007.605	1007.6375	1007.6625	1007.6275
ν	m^2/s	2.0571E-05	2.06003E-05	2.06258E-05	2.05901E-05
k	W/m·°C	0.0292456	0.029269	0.029287	0.02633325
Pr	-	0.7163085	0.71623375	0.71617625	0.71625675
Re	-	1458.640256	1456.293006	1454.492564	1457.014432
Q_{heater}	W	220	220	220	220

ตารางที่ ข-8 ตารางประกอบการคำนวณการพาแบบบังคับความเร็วลม 0.6 m/s อุณหภูมิผิว 125 °C

ชนิดของวัสดุ อลูมิเนียม ทรงกระบอก ขนาดของวัสดุ 0.05 * 0.1 เมตร

ตัวแปร	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
V	volt	220	220	220	220
A	amp	1	1	1	1
V_{∞}	m/s	0.6	0.6	0.6	0.6
$T_{\infty,in}$	°C	25.3	24.9	24.7	24.7
$T_{\infty,out}$	°C	31.9	31.8	32.1	31.5
$T_{s,heater}$	°C	150	150	150	150
$T_{initial}$	°C	25	25	25	25
$T_{s,1}$	°C	161.7	154.4	157.4	157.4
$T_{s,2}$	°C	148.8	148.3	147.1	148.2
Δt	sec.	267	213	305.4	240

ตารางที่ ข-9 บันทึกการทดลองการพาแบบบังคับความเร็วลม 0.6 m/s อุณหภูมิผิว 150 °C

$$T_{ave,s} = \frac{T_{s,1} + T_{s,2}}{2} \quad T_f = \frac{T_{ave,s} + T_{\infty,in}}{2} \quad Re = \frac{V_{\infty} L}{\nu}$$

$$Nu = \frac{hD}{k} = CRe^m Pr^n \quad \text{ค่า } C, m, n \text{ เป็นค่าคงที่}$$

$$\dot{Q}_{conv} = hA(T_{ave,s} - T_{\infty,in}) \quad \dot{Q}_{conv} = AV$$

ตัวแปร	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
$T_{ave,s}$	°C	155.25	151.35	152.25	152.8
T_f	°C	90.275	88.125	88.475	88.75
C_p	J/kg·°C	1008.0275	1008	1008	1008
ν	m^2/s	2.20389E-05	0.000021815	2.18514E-05	0.00002188
k	W/m·°C	0.03025953	0.030106875	0.030131725	0.03015125
Pr	-	0.71314225	0.7136125	0.7135355	0.713475
Re	-	1361.23101	1375.20055	1372.909745	1371.115174
Q_{heater}	W	220	220	220	220

ตารางที่ ข-10 ตารางประกอบการคำนวณการพาแบบบังคับความเร็วลม 0.6 m/s อุณหภูมิผิว 150 °C

ชนิดของวัสดุ อลูมิเนียม ทรงกระบอก ขนาดของวัสดุ 0.05 * 0.1 เมตร

ตัวแปร	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
V	volt	220	220	220	220
A	amp	1	1	1	1
V_{∞}	m/s	1.0	1.0	1.0	1.0
$T_{\infty,in}$	°C	23.2	22.8	26.7	26.2
$T_{\infty,out}$	°C	25.1	24.6	27.4	27.4
$T_{s,heater}$	°C	50	50	50	50
$T_{initial}$	°C	25	25	25	25
$T_{s,1}$	°C	56.9	57.8	56.7	54.4
$T_{s,2}$	°C	48.1	49.9	47.5	46.5
Δt	sec.	1,094.4	1,267.2	1,289.4	1,228.8

ตารางที่ ข-11 บันทึกการทดลองการพาแบบบังคับความเร็วลม 1.0 m/s อุณหภูมิผิว 50 °C

$$T_{ave,s} = \frac{T_{s,1} + T_{s,2}}{2} \quad T_f = \frac{T_{ave,s} + T_{\infty,in}}{2} \quad Re = \frac{V_{\infty} L}{\nu}$$

$$Nu = \frac{hD}{k} = CRe^m Pr^n \quad \text{ค่า } C, m, n \text{ เป็นค่าคงที่}$$

$$\dot{Q}_{conv} = hA(T_{ave,s} - T_{\infty,in}) \quad \dot{Q}_{conv} = AV$$

ตัวแปร	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
$T_{ave,s}$	°C	52.5	53.85	52.1	50.45
T_f	°C	37.85	38.325	39.4	38.325
C_p	J/kg·°C	1007	1007	1007	1007
ν	m^2/s	1.68179E-05	1.68626E-05	1.69636E-05	1.68626E-05
k	W/m·°C	0.0264609	0.02649605	0.0265756	0.02649605
Pr	-	0.726059	0.7259355	0.725656	0.7259355
Re	-	2973.02279	2965.150585	2947.487562	2965.150585
Q_{heater}	W	220	220	220	220

ตารางที่ ข-12 ตารางประกอบการคำนวณการพาแบบบังคับความเร็วลม 1.0 m/s อุณหภูมิผิว 50 °C

ชนิดของวัสดุ อลูมิเนียม ทรงกระบอก ขนาดของวัสดุ 0.05 * 0.1 เมตร

ตัวแปร	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
V	volt	220	220	220	220
A	amp	1	1	1	1
V_{∞}	m/s	1.0	1.0	1.0	1.0
$T_{\infty,in}$	°C	26.9	26.2	26.4	26.9
$T_{\infty,out}$	°C	27.1	27.3	27.2	27.2
$T_{s,heater}$	°C	75	75	75	75
$T_{initial}$	°C	25	25	25	25
$T_{s,1}$	°C	63.9	63.8	62.5	62.5
$T_{s,2}$	°C	57.6	57.9	56.6	57.2
Δt	sec.	190.8	201	319.8	328.8

ตารางที่ ข-13 บันทึกการทดลองการพาแบบบังคับความเร็วลม 1.0 m/s อุณหภูมิผิว 75 °C

$$T_{ave,s} = \frac{T_{s,1} + T_{s,2}}{2} \quad T_f = \frac{T_{ave,s} + T_{\infty,in}}{2} \quad Re = \frac{V_{\infty} L}{\nu}$$

$$Nu = \frac{hD}{k} = CRe^m Pr^n \quad \text{ค่า } C, m, n \text{ เป็นค่าคงที่}$$

$$\dot{Q}_{conv} = hA(T_{ave,s} - T_{\infty,in}) \quad \dot{Q}_{conv} = AV$$

ตัวแปร	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
$T_{ave,s}$	°C	75.9	76	75.7	75.85
T_f	°C	51.4	51.1	51.05	51.375
C_p	J/kg·°C	1007	1007	1007	1007
ν	m^2/s	1.81172E-05	1.80878E-05	1.80829E-05	1.81148E-05
k	W/m·°C	0.0274522	0.0274303	0.02742665	0.027450375
Pr	-	0.722436	0.722436	0.722527	0.7224425
Re	-	2759.80836	2764.294165	2765.043218	2760.18162
Q_{heater}	W	220	220	220	220

ตารางที่ ข-14 ตารางประกอบการคำนวณการพาแบบบังคับความเร็วลม 1.0 m/s อุณหภูมิผิว 75 °C

ชนิดของวัสดุ อลูมิเนียม ทรงกระบอก ขนาดของวัสดุ 0.05 * 0.1 เมตร

ตัวแปร	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
V	volt	220	220	220	220
A	amp	1	1	1	1
V_{∞}	m/s	1.0	1.0	1.0	1.0
$T_{\infty,in}$	°C	26.2	26.2	26	26.1
$T_{\infty,out}$	°C	27	28.7	28.8	28.2
$T_{s,heater}$	°C	100	100	100	100
$T_{initial}$	°C	25	25	25	25
$T_{s,1}$	°C	88.9	89.8	88.7	89.1
$T_{s,2}$	°C	78.7	80.8	78.6	79.7
Δt	sec.	187.2	275.4	264	326.4

ตารางที่ ข-15 บันทึกการทดลองการพาแบบบังคับความเร็วลม 1.0 m/s อุณหภูมิผิว 100 °C

$$T_{ave,s} = \frac{T_{s,1} + T_{s,2}}{2} \quad T_f = \frac{T_{ave,s} + T_{\infty,in}}{2} \quad Re = \frac{V_{\infty} L}{\nu}$$

$$Nu = \frac{hD}{k} = CRe^m Pr^n \quad \text{ค่า } C, m, n \text{ เป็นค่าคงที่}$$

$$\dot{Q}_{conv} = hA(T_{ave,s} - T_{\infty,in}) \quad \dot{Q}_{conv} = AV$$

ตัวแปร	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
$T_{ave,s}$	°C	101.2	101.6	100.35	101.55
T_f	°C	63.7	63.9	63.175	63.825
C_p	J/kg·°C	1007	1007	1007	1007
ν	m^2/s	1.93263E-05	1.93461E-05	1.92743E-05	1.93387E-05
k	W/m·°C	0.0283501	0.0283647	0.028311775	0.028359225
Pr	-	0.719275	0.719225	0.71940625	0.71924375
Re	-	2587.14808	2584.500235	2594.124567	2585.492543
Q_{heater}	W	220	220	220	220

ตารางที่ ข-16 ตารางประกอบการคำนวณการพาแบบบังคับความเร็วลม 1.0 m/s อุณหภูมิผิว 100 °C

ชนิดของวัสดุ อลูมิเนียม ทรงกระบอก ขนาดของวัสดุ 0.05 * 0.1 เมตร

ตัวแปร	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
V	volt	220	220	220	220
A	amp	1	1	1	1
V_{∞}	m/s	1.0	1.0	1.0	1.0
$T_{\infty,in}$	°C	26.3	26.9	26.4	25.9
$T_{\infty,out}$	°C	28.8	28.7	28.7	28.9
$T_{s,heater}$	°C	125	125	125	125
$T_{initial}$	°C	25	25	25	25
$T_{s,1}$	°C	113.2	114.2	113.6	113.9
$T_{s,2}$	°C	100	101.4	100.5	100.8
Δt	sec.	252.6	264	264	259.2

ตารางที่ ข-17 บันทึกการทดลองการพาแบบบังคับความเร็วลม 1.0 m/s อุณหภูมิผิว 125 °C

$$T_{ave,s} = \frac{T_{s,1} + T_{s,2}}{2} \quad T_f = \frac{T_{ave,s} + T_{\infty,in}}{2} \quad Re = \frac{V_{\infty} L}{\nu}$$

$$Nu = \frac{hD}{k} = CRe^m Pr^n \quad \text{ค่า } C, m, n \text{ เป็นค่าคงที่}$$

$$\dot{Q}_{conv} = hA(T_{ave,s} - T_{\infty,in}) \quad \dot{Q}_{conv} = AV$$

ตัวแปร	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
$T_{ave,s}$	°C	125.7	125.55	125.45	126.05
T_f	°C	76	76.225	75.925	75.975
C_p	J/kg·°C	1007.6	1007.6225	1007.5925	1007.5975
ν	m^2/s	0.000020562	2.0585E-05	2.05544E-05	2.05595E-05
k	W/m·°C	0.029242	0.0292582	0.0292366	0.0292402
Pr	-	0.71632	0.71626825	0.71633725	0.71632575
Re	-	2431.670071	2428.959021	2432.5751	2431.971672
Q_{heater}	W	220	220	220	220

ตารางที่ ข-18 ตารางประกอบการคำนวณการพาแบบบังคับความเร็วลม 1.0 m/s อุณหภูมิผิว 125 °C

ชนิดของวัสดุ อลูมิเนียม ทรงกระบอก ขนาดของวัสดุ 0.05 * 0.1 เมตร

ตัวแปร	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
V	volt	220	220	220	220
A	amp	1	1	1	1
V_{∞}	m/s	1.0	1.0	1.0	1.0
$T_{\infty,in}$	°C	24	23.9	24.1	24.6
$T_{\infty,out}$	°C	30	30.1	30.3	30.4
$T_{s,heater}$	°C	150	150	150	150
$T_{initial}$	°C	25	25	25	25
$T_{s,1}$	°C	155.4	160.1	159.3	155.5
$T_{s,2}$	°C	147.8	148.2	147.4	147.8
Δt	sec.	187.8	240	207.6	199.2

ตารางที่ ข-19 บันทึกการทดลองการพาแบบบังคับความเร็วลม 1.0 m/s อุณหภูมิผิว 150 °C

$$T_{ave,s} = \frac{T_{s,1} + T_{s,2}}{2} \quad T_f = \frac{T_{ave,s} + T_{\infty,in}}{2} \quad Re = \frac{V_{\infty} L}{\nu}$$

$$Nu = \frac{hD}{k} = CRe^m Pr^n \quad \text{ค่า } C, m, n \text{ เป็นค่าคงที่}$$

$$\dot{Q}_{conv} = hA(T_{ave,s} - T_{\infty,in}) \quad \dot{Q}_{conv} = AV$$

ตัวแปร	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
$T_{ave,s}$	°C	151.6	154.15	153.35	151.65
T_f	°C	87.8	89.025	88.725	88.125
C_p	J/kg·°C	1008	1008	1008	1008
ν	m^2/s	2.17812E-05	2.19086E-05	2.18774E-05	0.000021815
k	W/m·°C	0.0300838	0.030170775	0.030149475	0.030106875
Pr	-	0.713684	0.7134145	0.7134805	0.7136125
Re	-	2295.557637	2282.208813	2285.463538	1375.20055
Q_{heater}	W	220	220	220	220

