

เครื่องทำน้ำอุ่นด้วยโครงสร้างอย่างง่าย

Solar Water Heater



นาย พิศศักดิ์ ถิชนะวานิชพันธ์
นาย วุฒิชัย โพธิ์ทอง
นาย สัตยญา ชมไย

โครงงานวิศวกรรมนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

พ.ศ.2541

หัวข้อโครงการวิศวกรรมศาสตร์
โดย

ภาควิชา
อาจารย์ที่ปรึกษา

เครื่องทำน้ำอุ่นด้วยโครงสร้างอย่างง่าย
นาย พิระศักดิ์ ลิขนะวานิชพันธ์
นาย วุฒิชัย โพธิ์ทอง
นาย ตัญญา ชมไย
วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ เกียรติชัย รักษาชาติ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ อนุมัติให้นับโครงการ
วิศวกรรมศาสตร์เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

_____ คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ณรงค์ อาจฤทธิ์)

คณะกรรมการสอบโครงการวิศวกรรม

_____ ประธานกรรมการ
(อาจารย์ เกียรติชัย รักษาชาติ)

_____ กรรมการ
(อาจารย์ สุรัช พานิช)

เครื่องทำน้ำอุ่นด้วยโครงสร้างอย่างง่าย

ปีการศึกษา 2541

โดย

นาย พิศศักดิ์ ลิชนะวานิชพันธ์

นาย วุฒิชัย โพธิ์ทอง

นาย ศัญญา ชมไย

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ เกียรติชัย รักษาชาติ

บทคัดย่อ

โครงการวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ได้ศึกษาถึงการนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ในการระบบทำน้ำอุ่น ประกอบด้วยทฤษฎี หลักการทำงาน และการคำนวณออกแบบระบบทำน้ำอุ่น

เครื่องทำน้ำอุ่นด้วยโครงสร้างอย่างง่าย จะใช้แผงรับแสงอาทิตย์ขนาด 2 ตารางเมตร เป็นตัวแลกเปลี่ยนความร้อน โดยความร้อนที่น้ำได้รับจะทำให้ น้ำมีอุณหภูมิสูงขึ้น โดยวัสดุที่ใช้ทำแผงรับแสงอาทิตย์ประกอบด้วย ท่อเหล็กไร้กรดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร จำนวน 45 ท่อ ทาสีดำเพื่อให้ดูดกลืนแสงอาทิตย์ได้ดี ด้านบนของแผงปิดด้วยกระจกใสหนา 5 มิลลิเมตรและถึงเก็บน้ำปริมาตร 250 ลิตร หุ้มฉนวนโดยรอบเพื่อลดการสูญเสียความร้อน การทดลองจะใช้น้ำปริมาตร 250 ลิตร ทำให้มีอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ได้โดยใช้เวลาทั้งสิ้น 10 ชั่วโมง ตั้งแต่เวลา 8.00 น. -18.00 น.

Solar Water Heater

Academic Year 1998

By

Mr. Pirasak Leechanawanichpun

Mr. Wuttichai Pothong

Mr. Sanya Chomyai

Project Advisor

Mr. Kiattichai Ruksachat

Abstract

This project studies the solar energy used in water warming system which is consisted of primary functionally theory and calculation of water warming system design.

The solar water heater will use a solar plate sized 2 squaremetre to transfer the heat and increase the temperature of water. That created the grate are 45 rows non-grade iron cast having 2 centimetre. diameter and paint in black color in order to absorb more solar energy. Five millimetre thicked glass will be taken to cover at the top. Next appliance is tank. That is able to keep the 250 litre water and cover with fiber glass insulate all around to protect the heat spreading. We use water in the amount of 250 litre and heat its temperature reaching to 60°C 10 hours. We Choose to record the test around 8.00 am. – 6.00 pm.

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำโครงงานวิศวกรรมศาสตร์ เรื่องเครื่องทำน้ำอุ่นด้วยโครงสร้างอย่างง่าย
สำเร็จได้เพราะได้รับคำแนะนำและคำปรึกษาจากอาจารย์เกียรติชัย รักษาชาติ ขอขอบพระคุณ
คุณพ่อ คุณแม่ อาจารย์ภาควิศวกรรมศาสตร์ทุกท่านที่ให้การสนับสนุน และให้กำลังใจใน
การทำโครงงานวิศวกรรมศาสตร์จนเสร็จสมบูรณ์และขอขอบคุณบุคคลที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับ
ความสำเร็จของ โครงงานวิศวกรรมศาสตร์ในครั้งนี้

คณะผู้จัดทำ



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ณ
สารบัญภาพ	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ฐ
บทที่	
1. บทนำ	
ความสำคัญและที่มาของโครงการวิศวกรรมศาสตร์	1
วัตถุประสงค์ของโครงการวิศวกรรมศาสตร์	1
ขอบเขตของโครงการวิศวกรรมศาสตร์	1
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	1
2. ทฤษฎี	2
หลักการการทำงานของเทอร์โมไซฟอน	2
ปริมาณน้ำ	2
สถานที่ติดตั้ง	2
การแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ที่พิจารณาที่ผิวโลก	3
พลังงานแสงอาทิตย์รวม	3
การวัดและการประมาณการแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์	3
การแผ่รังสี	4
แผนรับแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ	4
ส่วนต่างๆของแผง	5
การแพร่กระจายของอุณหภูมิในแผง	5
ฉนวน	6
ตารางคุณสมบัติของฉนวนใยแก้ว	7

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
2. (ต่อ) เทอร์โมมิเตอร์และเทอร์โมคัปเปิล	9
คุณสมบัติพื้นฐานของของไหล	9
ความหนาแน่น	9
ปริมาตรจำเพาะ	10
น้ำหนักจำเพาะ	10
ความถ่วงจำเพาะ	10
พลังงานจลน์ของของไหลที่เคลื่อนที่	11
การถ่ายเทความร้อน	11
การนำความร้อน	12
การพาความร้อน	13
การพาความร้อนผนังปิดสองชั้นที่คงที่	14
การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสี	15
การพาความร้อนตามธรรมชาติ	18
ความดันสูญเสีย	20
ลักษณะการต่อท่อ	22
ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน	22
ความดันสูญเสียในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน	23
ความดันขับของไหล	24
3. การคำนวณและออกแบบ	25
ปริมาณน้ำที่ต้องการใช้	25
พื้นที่แผงรับแสง	25
การสูญเสียความร้อนในถังเก็บ	26
การสูญเสียความร้อนด้านบนและด้านล่างของแผง	29
การสูญเสียความดันภายในท่อ	32
กำลังในการขับเคลื่อนของไหล	35
การสูญเสียความร้อนที่ท่อส่งน้ำ	35

สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
3. (ต่อ) การสูญเสียความร้อนจากการนำและการพาของท่อส่งน้ำหุ้มฉนวน	37
การสูญเสียความร้อนในท่อร่วมหุ้มฉนวน	37
ความดันขับของไหล	38
4. อุปกรณ์ วิธีการทดลอง และผลการทดลอง	39
อุปกรณ์การทดลอง	39
วิธีการทดลอง	39
ตารางผลการทดลอง	41
ตารางการคำนวณจากผลการทดลอง	56
ตัวอย่างการคำนวณจากผลการทดลอง	57
กราฟแสดงความสัมพันธ์จากผลการทดลอง	59
5. สรุปผลการทดลอง	62
สรุปผลการทดลอง	62
ข้อเสนอแนะ	62
เอกสารอ้างอิง	63
ภาคผนวก	64

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1. แสดงคุณสมบัติของฉนวนใยแก้ว	7
2. แสดงผลการทดลองโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ วันที่ 29/03/42	41
3. แสดงผลการทดลองโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ วันที่ 30/03/42	46
4. แสดงผลการทดลองโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ วันที่ 31/03/42	51
5. แสดงการคำนวณผลการทดลอง วันที่ 29/03/42	56
6. แสดงการคำนวณผลการทดลอง วันที่ 30/03/42	56
7. แสดงการคำนวณผลการทดลอง วันที่ 31/03/42	57
 ตารางภาคผนวกที่	
1. Conversion factor สำหรับเปลี่ยนหน่วย SI หน่วยอังกฤษ	66
2. ค่าการแผ่รังสีความร้อนของผิวของวัตถุชนิดต่างๆ	67
3. คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของก๊าซชนิดต่างๆที่ความดันบรรยากาศ	68
4. คุณสมบัติของไอน้ำอิ่มตัว	69
5. คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของน้ำที่ความดันบรรยากาศ	71
6. สัมประสิทธิ์ความต้านของข้อต่อต่างๆ	72
7. คุณสมบัติที่เกี่ยวกับความร้อนของเหล็ก	73

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1. รังสีที่ผ่านกระจกหนา 5 มม. ที่มีปริมาณออกไซด์ของเหล็กผสมอยู่ต่างกัน	4
2. หน้าตัดของแผงรับแสงอาทิตย์	5
3. ผังรบบปิดสองชั้นที่ทำมุมกับพื้นราบ	14
4. สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	17
5. สเปกตรัมของแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความร้อนจากการแผ่รังสี	17
6. กำลังการแผ่รังสีโมโนโครเมติกของวัตถุดำ	18
7. การเคลื่อนที่ของความร้อนแบบการพาตามธรรมชาติจากผนังราบในแนวตั้งมาสู่ของไหล	18
8. ลักษณะแผงรับรังสีที่ใช้อากาศเป็นตัวพาความร้อนและมีแผ่นดูดรังสีตรงกลาง	19
9. กราฟแสดงค่าอุณหภูมิ ณ เวลาต่างๆ วันที่ 30/03/42	59
10. กราฟแสดงค่าความร้อน ณ ช่วงเวลาต่างๆ วันที่ 30/03/42	60
11. กราฟแสดงค่าอัตราการไหลเชิงมวล วันที่ 30/03/42	61
 ภาพภาคผนวกที่	
1. ตั้มประสิทธิภาพการสูญเสียของท่อจากการขยายทันที	74
2. ตั้มประสิทธิภาพการสูญเสียของท่อจากการหดทันที	74
3. แผนภูมิบูดี	75
4. ภาพด้านหน้าของเครื่องทำน้ำอุ่นด้วยโครงสร้างอย่างง่าย	77
5. ภาพด้านซ้ายของเครื่องทำน้ำอุ่นด้วยโครงสร้างอย่างง่าย	77
6. ภาพด้านขวาของเครื่องทำน้ำอุ่นด้วยโครงสร้างอย่างง่าย	78
7. ภาพด้านหลังของเครื่องทำน้ำอุ่นด้วยโครงสร้างอย่างง่าย	78

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
A	พื้นที่หน้าตัดท่อที่แผงรับแสงอาทิตย์	m^2
A_c	พื้นที่แผงรับแสงอาทิตย์	m^2
A_T	พื้นที่ถังเก็บน้ำ	m^2
A_i	พื้นที่ผิวท่อภายในแผง	m^2
C_p	ค่าคงที่ของน้ำ	$kJ/kg.K$
d_h	เส้นผ่าศูนย์กลางไฮดรอลิก	m
d_i	เส้นผ่าศูนย์กลางของถังเก็บน้ำ	m
f	ตัวประกอบความเสียดทาน	-
g	แรงโน้มถ่วงของโลก	m/s^2
G	ความเข้มแสงเฉลี่ย	MJ/m^2
Gr	กราชอฟนัมเบอร์	-
h	ความสูงของถังเก็บน้ำ	m
h_b	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของฉนวนด้านล่าง	$W/m^2.K$
h_{ca}	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างกระจกกับอากาศ	$W/m^2.K$
h_i	ค่าความร้อนแผงของน้ำอิมตัวทางเข้า	kJ/kg
h_L	ค่าหัวน้ำสูญเสียหลัก	m
h_m	ค่าหัวน้ำสูญเสียรอง	m
h_o	ค่าความร้อนแผงของน้ำอิมตัวทางออก	kJ/kg
h_{rca}	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการแผรังสีระหว่างกระจกกับอากาศ	$W/m^2.K$
h_{ro}	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการแผรังสีระหว่างฉนวนกับอากาศ	$W/m^2.K$
h_{rpe}	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการแผรังสีระหว่างกระจกกับแผง	$W/m^2.K$

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ(ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
Δh_{tot}	หัวความดันสูญเสียหลักรวม	m
Δh_{LA}	หัวความดันสูญเสียหลักท่อทางเข้าแผง	m
Δh_{LB}	หัวความดันสูญเสียหลักท่อทางออกแผง	m
Δh_{LC}	หัวความดันสูญเสียหลักท่อในแผง	m
$\bar{h}$	สัมประสิทธิ์การพาความร้อน	W/m ² .K
k_1	ค่าการนำความร้อนของถัง	W/m.K
k_2	ค่าการนำความร้อนของฉนวน	W/m.K
L	ระยะห่างระหว่างกระจกกับท่อในแผง	m
l_1	ความหนาของผนังถัง	m
l_2	ความหนาของฉนวน	m
m	มวลของสาร	kg
$\dot{m}$	อัตราการไหลเชิงมวล	kg/s
$\dot{m}_{tot}$	อัตราการไหลเชิงมวลของแผง	kg/s
$\dot{m}_B$	อัตราการไหลเชิงมวลทางออกแผง	kg/s
Nu_1	นอสเชิลนัมเบอร์	-
P	กำลังขับของของไหล	W
P_1	ความดันที่ท่อน้ำทางออกของถัง	Pa
P_2	ความดันที่ท่อน้ำทางเข้าของถัง	Pa
Pr	แพทเทิลนัมเบอร์	-
Q	ค่าความร้อนสะสม	kJ
Q_a	ปริมาณความร้อนที่น้ำได้รับจากแผง	kJ/s
Q_{accum}	ปริมาณความร้อนสะสมภายในถัง	W
Q_b	ปริมาณความร้อนสูญเสียด้านล่างแผง	W
Q_L	ปริมาณความร้อนสูญเสียรวมของแผง	W
Q_{loss}	ปริมาณความร้อนที่สูญเสียจากถัง	kJ/s

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ(ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
Q_T	ปริมาณความร้อนสูญเสียด้านบนแผง	W
Ra_i	เรย์เลห์นัมเบอร์	-
Re	เรโนลด์นัมเบอร์	-
r_1	รัศมีถึงของเก็บน้ำ	m
s	ความถ่วงจำเพาะ	-
T_{∞}	อุณหภูมิน้ำเฉลี่ยระหว่างทางเข้าออกแผง	$^{\circ}C$
T_a	อุณหภูมิของอากาศ	$^{\circ}C$
T_c	อุณหภูมิกระจก	$^{\circ}C$
T_i	อุณหภูมิภายในถัง	$^{\circ}C$
T_p	อุณหภูมิที่ผิวของแผงรับแสง	$^{\circ}C$
T_r	อุณหภูมิฉนวน	$^{\circ}C$
t	ความหนาฉนวน	m
U_L	สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนรวม	$W/m^2.K$
U_b	สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนด้านล่าง	$W/m^2.K$
U_T	สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนด้านบน	$W/m^2.K$
V	ความเร็วของน้ำในท่อที่แผง	m/s
V_A	ความเร็วของน้ำที่ท่อเข้าแผง	m/s
V_{∞}	ความเร็วน้ำเฉลี่ยของระบบ	m/s
V_B	ความเร็วของน้ำที่ท่อออกจากแผง	m/s
$\bar{V}$	ปริมาตร	m^3
v	ปริมาตรจำเพาะ	m^3/kg
W	น้ำหนักของวัตถุ	N
w	อัตราการไหลโดยมวล	kg/s
β	ส่วนกลับอุณหภูมิ	K^{-1}
η	ประสิทธิภาพของแผง	-
ρ	ความหนาแน่น	kg/m^3

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ(ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
V	ความหนืดจลน์	m^2/s
γ	น้ำหนักจำเพาะ	N/m^3
ϵ_c	ค่าการแผ่รังสีที่กระจก	-
ϵ_p	ค่าการแผ่รังสีที่แผง	-
σ	คงค่าที่สเตฟานโบลท์มาน	-
Gr	กราชอฟนัมเบอร์	-
τ	ค่าการส่งผ่านของกระจก	-



บทที่ 1

บทนำ

ความสำคัญและที่มาของโครงการวิศวกรรมศาสตร์

ในปัจจุบันเป็นความต้องการใช้พลังงานเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ ตามจำนวนประชากรที่สูงขึ้น แหล่งพลังงานที่มีอยู่เริ่มหมดลง แม้แต่ในประเทศเราก็เริ่มมีการรณรงค์ให้ประหยัดพลังงานกันมากขึ้น โดยเฉพาะสถานะเศรษฐกิจตอนนี้ การนำพลังงานที่มีอยู่ในธรรมชาติมาใช้เป็นทางเลือกที่เหมาะสมอีกทางหนึ่ง เช่น รังสีดวงอาทิตย์ เป็นพลังงานทดแทนอย่างหนึ่ง ซึ่งได้มาโดยไม่มีการลงทุนและมีอยู่ตลอดปี เป็นพลังงานที่ใช้ไปแล้วไม่เกิดมลภาวะใด ๆ ทั้งสิ้น เพราะฉะนั้นจึงมีการสร้างอุปกรณ์ต่างๆ ขึ้นเพื่อนำมาประยุกต์ใช้กับพลังงานแสงอาทิตย์กันอย่างกว้างขวาง

วัตถุประสงค์ของโครงการวิศวกรรมศาสตร์

1. เพื่อออกแบบและสร้างเครื่องทำน้ำอุ่นโดยใช้แผงรับแสงอาทิตย์
2. เพื่อเป็นการศึกษาการถ่ายเทความร้อน

ขอบเขตของโครงการวิศวกรรมศาสตร์

โครงการนี้ได้พิจารณาสร้างเครื่องทำน้ำอุ่นอย่างง่ายที่ใช้น้ำเป็นสารทำงานโดยผลิตน้ำอุ่นที่มีอุณหภูมิประมาณ $40 - 60^{\circ}\text{C}$ และเครื่องเริ่มทำงาน เวลา 8.00 น. ถึงสุด 18.00 น.

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ผลิตเครื่องทำน้ำอุ่นโดยใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์
2. เป็นการช่วยประหยัดพลังงานไฟฟ้า
3. น้ำอุ่นที่ได้สามารถนำมาใช้ได้ตลอดเวลา

บทที่ 2

ทฤษฎี

ระบบทำน้ำอุ่นโดยใช้แสงอาทิตย์เป็นอีกตัวอย่างหนึ่งในการนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้โดยระบบนี้ได้มีการนำไปใช้จริงในหลายประเทศเช่น ออสเตรเลีย ออสเตรีย ญี่ปุ่นและ บางส่วนของประเทศอเมริกา ระบบนี้ประกอบด้วยชิ้นส่วนหลัก 2 ส่วนคือ

1. แผงรับแสงอาทิตย์
2. ถังเก็บน้ำ

หลักการทำงานของเทอร์โมไซฟอน

เมื่อน้ำในระบบถูกทำให้ร้อนขึ้น แผงรับแสงอาทิตย์ซึ่งเป็นตัวแลกเปลี่ยนความร้อนจะทำให้ น้ำส่วนที่มีอุณหภูมิสูงขึ้นมีความหนาแน่นลดลง ในขณะที่น้ำที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าจะมีความหนาแน่นมากกว่า ทำให้น้ำที่มีอุณหภูมิสูงกว่าเกิดการลอยตัวขึ้นสู่ด้านบนและน้ำที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า(ความหนาแน่นมากกว่า)ไหลเข้ามาแทนที่ อันเป็นผลมาจากความแตกต่างของความหนาแน่นของน้ำ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้เกิดการไหลเวียนของน้ำขึ้นในระบบ โดยการไหลเวียนของระบบจะหยุดทำงานเมื่อระบบอยู่ในภาวะสมดุล นั่นคือความหนาแน่นของน้ำในระบบมีค่าเท่ากันทั้งหมดนั่นเอง

ปริมาณน้ำ

ปริมาณน้ำที่ใช้เป็นสิ่งสำคัญที่จะต้องนำมาพิจารณาถึงขนาดของถังเก็บน้ำที่จะใช้ ปริมาณการใช้น้ำโดยเฉลี่ยในแต่ละวันจะมีค่าประมาณ 50 ลิตร/คน แต่ถ้าใช้เฉพาะที่จำเป็น เช่น การอาบน้ำ ล้างจานฯ ก็จะลดปริมาณการใช้น้ำเหลือเพียง 35 ลิตร/คน เท่านั้น

สถานที่ติดตั้ง

จุดที่จะติดตั้งระบบนั้นมีความสำคัญมากแผงรับแสงอาทิตย์ควรจะหันหน้าไปทางทิศใต้และควรจะต้องตั้งไว้บนหลังคาบ้านหรือบนศาลาเพื่อจะได้รับแสงอาทิตย์ได้อย่างเต็มที่โดยต้องระวังไม่ให้มีเงาพาดมาบังแผงรับแสงอาทิตย์เพราะจะทำให้ประสิทธิภาพของระบบลดลงได้เนื่องจากประเทศไทยอยู่บริเวณเส้นรุ้งที่ 14 องศาแผงรับแสงอาทิตย์จึงเอียงทำมุม 14° กับแนวระดับด้วย

การแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ที่ผิวโลก (Solar radiation at earth's surface)

เนื่องจากบรรยากาศโลกประกอบด้วยก๊าซต่าง ๆ ไอน้ำ ฝุ่น และอนุภาคอื่น ๆ อีกจำนวนมากมายังทำให้รังสีที่เกิดจากการแผ่รังสีของอาทิตย์บางส่วนถูกดูดกลืนกระจัดกระจายมีทิศทางเบี่ยงเบนไป จึงเหลือรังสีปริมาณหนึ่งมาถึงผิวโลก ดังนั้นการแผ่รังสีมาที่ผิวโลกจึงมีหลายลักษณะเนื่องจากผ่านบรรยากาศโลกพอจะแบ่งได้ดังนี้

1. การแผ่รังสีแบบเป็นลำแสง (Beam radiation) เป็นรังสีที่โลกได้รับโดยตรงรังสีไม่มีการเปลี่ยนทิศทาง
2. การแผ่รังสีแบบแพร่กระจาย (Diffuse radiation) ผิวโลกได้รับรังสีนี้หลังจากที่รังสีมันเปลี่ยนทิศทางไปจากเดิมแล้ว อันเกิดเนื่องจากเกิดการสะท้อน (Reflection) และการกระจัดกระจาย (Scattering) เมื่อรังสีจากดวงอาทิตย์กระทบกับบรรยากาศของโลก
3. การแผ่รังสีทั้งหมด (Total radiation) คือผลรวมของการแผ่รังสีแบบลำแสงกับการแผ่รังสีแบบแพร่กระจาย บางทีเรียกกันว่า global radiation

พลังงานแสงอาทิตย์รวม (Total or Global Solar Radiation)

คือพลังงานแสงอาทิตย์ทั้งหมดซึ่งประกอบด้วยพลังงานแสงอาทิตย์รังสีตรง (Beam Radiation) และพลังงานแสงอาทิตย์รังสีกระจาย (Diffuse Radiation) ที่ได้รับบนระนาบระดับ (Horizontal Surface) ต่อหน่วยเวลาต่อหน่วยพื้นที่

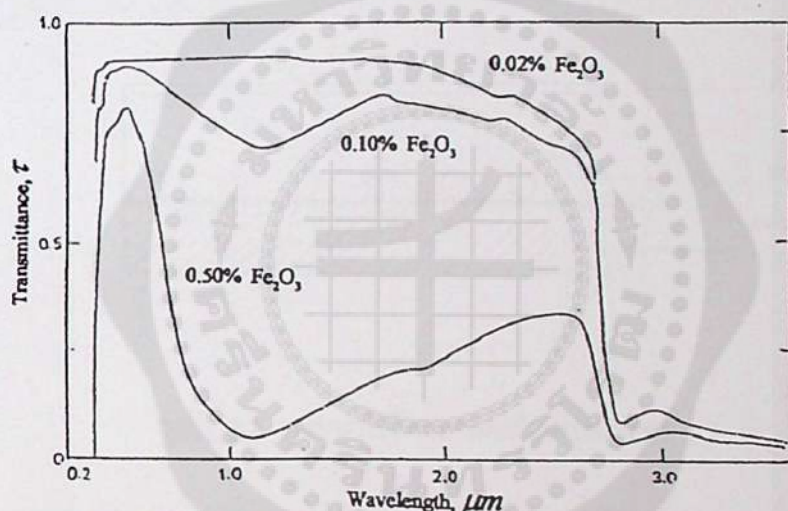
การวัดและการประมาณการแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์ (Measurements and estimation of solar radiation)

การแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์ มีทั้งแบบลำแสง และแบบแพร่กระจาย ถ้ารวมการแผ่รังสีทั้งสองเรียกว่าการแผ่รังสีทั้งหมด การแผ่รังสีของดวงอาทิตย์เราประมาณว่าเป็นแหล่งกำเนิดความร้อนอุณหภูมิประมาณ 5762 K รังสีส่วนใหญ่จะมีความยาวคลื่นระหว่าง 0.3 ถึง 3.0 μm ถือเป็นส่วนหนึ่งของรังสีความร้อน (Thermal radiation) ซึ่งมีช่วงประมาณ 0.1 ถึง 100 ดังนั้นการแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์จึงเป็นพวกคลื่นสั้นส่วนอีกพวกหนึ่งที่เหลือถือเป็นการแผ่รังสีคลื่นยาวเป็นพวกแหล่งกำเนิดความร้อนอุณหภูมิต่ำ ๆ เช่น แผ่นรังสี แสงอาทิตย์ ท้องฟ้า โดยเฉพาะวันที่มีเมฆมาก ๆ ซึ่งมีอุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิแวดล้อม พวกหลังนี้จะให้รังสีที่มีความยาวคลื่นมากกว่า 3 μm