ตารางที่ ข-20 ตารางประกอบการคำนวณการพาแบบบังคับความเร็วลม 1.0 m/s อุณหภูมิผิว 150 °C

ชนิดของวัสดุ อลูมิเนียม ทรงกระบอก ขนาดของวัสดุ 0.05 * 0.1 เมตร

ตัวแปร	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
V	volt	220	220	220	220
A	amp	1	1	1	1
V_{∞}	m/s	2.0	2.0	2.0	2.0
$T_{\infty,in}$	°C	26.8	27.2	26.8	26.4
$T_{\infty,out}$	°C	27.9	28.3	28.1	27.9
$T_{s,heater}$	°C	50	50	50	50
$T_{initial}$	°C	25	25	25	25
$T_{s,1}$	°C	55.5	53.7	54.1	56.8
$T_{s,2}$	°C	46.8	47.1	47.5	49.9
Δt	sec.	988.2	1,021.8	989.4	973.8

ตารางที่ ข-21 บันทึกการทดลองการพาแบบบังคับความเร็วลม 2.0 m/s อุณหภูมิผิว 50 °C

$$T_{ave,s} = \frac{T_{s,1} + T_{s,2}}{2} \quad T_f = \frac{T_{ave,s} + T_{\infty,in}}{2} \quad Re = \frac{V_{\infty} L}{\nu}$$

$$Nu = \frac{hD}{k} = CRe^m Pr^n \quad \text{ค่า } C, m, n \text{ เป็นค่าคงที่}$$

$$\dot{Q}_{conv} = hA(T_{ave,s} - T_{\infty,in}) \quad \dot{Q}_{conv} = AV$$

ตัวแปร	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
$T_{ave,s}$	°C	51.1	50.4	50.8	53.35
T_f	°C	38.95	38.8	38.8	39.875
C_p	J/kg·°C	1007	1007	1007	1007
ν	m^2/s	1.69213E-05	1.69072E-05	1.69072E-05	1.70083E-05
k	W/m·°C	0.0265423	0.0265312	0.0265312	0.02661075
Pr	-	0.725773	0.725812	0.725812	0.7255325
Re	-	5909.711429	5914.639917	5914.639917	5879.499655
Q_{heater}	W	220	220	220	220

ตารางที่ ข-22 ตารางประกอบการคำนวณการพาแบบบังคับความเร็วลม 2.0 m/s อุณหภูมิผิว 50 °C

ชนิดของวัสดุ อลูมิเนียม ทรงกระบอก ขนาดของวัสดุ 0.05 * 0.1 เมตร

ตัวแปร	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
V	volt	220	220	220	220
A	amp	1	1	1	1
V_{∞}	m/s	2.0	2.0	2.0	2.0
$T_{\infty,in}$	°C	26.4	26.8	26.8	26.8
$T_{\infty,out}$	°C	27.6	27.4	27.5	27.2
$T_{s,heater}$	°C	75	75	75	75
$T_{initial}$	°C	25	25	25	25
$T_{s,1}$	°C	62.7	62.5	62.3	64.3
$T_{s,2}$	°C	57.2	57	56.7	59.3
Δt	sec.	331.2	315.6	330.6	361.8

ตารางที่ ข-23 บันทึกการทดลองการพาแบบบังคับความเร็วลม 2.0 m/s อุณหภูมิผิว 75 °C

$$T_{ave,s} = \frac{T_{s,1} + T_{s,2}}{2} \quad T_f = \frac{T_{ave,s} + T_{\infty,in}}{2} \quad Re = \frac{V_{\infty} L}{\nu}$$

$$Nu = \frac{hD}{k} = CRe^m Pr^n \quad \text{ค่า } C, m, n \text{ เป็นค่าคงที่}$$

$$\dot{Q}_{conv} = hA(T_{ave,s} - T_{\infty,in}) \quad \dot{Q}_{conv} = AV$$

ตัวแปร	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
$T_{ave,s}$	°C	76.1	75.7	75.35	75.9
T_f	°C	51.25	51.25	51.075	51.35
C_p	J/kg·°C	1007	1007	1007	1007
ν	m^2/s	1.81025E-05	1.81025E-05	1.80854E-05	1.81123E-05
k	W/m·°C	0.02744125	0.02744125	0.027428475	0.02744855
Pr	-	0.722475	0.722475	0.7225205	0.722449
Re	-	5524.098881	5524.098881	5529.337281	5521.109964
Q_{heater}	W	220	220	220	220

ตารางที่ ข-24 ตารางประกอบการคำนวณการพาแบบบังคับความเร็วลม 2.0 m/s อุณหภูมิผิว 75 °C

ชนิดของวัสดุ อลูมิเนียม ทรงกระบอก ขนาดของวัสดุ 0.05 * 0.1 เมตร

ตัวแปร	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
V	volt	220	220	220	220
A	amp	1	1	1	1
V_{∞}	m/s	2.0	2.0	2.0	2.0
$T_{\infty,in}$	°C	29.1	29.8	29	29.5
$T_{\infty,out}$	°C	31	31.2	31.3	31.2
$T_{s,heater}$	°C	100	100	100	100
$T_{initial}$	°C	25	25	25	25
$T_{s,1}$	°C	89.6	88.7	89.8	88.9
$T_{s,2}$	°C	85.3	84.2	85.4	84.9
Δt	sec.	270	315	274.2	324

ตารางที่ ข-25 บันทึกการทดลองการพาแบบบังคับความเร็วลม 2.0 m/s อุณหภูมิผิว 100 °C

$$T_{ave,s} = \frac{T_{s,1} + T_{s,2}}{2} \quad T_f = \frac{T_{ave,s} + T_{\infty,in}}{2} \quad Re = \frac{V_{\infty} L}{\nu}$$

$$Nu = \frac{hD}{k} = CRe^m Pr^n \quad \text{ค่า } C, m, n \text{ เป็นค่าคงที่}$$

$$\dot{Q}_{conv} = hA(T_{ave,s} - T_{\infty,in}) \quad \dot{Q}_{conv} = AV$$

ตัวแปร	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
$T_{ave,s}$	°C	101.35	101.35	101.85	151.65
T_f	°C	65.225	65.575	65.425	88.125
C_p	J/kg·°C	1007	1007	1007	1008
ν	m^2/s	1.94773E-05	1.95119E-05	1.94971E-05	0.000021815
k	W/m·°C	0.028461425	0.028486975	0.028476025	0.030106875
Pr	-	0.71889375	0.71880625	0.71884375	0.7136125
Re	-	5134.188432	5125.07095	2285.463538	5128.974474
Q_{heater}	W	220	220	220	220

ตารางที่ ข-26 ตารางประกอบการคำนวณการพาแบบบังคับความเร็วลม 2.0 m/s อุณหภูมิผิว 100 °C

ชนิดของวัสดุ อลูมิเนียม ทรงกระบอก ขนาดของวัสดุ 0.05 * 0.1 เมตร

ตัวแปร	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
V	volt	220	220	220	220
A	amp	1	1	1	1
V_{∞}	m/s	2.0	2.0	2.0	2.0
$T_{\infty,in}$	°C	28.7	29.2	28.8	29
$T_{\infty,out}$	°C	32.1	32.1	32.2	32.1
$T_{s,heater}$	°C	125	125	125	125
$T_{initial}$	°C	25	25	25	25
$T_{s,1}$	°C	114.9	112.2	113.4	114.4
$T_{s,2}$	°C	109.2	107.1	108.1	108.9
Δt	sec.	182.4	154.8	189	185.4

ตารางที่ ข-27 บันทึกการทดลองการพาแบบบังคับความเร็วลม 2.0 m/s อุณหภูมิผิว 125 °C

$$T_{ave,s} = \frac{T_{s,1} + T_{s,2}}{2} \quad T_f = \frac{T_{ave,s} + T_{\infty,in}}{2} \quad Re = \frac{V_{\infty} L}{\nu}$$

$$Nu = \frac{hD}{k} = CRe^m Pr^n \quad \text{ค่า } C, m, n \text{ เป็นค่าคงที่}$$

$$\dot{Q}_{conv} = hA(T_{ave,s} - T_{\infty,in}) \quad \dot{Q}_{conv} = AV$$

ตัวแปร	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
$T_{ave,s}$	°C	127.4	126.95	127.35	127.05
T_f	°C	78.05	78.075	78.075	78.025
C_p	J/kg·°C	1007.805	1007.8075	1007.8075	1007.8025
ν	m^2/s	2.07711E-05	2.07737E-05	2.07737E-05	2.07686E-05
k	W/m·°C	0.0293896	0.0293914	0.0293914	0.0293878
Pr	-	0.7158485	0.71584275	0.71584275	0.71585425
Re	-	4814.38152	4813.790547	4813.790547	4814.972639
Q_{heater}	W	220	220	220	220

ตารางที่ ข-28 ตารางประกอบการคำนวณการพาแบบบังคับความเร็วลม 2.0 m/s อุณหภูมิผิว 125 °C

ชนิดของวัสดุ อลูมิเนียม ทรงกระบอก ขนาดของวัสดุ 0.05 * 0.1 เมตร

ตัวแปร	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
V	volt	220	220	220	220
A	amp	1	1	1	1
V_{∞}	m/s	2.0	2.0	2.0	2.0
$T_{\infty,in}$	°C	30.4	30.3	30	30.3
$T_{\infty,out}$	°C	32.2	32.3	32.3	32.3
$T_{s,heater}$	°C	150	150	150	150
$T_{initial}$	°C	25	25	25	25
$T_{s,1}$	°C	139.7	137.9	138.4	139.8
$T_{s,2}$	°C	133	130.5	131.5	132.9
Δt	sec.	141.6	145.2	144	142.2

ตารางที่ ข-29 บันทึกการทดลองการพาแบบบังคับความเร็วลม 2.0 m/s อุณหภูมิผิว 150 °C

$$T_{ave,s} = \frac{T_{s,1} + T_{s,2}}{2} \quad T_f = \frac{T_{ave,s} + T_{\infty,in}}{2} \quad Re = \frac{V_{\infty} L}{\nu}$$

$$Nu = \frac{hD}{k} = CRe^m Pr^n \quad \text{ค่า } C, m, n \text{ เป็นค่าคงที่}$$

$$\dot{Q}_{conv} = hA(T_{ave,s} - T_{\infty,in}) \quad \dot{Q}_{conv} = AV$$

ตัวแปร	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
$T_{ave,s}$	°C	153.95	153.7	154.45	153.7
T_f	°C	92.175	92	92.225	92
C_p	J/kg·°C	1008.2175	1008.2	1008.2225	1008.2
ν	m^2/s	2.22384E-05	0.00002222	2.22436E-05	0.00002222
k	W/m·°C	0.030394425	0.030382	0.030397975	0.030106875
Pr	-	0.71274325	0.71278	0.71273275	0.71278
Re	-	4496.731438	4500.450045	4495.670108	4500.450045
Q_{heater}	W	220	220	220	220

ตารางที่ ข-30 ตารางประกอบการคำนวณการพาแบบบังคับความเร็วลม 2.0 m/s อุณหภูมิผิว 150 °C

ชนิดของวัสดุ อลูมิเนียม ทรงกระบอก ขนาดของวัสดุ 0.05 * 0.1 เมตร

ตัวแปร	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
V	volt	220	220	220	220
A	amp	1	1	1	1
V_{∞}	m/s	2.7	2.7	2.7	2.7
$T_{\infty,in}$	°C	26.8	27.2	26.5	26.7
$T_{\infty,out}$	°C	29.8	29.9	29.7	29.8
$T_{s,heater}$	°C	50	50	50	50
$T_{initial}$	°C	25	25	25	25
$T_{s,1}$	°C	39.6	41.4	42.4	42.1
$T_{s,2}$	°C	38.7	40.4	41.2	41.7
Δt	sec.	990.6	919.2	990	911.4

ตารางที่ ข-31 บันทึกการทดลองการพาแบบบังคับความเร็วลม 2.7 m/s อุณหภูมิผิว 50 °C

$$T_{ave,s} = \frac{T_{s,1} + T_{s,2}}{2} \quad T_f = \frac{T_{ave,s} + T_{\infty,in}}{2} \quad Re = \frac{V_{\infty} L}{\nu}$$

$$Nu = \frac{hD}{k} = CRe^m Pr^n \quad \text{ค่า } C, m, n \text{ เป็นค่าคงที่}$$

$$\dot{Q}_{conv} = hA(T_{ave,s} - T_{\infty,in}) \quad \dot{Q}_{conv} = AV$$

ตัวแปร	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
$T_{ave,s}$	°C	51.55	52.15	51.05	51.55
T_f	°C	39.175	39.675	38.775	39.125
C_p	J/kg·°C	1007	1007	1007	1007
ν	m^2/s	1.69425E-05	1.69895E-05	1.69049E-05	1.69378E-05
k	W/m·°C	0.02655895	0.02659595	0.02652935	0.02655525
Pr	-	0.7257145	0.7255845	0.7258185	0.7257275
Re	-	7968.151005	7946.107732	7985.873876	7970.362061
Q_{heater}	W	220	220	220	220

ตารางที่ ข-32 ตารางประกอบการคำนวณการพาแบบบังคับความเร็วลม 2.7 m/s อุณหภูมิผิว 50 °C

ชนิดของวัสดุ อลูมิเนียม ทรงกระบอก ขนาดของวัสดุ 0.05 * 0.1 เมตร

ตัวแปร	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
V	volt	220	220	220	220
A	amp	1	1	1	1
V_{∞}	m/s	2.7	2.7	2.7	2.7
$T_{\infty,in}$	°C	27.7	27.8	27.5	27.4
$T_{\infty,out}$	°C	29.8	27.8	29.8	27.6
$T_{s,heater}$	°C	75	75	75	75
$T_{initial}$	°C	25	25	25	25
$T_{s,1}$	°C	61.8	61.8	59.3	29.4
$T_{s,2}$	°C	61.5	63	60.5	60.3
Δt	sec.	252	384.6	374.4	379.8

ตารางที่ ข-33 บันทึกการทดลองการพาแบบบังคับความเร็วลม 2.7 m/s อุณหภูมิผิว 75 °C

$$T_{ave,s} = \frac{T_{s,1} + T_{s,2}}{2} \quad T_f = \frac{T_{ave,s} + T_{\infty,in}}{2} \quad Re = \frac{V_{\infty} L}{\nu}$$

$$Nu = \frac{hD}{k} = CRe^m Pr^n \quad \text{ค่า } C, m, n \text{ เป็นค่าคงที่}$$

$$\dot{Q}_{conv} = hA(T_{ave,s} - T_{\infty,in}) \quad \dot{Q}_{conv} = AV$$

ตัวแปร	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
$T_{ave,s}$	°C	76	76.1	75.5	75.75
T_f	°C	51.85	51.95	51.5	51.575
C_p	J/kg·°C	1007	1007	1007	1007
ν	m^2/s	1.81613E-05	1.81711E-05	0.000018127	1.81344E-05
k	W/m·°C	0.02748505	0.02749235	0.0274595	0.027464975
Pr	-	0.722319	0.722293	0.72241	0.7223905
Re	-	7433.388579	7429.379619	7447.454074	7444.43556
Q_{heater}	W	220	220	220	220

ตารางที่ ข-34 ตารางประกอบการคำนวณการพาแบบบังคับความเร็วลม 2.7 m/s อุณหภูมิผิว 75 °C

ชนิดของวัสดุ อลูมิเนียม ทรงกระบอก ขนาดของวัสดุ 0.05 * 0.1 เมตร

ตัวแปร	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
V	volt	220	220	220	220
A	amp	1	1	1	1
V_{∞}	m/s	2.7	2.7	2.7	2.7
$T_{\infty,in}$	°C	29.4	30	29.7	30.1
$T_{\infty,out}$	°C	31.2	31.2	31.5	31.3
$T_{s,heater}$	°C	100	100	100	100
$T_{initial}$	°C	25	25	25	25
$T_{s,1}$	°C	89.4	90.2	89.8	90.1
$T_{s,2}$	°C	84.9	85.7	85.4	85.6
Δt	sec.	308.4	265.2	321	271.2

ตารางที่ ข-35 บันทึกการทดลองการพาแบบบังคับความเร็วลม 2.7 m/s อุณหภูมิผิว 100 °C

$$T_{ave,s} = \frac{T_{s,1} + T_{s,2}}{2} \quad T_f = \frac{T_{ave,s} + T_{\infty,in}}{2} \quad Re = \frac{V_{\infty} L}{\nu}$$

$$Nu = \frac{hD}{k} = CRe^m Pr^n \quad \text{ค่า } C, m, n \text{ เป็นค่าคงที่}$$

$$\dot{Q}_{conv} = hA(T_{ave,s} - T_{\infty,in}) \quad \dot{Q}_{conv} = AV$$

ตัวแปร	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
$T_{ave,s}$	°C	103.2	103.15	102.175	102.7
T_f	°C	66.3	66.575	65.9375	66.4
C_p	J/kg·°C	1007	1007	1007	1007
ν	m^2/s	1.95837E-05	1.96109E-05	1.95478E-05	1.95936E-05
k	W/m·°C	0.0285399	0.028559975	0.028513438	0.0285472
Pr	-	0.718625	0.71855625	0.718715625	0.7186
Re	-	6893.487952	6883.91802	6906.14359	6890.0049
Q_{heater}	W	220	220	220	220

ตารางที่ ข-36 ตารางประกอบการคำนวณการพาแบบบังคับความเร็วลม 2.7 m/s อุณหภูมิผิว 100 °C

ชนิดของวัสดุ อลูมิเนียม ทรงกระบอก ขนาดของวัสดุ 0.05 * 0.1 เมตร

ตัวแปร	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
V	volt	220	220	220	220
A	amp	1	1	1	1
V_{∞}	m/s	2.7	2.7	2.7	2.7
$T_{\infty,in}$	°C	30	29.9	29.8	29.9
$T_{\infty,out}$	°C	32.1	32	32.1	32.1
$T_{s,heater}$	°C	125	125	125	125
$T_{initial}$	°C	25	25	25	25
$T_{s,1}$	°C	114.8	114.5	114.2	114.8
$T_{s,2}$	°C	109.6	109.6	109.5	109.7
Δt	sec.	199.2	190.2	204	201

ตารางที่ ข-37 บันทึกการทดลองการพาแบบบังคับความเร็วลม 2.7 m/s อุณหภูมิผิว 125 °C

$$T_{ave,s} = \frac{T_{s,1} + T_{s,2}}{2} \quad T_f = \frac{T_{ave,s} + T_{\infty,in}}{2} \quad Re = \frac{V_{\infty} L}{\nu}$$

$$Nu = \frac{hD}{k} = CRe^m Pr^n \quad \text{ค่า } C, m, n \text{ เป็นค่าคงที่}$$

$$\dot{Q}_{conv} = hA(T_{ave,s} - T_{\infty,in}) \quad \dot{Q}_{conv} = AV$$

ตัวแปร	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
$T_{ave,s}$	°C	126.7	126.3	126.3	125.95
T_f	°C	78.35	78.1	79.2	77.925
C_p	J/kg·°C	1007.835	1007.81	1007.92	1007.7925
ν	m^2/s	2.08017E-05	2.07762E-05	2.08884E-05	2.07584E-05
k	W/m·°C	0.0294112	0.0293932	0.0294724	0.0293806
Pr	-	0.7157795	0.715837	0.715584	0.71587725
Re	-	6489.854195	6497.819621	6462.917217	6503.407063
Q_{heater}	W	220	220	220	220

ตารางที่ ข-38 ตารางประกอบการคำนวณการพาแบบบังคับความเร็วลม 2.7 m/s อุณหภูมิผิว 125 °C

ชนิดของวัสดุ อลูมิเนียม ทรงกระบอก ขนาดของวัสดุ 0.05 * 0.1 เมตร

ตัวแปร	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
V	volt	220	220	220	220
A	amp	1	1	1	1
V_{∞}	m/s	2.7	2.7	2.7	2.7
$T_{\infty,in}$	°C	30.1	30.5	30.3	30.2
$T_{\infty,out}$	°C	32.5	32.6	32.5	32.5
$T_{s,heater}$	°C	150	150	150	150
$T_{initial}$	°C	25	25	25	25
$T_{s,1}$	°C	140.4	141.4	140.5	141.7
$T_{s,2}$	°C	132.6	134	133.4	134.2
Δt	sec.	154.8	153	180.6	150.6

ตารางที่ ข-39 บันทึกการทดลองการพาแบบบังคับความเร็วลม 2.7 m/s อุณหภูมิผิว 150 °C

$$T_{ave,s} = \frac{T_{s,1} + T_{s,2}}{2} \quad T_f = \frac{T_{ave,s} + T_{\infty,in}}{2} \quad Re = \frac{V_{\infty} L}{\nu}$$

$$Nu = \frac{hD}{k} = CRe^m Pr^n \quad \text{ค่า } C, m, n \text{ เป็นค่าคงที่}$$

$$\dot{Q}_{conv} = hA(T_{ave,s} - T_{\infty,in}) \quad \dot{Q}_{conv} = AV$$

ตัวแปร	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
$T_{ave,s}$	°C	151.9	151	150.95	152.05
T_f	°C	91	90.75	90.625	91.125
C_p	J/kg·°C	1008.1	1008.075	1008.0625	1008.1125
ν	m^2/s	0.000022115	2.20888E-05	2.20756E-05	2.21281E-05
k	W/m·°C	0.030311	0.03029325	0.030284375	0.030319875
Pr	-	0.71299	0.7130425	0.71306875	0.71296375
Re	-	6104.453991	6111.708449	6115.342148	6100.833216
Q_{heater}	W	220	220	220	220

ตารางที่ ข-40 ตารางประกอบการคำนวณการพาแบบบังคับความเร็วลม 2.7 m/s อุณหภูมิผิว 150 °C

ใบบันทึกผลการทดลองทรงกระบอก
การพาความร้อนแบบอิสระ

ชนิดของวัสดุ อลูมิเนียม ทรงกระบอก ขนาดของวัสดุ 0.05 * 0.1 เมตร

ตัวแปร	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
V	volt	220	220	220	220
A	amp	1	1	1	1
$T_{\infty,in}$	°C	29.9	30.01	29.9	30
$T_{\infty,out}$	°C	30.4	29.9	29.6	29.9
$T_{s,heater}$	°C	50	50	50	50
$T_{initial}$	°C	26	26	26	26
$T_{s,1}$	°C	47.5	47.9	36.8	36.9
$T_{s,2}$	°C	47.5	47.8	36.9	37
Δt	sec.	1,803.6	1,741.8	2,531.4	2,481

ตารางที่ ข-41 บันทึกการทดลองการพาแบบอิสระอุณหภูมิมิ่ว 50 °C

$$T_{ave,s} = \frac{T_{s,1} + T_{s,2}}{2} \quad T_f = \frac{T_{ave,s} + T_{\infty,in}}{2} \quad \beta = \frac{1}{T_f} \quad g = 9.81$$

$$Ra = Gr \cdot Pr = \frac{g\beta(T_{ave,s} - T_{\infty,in})L_c^3}{\nu^2} Pr \quad Nu = \frac{hL_c}{k} = CRe^n \quad (\text{ค่า } C, n \text{ เป็นค่าคงที่})$$

$$\dot{Q}_{conv} = hA(T_{ave,s} - T_{\infty,in}) \quad \dot{Q}_{conv} = AV$$

ตัวแปร	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
$T_{ave,s}$	°C	47.5	47.9	47.75	47.55
T_f	°C	38.7	38.955	38.825	38.775
ν	m^2/s	1.68978E-05	1.69218E-05	1.69096E-05	1.69049E-05
k	W/m°C	0.0265238	0.02654267	0.02653305	0.02652935
β	K^{-1}	0.003208213	0.003205591	0.003206927	0.003207441
Pr	-	0.725838	0.7257717	0.7258055	0.7258185
L_c	m	0.05	0.05	0.05	0.05
Ra	-	594029.5277	601560.9567	601362.3597	591689.7159
Q_{heater}	W	220	220	220	220

ตารางที่ ข-42 ตารางประกอบการคำนวณการพาแบบอิสระอุณหภูมิมิ่ว 50 °C

ชนิดของวัสดุ อลูมิเนียม ทรงกระบอก ขนาดของวัสดุ 0.05 * 0.1 เมตร

ตัวแปร	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
V	volt	220	220	220	220
A	amp	1	1	1	1
$T_{\infty,in}$	°C	28.8	30.2	30.3	30.6
$T_{\infty,out}$	°C	32.8	32.6	33.1	33.2
$T_{s,heater}$	°C	75	75	75	75
$T_{initial}$	°C	26	26	26	26
$T_{s,1}$	°C	62.7	75.2	71.6	74.9
$T_{s,2}$	°C	62.1	72.5	71.4	71.7
Δt	sec.	1,090.8	929.4	988.2	905.4

ตารางที่ ข-43 บันทึกการทดลองการพาแบบอิสระอุณหภูมิผิว 75 °C

$$T_{ave,s} = \frac{T_{s,1} + T_{s,2}}{2} \quad T_f = \frac{T_{ave,s} + T_{\infty,in}}{2} \quad \beta = \frac{1}{T_f} \quad g = 9.81$$

$$Ra = Gr \cdot Pr = \frac{g\beta(T_{ave,s} - T_{\infty,in})L_c^3}{\nu^2} Pr \quad Nu = \frac{hL_c}{k} = CRe^n \quad (\text{ค่า } C, n \text{ เป็นค่าคงที่})$$

$$\dot{Q}_{conv} = hA(T_{ave,s} - T_{\infty,in}) \quad \dot{Q}_{conv} = AV$$

ตัวแปร	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
$T_{ave,s}$	°C	78.4	78.15	78.65	78.6
T_f	°C	54.2	54.125	54.325	55.25
ν	m^2/s	1.83916E-05	1.83843E-05	1.84039E-05	1.84945E-05
k	W/m·°C	0.0276566	0.027651125	0.027665725	0.02773325
β	K^{-1}	0.003056235	0.003056935	0.003055068	0.003046458
Pr	-	0.721708	0.7217275	0.7216755	0.721435
L_c	m	0.05	0.05	0.05	0.05
Ra	-	1306193.018	1298117.107	1310632.876	1241872.363
Q_{heater}	W	220	220	220	220