การแผ่รังสี

รังสีที่ตกกระทบแผงรับแสงอาทิตย์นั้น มีทั้งแสงที่มาจากท้องฟ้าและ กระทั่งแสงที่สะท้อนขึ้นจากพื้นดิน แผงรับแสงอาทิตย์นั้นนิยมตั้งในตำแหน่ง หันหน้าไปทางทิศใต้ เพื่อจะได้ รับแสงจากท้องฟ้าและที่สะท้อนจากพื้นดินได้อย่างเต็มที่

กระจกเป็นวัสดุที่นิยมนำมาใช้วางบนแผงรับแสง กระจกจะสามารถดูดกลืนพลังงาน จากแสงอาทิตย์ได้ดี ถ้ามีปริมาณ Fe_2O_3 ผสมอยู่ต่างกันกระจกที่มีเหล็กผสมอยู่น้อยจะมีความ สามารถในการส่งผ่านดีกว่ากระจกที่มีเหล็กผสมอยู่มากซึ่งกระจกชนิดนี้จะมีสีเป็นสีเขียวในระบบ ที่มีวัสดุปกคลุมหลายชั้น ซึ่งมีค่าความยาวคลื่นจำเพาะแตกต่างกันแสงที่ส่งผ่านมาจะเปลี่ยนไปใน แต่ละชั้น



รูปที่ 2.1 รังสีที่ผ่านกระจกหนา 5 มม.ที่มีปริมาณออกไซด์ของเหล็กผสมอยู่ต่างกัน

แผงรับแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ

แผงรับแสงอาทิตย์เป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนชนิดหนึ่ง que เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานความร้อนซึ่งมีลักษณะแตกต่างกันไปตามการใช้งาน โดยแผงจะถ่ายเทพลังงาน ที่ได้เข้าสู่ของเหลว โดยเฉลี่ยแล้วความเข้มของแสงที่ตกกระทบมีค่าประมาณ 1100 w/m^2 และมีความยาวคลื่น $0.3 - 3 \text{ μm}$

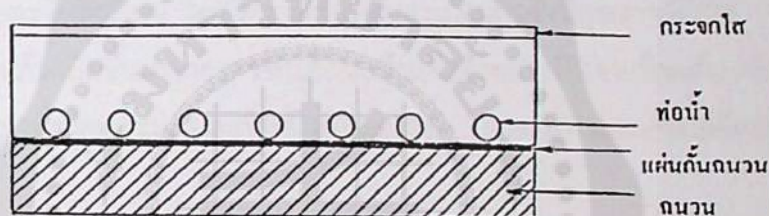
เราสามารถออกแบบแผงให้มีความสามารถที่จะทำให้อุณหภูมิของเหลวภายในเพิ่มสูงขึ้นจากสภาวะปกติจนถึง 100°C ได้ โดยไม่ต้องใช้ระบบติดตามดวงอาทิตย์

ส่วนต่าง ๆ ของแผง

การทำให้ส่วนที่รับแสงเป็นสีดำจะช่วยดูดซับพลังงานและถ่ายเทออกไปสู่ของเหลวโดยมีการนำวัสดุมาปิดผิวหน้าของแผง (กระจก) เพื่อป้องกันการสูญเสียจากการพาความร้อนและใช้ฉนวนปิดด้านหลังเพื่อลดการสูญเสียจากการนำความร้อน แผงมักจะยึดติดกับฐานที่มั่นคง แล้วนำไปติดกับกำแพงหรือวางไว้บนหลังคาและมักจะหันหน้าไปทางทิศใต้ ในการออกแบบระบบพลังงานแสงอาทิตย์ต้องคำนึงถึงต้นทุนที่ต้องใช้ในบางครั้งการออกแบบให้ระบบมีประสิทธิภาพต่ำกว่าระบบที่ใช้เทคโนโลยีอย่างเต็มที่นั้นจะช่วยลดต้นทุนลงได้มาก

การแพร่กระจายของอุณหภูมิในแผง

ในบริเวณแผงรับแสงอาทิตย์นั้นท่อที่อยู่ข้างบนจะถ่ายเทพลังงาน ไปยังของเหลวจะ



รูปที่ 2.2 ภาพหน้าตัดของแผงรับแสงอาทิตย์

ทำให้ของเหลวมีอุณหภูมิสูงขึ้นเรื่อย ๆ ระหว่างที่กำลังไหลไปยังทางออก เราสามารถสรุปหลักของแผงรับแสงอาทิตย์ได้ดังนี้

1. เป็นระบบ Steady state
2. ท่อวางอยู่ในแนวนอนขนานกัน
3. ไม่คิดพื้นที่บริเวณข้อต่อหัวท่อเพราะถือว่ามีพื้นที่เล็กน้อย
4. การไหลในท่อเป็นแบบ Uniform flow
5. กระจกไม่มีการดูดกลืนพลังงานแสง
6. ไม่คิดอุณหภูมิที่ลดลงระหว่างแสงเคลื่อนที่ผ่านแผ่นกระจก
7. ความร้อนผ่านแผงเป็นแบบมิติเดียว
8. กระจกทึบแสงอินฟราเรด

9. ความร้อนผ่านฉนวนเป็นแบบมิตติเดียว
10. ท้องฟ้าถือเป็น Black body สำหรับรังสีที่มีความยาวคลื่นยาว
11. ไม่คิดอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นบริเวณรอบ ๆ ท่อ
12. อุณหภูมิในทิศทางทวนและระหว่างท่อสามารถแยกกันคิดได้
13. ค่าคงที่ต่าง ๆ ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ
14. การสูญเสียของแผงทั้งจากด้านหน้าและหลังถือว่าไปสู่อุณหภูมิภายนอกเดียวกัน
15. ไม่คำนึงถึงฝุ่นหรือดินที่จับบนแผง
16. ไม่คำนึงถึงเงาของแผง

ฉนวน

ฉนวนตามท้องตลาดมีให้เลือกหลายชนิดด้วยกันเช่น ฉนวนใยแก้ว ฉนวนใยแร่ เพอร์ไลต์ โยเซลลูโลส และ โพลียูรีเทน ในที่นี้เราเลือกใช้ฉนวนใยแก้วซึ่งมีคุณสมบัติดังนี้

ฉนวนใยแก้วผลิตขึ้นมาจากการพันก้อนแก้วแข็งด้วยการปั่นจนเป็นเส้นเกลียวบาง ฉนวนชนิดนี้ทำออกมาทั้งลักษณะแบบรูดฟิลต์ แบบแผ่นอัด (Boards) และเส้นใยอัดเป็นแผ่น หรือแบบคลุมหรือห่ม

ฉนวนแบบเส้นใยอัดเป็นแผ่นหรือแบบคลุมหรือห่มโดยทั่วไปจะมีความหนาแน่นอยู่ระหว่าง 9.61 ถึง 16.02 kg/m³ และจากผลของเส้นใยที่ยาว วัสดุชนิดนี้จึงมีแนวโน้มที่จะคืนสภาพความหนาออกมาใหม่ได้ภายหลังการบรรจุเมื่อใช้ในลักษณะเส้นใยอัดเป็นแผ่นหรือแบบห่มคลุมนี้ ฉนวนใยแก้วจะมีสภาพต้านทานความร้อนประมาณ 22.4 m.K/W

สำหรับใยแก้วแบบรูดฟิลต์ทำได้ด้วยการไม่ใยแก้วอัดเป็นแผ่น ซึ่งทำให้ฉนวนแบบรูดฟิลต์ที่ได้มีสภาพต้านทานความร้อนประมาณ 19.84 m.K/W และทั้งแบบรูดฟิลต์และแบบอัดเป็นแผ่นหรือคลุมของฉนวนใยแก้ว น้ำสามารถจะซึมเข้าไปได้เป็นจำนวนมากกว่า 180 perm-cm แต่การดูดซับน้ำเอาไว้กลับน้อยไม่เกิน 1 เปอร์เซนต์

เนื่องจากใยแก้วเป็นสารอนินทรีย์จึงเป็นวัสดุที่ไม่ถูกไหม้ อย่างไรก็ตามตัวประสานอินทรีย์ที่ใช้ในการประสานเป็นฉนวนแบบเส้นใยอัดเป็นแผ่นสามารถถูกไหม้ได้ ฉะนั้นวัสดุที่ใช้เป็นตัวประสาน ASTM E-84 จึงกำหนดให้มีคุณสมบัติโดยประมาณ ดังนี้ : ระดับการกระจายของเปลวไฟ 15-20 ระดับการมีส่วนเป็นเชื้อเพลิง 5-15 และระดับการเกิดควัน 0-20 สำหรับผิวหน้าฉนวนใยแก้วที่ใช้กับอาคารโดยปกติจะประกอบด้วยกระดาษเคลือบแอสฟัลต์ หรือกระดาษแผ่นบางซ้อนทับกัน และเนื่องจากผิวหน้าที่สามารถถูกไหม้ได้ จึงไม่สามารถใช้ในลักษณะหันเข้าหา

เปลวไฟหรืออุณหภูมิเกินกว่า 80°C ซึ่งเกิดการลุกไหม้ของผิวหน้าหรือตัวประสานอินทรีย์สามารถทำให้เกิดการลุกไหม้ของผิวหน้า หรือตัวประสานอินทรีย์สามารถทำให้เกิดควันที่เป็นอันตรายได้

ฉนวนใยแก้วแบบเส้นใยอัดเป็นแผ่นไม่ปรากฏว่ามีการยุบหรือหดตัวตามอายุการใช้งาน อย่างไรก็ตามแบบลูตฟีลล์อาจมีการยุบตัวหากใช้ฉนวนที่มีความหนาแน่นต่ำกว่าข้อกำหนดของบริษัทผู้ผลิต ส่วนคุณสมบัติของวัสดุอื่นๆ เช่น สมรรถนะทางความร้อนและสภาพต้านทานไฟไหม้ ไม่ปรากฏว่ามีผลกระทบเนื่องจากอายุการใช้งานและอุณหภูมิที่ติดตั้งปกติ นอกจากนี้ฉนวนใยแก้วไม่ทำให้แบคทีเรียเติบโต และไม่เป็นอาหารของสัตว์ใดๆ รวมทั้งไม่มีสถานะกัดกร่อนวัสดุที่หุ้มและไม่มีกลิ่นเป็นที่น่าสนใจ

สำหรับฉนวนใยแก้วแบบแผ่นอัดที่ผลิตขึ้นมามีหลากหลายคุณสมบัติ ขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้เป็นรากฐานและเปอร์เซ็นต์ของใยแก้วที่ผสมอยู่ สำหรับชนิดที่มีความหนาแน่นประมาณ 64.0 kg/m^3 จะมีสภาพต้านทานความร้อนในระดับชั้น 27.8 m.K/W

การประยุกต์ใช้งานฉนวนใยแก้วโดยทั่วไปจะใช้งานเป็นฉนวนหลังอาคาร ผนัง พื้นห้องใต้ดินติดและกับระบบท่อ นอกจากนี้ยังใช้ในงานอุตสาหกรรมด้วยเช่น เป็นฉนวนหุ้มถังเก็บและท่อส่งลม เป็นต้น สำหรับคุณสมบัติโดยสรุปดังแสดงในตาราง

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของฉนวนใยแก้ว

คุณสมบัติ	แบบเส้นใยอัดเป็นแผ่น	แบบลูตฟีลล์	แบบแผ่นหนา
สภาพนำความร้อนปรากฏ $(k), \text{W/m.K}$	0.045	0.05	0.036
สภาพต้านทานความร้อนปรากฏ $(R), \text{m.K/W}$	22.4	20.00	27.78
ความหนาแน่นของวัสดุ $\rho, \text{kg/m}^3$	16.02	16.02	64.00
ความร้อนจำเพาะ $(C_p), \text{kJ/kg.}^{\circ}\text{C}$	0.84	0.84	1.256
สภาพแพร่กระจายความร้อน $\alpha, \text{m}^2/\text{s}$	0.33×10^{-5}	0.33×10^{-5}	0.33×10^{-5}

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของฉนวนใยแก้ว (ต่อ)

คุณสมบัติ	แบบเส้นใย อัดเป็นแผ่น	แบบรูทฟิลล์	แบบแผ่นหนา
อุณหภูมิใช้งานสูงสุด °C	190	540	205
ค่าแทรกซึมความชื้น ,perm-cm	180	180	180
ค่าดูดซึมน้ำ,เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	1	1	1
การกัดกร่อนวัสดุที่ถูกฉนวนหุ้ม	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี
การเสื่อมสภาพลงจากผลของ :			
อุณหภูมิที่เป็นวัฏจักร	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี
สัตว์จำพวกหนู หมัด นก ฯลฯ	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี
ความชื้น	ชั่วคราว	ชั่วคราว	ชั่วคราว
พึงใจ/แบคทีเรีย	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี
สภาพอากาศ	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี
ลม	ปานกลาง	พอสมควร	เล็กน้อย
ปัจจัยที่กระทบต่อคน			
การเป็นพิษ	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี
กลิ่น	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี
การดูดซับเสียง	ดี	ดี	ดี
ผลกระทบต่ออายุ :			
เสถียรภาพของขนาด	ไม่มี	จะยุบตัว	ไม่มี
สมรรถนะทางความร้อน	ไม่มี	เสื่อมลงเล็กน้อยเนื่องจาก การยุบตัว	ไม่มี
สภาพการติดไฟ	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี

เทอร์โมมิเตอร์และเทอร์โมคัปเปิล

เทอร์โมมิเตอร์จะวัดอุณหภูมิโดยใช้คุณสมบัติการขยายตัวเมื่อได้รับความร้อนของของเหลว โดยของเหลวจะบรรจุอยู่ในแท่งแก้วซึ่งมีส่วนประกอบคือ กระเปาะและก้านโดยกระเปาะจะมีหน้าที่บรรจุของเหลวที่มีปริมาตรพอเพียงที่จะขยายตัวได้เต็มแท่งแก้วภายในแท่งแก้วจะมีหลอดคาปิลลารี ซึ่งแต่ละระดับจะบ่งบอกถึงอุณหภูมิขณะนั้น การวัดอุณหภูมิโดยใช้เทอร์โมมิเตอร์สามารถให้ความแม่นยำในช่วง $\pm 0.01^{\circ}\text{C}$ ภายใต้สภาวะที่มีการควบคุมอย่างดี อย่างไรก็ตามการใช้เทอร์โมมิเตอร์ในสภาวะแวดล้อมทั่วไปจะเกิดความผิดพลาดได้มาก

เทอร์โมคัปเปิลเป็นอุปกรณ์วัดอุณหภูมิอีกชนิดหนึ่งประกอบด้วยตัวนำไฟฟ้าที่ทำจากโลหะที่ต่างกัน 2 ชนิด ยึดติดกันเป็นขั้ว โดยเทอร์โมคัปเปิลจะวัดอุณหภูมิที่ต่างกันระหว่างขั้ว 2 ขั้ว โดยอุณหภูมิที่แตกต่างกันจะทำให้เกิดความต่างศักย์ทางไฟฟ้าขึ้นและนำค่าที่ได้ไปใช้คำนวณหาอุณหภูมิ การวัดอุณหภูมิจะกระทำโดยให้ขั้วหนึ่งเป็นจุดอ้างอิง(นำไปแช่น้ำแข็งที่ 0°C อีกขั้วหนึ่งจะนำไปใช้วัดอุณหภูมิที่ต้องการ ภายหลังได้มีการพัฒนาจุดอ้างอิง อิเลคโตรนิค (Thermistor) ขึ้นเพื่อความสะดวกในการวัดอุณหภูมิโดยไม่จำเป็นต้องนำขั้วอ้างอิงไปแช่น้ำแข็งอีกต่อไปและยังมีการพัฒนาอุปกรณ์ที่ใช้แปลงค่าเอาต์พุตที่ได้จากความต่างศักย์เป็นค่าอุณหภูมิได้ทันที

เทอร์โมคัปเปิลแบ่งออกเป็นหลายชนิดเช่น E, J, K, S, T ตามชนิดของโลหะที่นำมาใช้ โดย Type K จะทำมาจากโครเมียม(ขั้วบวก)และอะลูมิเนียม(ขั้วลบ) ซึ่งสามารถวัดอุณหภูมิได้สูงถึง 1372°C และมีความผิดพลาดเพียง 0.75% เท่านั้น

คุณสมบัติพื้นฐานของของไหล

คุณสมบัติพื้นฐานของของไหลเป็นสิ่งจำเป็นในการวิเคราะห์ปัญหาที่เกี่ยวข้องกับของไหล ซึ่งประกอบด้วย ความหนาแน่น , ปริมาตรจำเพาะ , น้ำหนักจำเพาะ และความถ่วงจำเพาะ

ความหนาแน่น (Mass Density)

คือ มวลของสารต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร (ρ)

$$\rho = m/V \quad (2.1)$$

โดยที่ m คือ มวลของสาร ; Kg

V คือ ปริมาตร ; m^3

ปริมาตรจำเพาะ (Specific Volume)

คือ ปริมาตรของสารในหนึ่งหน่วยมวล หรือส่วนกลับของความหนาแน่น

$$v = V/m = 1/\rho \quad (2.2)$$

โดยที่ v คือ ปริมาตรจำเพาะ ; m^3/kg

ค่าปริมาตรจำเพาะของน้ำมีค่ามากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นซึ่งตรงข้ามกับความหนาแน่นของน้ำ

น้ำหนักจำเพาะ (Specific Weight)

คือ น้ำหนักของสารต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร (γ)

$$\gamma = W/V = mg/V = \rho g \quad (2.3)$$

โดยที่ γ คือ น้ำหนักจำเพาะ ; N/m^3

g คือ แรงโน้มถ่วงของโลก ; m/s^2

ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity)

คือ อัตราส่วนของน้ำหนักของวัตถุต่อน้ำหนักของน้ำที่มีปริมาตรเท่ากับวัตถุนั้น

$$S = W/W_w = \gamma/\gamma_w = \rho/\rho_w \quad (2.4)$$

โดยที่ S คือ ความถ่วงจำเพาะ

W คือ น้ำหนักของวัตถุ ; N

W_w คือ น้ำหนักของน้ำที่มีปริมาตรเท่ากับวัตถุ ; N

γ, γ_w คือ น้ำหนักจำเพาะของวัตถุและน้ำตามลำดับ ; N/m^3

ρ, ρ_w คือ ความหนาแน่นของวัตถุและน้ำตามลำดับ ; kg/m^3

พลังงานจลน์ของของไหลที่กำลังเคลื่อนที่ (Kinetic Energy of a flowing fluid)

วัตถุที่มีมวล m และเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว V จะมีพลังงานจลน์ เป็น

$$K.E = m.V^2/2 \quad (2.5)$$

หรือเท่ากับ $V^2/2$ ต่อหนึ่งหน่วยมวล แต่เนื่องจากหนึ่งหน่วยมวลมีน้ำหนักเป็น g หน่วย ดังนั้นพลังงานจลน์ ต่อ หน่วยน้ำหนัก $= V^2/2g$

การถ่ายเทความร้อน

การไหลของความร้อนเรียกว่าการถ่ายเทความร้อน (Heat transfer) การถ่ายเทความร้อนแบ่งออกได้เป็น 3 รูปแบบใหญ่ ๆ ดังต่อไปนี้

1. การนำความร้อน (Heat Conduction)
2. การพาความร้อน (Heat Convection)
3. การแผ่รังสีความร้อน (Heat Radiation)

ไม่ว่าการถ่ายเทความร้อนในรูปแบบใดข้างต้น การถ่ายเทความร้อนจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อมีผลต่างของอุณหภูมิเท่านั้น โดยความร้อนจะไหลจากที่อุณหภูมิสูงไปยังที่อุณหภูมิต่ำกว่า ปรัชญาของการนำความร้อนจะเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิภายในวัตถุชิ้นหนึ่งมีค่าเท่ากันไม่ทุกจุดหรือเมื่อนำวัตถุสองชิ้นที่มีอุณหภูมิแตกต่างกันมาสัมผัสกัน ปัจจัยที่สำคัญที่มีส่วนในการกำหนดอัตราการนำความร้อนก็คือ ผลต่างของอุณหภูมิ มิติและรูปร่างของวัตถุ และคุณสมบัติของวัตถุซึ่งผลต่างของอุณหภูมิสูงเท่าไร อัตราการนำความร้อนก็จะสูงขึ้นเท่านั้น

ในกรณีของการนำความร้อน ถ้าอุณหภูมิที่ทุก ๆ จุด ของวัตถุที่นำความร้อนมีค่าคงที่โดยไม่แปรเปลี่ยนตามเวลา เราเรียกว่าการนำความร้อนในสภาวะคงที่ (Steady - state Heat conduction) ในกรณีนี้ปริมาณความร้อนที่ไหลผ่านพื้นที่หนึ่งหน่วยของวัตถุในหนึ่งหน่วยเวลาจะมีค่าคงที่ในทางตรงกันข้ามถ้าอุณหภูมิของวัตถุทั้งชิ้น หรืออุณหภูมิของวัตถุส่วนหนึ่งมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา อัตราการนำความร้อนของวัตถุย่อมเปลี่ยนค่าตามเวลาด้วยในกรณีนี้เราเรียกว่า การนำความร้อน ในสภาวะไม่คงที่ (Unsteady - state Conduction) โดยทั่วไปการนำความร้อนสามารถถือว่าเป็นการนำความร้อนในสภาวะคงที่

การถ่ายเทความร้อนแบบการพาเป็นลักษณะเฉพาะของของไหล เพราะจะเกิดขึ้นในก๊าซและของเหลวเท่านั้น ในการพาความร้อนโมเลกุลของก๊าซหรือของของเหลวจะเคลื่อนที่ไปยัง

ผิวถ่ายเทความร้อนอย่างไม่ขาดสาย และการทำการแลกเปลี่ยนความร้อนที่ผิวนั้นยังการเคลื่อนที่ของโมเลกุลยิ่งเร็วเท่าไร อัตราการพาความร้อนก็จะสูงขึ้นเท่านั้น

การเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนมีอยู่บ่อย ๆ ที่ทำการกวนของไหลด้วยแรงกลบ้าง หมุนเวียนของไหลด้วยเครื่องสูบบ้าง การทำเช่นนี้เรียกว่าการพาความร้อนโดยการบังคับ (Force convection) ในทางตรงข้ามการพาความร้อนที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของของไหลตามธรรมชาติเนื่องจากแรงลอยตัว (Buoyant force) ที่เกิดจากการขยายตัวของของไหลด้วยความร้อน เราเรียกการพาอย่างธรรมชาติ (Natural convection) หรือการพาอย่างอิสระ (Free convection)

การแผ่รังสีความร้อนจะเกิดขึ้นระหว่างผิว 2 แห่ง ที่มีอุณหภูมิต่างกันและถูกกั้นกลางด้วยมัชฌิม (Medium) ที่ยอมให้รังสีความร้อนวิ่งผ่านได้ อากาศที่บริสุทธิ์และสุญญากาศจะยอมให้รังสีความร้อนวิ่งผ่านได้ แต่ของเหลวส่วนใหญ่จะไม่ยอมให้รังสีความร้อนวิ่งผ่าน เมื่อรังสีความร้อนแผ่ไปถึงผิวของวัตถุ รังสีส่วนหนึ่งจะถูกสะท้อนกลับมาจากผิววัตถุ รังสีส่วนหนึ่งจะถูกดูดกลืนความร้อน และไปเพิ่มอุณหภูมิของวัตถุที่รับรังสีความร้อน และในบางครั้งรังสีส่วนหนึ่งจะวิ่งทะลุวัตถุนั้น โดยไม่เปลี่ยนเป็นความร้อน

การนำความร้อน (Heat Conduction)

การนำความร้อน คือ วิธีการที่ความร้อนเคลื่อนที่จากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำภายในตัวกลางเดียวกัน หรือเป็นการเคลื่อนที่ของความร้อนระหว่างตัวกลางที่ติดกัน แต่มีอุณหภูมิต่างกัน ในการนำความร้อน ความร้อนจะเคลื่อนที่ผ่านโมเลกุลของสารโดยที่โมเลกุลไม่เคลื่อนที่ (อยู่นิ่ง) การนำความร้อนจะเกิดขึ้นได้ดีมากในตัวกลางที่เป็นของแข็ง การเคลื่อนที่ของความร้อนแบบการนำเกิดขึ้นในของเหลวและก๊าซ แต่มักจะแยกไม่ออกจากการเคลื่อนที่ของความร้อนแบบการพา ความร้อนเคลื่อนที่โดยการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากจุดที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่อุณหภูมิต่ำ นอกจากนี้อุณหภูมิยังเคลื่อนที่ไปได้โดยการสั่นสะเทือนของโมเลกุลภายในของแข็งในลักษณะของพลังงานของความสั่นสะเทือน (Vibrational energy) อีกด้วย

หลักการคำนวณเกี่ยวกับการนำความร้อนถูกตั้งขึ้นโดย โจเซฟ โฟริเยอร์ (Joseph Fourier) นักวิทยาศาสตร์ชาวฝรั่งเศส โฟริเยอร์ ได้เสนอสมการที่ใช้สำหรับคำนวณอัตราการเคลื่อนที่ของความร้อนโดยการนำ ในปี ค.ศ. 1822 โดยอาศัยข้อมูลจากการทดลองไว้ดังนี้ คือ

$$Q_x = -kA \frac{dT}{dx} \quad (2.6)$$

โดยที่ k คือ ค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) ของสาร ที่ความร้อนเคลื่อนที่ผ่านมีหน่วยเป็น $W/m.K$ ในระบบ SI และ $Btu/ft.hr.^{\circ}F$ ในระบบอังกฤษ A เป็นพื้นที่ที่ตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ของความร้อน dT/dx เป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกับระยะทาง สมการนี้เรียกว่า สมการอัตราส่วนฟูเรียร์ ซึ่งเป็นสมการที่ได้มาโดยอาศัยผลการทดลองจากสมการนี้เราสามารถหาสมการอื่นๆเพื่อให้เป็นประโยชน์ในการคำนวณเกี่ยวกับการเคลื่อนที่ของความร้อนโดยการนำได้ ดังจะได้แสดงให้เห็นต่อไป