ตารางที่ ข-44 ตารางประกอบการคำนวณการพาแบบอิสระอุณหภูมิผิว 75 °C

ชนิดของวัสดุ อลูมิเนียม ทรงกระบอก ขนาดของวัสดุ 0.05 * 0.1 เมตร

ตัวแปร	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
V	volt	220	220	220	220
A	amp	1	1	1	1
$T_{\infty,in}$	°C	30.6	36.8	31	31
$T_{\infty,out}$	°C	33.3	36.8	36.2	36.1
$T_{s,heater}$	°C	100	100	100	100
$T_{initial}$	°C	26	26	26	26
$T_{s,1}$	°C	102	103.1	101.5	101.2
$T_{s,2}$	°C	98	99.4	98.5	98.4
Δt	sec.	549.6	545.4	533.4	547.2

ตารางที่ ข-45 บันทึกการทดลองการพาแบบอิสระอุณหภูมิผิว 100 °C

$$T_{ave,s} = \frac{T_{s,1} + T_{s,2}}{2} \quad T_f = \frac{T_{ave,s} + T_{\infty,in}}{2} \quad \beta = \frac{1}{T_f} \quad g = 9.81$$

$$Ra = Gr \cdot Pr = \frac{g\beta(T_{ave,s} - T_{\infty,in})L_c^3}{\nu^2} Pr \quad Nu = \frac{hL_c}{k} = CRe^n \quad (\text{ค่า } C, n \text{ เป็นค่าคงที่})$$

$$\dot{Q}_{conv} = hA(T_{ave,s} - T_{\infty,in}) \quad \dot{Q}_{conv} = AV$$

ตัวแปร	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
$T_{ave,s}$	°C	106.2	101.65	101.5	100.4
T_f	°C	67.25	65.225	65.35	64.9
ν	m^2/s	1.96778E-05	1.94773E-05	1.94897E-05	1.94451E-05
k	W/m·°C	0.02860925	0.028461425	0.02847055	0.0284377
β	K^{-1}	0.002939015	0.002956612	0.002955519	0.002959455
Pr	-	0.7183875	0.71889375	0.7188625	0.718975
L_c	m	0.05	0.05	0.05	0.05
Ra	-	1757923.658	1689215.135	1673642.374	1653546.385
Q_{heater}	W	220	220	220	220

ตารางที่ ข-46 ตารางประกอบการคำนวณการพาแบบอิสระอุณหภูมิผิว 100 °C

ชนิดของวัสดุ อลูมิเนียม ทรงกระบอก ขนาดของวัสดุ 0.05 * 0.1 เมตร

ตัวแปร	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
V	volt	220	220	220	220
A	amp	1	1	1	1
$T_{\infty,in}$	°C	30.8	31	31	30.8
$T_{\infty,out}$	°C	38.5	39	42.4	39.6
$T_{s,heater}$	°C	125	125	125	125
$T_{initial}$	°C	26	26	26	26
$T_{s,1}$	°C	128.7	127.4	126.6	126.6
$T_{s,2}$	°C	125.4	124	123.2	123.4
Δt	sec.	382.8	334.2	364.8	369.6

ตารางที่ ข-47 บันทึกการทดลองการพาแบบอิสระอุณหภูมิผิว 125 °C

$$T_{ave,s} = \frac{T_{s,1} + T_{s,2}}{2} \quad T_f = \frac{T_{ave,s} + T_{\infty,in}}{2} \quad \beta = \frac{1}{T_f} \quad g = 9.81$$

$$Ra = Gr \cdot Pr = \frac{g\beta(T_{ave,s} - T_{\infty,in})L_c^3}{\nu^2} Pr \quad Nu = \frac{hL_c}{k} = CRe^n \quad (\text{ค่า } C, n \text{ เป็นค่าคงที่})$$

$$\dot{Q}_{conv} = hA(T_{ave,s} - T_{\infty,in}) \quad \dot{Q}_{conv} = AV$$

ตัวแปร	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
$T_{ave,s}$	°C	137.05	124.1	124.65	124.05
T_f	°C	83.075	76.15	76.925	76.975
ν	m^2/s	2.12898E-05	2.05773E-05	2.06564E-05	2.06615E-05
k	W/m·°C	0.02974833	0.0292528	0.0293086	0.0293122
β	K^{-1}	0.0028084	0.0028641	0.00285776	0.00285735
Pr	-	0.7147235	0.7162855	0.71610725	0.71609575
L_c	m	0.05	0.05	0.05	0.05
Ra	-	1978467.22	1922953.31	1894631.1	1867607.47
Q_{heater}	W	220	220	220	220

ตารางที่ ข-48 ตารางประกอบการคำนวณการพาแบบอิสระอุณหภูมิผิว 125 °C

ชนิดของวัสดุ อลูมิเนียม ทรงกระบอก ขนาดของวัสดุ 0.05 * 0.1 เมตร

ตัวแปร	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
V	volt	220	220	220	220
A	amp	31	31.1	31	30.9
$T_{\infty,in}$	°C	42	51.4	57.2	583
$T_{\infty,out}$	°C	150	150	150	150
$T_{s,heater}$	°C	26	26	26	26
$T_{initial}$	°C	153.4	153.1	153.3	153.6
$T_{s,1}$	°C	179.8	14.5	149.7	149.9
$T_{s,2}$	°C	247.2	252	263.4	207.6
Δt	sec.	31	31.1	31	30.9

ตารางที่ ข-49 บันทึกการทดลองการพาแบบอิสระอุณหภูมิผิว 150 °C

$$T_{ave,s} = \frac{T_{s,1} + T_{s,2}}{2} \quad T_f = \frac{T_{ave,s} + T_{\infty,in}}{2} \quad \beta = \frac{1}{T_f} \quad g = 9.81$$

$$Ra = Gr \cdot Pr = \frac{g\beta(T_{ave,s} - T_{\infty,in})L_c^3}{\nu^2} Pr \quad Nu = \frac{hL_c}{k} = CRe^n \quad (\text{ค่า } C, n \text{ เป็นค่าคงที่})$$

$$\dot{Q}_{conv} = hA(T_{ave,s} - T_{\infty,in}) \quad \dot{Q}_{conv} = AV$$

ตัวแปร	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
$T_{ave,s}$	°C	151.55	147.55	149.55	148
T_f	°C	90.775	88.575	89.825	89
ν	m^2/s	2.20914E-05	2.18618E-05	2.19918E-05	0.000021906
k	W/m·°C	0.03029503	0.03013883	0.03022758	0.00276243
β	K^{-1}	0.00274895	88.575	0.00275615	0.00276243
Pr	-	0.71303725	0.7135135	0.7132385	0.71342
L_c	m	0.05	0.05	0.05	0.05
Ra	-	2020419.89	2015499.56	2009347.13	2005604.74
Q_{heater}	W	220	220	220	220

ตารางที่ ข-50 ตารางประกอบการคำนวณการพาแบบอิสระอุณหภูมิผิว 150 °C

ใบบันทึกผลการทดลองทรงสี่เหลี่ยม
การพาความร้อนแบบบังคับ

ชนิดของวัสดุ อลูมิเนียม ทรงสี่เหลี่ยม ขนาดของวัสดุ 0.075 * 0.1 เมตร

ตัวแปร	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
V	volt	220	220	220	220
A	amp	1	1	1	1
V_{∞}	m/s	0.6	0.6	0.6	0.6
$T_{\infty,in}$	°C	26.5	26.2	26	25.7
$T_{\infty,out}$	°C	27.8	27.3	27.4	26.8
$T_{s,heater}$	°C	50	50	50	50
$T_{initial}$	°C	27	27	27	27
$T_{s,1}$	°C	50	50.5	50.9	50.5
$T_{s,2}$	°C	51	52.2	51.8	51.4
Δt	sec.	1,500	1,350	1,216.8	1,169.4

ตารางที่ ข-51 บันทึกการทดลองการพาแบบบังคับความเร็วลม 0.6 m/s อุณหภูมิผิว 50 °C

$$T_{ave,s} = \frac{T_{s,1} + T_{s,2}}{2} \quad T_f = \frac{T_{ave,s} + T_{\infty,in}}{2} \quad Re = \frac{V_{\infty} L}{\nu}$$

$$Nu = \frac{hD}{k} = CRe^m Pr^n \quad \text{ค่า } C, m, n \text{ เป็นค่าคงที่}$$

$$\dot{Q}_{conv} = hA(T_{ave,s} - T_{\infty,in}) \quad \dot{Q}_{conv} = AV$$

ตัวแปร	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
$T_{ave,s}$	°C	50.5	50.75	51.35	50.95
T_f	°C	38.5	38.475	38.675	38.325
C_p	J/kg·°C	1007	1007	1007	1007
ν	m^2/s	0.000016879	1.68767E-05	1.68955E-05	1.68626E-05
k	W/m·°C	0.026509	0.02650715	0.02652195	0.02649605
Pr	-	0.72589	0.7258965	0.7258445	0.7259355
Re	-	2666.03472	2666.40595	2663.43897	2668.63553
Q_{heater}	W	220	220	220	220

ตารางที่ ข-52 ตารางประกอบการคำนวณการพาแบบบังคับความเร็วลม 0.6 m/s อุณหภูมิผิว 50 °C

ชนิดของวัสดุ อลูมิเนียม ทรงสี่เหลี่ยม ขนาดของวัสดุ 0.075 * 0.1 เมตร

ตัวแปร	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
V	volt	220	220	220	220
A	amp	1	1	1	1
V_{∞}	m/s	0.6	0.6	0.6	0.6
$T_{\infty,in}$	°C	25.7	25.7	25.5	24.6
$T_{\infty,out}$	°C	28	27.8	27.7	26.1
$T_{s,heater}$	°C	75	75	75	75
$T_{initial}$	°C	27	27	27	27
$T_{s,1}$	°C	75.7	73.5	70.9	72.7
$T_{s,2}$	°C	78	75.1	74.6	75.7
Δt	sec.	480	447	591.6	514.2

ตารางที่ ข-53 บันทึกการทดลองการพาแบบบังคับความเร็วลม 0.6 m/s อุณหภูมิผิว 75 °C

$$T_{ave,s} = \frac{T_{s,1} + T_{s,2}}{2}$$

$$T_f = \frac{T_{ave,s} + T_{\infty,in}}{2}$$

$$Re = \frac{V_{\infty} L}{\nu}$$

$$Nu = \frac{hD}{k} = CRe^m Pr^n$$

ค่า C, m, n เป็นค่าคงที่

$$\dot{Q}_{conv} = hA(T_{ave,s} - T_{\infty,in})$$

$$\dot{Q}_{conv} = AV$$

ตัวแปร	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
$T_{ave,s}$	°C	76.85	74.33	72.75	67.8
T_f	°C	51.275	50.015	49.125	46.2
C_p	J/kg·°C	1007	1007	1007	1007
ν	m^2/s	1.8105E-05	1.79815E-05	0.000017896	1.76152E-05
k	W/m·°C	0.027443075	0.027351095	0.027287	0.0270764
Pr	-	0.7224685	0.7227961	0.7230275	0.723788
Re	-	2485.508107	2502.576263	2514.528386	2554.611926
Q_{heater}	W	220	220	220	220

ตารางที่ ข-54 ตารางประกอบการคำนวณการพาแบบบังคับความเร็วลม 0.6 m/s อุณหภูมิผิว 75 °C

ชนิดของวัสดุ อลูมิเนียม ทรงสี่เหลี่ยม ขนาดของวัสดุ 0.075 * 0.1 เมตร

ตัวแปร	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
V	volt	220	220	220	220
A	amp	1	1	1	1
V_{∞}	m/s	0.6	0.6	0.6	0.6
$T_{\infty,in}$	°C	25.4	25.4	25.3	25.3
$T_{\infty,out}$	°C	28.9	28.5	28.7	28.1
$T_{s,heater}$	°C	100	100	100	100
$T_{initial}$	°C	27	27	27	27
$T_{s,1}$	°C	99.2	98.2	95.7	95.1
$T_{s,2}$	°C	103.7	103.5	101.1	101.5
Δt	sec.	313.2	311.4	247.8	309.6

ตารางที่ ข-55 บันทึกการทดลองการพาแบบบังคับความเร็วลม 0.6 m/s อุณหภูมิผิว 100 °C

$$T_{ave,s} = \frac{T_{s,1} + T_{s,2}}{2} \quad T_f = \frac{T_{ave,s} + T_{\infty,in}}{2} \quad Re = \frac{V_{\infty} L}{\nu}$$

$$Nu = \frac{hD}{k} = CRe^m Pr^n \quad \text{ค่า } C, m, n \text{ เป็นค่าคงที่}$$

$$\dot{Q}_{conv} = hA(T_{ave,s} - T_{\infty,in}) \quad \dot{Q}_{conv} = AV$$

ตัวแปร	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
$T_{ave,s}$	°C	101.45	100.85	98.4	98.3
T_f	°C	63.425	63.125	61.85	61.8
C_p	J/kg·°C	1007	1007	1007	1007
ν	m^2/s	1.92991E-05	1.92694E-05	1.91432E-05	1.91382E-05
k	W/m·°C	0.028330025	0.028308125	0.02821505	0.0282114
Pr	-	0.71934375	0.71941875	0.7197375	0.71975
Re	-	2331.717971	2335.311861	2350.710306	2351.318306
Q_{heater}	W	220	220	220	220

ตารางที่ ข-56 ตารางประกอบการคำนวณการพาแบบบังคับความเร็วลม 0.6 m/s อุณหภูมิผิว 100 °C

ชนิดของวัสดุ อลูมิเนียม ทรงสี่เหลี่ยม ขนาดของวัสดุ 0.075 * 0.1 เมตร

ตัวแปร	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
V	volt	220	220	220	220
A	amp	1	1	1	1
V_{∞}	m/s	0.6	0.6	0.6	0.6
$T_{\infty,in}$	°C	0.6	0.6	0.6	0.6
$T_{\infty,out}$	°C	26.2	26.7	26.7	26.7
$T_{s,heater}$	°C	30	31.6	31.9	31.9
$T_{initial}$	°C	125	125	125	125
$T_{s,1}$	°C	27	27	27	27
$T_{s,2}$	°C	131.3	128.9	130.4	129.2
Δt	sec.	129.1	130.8	129.8	130.1

ตารางที่ ข-57 บันทึกการทดลองการพาแบบบังคับความเร็วลม 0.6 m/s อุณหภูมิผิว 125 °C

$$T_{ave,s} = \frac{T_{s,1} + T_{s,2}}{2} \quad T_f = \frac{T_{ave,s} + T_{\infty,in}}{2} \quad Re = \frac{V_{\infty} L}{\nu}$$

$$Nu = \frac{hD}{k} = CRe^m Pr^n \quad \text{ค่า } C, m, n \text{ เป็นค่าคงที่}$$

$$\dot{Q}_{conv} = hA(T_{ave,s} - T_{\infty,in}) \quad \dot{Q}_{conv} = AV$$

ตัวแปร	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
$T_{ave,s}$	°C	130.2	129.85	130.1	129.65
T_f	°C	78.2	78.275	78.4	78.175
C_p	J/kg·°C	1007.82	1007.8275	1007.84	1007.8175
ν	m^2/s	2.07864E-05	2.07941E-05	2.08068E-05	2.07839E-05
k	W/m·°C	0.0294004	0.0294058	0.0294148	0.0293986
Pr	-	0.715814	0.71579675	0.715768	0.71581975
Re	-	2164.877035	2164.08059	2162.754484	2165.142647
Q_{heater}	W	220	220	220	220

ตารางที่ ข-58 ตารางประกอบการคำนวณการพาแบบบังคับความเร็วลม 0.6 m/s อุณหภูมิผิว 125 °C

ชนิดของวัสดุ อลูมิเนียม ทรงสี่เหลี่ยม ขนาดของวัสดุ 0.075 * 0.1 เมตร

ตัวแปร	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
V	volt	220	220	220	220
A	amp	1	1	1	1
V_{∞}	m/s	0.6	0.6	0.6	0.6
$T_{\infty,in}$	°C	26.7	26.1	26.5	26.1
$T_{\infty,out}$	°C	34.1	32.9	32.8	32.4
$T_{s,heater}$	°C	150	150	150	150
$T_{initial}$	°C	27	27	27	27
$T_{s,1}$	°C	151	150.3	150.2	150.9
$T_{s,2}$	°C	156.7	156.5	153.3	154
Δt	sec.	258	208.8	210.6	207

ตารางที่ ข-59 บันทึกการทดลองการพาแบบบังคับความเร็วลม 0.6 m/s อุณหภูมิผิว 150 °C

$$T_{ave,s} = \frac{T_{s,1} + T_{s,2}}{2} \quad T_f = \frac{T_{ave,s} + T_{\infty,in}}{2} \quad Re = \frac{V_{\infty} L}{\nu}$$

$$Nu = \frac{hD}{k} = CRe^m Pr^n \quad \text{ค่า } C, m, n \text{ เป็นค่าคงที่}$$

$$\dot{Q}_{conv} = hA(T_{ave,s} - T_{\infty,in}) \quad \dot{Q}_{conv} = AV$$

ตัวแปร	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
$T_{ave,s}$	°C	153.85	153.5	151.75	152.45
T_f	°C	90.275	89.8	89.125	89.275
C_p	J/kg·°C	1008.0275	1008	1008	1008
ν	m^2/s	2.20389E-05	2.19892E-05	0.000021919	2.19346E-05
k	W/m·°C	0.030259525	0.0302258	0.030177875	0.030188525
Pr	-	0.71314225	0.713244	0.7135355	0.7133595
Re	-	2041.84651	2046.459171	2053.013367	2051.553254
Q_{heater}	W	220	220	220	220

ตารางที่ ข-60 ตารางประกอบการคำนวณการพาแบบบังคับความเร็วลม 0.6 m/s อุณหภูมิผิว 150 °C

ชนิดของวัสดุ อลูมิเนียม ทรงสี่เหลี่ยม ขนาดของวัสดุ 0.075 * 0.1 เมตร

ตัวแปร	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
V	volt	220	220	220	220
A	amp	1	1	1	1
V_{∞}	m/s	1.0	1.0	1.0	1.0
$T_{\infty,in}$	°C	26.4	25.5	25.2	25.1
$T_{\infty,out}$	°C	27.6	26.7	26.2	26.5
$T_{s,heater}$	°C	50	50	50	50
$T_{initial}$	°C	25	25	25	25
$T_{s,1}$	°C	51	51.8	51	54.4
$T_{s,2}$	°C	50.8	51.3	50.5	52.3
Δt	sec.	1,384.2	1,346.4	1,342.2	1,587

ตารางที่ ข-61 บันทึกการทดลองการพาแบบบังคับความเร็วลม 1.0 m/s อุณหภูมิผิว 50 °C

$$T_{ave,s} = \frac{T_{s,1} + T_{s,2}}{2}$$

$$T_f = \frac{T_{ave,s} + T_{\infty,in}}{2}$$

$$Re = \frac{V_{\infty} L}{\nu}$$

$$Nu = \frac{hD}{k} = CRe^m Pr^n$$

ค่า C, m, n เป็นค่าคงที่

$$\dot{Q}_{conv} = hA(T_{ave,s} - T_{\infty,in})$$

$$\dot{Q}_{conv} = AV$$

ตัวแปร	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
$T_{ave,s}$	°C	50.9	51.55	50.75	53.35
T_f	°C	38.65	38.525	37.975	39.225
C_p	J/kg·°C	1007	1007	1007	1007
ν	m^2/s	1.68931E-05	1.68814E-05	1.68297E-05	1.69472E-05
k	W/m·°C	0.0265201	0.02651085	0.02647015	0.02656265
Pr	-	0.725851	0.7258835	0.7260265	0.7257015
Re	-	4439.682474	4442.772646	4456.420662	4425.522876
Q_{heater}	W	220	220	220	220

ตารางที่ ข-62 ตารางประกอบการคำนวณการพาแบบบังคับความเร็วลม 1.0 m/s อุณหภูมิผิว 50 °C

ชนิดของวัสดุ อลูมิเนียม ทรงสี่เหลี่ยม ขนาดของวัสดุ 0.075 * 0.1 เมตร

ตัวแปร	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
V	volt	220	220	220	220
A	amp	1	1	1	1
V_{∞}	m/s	1.0	1.0	1.0	1.0
$T_{\infty,in}$	°C	27.2	26.8	26.4	27.1
$T_{\infty,out}$	°C	25.1	29.2	28.7	28.9
$T_{s,heater}$	°C	75	75	75	75
$T_{initial}$	°C	25	25	25	25
$T_{s,1}$	°C	75	76.7	78.1	79.2
$T_{s,2}$	°C	74.9	75.1	76.2	76.8
Δt	sec.	614.4	558.6	675	613.8

ตารางที่ ข-63 บันทึกการทดลองการพาแบบบังคับความเร็วลม 1.0 m/s อุณหภูมิผิว 75 °C

$$T_{ave,s} = \frac{T_{s,1} + T_{s,2}}{2} \quad T_f = \frac{T_{ave,s} + T_{\infty,in}}{2} \quad Re = \frac{V_{\infty} L}{\nu}$$

$$Nu = \frac{hD}{k} = CRe^m Pr^n \quad \text{ค่า } C, m, n \text{ เป็นค่าคงที่}$$

$$\dot{Q}_{conv} = hA(T_{ave,s} - T_{\infty,in}) \quad \dot{Q}_{conv} = AV$$

ตัวแปร	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
$T_{ave,s}$	°C	74.95	75.9	77.15	76.5
T_f	°C	51.075	51.35	51.775	51.8
C_p	J/kg·°C	1007	1007	1007	1007
ν	m^2/s	1.80854E-05	1.81123E-05	1.8154E-05	1.81564E-05
k	W/m·°C	0.027428475	0.02744855	0.027479575	0.0274814
Pr	-	0.7225205	0.722449	0.7223385	0.722332
Re	-	4147.002961	4140.832473	4131.3323	4130.774823
Q_{heater}	W	220	220	220	220

ตารางที่ ข-64 ตารางประกอบการคำนวณการพาแบบบังคับความเร็วลม 1.0 m/s อุณหภูมิผิว 75 °C

ชนิดของวัสดุ อลูมิเนียม ทรงสี่เหลี่ยม ขนาดของวัสดุ 0.075 * 0.1 เมตร

ตัวแปร	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
V	volt	220	220	220	220
A	amp	1	1	1	1
V_{∞}	m/s	1.0	1.0	1.0	1.0
$T_{\infty,in}$	°C	27	26.2	26.4	26.5
$T_{\infty,out}$	°C	30.7	30.1	29.5	29.4
$T_{s,heater}$	°C	100	100	100	100
$T_{initial}$	°C	25	25	25	25
$T_{s,1}$	°C	105.4	1005.6	104.5	104.5
$T_{s,2}$	°C	104.4	103.3	102.7	102.8
Δt	sec.	421.2	393.6	362.4	333.6

ตารางที่ ข-65 บันทึกการทดลองการพาแบบบังคับความเร็วลม 1.0 m/s อุณหภูมิผิว 100 °C

$$T_{ave,s} = \frac{T_{s,1} + T_{s,2}}{2}$$

$$T_f = \frac{T_{ave,s} + T_{\infty,in}}{2}$$

$$Re = \frac{V_{\infty} L}{\nu}$$

$$Nu = \frac{hD}{k} = CRe^m Pr^n$$

ค่า C, m, n เป็นค่าคงที่

$$\dot{Q}_{conv} = hA(T_{ave,s} - T_{\infty,in})$$

$$\dot{Q}_{conv} = AV$$

ตัวแปร	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
$T_{ave,s}$	°C	104.9	104.45	103.6	103.65
T_f	°C	65.95	65.325	65	65.075
C_p	J/kg·°C	1007	1007	1007	1007
ν	m^2/s	1.95491E-05	1.94872E-05	0.000019455	1.94624E-05
k	W/m·°C	0.02851435	0.028468725	0.028445	0.028450475
Pr	-	0.7187125	0.71886875	0.71895	0.71893125
Re	-	3836.503564	3848.685097	3855.050116	3853.579397
Q_{heater}	W	220	220	220	220

ตารางที่ ข-66 ตารางประกอบการคำนวณการพาแบบบังคับความเร็วลม 1.0 m/s อุณหภูมิผิว 100 °C

ชนิดของวัสดุ อลูมิเนียม ทรงสี่เหลี่ยม ขนาดของวัสดุ 0.075 * 0.1 เมตร

ตัวแปร	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
V	volt	220	220	220	220
A	amp	1	1	1	1
V_{∞}	m/s	1.0	1.0	1.0	1.0
$T_{\infty,in}$	°C	24.8	24.8	23.9	23.8
$T_{\infty,out}$	°C	30	29.5	29	29.5
$T_{s,heater}$	°C	125	125	125	125
$T_{initial}$	°C	25	25	25	25
$T_{s,1}$	°C	135.6	133.6	132.4	133.9
$T_{s,2}$	°C	130	129.8	129.4	129.7
Δt	sec.	307.2	267.6	249.6	209.4