การพาความร้อน(Convection)

การพาความร้อน คือวิธีการที่ความร้อนเคลื่อนที่ระหว่างผิวของของแข็งและของไหล ของไหลจะเป็นตัวพาความร้อนมาให้ หรือพาความร้อนจากผิวของของแข็ง กลไกที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของความร้อนโดยการพาได้นั้น เกิดจากผลรวมของการนำความร้อน การสะสมพลังงาน และการเคลื่อนที่ของของไหล การพายังแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดคือ การพาโดยการบังคับ (Forced convection) และการพาตามธรรมชาติ (Natural หรือ Free convection)

การพาโดยการบังคับ (Forced convection) คือการเคลื่อนที่ของความร้อนระหว่างผิวของของแข็งและของไหล โดยที่ของไหลถูกบังคับให้เคลื่อนที่ไปสัมผัสกับผิวของของแข็งโดยกลไกภายนอก เช่น พัดลม หรือเครื่องสูบน้ำ

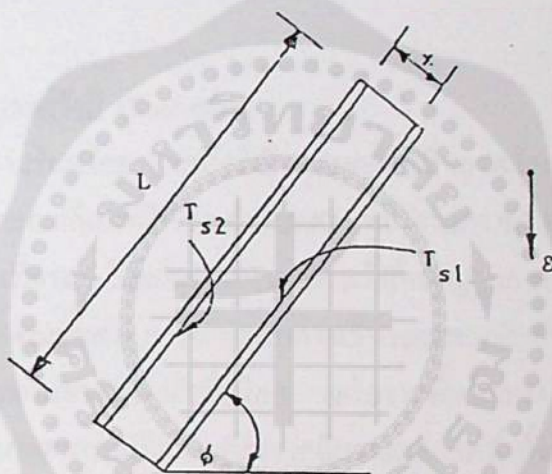
การพาตามธรรมชาติ (Natural หรือ Free convection) คือการเคลื่อนที่ของความร้อนระหว่างผิวของของแข็งและของไหล โดยที่ไม่มีกลไกใด ๆ ที่ทำให้ของไหลเคลื่อนที่ แต่ของไหลที่อยู่ใกล้กับผิวของของแข็งก็อาจเคลื่อนที่ได้โดยแรงลอยตัวของของไหลเอง แรงลอยตัวนี้เกิดจากความแตกต่างของความหนาแน่นของของไหล เมื่อเกิดความแตกต่างของอุณหภูมิในชั้นของของไหลขึ้น

การคำนวณอัตราการเคลื่อนที่ของความร้อนโดยการพานั้นเป็นสิ่งที่ยุ่งยากเมื่อพิจารณาแล้วมีหลายสิ่งหลายอย่างที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ของความร้อนแบบการพา นี้เป็นต้นว่า คุณสมบัติต่าง ๆ ของของไหล เช่น ความหนาแน่น ความร้อนจำเพาะ ความหนืด ฯลฯ ความเร็วของของไหลความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของพื้นผิวของของแข็ง และของไหลเป็นต้น นิวตัน (Newton) ได้ตัดปัญหาความยุ่งยากเหล่านี้ โดยเสนอสมการสำหรับคำนวณอัตราการเคลื่อนที่ของความร้อนโดยการพาดังนี้คือ

$$q = h(T_h - T_c) \quad (2.7)$$

โดยที่ h คือสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (Heat transfer coefficient) ซึ่งได้รวมเอาความยุ่งยากทั้งหมดไว้ ถ้าเราวิธีคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ของการพาความร้อนได้ เราก็คำนวณอัตราการเคลื่อนที่ของความร้อนโดยการพาได้สมการสำหรับคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ของการพาความร้อนส่วนใหญ่จะเป็นสมการชนิดเอมไพริกัล (Empirical equation) h มีหน่วยเป็น $W/m^2.K$ ในระบบ SI และ $Btu/ft^2 \cdot hr. ^\circ F$, q คืออัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ของของแข็งที่สัมผัสกับของไหล T_h คืออุณหภูมิที่ร้อนกว่า (ของของไหล หรือพื้นผิวของของแข็ง) T_c คืออุณหภูมิที่เย็นกว่า (ของของไหล หรือพื้นผิวของของแข็ง)

การพาความร้อนผนังปิดสองชั้นที่ติดตั้งทำมุม



รูปที่ 2.3 ผนังราบปิดสองชั้นที่ติดตั้งทำมุม ϕ กับแนวราบ

การเคลื่อนที่ผนังปิดสองชั้นพบกันมากในปัญหาทางวิศวกรรมทั่วไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีของเครื่องรับพลังงานจากแสงอาทิตย์ (Solar energy collector) El Sherbing, Raithby and Hollands ได้เสนอวิธีการคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังสองชั้น Bayazitoglu and Ozisik ได้เสนอสมการของวิธีดังกล่าวไว้จากการศึกษาพบว่าวิธีการคำนวณนี้ให้ผลใกล้เคียงกับการทดลองมาก โดยเมื่อมุม ϕ อยู่ระหว่าง 0° ถึง 60° สมการที่ใช้คำนวณคือ

$$Nu_\phi = 1 + 1.44 \left[1 - \frac{1708}{Gr_1 Pr \cos \phi} \right] \left[1 - \frac{1708 (\sin \phi)^{1.6}}{Gr_1 Pr \cos \phi} \right] + \left[\left(\frac{Gr_1 Pr \cos \phi}{5830} \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \right] \quad (2.8)$$

โดยที่
$$Gr_1 = \frac{\beta g (T_{s1} - T_{s2}) L^3}{\nu^2}$$

$$Nu_\phi = \frac{hl}{k} = \frac{Ql}{kA(T_{s1} - T_{s2})}$$

สำหรับการพาความร้อนของท่อภายในแผง จะใช้สมการ

$$Gr_l = \frac{\beta g \Delta T L^3}{\nu^2} \quad (2.9)$$

เมื่อ $Gr_l Pr < 10^8$ ได้ $B = 0.47, e = f = 0.25$

$Gr_l Pr < 10^8$ ได้ $B = 1, e = f = 0.33$

โดยที่ $Nu_l = B Gr_l^e Pr^f$

การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสี (Radiation)

การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีเป็นการเคลื่อนที่ของพลังงานความร้อนในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่สามารถเคลื่อนที่ได้เร็วเท่ากับแสง พลังงานความร้อนที่เคลื่อนที่โดยการแผ่รังสีนี้สามารถเคลื่อนที่ผ่านที่ต่าง ๆ ได้แม้กระทั่งในบริเวณที่เป็นสุญญากาศ เช่น การเคลื่อนที่ของความร้อนจากดวงอาทิตย์ที่ผ่านชั้นต่าง ๆ ของบรรยากาศเป็นระยะทางนับล้าน ๆ กิโลเมตร เป็นต้น นอกจากนี้พลังงานที่ส่งจากยานอวกาศมายังพื้นโลก หรือจากพื้นโลกส่งไปยังยานอวกาศที่อยู่วงโคจร ก็เป็นการส่งพลังงานโดยการแผ่รังสีในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทั้งสิ้น

ส่วนทฤษฎีของอนุภาคนั้นได้สมมุติว่าพลังงานจากการแผ่รังสีจะเคลื่อนที่ไปในลักษณะของแพ็คเกจของพลังงาน (Packets of energy) ที่เรียกกันว่า “โฟตอน” (Photon), โฟตอนแต่ละโฟตอนนี้จะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่ากับแสงในระดับของพลังงานที่แตกต่างกันบ้างก็เคลื่อนที่ด้วยระดับพลังงานที่สูงบ้างก็เคลื่อนที่ด้วยระดับพลังงานต่ำ

โฟตอนที่มีความถี่ของคลื่นสูงของคลื่นสูงจะมีพลังงานสูงกว่าโฟตอนที่มีความถี่ของคลื่นต่ำ ดังนั้นเมื่ออิเล็กตรอนอิสระของวัตถุร้อนขึ้น มันก็จะย้ายไปอยู่ในระดับที่มีพลังงานความร้อนสูงขึ้นไป แต่เมื่อมันกลับลงมาระดับพลังงานเดิมของมันแล้ว มันก็จะแพร่โฟตอนที่มีพลังงานเท่ากับความแตกต่างของพลังงานของสองระดับนั้น ปกติแล้วอิเล็กตรอนที่ผิวใด ๆ ของวัตถุส่วนใหญ่จะผ่านการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานมาแล้วทั้งสิ้น ดังนั้นพลังงานที่แพร่ออกไปจากผิวก็จะเป็นพลังงานที่ได้มาจากทุก ๆ ความถี่ของคลื่น พลังงานที่แพร่ออกมาจากวัตถุนี้อาจจะแพร่ออกมาด้วยอำนาจอุณหภูมิของวัตถุ ก้อนนั้น ๆ และมีชื่อเรียกพลังงานดังกล่าวนี้ว่า “ความร้อนจากการแผ่รังสี” (Thermal radiation)

โฟตอนนี้ นอกจากจะแพร่ออกจากผิวได้ด้วยการทำให้ผิวนั้นร้อนขึ้นแล้ว ก็ยังมีวิธีการอื่นๆ อีกมากมาย เช่น โดยการให้ลำอิเล็กตรอนไปตกกระทบกับชั้นโลหะเพื่อผลิตรังสี X ซึ่งเป็นรังสีคลื่นสั้นที่อยู่ทางปลายสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า นอกจากนี้ก็ยังมีคลื่นแม่เหล็กวิทยุ ซึ่งเป็นคลื่นยาวที่ได้มาจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กับผลึกบางชนิด คลื่นวิทยุนี้จะอยู่ทางปลายอีกด้านของสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า คลื่นที่มีความยาวอยู่ในระหว่างรังสี X กับคลื่นวิทยุ นั่นก็คือ คลื่นของการของความร้อนจากแผ่รังสีที่แพร่ออกมาจากวัตถุด้วยอำนาจของอุณหภูมิของวัตถุก้อนนั้น ๆ ช่วงของความยาวคลื่นทั้งหมดนี้มีชื่อเรียกว่า “สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า” (Electro - magnetic spectrum)

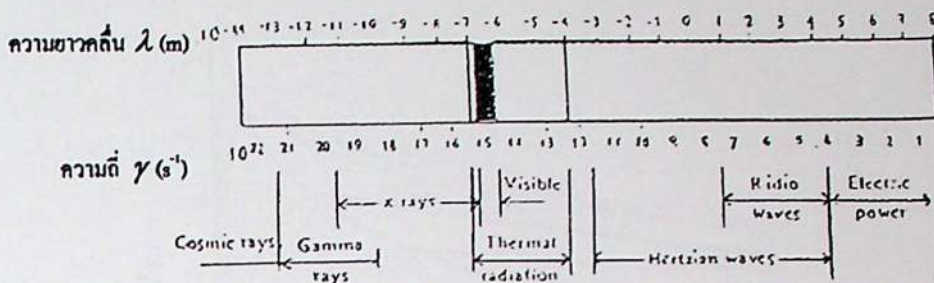
สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านี้แบ่งออกเป็นความยาวคลื่นต่าง ๆ กัน ดังรูปสำหรับความร้อนจากการแผ่รังสีที่แพร่ออกจากผิววัตถุด้วยอำนาจของอุณหภูมินั้นจะมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 10^{-7} m ถึง 10^{-4} m เนื่องจากความร้อนจากการแผ่รังสีนี้มีความสำคัญมาก ดังนั้นจึงควรทราบรายละเอียดของสเปกตรัมในช่วงของความร้อนจากการแผ่รังสีที่อยู่ในรูปเอาไว้ด้วย

ตามนุษย์สามารถรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้เฉพาะในช่วงความยาวประมาณ 3.8×10^{-7} ถึง 7.6×10^{-7} m. ไว้ได้ ส่วนความยาวช่วงอื่นรับไม่ได้เลย ความร้อนจากการแผ่รังสีในช่วงความยาวคลื่นดังกล่าวนี้มีชื่อเรียกว่า “ความร้อนจากการแผ่รังสีที่สามารถมองเห็นได้” (Visible radiation) ช่วงของรังสีที่สามารถมองเห็นได้นี้เป็นเพียงแค่วงรังสีสั้น ๆ ที่อยู่บนสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเท่านั้น และจะอยู่ในช่วงของความยาวคลื่นของความร้อนจากการแผ่รังสีสำหรับหน่วยของความยาวคลื่นนั้นจะมีอยู่หลายหน่วยด้วยกัน คือ

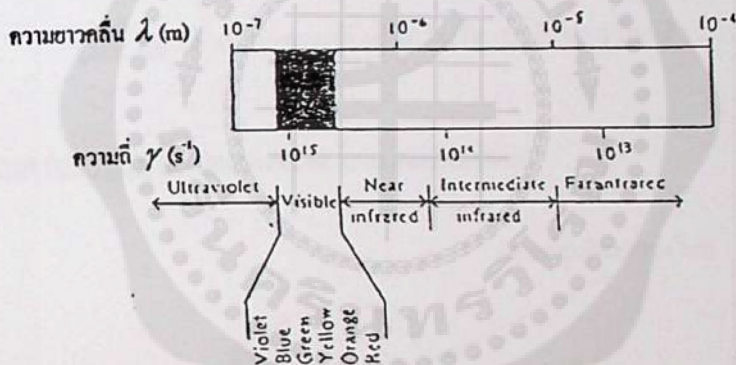
$$1 \text{ \AA} = 1 \text{ อังสตรอม (angstrom)} = 10^{-10} \text{ m.} = 10^{-8} \text{ cm.} = 10^{-4} \mu\text{m}$$

$$1 \mu\text{m} = 1 \text{ ไมโครมิเตอร์ (micrometer)} = 1 \text{ ไมครอน (micron)}$$

$$= 10^{-6} \text{ m} = 10^{-4} \text{ cm.} = 10^4 \text{ \AA}$$



รูปที่ 2.4 สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

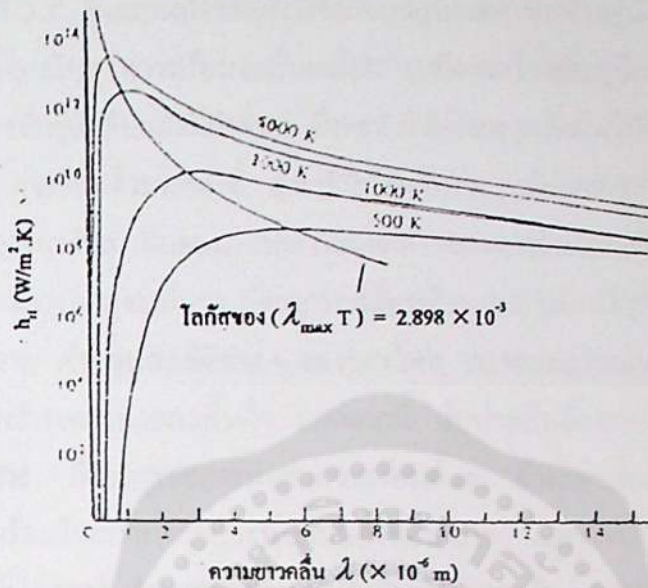


รูปที่ 2.5 สเปกตรัมของแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงของความร้อนจากการแผ่รังสี

ในหัวข้อต่อไปเป็นรายละเอียดทางด้านฟิสิกส์ของความร้อนจากการแผ่รังสี ซึ่งจะนำเอาแนวความคิดของวัตถุดำ ในความหมายเชิงความร้อนการกระจายของพลังงาน เป็นฟังก์ชันของความยาวคลื่นและของอุณหภูมิ

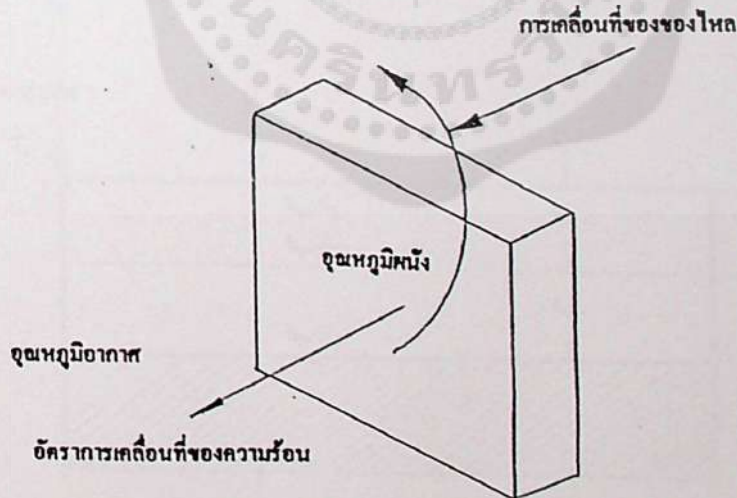
ผิวของวัตถุที่อุณหภูมิเท่า ๆ กันนั้น ไม่จำเป็นว่าจะต้องสามารถแผ่ หรือ ดูดซึมพลังงานความร้อนจากการแผ่รังสีได้เท่า ๆ กัน วัตถุที่สามารถแผ่รังสีและสามารถดูดซึมพลังงานความร้อนได้มากที่สุด เมื่อมีอุณหภูมิเท่า ๆ กันคือ วัตถุที่มีสีดำ หรือที่เรียกกันว่า “วัตถุดำ” (Black body) ในทางปฏิบัตินั้นสามารถที่จะทำวัตถุต่าง ๆ กลายเป็นวัตถุดำได้โดยการเคลือบผิวของวัตถุ หรือไม่ก็ด้วยการดัดแปลงผิวของวัตถุเหล่านั้นเสียใหม่ วัตถุดำเป็นวัตถุมูลฐานที่

สำหรับให้วัตถุอื่นๆ ใช้เป็นตัวเปรียบเทียบดังเช่น ปั๊มและกังหันที่มีเอนทาลปีคงที่ (Isentropic pump and turbine) ที่ใช้สำหรับการเปรียบเทียบในวิชาเทอร์โมไดนามิกส์



รูปที่ 2.6 กำลังการแผ่รังสีโมโนโครเมติกของวัตถุดำ

การพาความร้อนตามธรรมชาติ (Natural or free convection)

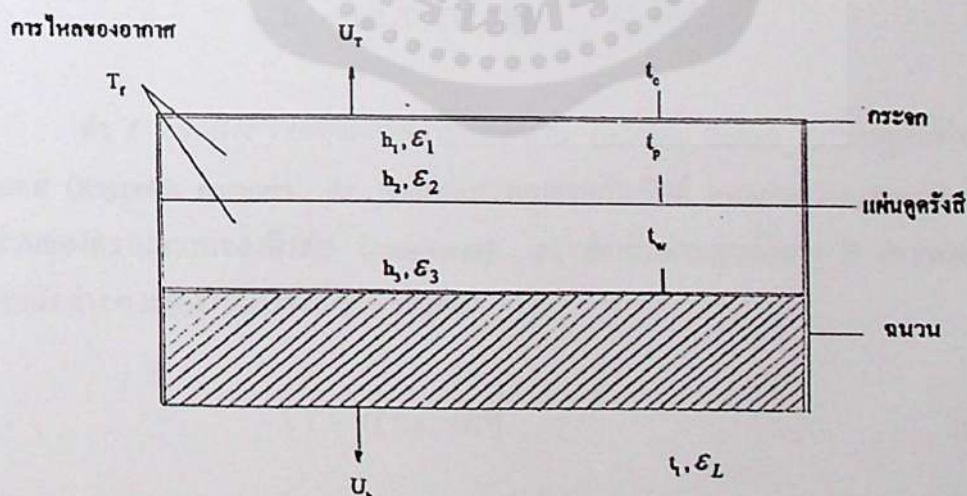


รูปที่ 2.7 การเคลื่อนที่ของความร้อนแบบการพาตามธรรมชาติ จากผนังราบในแนวตั้งมาสู่ของไหล

การเคลื่อนที่ของความร้อนแบบการพาตามธรรมชาติคือการเคลื่อนที่ของความร้อนระหว่างผิวของของแข็ง และของไหล โดยที่ของไหลไม่ถูกทำให้เคลื่อนไหวโดยกลไกภายนอกเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 2.7 ซึ่งแสดงถึงวัตถุซึ่งมีผิวเรียบอยู่ในของไหลซึ่งอยู่นิ่ง ถ้าอุณหภูมิของผิวสูงกว่าอุณหภูมิของของไหล ความร้อนจะเริ่มเคลื่อนที่มายังของไหลที่อยู่ติดกับผนัง ทำให้ความหนาแน่นของของไหลที่อยู่ติดกับผนังมีค่าต่ำลง ซึ่งจะทำให้เกิดแรงผลักดันให้ของไหลลอยตัวขึ้น ของไหลที่อุณหภูมิต่ำกว่าก็จะเข้ามาแทนที่ และทำให้เกิดการหมุนเวียนของการไหลขึ้น จะเห็นได้ว่าการหมุนเวียนของของไหล เป็นผลมาจากความแตกต่างของความหนาแน่นของของไหล

เมื่อพิจารณาจะเห็นว่า อัตราการเคลื่อนที่ของความร้อนในกรณีนี้ ขึ้นอยู่กับปริมาณต่าง ๆ หลายปริมาณ เช่น คุณสมบัติต่าง ๆ ของของไหล ขนาดและลักษณะของของแข็ง อุณหภูมิที่แตกต่างกันระหว่างของไหลและพื้นผิว นอกจากนี้ สัมประสิทธิ์การขยายตัวของสารซึ่งมีผลต่อแรงลอยตัวของสาร ก็ยังมีผลต่อการถ่ายเทความร้อนด้วย ถ้าจะหาสมการมาใช้คำนวณสัมประสิทธิ์การพาความร้อนโดยวิธีการวิเคราะห์จะเป็นสิ่งที่ยากมาก และทำได้ในกรณีที่ง่าย ๆ บางกรณีเท่านั้น สมการที่ใช้สำหรับคำนวณหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อน สำหรับการพาตามธรรมชาติส่วนมากแล้วได้จากการวิเคราะห์เชิงมิติแห่งรังสีที่ใช้อากาศเป็นตัวพาความร้อน

แผงรับรังสีดวงอาทิตย์ คืออุปกรณ์ที่รับรังสีดวงอาทิตย์แล้วเปลี่ยนเป็นความร้อนเพื่อนำไปใช้งาน เช่น แผงรับรังสีของเครื่องอบแห้งจะมีแผ่นดูดรังสีตรงกลาง และมีกระจกเป็นแผ่นปิด มีลักษณะดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ลักษณะแผงรับรังสีที่ใช้อากาศเป็นตัวพาความร้อนและมีแผ่นดูดรังสีตรงกลาง

ตามทฤษฎีที่กล่าวแสดงให้เห็นว่า การสูญเสียพลังงานทางด้านออฟติก และความร้อนจากแผ่นดูดรังสี เป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ประสิทธิภาพของตัวรับรังสีลดลง การเพิ่มประสิทธิภาพของตัวรับรังสีอาจทำได้ตามแนวทางดังต่อไปนี้

1. เพิ่มสภาพส่งผ่านรังสีของแผ่นปิดโปร่งแสง โดยใช้แก้วที่มีความหนาต่ำหรือ ใช้พลาสติกสังเคราะห์ เทคลาร์และไมลาร์ เป็นต้น
2. ลดการสูญเสียเนื่องจากการแผ่ความร้อน โดยให้เลือกสีเคลือบบนแผ่นดูดรังสี เช่น เคลือบด้วยโครมดำ
3. เพิ่มรังสีกระทบบนแผ่นดูดรังสี โดยใช้กระจกผิวโค้งหรือรูปร่างวิเวก

ความดันสูญเสีย

ค่าหัวความดันสูญเสีย (Head losses) จะแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ ได้แก่ ความสูญเสียหลัก (Major losses) ซึ่งเป็นความดันสูญเสีย ที่เกิดจากความเสียดทานระหว่างของไหลที่ไหลในท่อ และผนังท่อ และความสูญเสียรอง (Minor losses) ซึ่งเป็นความดันสูญเสียในขณะที่ของไหลไหลในข้อต่อ, วาล์ว และอุปกรณ์ต่าง รวมทั้งความดันสูญเสียที่เกิดจากการเปลี่ยนขนาดของพื้นที่หน้าตัดในการไหล