ตารางที่ ข-67 บันทึกการทดลองการพาแบบบังคับความเร็วลม 1.0 m/s อุณหภูมิผิว 125 °C

$$T_{ave,s} = \frac{T_{s,1} + T_{s,2}}{2}$$

$$T_f = \frac{T_{ave,s} + T_{\infty,in}}{2}$$

$$Re = \frac{V_{\infty} L}{\nu}$$

$$Nu = \frac{hD}{k} = CRe^m Pr^n$$

ค่า C, m, n เป็นค่าคงที่

$$\dot{Q}_{conv} = hA(T_{ave,s} - T_{\infty,in})$$

$$\dot{Q}_{conv} = AV$$

ตัวแปร	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
$T_{ave,s}$	°C	132.8	131.7	130.9	131.8
T_f	°C	78.8	78.25	77.4	77.8
C_p	J/kg·°C	1007.6	1007.825	1007.74	1007.78
ν	m^2/s	2.08476E-05	2.07915E-05	2.07048E-05	2.07456E-05
k	W/m·°C	0.0294436	0.029404	0.0293428	0.0293716
Pr	-	0.715676	0.7158025	0.715998	0.715906
Re	-	3597.536407	3607.243345	3622.348441	3615.224433
Q_{heater}	W	220	220	220	220

ตารางที่ ข-68 ตารางประกอบการคำนวณการพาแบบบังคับความเร็วลม 1.0 m/s อุณหภูมิผิว 125 °C

ชนิดของวัสดุ อลูมิเนียม ทรงสี่เหลี่ยม ขนาดของวัสดุ 0.075 * 0.1 เมตร

ตัวแปร	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
V	volt	220	220	220	220
A	amp	1	1	1	1
V_{∞}	m/s	1.0	1.0	1.0	1.0
$T_{\infty,in}$	°C	23.4	23	22.9	22.9
$T_{\infty,out}$	°C	29.5	28.9	28.7	29.2
$T_{s,heater}$	°C	150	150	150	150
$T_{initial}$	°C	25	25	25	25
$T_{s,1}$	°C	166.2	162.6	164.7	162.9
$T_{s,2}$	°C	153.2	152.9	153.7	157.5
Δt	sec.	315	265.2	302.4	300.6

ตารางที่ ข-69 บันทึกการทดลองการพาแบบบังคับความเร็วลม 1.0 m/s อุณหภูมิผิว 150 °C

$$T_{ave,s} = \frac{T_{s,1} + T_{s,2}}{2} \quad T_f = \frac{T_{ave,s} + T_{\infty,in}}{2} \quad Re = \frac{V_{\infty} L}{\nu}$$

$$Nu = \frac{hD}{k} = CRe^m Pr^n \quad \text{ค่า } C, m, n \text{ เป็นค่าคงที่}$$

$$\dot{Q}_{conv} = hA(T_{ave,s} - T_{\infty,in}) \quad \dot{Q}_{conv} = AV$$

ตัวแปร	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
$T_{ave,s}$	°C	159.7	157.75	159.2	160.2
T_f	°C	91.55	90.375	91.05	91.55
C_p	J/kg·°C	1008.155	1008.0375	1008.105	1008.155
ν	m^2/s	2.21728E-05	2.20494E-05	2.21203E-05	2.21728E-05
k	W/m·°C	0.03035005	0.030266625	0.03031455	0.03035005
Pr	-	0.7128745	0.71312125	0.7129795	0.7128745
Re	-	3382.530358	3401.456957	3390.558425	2029.518215
Q_{heater}	W	220	220	220	220

ตารางที่ ข-70 ตารางประกอบการคำนวณการพาแบบบังคับความเร็วลม 1.0 m/s อุณหภูมิผิว 150 °C

ชนิดของวัสดุ อลูมิเนียม ทรงสี่เหลี่ยม ขนาดของวัสดุ 0.075 * 0.1 เมตร

ตัวแปร	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
V	volt	220	220	220	220
A	amp	1	1	1	1
V_{∞}	m/s	26.3	24.9	24.6	23.7
$T_{\infty,in}$	°C	27	26.4	25.8	25.4
$T_{\infty,out}$	°C	50	50	50	50
$T_{s,heater}$	°C	25	25	25	25
$T_{initial}$	°C	54.8	54.4	54.6	53.6
$T_{s,1}$	°C	52.9	52.4	53.3	52.1
$T_{s,2}$	°C	1,284.6	1,103.4	1,036.2	984
Δt	sec.	26.3	24.9	24.6	23.7

ตารางที่ ข-71 บันทึกการทดลองการพาแบบบังคับความเร็วลม 2.0 m/s อุณหภูมิผิว 50 °C

$$T_{ave,s} = \frac{T_{s,1} + T_{s,2}}{2} \quad T_f = \frac{T_{ave,s} + T_{\infty,in}}{2} \quad Re = \frac{V_{\infty} L}{\nu}$$

$$Nu = \frac{hD}{k} = CRe^m Pr^n \quad \text{ค่า } C, m, n \text{ เป็นค่าคงที่}$$

$$\dot{Q}_{conv} = hA(T_{ave,s} - T_{\infty,in}) \quad \dot{Q}_{conv} = AV$$

ตัวแปร	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
$T_{ave,s}$	°C	53.85	53.4	53.95	52.85
T_f	°C	40.075	39.15	39.275	38.275
C_p	J/kg·°C	1007	1007	1007	1007
ν	m^2/s	1.70272E-05	1.69401E-05	1.69519E-05	1.68579E-05
k	W/m·°C	0.02662555	0.0265571	0.02656635	0.02649235
Pr	-	0.725479	0.725721	0.7256885	0.7259485
Re	-	8809.434317	8854.729311	8848.591747	8897.931824
Q_{heater}	W	220	220	220	220

ตารางที่ ข-72 ตารางประกอบการคำนวณการพาแบบบังคับความเร็วลม 2.0 m/s อุณหภูมิผิว 50 °C

ชนิดของวัสดุ อลูมิเนียม ทรงสี่เหลี่ยม ขนาดของวัสดุ 0.075 * 0.1 เมตร

ตัวแปร	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
V	volt	220	220	220	220
A	amp	1	1	1	1
V_{∞}	m/s	2.0	2.0	2.0	2.0
$T_{\infty,in}$	°C	25.7	26.5	27	27.2
$T_{\infty,out}$	°C	26.9	28.1	28.5	28.8
$T_{s,heater}$	°C	75	75	75	75
$T_{initial}$	°C	25	25	25	25
$T_{s,1}$	°C	87.2	72.3	78	79.5
$T_{s,2}$	°C	80.4	77.1	76.8	77.7
Δt	sec.	684	454.8	441.6	480.6

ตารางที่ ข-73 บันทึกการทดลองการพาแบบบังคับความเร็วลม 2.0 m/s อุณหภูมิผิว 75 °C

$$T_{ave,s} = \frac{T_{s,1} + T_{s,2}}{2} \quad T_f = \frac{T_{ave,s} + T_{\infty,in}}{2} \quad Re = \frac{V_{\infty} L}{\nu}$$

$$Nu = \frac{hD}{k} = CRe^m Pr^n \quad \text{ค่า } C, m, n \text{ เป็นค่าคงที่}$$

$$\dot{Q}_{conv} = hA(T_{ave,s} - T_{\infty,in}) \quad \dot{Q}_{conv} = AV$$

ตัวแปร	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
$T_{ave,s}$	°C	81.8	78.2	77.4	78.6
T_f	°C	53.75	52.35	52.2	52.9
C_p	J/kg·°C	1007	1007	1007	1007
ν	m^2/s	1.83475E-05	1.82103E-05	1.81956E-05	1.82642E-05
k	W/m·°C	0.02762375	0.02752155	0.0275106	0.0275617
Pr	-	0.721825	0.722189	0.722228	0.722046
Re	-	8175.500749	8237.096588	8243.751237	8212.787858
Q_{heater}	W	220	220	220	220

ตารางที่ ข-74 ตารางประกอบการคำนวณการพาแบบบังคับความเร็วลม 2.0 m/s อุณหภูมิผิว 75 °C

ชนิดของวัสดุ อลูมิเนียม ทรงสี่เหลี่ยม ขนาดของวัสดุ 0.075 * 0.1 เมตร

ตัวแปร	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
V	volt	220	220	220	220
A	amp	1	1	1	1
V_{∞}	m/s	2.0	2.0	2.0	2.0
$T_{\infty,in}$	°C	26.3	26	26.5	26.4
$T_{\infty,out}$	°C	29.9	29.5	29.8	30
$T_{s,heater}$	°C	100	100	100	100
$T_{initial}$	°C	25	25	25	25
$T_{s,1}$	°C	105.9	105.7	105.6	105.2
$T_{s,2}$	°C	104.3	104.1	104.2	103.2
Δt	sec.	304.8	269.4	307.2	303.6

ตารางที่ ข-75 บันทึกการทดลองการพาแบบบังคับความเร็วลม 2.0 m/s อุณหภูมิผิว 100 °C

$$T_{ave,s} = \frac{T_{s,1} + T_{s,2}}{2}$$

$$T_f = \frac{T_{ave,s} + T_{\infty,in}}{2}$$

$$Re = \frac{V_{\infty} L}{\nu}$$

$$Nu = \frac{hD}{k} = CRe^m Pr^n$$

ค่า C, m, n เป็นค่าคงที่

$$\dot{Q}_{conv} = hA(T_{ave,s} - T_{\infty,in})$$

$$\dot{Q}_{conv} = AV$$

ตัวแปร	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
$T_{ave,s}$	°C	105.1	104.9	104.9	104.2
T_f	°C	65.7	65.45	65.7	65.3
C_p	J/kg·°C	1007	1007	1007	1008
ν	m^2/s	1.95243E-05	1.94996E-05	1.95243E-05	1.94847E-05
k	W/m·°C	0.0284961	0.02847785	0.0284961	0.0284669
Pr	-	0.718775	0.7188375	0.718775	0.718875
Re	-	7682.733824	7692.485211	7682.733824	7698.347935
Q_{heater}	W	220	220	220	220

ตารางที่ ข-76 ตารางประกอบการคำนวณการพาแบบบังคับความเร็วลม 2.0 m/s อุณหภูมิผิว 100 °C

ชนิดของวัสดุ อลูมิเนียม ทรงสี่เหลี่ยม ขนาดของวัสดุ 0.075 * 0.1 เมตร

ตัวแปร	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
V	volt	220	220	220	220
A	amp	1	1	1	1
V_{∞}	m/s	2.0	2.0	2.0	2.0
$T_{\infty,in}$	°C	23.6	23.6	23.7	23.6
$T_{\infty,out}$	°C	28.1	27.8	27.9	27.6
$T_{s,heater}$	°C	125	125	125	125
$T_{initial}$	°C	25	25	25	25
$T_{s,1}$	°C	136.2	139.7	138.2	136.9
$T_{s,2}$	°C	125	126.9	126.9	124.8
Δt	sec.	249	320.4	306	271.8

ตารางที่ ข-77 บันทึกการทดลองการพาแบบบังคับความเร็วลม 2.0 m/s อุณหภูมิผิว 125 °C

$$T_{ave,s} = \frac{T_{s,1} + T_{s,2}}{2} \quad T_f = \frac{T_{ave,s} + T_{\infty,in}}{2} \quad Re = \frac{V_{\infty} L}{\nu}$$

$$Nu = \frac{hD}{k} = CRe^m Pr^n \quad \text{ค่า } C, m, n \text{ เป็นค่าคงที่}$$

$$\dot{Q}_{conv} = hA(T_{ave,s} - T_{\infty,in}) \quad \dot{Q}_{conv} = AV$$

ตัวแปร	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
$T_{ave,s}$	°C	130.6	133.3	132.55	130.85
T_f	°C	77.1	78.45	78.125	77.225
C_p	J/kg·°C	1007.71	1007.845	1007.8125	1007.7225
ν	m^2/s	2.06742E-05	2.08119E-05	2.07788E-05	2.0687E-05
k	W/m·°C	0.0293212	0.0294184	0.029395	0.0293302
Pr	-	0.716067	0.7157565	0.71583125	0.71603825
Re	-	7255.419799	7207.414989	7218.913554	7250.948061
Q_{heater}	W	220	220	220	220

ตารางที่ ข-78 ตารางประกอบการคำนวณการพาแบบบังคับความเร็วลม 2.0 m/s อุณหภูมิผิว 125 °C

ชนิดของวัสดุ อลูมิเนียม ทรงสี่เหลี่ยม ขนาดของวัสดุ 0.075 * 0.1 เมตร

ตัวแปร	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
V	volt	220	220	220	220
A	amp	1	1	1	1
V_{∞}	m/s	2.0	2.0	2.0	2.0
$T_{\infty,in}$	°C	22.8	23	22.9	22.9
$T_{\infty,out}$	°C	28.2	28.3	28.3	28
$T_{s,heater}$	°C	150	150	150	150
$T_{initial}$	°C	25	25	25	25
$T_{s,1}$	°C	166.7	167.4	165.5	165.7
$T_{s,2}$	°C	153.3	154.9	152.7	152.8
Δt	sec.	247.2	264	260.4	251.4