ค่าหัวความดันสูญเสียหลัก เป็นผลของความดันสูญเสียขณะที่ของไหลไหลไปในท่อ ด้วยความเร็วเฉลี่ย V ไปตามความยาว L ของท่อ ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง D จะสามารถเขียนในรูป

$$h_L = f(L/D)(V^2/2g) \quad (2.10)$$

ค่า f มีชื่อเรียกว่าแฟคเตอร์ความเสียดทาน (friction factor) จะขึ้นอยู่กับค่าตัวเลขเรย์โนลด์ส (Reynolds number), Re , และค่าความหยาบสัมพัทธ์ (relative roughness) ซึ่งเป็นอัตราส่วนของความหยาบของผิวท่อ (roughness), e , ต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง D (ความหยาบ e ของท่อชนิดต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 2.1) นั่นคือ

$$f = f(Re, e/D) \quad (2.11)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างค่า f ที่มีต่อ Re และ e/D สามารถแสดงในไดอะแกรมมูดี้ (Moody diagram) ดังแสดงในรูปภาคผนวกที่ 3 ลักษณะการไหลของของไหลภายในท่อ ซึ่งแสดงในไดอะแกรมนี้แบ่งออกเป็นการไหลแบบราบเรียบ (laminar flow) และแบบปั่นป่วน (turbulent

flow) ในช่วงการไหลแบบราบเรียบค่าความหยาบสัมพัทธ์ของท่อ ไม่มีผลค่าแฟคเตอร์ความเสียดทาน ค่าความต้านทานระหว่าง f และ Re จะเป็นสมการเส้นตรงในสเกลแบบล็อก-ล็อก (log-log plot) โดย

$$f = 64 / ReD \quad (2.12)$$

เมื่อค่าความหยาบของผิวท่อเพิ่มมากขึ้น การไหลก็จะเปลี่ยนไปเป็นแบบปั่นป่วนได้ง่ายขึ้น และเมื่อเป็นการไหลแบบปั่นป่วนพบว่าค่าความสูญเสีย h_L เป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่า V^2 แทนที่จะเป็นค่า V ดังเช่นการไหลแบบราบเรียบ

ในช่วง Re อยู่ระหว่าง 2000 - 4000 จะเป็นช่วงที่เรียกว่าช่วงวิกฤต (Critical region) ซึ่งลักษณะการไหลของของไหล อาจจะเป็นแบบราบเรียบหรือแบบปั่นป่วน เมื่อค่า Re อยู่ในช่วงวิกฤต ลักษณะการไหลในท่อจะเป็นการไหลแบบปั่นป่วน ซึ่งในช่วงนี้ อาจแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน คือ ในส่วนแรกเรียกว่าช่วงไม่ถาวร (Transition zone) และช่วงที่เป็นการปั่นป่วนโดยสมบูรณ์ (Complete turbulence) ซึ่งในช่วงหลังนี้ค่า f จะขึ้นอยู่กับค่าความหยาบของผิวท่อ โดยไม่ขึ้นกับค่า Re ในช่วงการไหลแบบปั่นป่วนโดยสมบูรณ์และช่วงไม่ถาวรจะแตกต่างกัน ทั้งนี้เนื่องจากในช่วงไม่ถาวรจะมีผลของการต้านทานการไหลเนื่องจากมีแรงเสียดทานแบบเดียวกับที่เกิดในการไหลแบบราบเรียบ (laminar viscous shear) เกิดขึ้นที่ผนังด้วย

ความดันสูญเสียรองเป็นค่าความดันสูญเสียที่เกิดจากการที่ของไหลไหลผ่านข้อต่อของท่อและวาล์วต่าง ๆ ค่าหัวความดันสูญเสียรองสามารถเขียนในรูปคล้ายกับกรณีหัวความดันสูญเสียหลักโดย

$$h_m = KV^2 / 2g \quad (2.13)$$

K คือค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสีย (loss coefficient) ซึ่งค่าดังกล่าวในกรณีของข้อต่อและวาล์วรูปแบบต่าง ๆ รวมทั้งการเปลี่ยนขนาดพื้นที่หน้าตัดของการไหลแสดงในตารางที่ 6 ค่าที่อ่านได้จากตารางนี้ช่วยในการคำนวณความดันสูญเสียอย่างง่าย ๆ ซึ่งในกรณีที่ค่าความดันสูญเสียรองมีค่ามาก อาจจะก่อให้เกิดการคำนวณลักษณะการไหลในท่อผิดพลาด

ลักษณะการต่อท่อ

การต่อท่อจะมีอยู่ 3 ลักษณะด้วยกันได้แก่ การต่อท่อแบบอนุกรม (Pipes in series), การต่อท่อแบบขนาน (Pipes in parallel) และการต่อท่อแบบอนุกรม-ขนาน (Series-Parallel network)

การต่อท่อแบบอนุกรม จะเท่ากับผลรวมของความดันในแต่ละท่อ นั่นคือ

$$W = W_1 = W_2 = \dots \quad (2.14a)$$

$$h_L = h_{L1} + h_{L2} + \dots \quad (2.14b)$$

W คืออัตราการไหลโดยมวลและ h_L คือหัวความดันสูญเสีย

ในการต่อท่อแบบขนาน อัตราการไหลรวมจะเท่ากับผลรวมของอัตราการไหลในแต่ละท่อ โดยที่ค่าความสูญเสียในท่อย่อย แต่ละท่อก็มีค่าเท่ากัน นั่นคือ

$$W = W_1 + W_2 + \dots \quad (2.15a)$$

$$h_L = h_{L1} = h_{L2} = \dots \quad (2.15b)$$

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม

ในกรณีการถ่ายเทความร้อน ระหว่างของไหล ในผนังแบบแผ่น ซึ่งมีอุณหภูมิ T_h และ T_c อัตราการถ่ายเทความร้อน สามารถคำนวณจาก

$$q = UA (T_h - T_c) \quad (2.17)$$

โดย U คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลทั้งสอง ซึ่งคำนวณได้จาก

$$U = 1 / [1/h_1 + L_1/k_1 + L_2/k_2 + L_3/k_3 + 1/h_c] \quad (2.18)$$

เมื่อ L คือความหนาของผนังชั้นต่างๆ, K คือสภาพการนำความร้อน (Thermal conductivity) และ h คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างผนังกับของไหล

ในกรณีที่ผนังบางมาก หรือค่า k มีค่าสูงมาก

$$U = 1 / (1/h_h + 1/h_c) \quad (2.19)$$

จะเห็นได้ว่าค่า U จะมีค่าไม่เกินค่าต่ำระหว่าง h_h และ h_c หรือ (UA) จะมีค่าไม่เกินค่าต่ำสุดของ (hA) นั่นคืออาจกล่าวได้ว่าด้านใดก็ตามที่มีค่า (hA) ต่ำ ด้านนั้นจะเป็นตัวควบคุมอัตราการถ่ายเทความร้อน (Heat transfer control)

ในการเพิ่มค่า (UA) ให้สูงขึ้น เพื่อให้ $q = UA(T_h - T_c)$ มีค่าเพิ่มขึ้นสามารถทำได้โดยการเพิ่มพื้นที่ด้านที่มีค่า (hA) ต่ำ ซึ่งก็คือการใช้ครีป (fins or extended surfaces) ในด้านที่มี (hA) ต่ำ ถ้าติดครีปด้านที่มี (hA) มีค่าสูงจะไม่ก่อให้เกิดประโยชน์อะไร

ความดันสูญเสียในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

การพิจารณาค่าความดันสูญเสีย หรือความดันลด (Pressure drop) ในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนก็เพื่อ

1. เพื่อที่จะสามารถหากำลังงานในการผลักดัน (Pumping power) ให้ของไหลไหลผ่านอุปกรณ์ไปได้

2. อัตราการถ่ายเทความร้อนในอุปกรณ์พวกคอนเดนเซอร์ และอีแวปอเรเตอร์จะขึ้นกับอุณหภูมิอิ่มตัว (Saturation temperature) ซึ่งอุณหภูมินี้ ขึ้นกับค่าความดันอิ่มตัว (Saturation pressure) ดังนั้นถ้ามีค่าความดันสูญเสียเกิดขึ้นมาก จะทำให้ค่าความดันอิ่มตัวเปลี่ยนแปลงไปมาก ซึ่งจะทำให้มีผลต่อการแลกเปลี่ยนความร้อนภายในอุปกรณ์

กำลังงานที่ต้องการในการขับเคลื่อนของไหล P จะแปรผันโดยตรงกับค่าความดันลด Δp ในกระแสน้ำของไหลที่ไหลผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

$$P = wv \Delta P$$

หรือ

$$P = w \Delta P / \rho \quad (2.20)$$

w คืออัตราการไหลโดยมวล (kg/s), v คือ ค่าปริมาตรจำเพาะของของไหล (m^3/kg) และ P คือ กำลังงาน (W) ถ้าค่าความหนาแน่นไม่เปลี่ยนแปลงตามความดันมากนัก จะได้

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 + h_L + h_m \quad (2.21)$$

ρ คือ ค่าความหนาแน่นของของไหล (kg/m^3) ซึ่งเป็นส่วนกลับของปริมาตรจำเพาะ
 ΔP คือ ค่าความดันลดในอุปกรณ์ โดยจากสมการแบร์นูลี

ความดันขับของไหล

ค่าแรงดันขับของไหลจะแปรผันตามค่าความสูงของตัวถังเก็บน้ำ โดยจะแสดงตามสมการการคำนวณดังนี้

$$\Delta p_d = (\rho_{dc} - \bar{\rho}_r) \cdot Hg \quad (2.22)$$

โดย

Δp_d คือความดันขับของไหล

ρ_{dc} คือความหนาแน่นของน้ำขาลง

$\bar{\rho}_r$ คือความหนาแน่นเฉลี่ยของน้ำผสมขาขึ้น

H คือความสูงของถังเก็บน้ำ

บทที่ 3

การคำนวณและออกแบบ

ในการคำนวณและออกแบบแผงรับแสงอาทิตย์ เพื่อต้องการนำเอาพลังงานความร้อนที่ได้จากแผงไปใช้ในการอุ่นน้ำให้น้ำมีอุณหภูมิสูงขึ้นตามต้องการ โดยจะนำน้ำอุ่นที่ได้นี้ไปใช้ประโยชน์ซึ่งจะแบ่งการคำนวณเป็นลำดับขั้นดังนี้

1. การคำนวณปริมาณการใช้น้ำในแต่ละวัน
2. การคำนวณพื้นที่แผงรับแสงอาทิตย์ให้เหมาะสมกับปริมาณความร้อนที่ต้องการ
3. การคำนวณหาปริมาณความร้อนที่สูญเสีย
4. การคำนวณหาความดันที่สูญเสีย

ปริมาณน้ำที่ต้องการใช้

โดยเฉลี่ยในแต่ละคนจะใช้น้ำคนละ 50 ลิตรต่อวัน โดยการออกแบบนี้ได้ออกแบบสำหรับครอบครัวประมาณ 5 คน เพราะฉะนั้นในหนึ่งครอบครัวจะใช้น้ำในแต่ละวันเป็น 250 ลิตร

พื้นที่แผงรับแสงอาทิตย์

สมมติให้ประสิทธิภาพแผง = 100 %

ความเข้มแสงเฉลี่ย = 19.5 MJ/m^2

ถังเก็บน้ำ 250 ลิตร

อุณหภูมิเฉลี่ยของของน้ำ 25°C

ต้องการอุ่นน้ำอุณหภูมิเฉลี่ยเป็น 60°C

$$\text{จาก } Q = mC_p\Delta T$$

$$Q = \text{ความร้อนสะสม (kJ)}$$

$$m = \text{มวล (kg)}$$

$$T_{av} = \text{อุณหภูมิน้ำเฉลี่ยระหว่างทางเข้าและออกจากแผงรับแสงอาทิตย์}$$

$$T_{av} = \frac{60 + 25}{2} = 42.5^\circ\text{C}$$

ที่อุณหภูมิ 42.5 องศาเซลเซียส จากตารางที่ 5 ได้

$$\rho = 993.45 \text{ kg/m}^3$$

$$\tau = 0.9$$

$$C_p = 4.19 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$$

$$\Delta T = (60-25) ^\circ\text{C}$$

$$V = 0.15 \text{ m}^3$$

$$A_c = \text{พื้นที่แผงรับแสงอาทิตย์}$$

$$Q_{\text{แผ่นได้รับจากดวงอาทิตย์}} = Q_{\text{น้ำได้รับ}}$$

$$\tau G A_c \eta = m C_p \Delta T = \rho \bar{V} C_p \Delta T$$

$$A_c = \frac{\rho \bar{V} C_p \Delta T}{\tau G \eta}$$

$$A_c = \frac{(993.45 \text{ kg/m}^3)(0.25 \text{ m}^3)(4.19 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})(60-25) ^\circ\text{C}}{(0.9)(19.5 \times 10^3 \text{ kJ/m}^2)(1)}$$

$$A_c = 2.074 \approx 2 \text{ m}^2$$

การสูญเสียความร้อนในถังเก็บ

ใช้ฉนวนใยแก้วหนา 5 cm หุ้มถังอุณหภูมิอากาศโดยเฉลี่ย 30°C ให้อุณหภูมิในถัง 60°C

$$l_1 = 2 \text{ mm} = 0.002 \text{ m}$$

$$l_2 = 50 \text{ mm} = 0.05 \text{ m}$$

$$k_1 = 51.9 \text{ W/m} \cdot \text{K} \quad \text{จากตารางภาคผนวกที่ 7}$$

$$k_2 = 0.05 \text{ W/m} \cdot \text{K} \quad \text{จากตารางที่ 1 คุณสมบัติของฉนวนใยแก้ว}$$