ตารางที่ ข-79 บันทึกการทดลองการพาแบบบังคับความเร็วลม 2.0 m/s อุณหภูมิผิว 150 °C

$$T_{ave,s} = \frac{T_{s,1} + T_{s,2}}{2}$$

$$T_f = \frac{T_{ave,s} + T_{\infty,in}}{2}$$

$$Re = \frac{V_{\infty} L}{\nu}$$

$$Nu = \frac{hD}{k} = CRe^m Pr^n$$

ค่า C, m, n เป็นค่าคงที่

$$\dot{Q}_{conv} = hA(T_{ave,s} - T_{\infty,in})$$

$$\dot{Q}_{conv} = AV$$

ตัวแปร	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
$T_{ave,s}$	°C	160	161.15	159.1	159.25
T_f	°C	91.4	92.075	91	91.075
C_p	J/kg·°C	1008.14	1008.2075	1008.1	1008.1075
ν	m^2/s	0.000022157	2.22279E-05	0.000022115	2.21229E-05
k	W/m·°C	0.0303394	0.030387325	0.030311	0.030316325
Pr	-	0.712906	0.71276425	0.71299	0.71297425
Re	-	6769.869567	6748.283405	6782.726656	6780.312233
Q_{heater}	W	220	220	220	220

ตารางที่ ข-80 ตารางประกอบการคำนวณการพาแบบบังคับความเร็วลม 2.0 m/s อุณหภูมิผิว 150 °C

ชนิดของวัสดุ อลูมิเนียม ทรงสี่เหลี่ยม ขนาดของวัสดุ 0.075 * 0.1 เมตร

ตัวแปร	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
V	volt	220	220	220	220
A	amp	1	1	1	1
V_{∞}	m/s	2.7	2.7	2.7	2.7
$T_{\infty,in}$	°C	23	23.4	23.2	22.7
$T_{\infty,out}$	°C	24.5	24.8	24.6	24.2
$T_{s,heater}$	°C	50	50	50	50
$T_{initial}$	°C	25	25	25	25
$T_{s,1}$	°C	52.8	52.3	52.8	52.7
$T_{s,2}$	°C	50.1	51.5	50.4	50.3
Δt	sec.	866.4	805.8	867	857.4

ตารางที่ ข-81 บันทึกการทดลองการพาแบบบังคับความเร็วลม 2.7 m/s อุณหภูมิผิว 50 °C

$$T_{ave,s} = \frac{T_{s,1} + T_{s,2}}{2} \quad T_f = \frac{T_{ave,s} + T_{\infty,in}}{2} \quad Re = \frac{V_{\infty} L}{\nu}$$

$$Nu = \frac{hD}{k} = CRe^m Pr^n \quad \text{ค่า } C, m, n \text{ เป็นค่าคงที่}$$

$$\dot{Q}_{conv} = hA(T_{ave,s} - T_{\infty,in}) \quad \dot{Q}_{conv} = AV$$

ตัวแปร	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
$T_{ave,s}$	°C	51.45	51.9	51.6	51.5
T_f	°C	37.225	37.65	37.4	37.1
C_p	J/kg·°C	1007	1007	1007	1007
ν	m^2/s	1.67592E-05	1.67991E-05	1.67756E-05	1.67474E-05
k	W/m·°C	0.02641465	0.0264461	0.0264276	0.0264054
Pr	-	0.7262215	0.726111	0.726176	0.726254
Re	-	12082.9517	12054.21719	12071.10327	12091.42912
Q_{heater}	W	220	220	220	220

ตารางที่ ข-82 ตารางประกอบการคำนวณการพาแบบบังคับความเร็วลม 2.7 m/s อุณหภูมิผิว 50 °C

ชนิดของวัสดุ อลูมิเนียม ทรงสี่เหลี่ยม ขนาดของวัสดุ 0.075 * 0.1 เมตร

ตัวแปร	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
V	volt	220	220	220	220
A	amp	1	1	1	1
V_{∞}	m/s	2.7	2.7	2.7	2.7
$T_{\infty,in}$	°C	26.9	26.7	26.8	26.2
$T_{\infty,out}$	°C	28.7	28.2	29	28.2
$T_{s,heater}$	°C	75	75	75	75
$T_{initial}$	°C	25	25	25	25
$T_{s,1}$	°C	80.3	80.1	80	80.2
$T_{s,2}$	°C	78.3	78.2	78.5	78.6
Δt	sec.	439.2	487.8	390.6	438

ตารางที่ ข-83 บันทึกการทดลองการพาแบบบังคับความเร็วลม 2.7 m/s อุณหภูมิผิว 75 °C

$$T_{ave,s} = \frac{T_{s,1} + T_{s,2}}{2} \quad T_f = \frac{T_{ave,s} + T_{\infty,in}}{2} \quad Re = \frac{V_{\infty} L}{\nu}$$

$$Nu = \frac{hD}{k} = CRe^m Pr^n \quad \text{ค่า } C, m, n \text{ เป็นค่าคงที่}$$

$$\dot{Q}_{conv} = hA(T_{ave,s} - T_{\infty,in}) \quad \dot{Q}_{conv} = AV$$

ตัวแปร	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
$T_{ave,s}$	°C	79.3	79.15	79.25	79.4
T_f	°C	53.1	52.925	53.025	52.8
C_p	J/kg·°C	1007	1007	1007	1007
ν	m^2/s	1.82838E-05	1.82667E-05	1.82765E-05	1.82544E-05
k	W/m·°C	0.0275763	0.027563525	0.027570825	0.0275544
Pr	-	0.721994	0.7220395	0.7220135	0.722072
Re	-	11075.3782	11085.77654	11079.83224	11093.21588
Q_{heater}	W	220	220	220	220

ตารางที่ ข-84 ตารางประกอบการคำนวณการพาแบบบังคับความเร็วลม 2.7 m/s อุณหภูมิผิว 75 °C

ชนิดของวัสดุ อลูมิเนียม ทรงสี่เหลี่ยม ขนาดของวัสดุ 0.075 * 0.1 เมตร

ตัวแปร	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
V	volt	220	220	220	220
A	amp	1	1	1	1
V_{∞}	m/s	2.7	2.7	2.7	2.7
$T_{\infty,in}$	°C	27.1	26.8	26.7	24.9
$T_{\infty,out}$	°C	30	29.7	29.7	28.2
$T_{s,heater}$	°C	100	100	100	100
$T_{initial}$	°C	25	25	25	25
$T_{s,1}$	°C	106.1	105.3	108.6	107.7
$T_{s,2}$	°C	103.9	104	104.1	104.3
Δt	sec.	249.6	209.4	241.2	204

ตารางที่ ข-85 บันทึกการทดลองการพาแบบบังคับความเร็วลม 2.7 m/s อุณหภูมิผิว 100 °C

$$T_{ave,s} = \frac{T_{s,1} + T_{s,2}}{2} \quad T_f = \frac{T_{ave,s} + T_{\infty,in}}{2} \quad Re = \frac{V_{\infty} L}{\nu}$$

$$Nu = \frac{hD}{k} = CRe^m Pr^n \quad \text{ค่า } C, m, n \text{ เป็นค่าคงที่}$$

$$\dot{Q}_{conv} = hA(T_{ave,s} - T_{\infty,in}) \quad \dot{Q}_{conv} = AV$$

ตัวแปร	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
$T_{ave,s}$	°C	105	104.65	106.35	106
T_f	°C	66.05	65.725	66.525	65.45
C_p	J/kg·°C	1007	1007	1007	1007
ν	m^2/s	1.9559E-05	1.95268E-05	1.9606E-05	1.94996E-05
k	W/m·°C	0.02852165	0.028497925	0.028556325	0.02847785
Pr	-	0.7186875	0.71876875	0.71856875	0.7188375
Re	-	10353.31651	10370.37606	10328.48405	10384.85504
Q_{heater}	W	220	220	220	220

ตารางที่ ข-86 ตารางประกอบการคำนวณการพาแบบบังคับความเร็วลม 2.7 m/s อุณหภูมิผิว 100 °C

ชนิดของวัสดุ อลูมิเนียม ทรงสี่เหลี่ยม ขนาดของวัสดุ 0.075 * 0.1 เมตร

ตัวแปร	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
V	volt	220	220	220	220
A	amp	1	1	1	1
V_{∞}	m/s	2.7	2.7	2.7	2.7
$T_{\infty,in}$	°C	23.3	23.1	23	23
$T_{\infty,out}$	°C	27.6	26.9	27.2	26.9
$T_{s,heater}$	°C	125	125	125	125
$T_{initial}$	°C	25	25	25	25
$T_{s,1}$	°C	140.4	140	140.4	141.9
$T_{s,2}$	°C	126.9	126.1	126.6	128.6
Δt	sec.	265.8	257.4	271.2	268.8

ตารางที่ ข-87 บันทึกการทดลองการพาแบบบังคับความเร็วลม 2.7 m/s อุณหภูมิผิว 125 °C

$$T_{ave,s} = \frac{T_{s,1} + T_{s,2}}{2}$$

$$T_f = \frac{T_{ave,s} + T_{\infty,in}}{2}$$

$$Re = \frac{V_{\infty} L}{\nu}$$

$$Nu = \frac{hD}{k} = CRe^m Pr^n$$

ค่า C, m, n เป็นค่าคงที่

$$\dot{Q}_{conv} = hA(T_{ave,s} - T_{\infty,in})$$

$$\dot{Q}_{conv} = AV$$

ตัวแปร	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
$T_{ave,s}$	°C	133.65	133.05	133.5	135.25
T_f	°C	78.475	78.075	78.25	79.125
C_p	J/kg·°C	1007.8475	1007.8075	1007.825	1007.9125
ν	m^2/s	2.08145E-05	2.07737E-05	2.07915E-05	2.08808E-05
k	W/m·°C	0.0294202	0.0293914	0.029404	0.029467
Pr	-	0.71575075	0.71584275	0.7158025	0.71560125
Re	-	9728.818201	9747.925858	9739.557031	9697.927517
Q_{heater}	W	220	220	220	220

ตารางที่ ข-88 ตารางประกอบการคำนวณการพาแบบบังคับความเร็วลม 2.7 m/s อุณหภูมิผิว 125 °C

ชนิดของวัสดุ อลูมิเนียม ทรงสี่เหลี่ยม ขนาดของวัสดุ 0.075 * 0.1 เมตร

ตัวแปร	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
V	volt	220	220	220	220
A	amp	1	1	1	1
V_{∞}	m/s	2.7	2.7	2.7	2.7
$T_{\infty,in}$	°C	23	23.1	23	22.9
$T_{\infty,out}$	°C	27	28.1	27.8	27.6
$T_{s,heater}$	°C	150	150	150	150
$T_{initial}$	°C	25	25	25	25
$T_{s,1}$	°C	166.1	167.6	166.2	166.6
$T_{s,2}$	°C	152.8	153.9	153.4	153.2
Δt	sec.	199.2	215.4	208.8	206.4

ตารางที่ ข-89 บันทึกการทดลองการพาแบบบังคับความเร็วลม 2.7 m/s อุณหภูมิผิว 150 °C

$$T_{ave,s} = \frac{T_{s,1} + T_{s,2}}{2} \quad T_f = \frac{T_{ave,s} + T_{\infty,in}}{2} \quad Re = \frac{V_{\infty} L}{\nu}$$

$$Nu = \frac{hD}{k} = CRe^m Pr^n \quad \text{ค่า } C, m, n \text{ เป็นค่าคงที่}$$

$$\dot{Q}_{conv} = hA(T_{ave,s} - T_{\infty,in}) \quad \dot{Q}_{conv} = AV$$

ตัวแปร	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
$T_{ave,s}$	°C	159.45	160.75	160.8	159.9
T_f	°C	91.225	91.925	91.9	91.4
C_p	J/kg·°C	1008.1225	1008.1925	1008.19	1008.14
ν	m^2/s	2.21386E-05	2.22121E-05	2.22095E-05	0.000022157
k	W/m·°C	0.030326975	0.030376675	0.0303749	0.0303394
Pr	-	0.71294275	0.71279575	0.712801	0.712906
Re	-	9146.90953	9116.642374	9117.719895	9139.323916
Q_{heater}	W	220	220	220	220

ตารางที่ ข-90 ตารางประกอบการคำนวณการพาแบบบังคับความเร็วลม 2.7 m/s อุณหภูมิผิว 150 °C

ใบบันทึกผลการทดลองทรงสี่เหลี่ยม
การพาความร้อนแบบอิสระ

ชนิดของวัสดุ อลูมิเนียม ทรงสี่เหลี่ยม ขนาดของวัสดุ 0.075 * 0.1 เมตร

ตัวแปร	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
V	volt	220	220	220	220
A	amp	1	1	1	1
$T_{\infty,in}$	°C	32.1	31.9	32.7	33.2
$T_{\infty,out}$	°C	33.2	32.1	31.1	31.1
$T_{s,heater}$	°C	50	50	50	50
$T_{initial}$	°C	26	26	26	26
$T_{s,1}$	°C	50.7	49.3	48.6	49.2
$T_{s,2}$	°C	48.9	46.9	47.1	47.5
Δt	sec.	3,319.2	3,253.8	3,124.2	3,007.2

ตารางที่ ข-91 บันทึกการทดลองการพาแบบอิสระอุณหภูมิผิว 50 °C

$$T_{ave,s} = \frac{T_{s,1} + T_{s,2}}{2} \quad T_f = \frac{T_{ave,s} + T_{\infty,in}}{2} \quad \beta = \frac{1}{T_f} \quad g = 9.81$$

$$Ra = Gr \cdot Pr = \frac{g\beta(T_{ave,s} - T_{\infty,in})L_c^3}{\nu^2} Pr \quad Nu = \frac{hL_c}{k} = CRe^n \quad (\text{ค่า } C, n \text{ เป็นค่าคงที่})$$

$$\dot{Q}_{conv} = hA(T_{ave,s} - T_{\infty,in}) \quad \dot{Q}_{conv} = AV$$

ตัวแปร	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
$T_{ave,s}$	°C	49.8	48.1	47.85	48.35
T_f	°C	40.95	40	38.875	40.775
ν	m^2/s	1.71112E-05	0.00001702	1.69143E-05	1.70944E-05
k	W/m°C	0.0266903	0.02662	0.02653675	0.02667735
β	K^{-1}	0.003185221	0.003194888	0.003206413	0.003186997
Pr	-	0.725234	0.7255	0.7257925	0.725283
L_c	m	0.075	0.075	0.075	0.075
Ra	-	577940.0589	536465.4778	604287.5864	495960.2454
Q_{heater}	W	220	220	220	220

ตารางที่ ข-92 ตารางประกอบการคำนวณการพาแบบอิสระอุณหภูมิผิว 50 °C

ชนิดของวัสดุ อลูมิเนียม ทรงสี่เหลี่ยม ขนาดของวัสดุ 0.075 * 0.1 เมตร

ตัวแปร	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
V	volt	220	220	220	220
A	amp	1	1	1	1
$T_{\infty,in}$	°C	28.8	30.2	30.3	30.6
$T_{\infty,out}$	°C	32.8	32.6	33.1	33.2
$T_{s,heater}$	°C	75	75	75	75
$T_{initial}$	°C	26	26	26	26
$T_{s,1}$	°C	62.7	75.2	71.6	74.9
$T_{s,2}$	°C	62.1	72.5	71.4	71.7
Δt	sec.	1,090.8	929.4	988.2	905.4

ตารางที่ ข-93 บันทึกการทดลองการพาแบบอิสระอุณหภูมิผิว 75 °C

$$T_{ave,s} = \frac{T_{s,1} + T_{s,2}}{2} \quad T_f = \frac{T_{ave,s} + T_{\infty,in}}{2} \quad \beta = \frac{1}{T_f} \quad g = 9.81$$

$$Ra = Gr \cdot Pr = \frac{g\beta(T_{ave,s} - T_{\infty,in})L_c^3}{\nu^2} Pr \quad Nu = \frac{hL_c}{k} = CRe^n \quad (\text{ค่า } C, n \text{ เป็นค่าคงที่})$$

$$\dot{Q}_{conv} = hA(T_{ave,s} - T_{\infty,in}) \quad \dot{Q}_{conv} = AV$$

ตัวแปร	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
$T_{ave,s}$	°C	76.85	73.85	71.5	73.3
T_f	°C	52.825	30.2	50.9	51.95
ν	m^2/s	1.82569E-05	1.60988E-05	1.80682E-05	1.81711E-05
k	W/m·°C	0.027556225	0.0258948	0.0274157	0.02749235
β	K^{-1}	0.003069132	0.003298153	0.003087373	0.003077397
Pr	-	0.7220655	0.728144	0.722566	0.722293
L_c	m	0.075	0.075	0.075	0.075
Ra	-	1322168.134	1677768.063	1165163.334	1189638.746
Q_{heater}	W	220	220	220	220

ตารางที่ ข-94 ตารางประกอบการคำนวณการพาแบบอิสระอุณหภูมิผิว 75 °C

ชนิดของวัสดุ อลูมิเนียม ทรงสี่เหลี่ยม ขนาดของวัสดุ 0.075 * 0.1 เมตร

ตัวแปร	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
V	volt	220	220	220	220
A	amp	1	1	1	1
$T_{\infty,in}$	°C	30.6	30.9	31	31
$T_{\infty,out}$	°C	33.3	36.8	36.2	36.1
$T_{s,heater}$	°C	100	100	100	100
$T_{initial}$	°C	26	26	26	26
$T_{s,1}$	°C	102	103.1	101.5	101.2
$T_{s,2}$	°C	98	99.4	98.5	98.4
Δt	sec.	549.6	545.4	533.4	533.4

ตารางที่ ข-95 บันทึกการทดลองการพาแบบอิสระอุณหภูมิผิว 100 °C

$$T_{ave,s} = \frac{T_{s,1} + T_{s,2}}{2} \quad T_f = \frac{T_{ave,s} + T_{\infty,in}}{2} \quad \beta = \frac{1}{T_f} \quad g = 9.81$$

$$Ra = Gr \cdot Pr = \frac{g\beta(T_{ave,s} - T_{\infty,in})L_c^3}{\nu^2} Pr \quad Nu = \frac{hL_c}{k} = CRe^n \quad (\text{ค่า } C, n \text{ เป็นค่าคงที่})$$

$$\dot{Q}_{conv} = hA(T_{ave,s} - T_{\infty,in}) \quad \dot{Q}_{conv} = AV$$

ตัวแปร	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
$T_{ave,s}$	°C	100	101.25	100	99.8
T_f	°C	65.3	66.075	65.5	65.4
ν	m^2/s	1.94847E-05	1.95614E-05	1.95045E-05	1.94946E-05
k	W/m·°C	0.0284669	0.028523475	0.0284815	0.0284742
β	K^{-1}	0.002955956	0.0029492	0.00295421	0.002955083
Pr	-	0.718875	0.71868125	0.718825	0.71885
L_c	m	0.075	0.075	0.075	0.075
Ra	-	1607593.361	1612710.694	1594030.934	1591550.786
Q_{heater}	W	220	220	220	220

ตารางที่ ข-96 ตารางประกอบการคำนวณการพาแบบอิสระอุณหภูมิผิว 100 °C

ชนิดของวัสดุ อลูมิเนียม ทรงสี่เหลี่ยม ขนาดของวัสดุ 0.075 * 0.1 เมตร

ตัวแปร	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
V	volt	220	220	220	220
A	amp	1	1	1	1
$T_{\infty,in}$	°C	30.8	31	31	30.8
$T_{\infty,out}$	°C	38.5	39	42.4	39.6
$T_{s,heater}$	°C	125	125	125	125
$T_{initial}$	°C	26	26	26	26
$T_{s,1}$	°C	128.7	127.4	126.6	126.6
$T_{s,2}$	°C	125.4	124	123.2	123.4
Δt	sec.	382.8	334.2	364.8	369.6

ตารางที่ ข-97 บันทึกการทดลองการพาแบบอิสระอุณหภูมิผิว 125 °C

$$T_{ave,s} = \frac{T_{s,1} + T_{s,2}}{2} \quad T_f = \frac{T_{ave,s} + T_{\infty,in}}{2} \quad \beta = \frac{1}{T_f} \quad g = 9.81$$

$$Ra = Gr \cdot Pr = \frac{g\beta(T_{ave,s} - T_{\infty,in})L_c^3}{\nu^2} Pr \quad Nu = \frac{hL_c}{k} = CRe^n \quad (\text{ค่า } C, n \text{ เป็นค่าคงที่})$$

$$\dot{Q}_{conv} = hA(T_{ave,s} - T_{\infty,in}) \quad \dot{Q}_{conv} = AV$$

ตัวแปร	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
$T_{ave,s}$	°C	127.05	125.7	124.9	125
T_f	°C	78.925	78.35	77.95	77.9
ν	m^2/s	2.08604E-05	2.08017E-05	2.07609E-05	2.07558E-05
k	W/m·°C	0.0294526	0.0294112	0.0293824	0.0293788
β	K^{-1}	0.002841515	0.002846165	0.002849409	0.002849815
Pr	-	0.71564725	0.7157795	0.7158715	0.715883
L_c	m	0.075	0.075	0.075	0.075
Ra	-	1861483.716	1845204.127	1839144.542	1846219.897
Q_{heater}	W	220	220	220	220

ตารางที่ ข-98 ตารางประกอบการคำนวณการพาแบบอิสระอุณหภูมิผิว 125 °C

ชนิดของวัสดุ อลูมิเนียม ทรงสี่เหลี่ยม ขนาดของวัสดุ 0.075 * 0.1 เมตร

ตัวแปร	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
V	volt	220	220	220	220
A	amp	1	1	1	1
$T_{\infty,in}$	°C	31	31.1	31	30.9
$T_{\infty,out}$	°C	42	5.4	57.2	58.3
$T_{s,heater}$	°C	150	150	150	150
$T_{initial}$	°C	26	26	26	26
$T_{s,1}$	°C	153.4	153.1	153.3	153.6
$T_{s,2}$	°C	149.8	149.5	149.7	149.9
Δt	sec.	247.2	252	263.4	207.6

ตารางที่ ข-99 บันทึกการทดลองการพาแบบอิสระอุณหภูมิผิว 150 °C

$$T_{ave,s} = \frac{T_{s,1} + T_{s,2}}{2} \quad T_f = \frac{T_{ave,s} + T_{\infty,in}}{2} \quad \beta = \frac{1}{T_f} \quad g = 9.81$$

$$Ra = Gr \cdot Pr = \frac{g\beta(T_{ave,s} - T_{\infty,in})L_c^3}{\nu^2} Pr \quad Nu = \frac{hL_c}{k} = CRe^n \quad (\text{ค่า } C, n \text{ เป็นค่าคงที่})$$

$$\dot{Q}_{conv} = hA(T_{ave,s} - T_{\infty,in}) \quad \dot{Q}_{conv} = AV$$

ตัวแปร	หน่วย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
$T_{ave,s}$	°C	151.6	151.3	151.5	151.75
T_f	°C	91.3	91.2	90.8	90.875
ν	m^2/s	2.21465E-05	0.000022136	0.000022094	2.21019E-05
k	W/m·°C	0.0303323	0.0303252	0.0302968	0.030302125
β	K^{-1}	0.00274499	0.002745744	0.002748763	0.002748196
Pr	-	0.712927	0.712948	0.713032	0.71301625
L_c	m	0.075	0.075	0.075	0.075
Ra	-	1991479.294	1987361.565	2017293.602	2021206.75
Q_{heater}	W	220	220	220	220

ตารางที่ ข-100 ตารางประกอบการคำนวณการพาแบบอิสระอุณหภูมิผิว 150 °C

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ : อนุกุล เกิดแก่นแก้ว
ชื่อปริญญาบัตร : ชุติการทดลองการพาความร้อน
สาขาวิชา : วิศวกรรมเครื่องกล

ประวัติ

เกิดวันที่ 30 เมษายน พ.ศ.2543

ที่อยู่ 546/29 ซอยอยู่ดี 10 แขวงบางโคล่ เขตบางคอแหลม กรุงเทพมหานคร 10120

เบอร์โทร 082-4946565

Email : ake0824946565@gmail.com

ประวัติการศึกษา

ระดับประถมศึกษา	โรงเรียนตรุณาราชบุรีวิเทศศึกษา
ระดับมัธยมศึกษาตอนต้น	โรงเรียนตรุณาราชบุรีวิเทศศึกษา
ระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ	วิทยาลัยการอาชีพวังไกลกังวล
ระดับปริญญาตรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเจ้าพระนครเหนือ

ชื่อ : นางสาวกลชนก เพชรรัตน์
ชื่อปริญญาบัตร : ชุดการทดลองการพาความร้อน
สาขาวิชา : วิศวกรรมเครื่องกล

ประวัติ

เกิดวันที่ 11 ตุลาคม พ.ศ. 2542

ที่อยู่ 93/2 ม.1 ต.บางสีทอง อ.บางกรวย จ.นนทบุรี 11130

เบอร์โทร 099-6751554

Email : kamonchanok.pchr@gmail.com

ประวัติการศึกษา

ระดับประถมศึกษา	โรงเรียนวัดวิมุตยาราม
ระดับมัธยมศึกษาตอนต้น	โรงเรียนวิมุตยารามพิทยากร
ระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย	โรงเรียนวิมุตยารามพิทยากร
ระดับปริญญาตรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเจ้าพระนครเหนือ

ชื่อ : นางสาวมลชนก กลทิพย์
ชื่อปริญญาบัตร : ชุดการทดลองการพาความร้อน
สาขาวิชา : วิศวกรรมเครื่องกล

ประวัติ

เกิดวันที่ 7 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2542

ที่อยู่ 543/1 ม.4 ต.เมืองกาฐัง อ.บ้านไร่ จ.อุทัยธานี 61180

เบอร์โทร 097-0436289

Email : tay665523@gmail.com

ประวัติการศึกษา

ระดับประถมศึกษา โรงเรียนชุมชนบ้านเมืองกาฐัง

ระดับมัธยมศึกษาตอนต้น

ระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนหนองฉางวิทยา

ระดับปริญญาตรี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเจ้าพระนครเหนือ