หาค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนรวม

$$U = \frac{1}{\frac{l_1}{k_1} + \frac{l_2}{k_2}}$$

$$U = \frac{1}{\frac{0.002 \text{ m}}{51.9 \text{ W/m} \cdot \text{K}} + \frac{0.05 \text{ m}}{0.05 \text{ W/m} \cdot \text{K}}}$$

$$U = 1 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

ความร้อนที่สูญเสียออกจากถังเก็บน้ำหุ้มฉนวน

มีถังเก็บน้ำรัศมี

$$r_1 = 0.3 \text{ m}$$

ความสูงของถังเก็บน้ำ

$$h = 0.9 \text{ m}$$

เส้นผ่านศูนย์กลางของถังเก็บน้ำ

$$d_1 = 0.6 \text{ m}$$

หาพื้นที่ผิวของถังเก็บน้ำ

$$A_T = (2\pi r_1 h) + 2\frac{\pi}{4}d_1^2$$

$$A_T = (2\pi \times 0.3\text{m} \times 0.9\text{m}) + (2\frac{\pi}{4} \times (0.6\text{m})^2)$$

$$A_T = 2.26 \text{ m}^2$$

หาปริมาณความร้อนที่สูญเสียออกจากถัง

$$\dot{Q}_{\text{loss}} = UA_T (T_i - T_o)$$

$$\dot{Q}_{\text{loss}} = (1 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}) (2.26 \text{ m}^2) (60 - 30)^\circ\text{C}$$

$$\dot{Q}_{\text{loss}} = 67.8 \text{ J/s}$$

1 ชั่วโมงจะได้

$$Q_{\text{loss}} = 67.8 \times 3600 = 244080 \text{ J} = 244.08 \text{ kJ}$$

$$Q_{\text{accum}} = \rho \bar{V} c_p \Delta T$$

$$= \rho (\pi r^2 L) c_p (\Delta T)$$

$$= 998 \text{ kg/m}^3 \pi (0.3\text{m})^2 (0.9\text{m}) (4.19 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}) (60 - 30)^\circ\text{C}$$

$$= 31922.78 \text{ kJ}$$

เมื่อผ่านไป 1 ชั่วโมง Q_{accum} จะเหลือ $31922.78 - 244.08 = 31678.7 \text{ kJ}$

อุณหภูมิจะเปลี่ยนไปเมื่อผ่านไป 1 ชม

$$Q_{\text{accum}} = \rho \bar{V} c_p \Delta T$$

$$31678.7 \text{ kJ} = 998 \text{ kg/m}^3 \pi (0.3\text{m})^2 (0.9\text{m}) (4.19 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}) (T - 30)$$

$$T = 59.77^\circ\text{C}$$

ดังนั้นใน 1 ชั่วโมงอุณหภูมิจะลดลง $60 - 59.771 = 0.229^\circ\text{C} \approx 0.23^\circ\text{C}$

อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำจะได้ $\frac{60 + 25}{2} = 42.5^\circ\text{C}$, อุณหภูมิของผิวท่อ 70°C

อุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างน้ำ & ท่อ $\frac{42.5 + 70}{2} = 56.25^\circ\text{C} = 329.25 \text{ K}$

ค่าต่าง ๆ ของน้ำที่อุณหภูมิ 56.25°C จากตารางภาคผนวกที่ 5 ได้

$$\rho = 987.172 \quad \text{kg/m}^3 \quad C_p = 4.1832 \quad \text{kJ/kg.K}$$

$$\nu = 0.5118 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \quad k = 0.6467 \quad \text{W/m.K}$$

$$\text{Pr} = 3.2675 \quad \beta = \frac{1}{329.25} \quad \text{K}^{-1}$$

$$\text{Gr} = \frac{l^3 \Delta T \beta g}{\nu^2} = \frac{(1\text{m})^3 (27.5\text{K}) (9.81\text{m/s}^2)}{329.25 \text{K} (0.5118 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s})^2}$$

$$\text{Gr} = 3.128 \times 10^{12}$$

$$\text{Gr Pr} = 1.022 \times 10^{13}, \text{Gr}_c \text{Pr}_c > 10^8, \text{ได้ } B = 0.1, e = f = 0.33$$

จาก $\bar{Nu} = \frac{\bar{h}l}{k} = BG_m^e \text{Pr}_m^f$ (สำหรับท่อที่มีรัศมีไม่มาก)

$$\frac{\bar{h}(1\text{m})}{0.6467 \text{W/m.K}} = 0.1(1.022 \times 10^{13})^{0.33}$$

$$\bar{h} = 1270.09 \text{ W/m}^2\text{K}$$

สัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างท่อเหล็กกับน้ำ คือ 1270.09 W/m²K

ปริมาณความร้อนที่น้ำได้รับจากแผงคือ

$$\begin{aligned} \dot{Q}_a &= \bar{h} A (T_p - T_{av}) \\ &= 1270.09 (2\pi \times 0.01)(1)(70 - 42.5) \\ &= 2194.56 \text{ W} \\ &= 2.195 \text{ kW} \end{aligned}$$

จากกฎข้อ 1 $\dot{Q} = \dot{m}(h_c - h_i) + \dot{m}g(Z_c - Z_i)$

จากตารางภาคผนวกที่ 4 ได้

$$h_c = h_{\text{น้ำ}} = 251.13 \text{ kJ/kg}$$

$$h_i = h_{\text{น้ำ}} = 104.89 \text{ kJ/kg}$$

$$Z_c - Z_i = 1 \sin 14^\circ = 0.242 \text{ m}$$

$$2.195 \text{ kJ/s} = \dot{m} (251.13 - 104.89) \text{ kJ/kg} + \dot{m} (9.81 \text{ m/s}^2) \frac{(0.242 \text{ m})}{1000}$$

$$\dot{m} = \frac{2.195}{146.24} = 0.015 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m} = \rho A V, \quad V = \frac{\dot{m}}{\rho A}$$

$$V = \frac{0.015 \text{ kg/s}}{(987.172 \text{ kg/m}^3) \pi (0.01 \text{ m})^2}$$

$$= 0.0484 \text{ m/s}$$

$$Re = \frac{Vd}{\nu}$$

$$Re = \frac{0.0484 \text{ m/s} (0.02 \text{ m})}{0.5118 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}}$$

$$Re = 1891.36$$

ค่า $Re < 2000$ แสดงว่าเป็นการไหลแบบราบเรียบ

การสูญเสียความร้อนด้านบนและล่างของแผง

$$\text{จาก} \quad \frac{1}{U_t} = \frac{1}{h_{tpc} + h_{pc}} + \frac{1}{h_{rca} + h_{ca}}$$

โดย $h_{ca} = 0$ เนื่องจากให้อากาศด้านบนอยู่นิ่ง

$$T_c = 42^\circ\text{C} = 315 \text{ K}, \quad T_p = 70^\circ\text{C} = 343 \text{ K},$$

จากตารางภาคผนวกที่ 2 ได้ $\epsilon_p = 0.28, \epsilon_g = 0.94$

หาค่า

$$h_{tpc} = \frac{\sigma(T_p^2 + T_c^2)(T_p + T_c)}{(1/\epsilon_p) + (1/\epsilon_g) - 1}$$

$$= \frac{5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4 (343^2 + 315^2) \text{ K}^2 (343 + 315) \text{ K}}{(1/0.28) + (1/0.94) - 1}$$

$$= \frac{8.09}{3.64}$$

$$= 2.22 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

$$h_{rca} = \epsilon_g \sigma (T_c^2 + T_a^2)(T_c + T_a)$$

$$= 0.94 (5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4) (315^2 + 303^2) \text{ K}^2 (315 + 303) \text{ K}$$

$$= 6.29 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

อุณหภูมิเฉลี่ยระหว่าง plate กับ cover $= \frac{70+42}{2} = 56^{\circ}\text{C} = 329\text{ K}$

นำค่าอุณหภูมิที่ 56°C เป็นคุณสมบัติของอากาศ

จากตารางภาคผนวกที่ 3

$$\rho = 1.073 \quad \text{kg/m}^3 \quad C_p = 1.0076 \text{ kJ/kg.K}$$

$$\mu = 2.036 \times 10^{-5} \text{ kg/m.s} \quad k = 0.02844 \text{ W/m.K}$$

$$\text{Pr} = 0.70162 \quad \beta = \frac{1}{T} = \frac{1}{329} = 3.0395 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$$

$$\text{Ra}_L = \frac{g \rho^2 (\Delta T) L^3 \text{Pr} \beta}{\mu^2}$$

$$\text{Ra}_L = \frac{9.81 \text{ m/s}^2 (1.073 \text{ kg/m}^3)^2 (343 - 315) \text{ K} (0.025 \text{ m})^3 (0.70162)}{329 \text{ K} (2.036 \times 10^{-5} \text{ kg/m.s})^2}$$

$$\text{Ra}_L = 25421.26$$

จาก
$$\text{Nu}_L = 1 + 1.44 \left[1 - \frac{1708}{\text{Ra}_L \cos \theta} \right] \left\{ 1 - \frac{1708 (\sin 1.80)^{1.6}}{\text{Ra}_L \cos \theta} \right\} + \left[\left[\frac{\text{Ra}_L \cos \theta}{5830} \right]^{1/3} - 1 \right]$$

$$\begin{aligned} \text{Nu}_L &= 1 + 1.44 \left[1 - \frac{1708}{25421.26 \cos 14} \right] \left\{ 1 - \frac{1708 (\sin 25.2)^{1.6}}{25421.26 \cos 14} \right\} + \left[\left[\frac{25421.26 \cos 14}{5830} \right]^{1/3} - 1 \right] \\ &= 1 + 1.44(0.931)(0.982) + 0.61 \end{aligned}$$

$$\text{Nu}_L = 2.927$$

หาค่า
$$h_{pc} = \frac{\text{Nu} K}{L} = \frac{2.927 (0.02844 \text{ W/m.K})}{0.025 \text{ m}}$$

$$h_{pc} = 3.33 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

$$\frac{1}{U_T} = \frac{1}{(2.22 + 3.33) \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}} + \frac{1}{6.29 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}}$$

$$\frac{1}{U_T} = 0.34 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

$$U_T = 2.95 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

จากความต้านทาน $\frac{1}{U_b} = \frac{l}{k} + \frac{1}{h_{rb} + h_b}$

$h_b = 0$ เนื่องจากให้อากาศได้แผงอยู่นิ่ง

สมมุติอุณหภูมิฉนวน $T_s = 30^\circ\text{C}$

$$\begin{aligned} h_{rb} &= \epsilon_p \sigma (T_s^2 + T_a^2)(T_s + T_a) \\ &= 0.28(5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4)(303^2 + 303^2) \text{ K}^2 (303 + 303) \text{ K} \\ &= 1.77 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \end{aligned}$$

$$\frac{1}{U_b} = \frac{0.05 \text{ m}}{0.05 \text{ W/m} \cdot \text{K}} + \frac{1}{1.77 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}}$$

$$\frac{1}{U_b} = 1.56 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

$$U_b = 0.64 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนด้านล่าง $0.64 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$

$$T_s = T_a + \frac{U_b(T_p - T_a)}{h_{rb} + h_b}$$

$$T_s = 303 \text{ K} + \frac{0.64 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}(343 - 303) \text{ K}}{1.77 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}} = 317.46 \text{ K}$$

สมมุติ

$$T_s = 317.46 \text{ K} = 44.46^\circ\text{C}$$

$$h_{rb} = 0.28(5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4)(317.46^2 + 303^2) \text{ K}^2 (317.46 + 303) \text{ K}$$

$$h_{rb} = 1.9 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

$$\frac{1}{U_b} = \frac{0.05 \text{ m}}{0.05 \text{ W/m} \cdot \text{K}} + \frac{1}{1.9 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}}$$

$$\frac{1}{U_b} = 1.526 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

$$U_b = 0.66 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

$$T_s = 303 \text{ K} + \frac{0.66 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}(343 - 303) \text{ K}}{1.9 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}} = 316.89 \text{ K}$$

สมมุติ

$$T_s = 316.89 \text{ K} = 43.89^\circ\text{C}$$

$$h_{rb} = 0.28(5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4)(316.89^2 + 303^2) \text{ K}^2 (316.89 + 303) \text{ K}$$

$$h_b = 1.89 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

$$\frac{1}{U_b} = \frac{0.05 \text{ m}}{0.05 \text{ W/m} \cdot \text{K}} + \frac{1}{1.89 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}}$$

$$\frac{1}{U_b} = 1.53 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

$$U_b = 0.65 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

$$T_i = 303 + \frac{0.65 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} (343 - 303) \text{ K}}{1.89 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}} = 316.76 \text{ K} = 43.76^\circ \text{C}$$

สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนรวม

$$\begin{aligned} U_L &= U_T + U_b \\ &= (2.95 + 0.65) \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \\ &= 3.6 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \end{aligned}$$

อัตราการสูญเสียความร้อนด้านบน

$$\begin{aligned} Q_T &= U_T A (T_p - T_a) \\ &= 2.95 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} (2 \text{ m}^2) (343 - 303) \text{ K} \\ &= 236 \text{ W} \end{aligned}$$

อัตราการสูญเสียความร้อนด้านล่าง

$$\begin{aligned} Q_b &= U_b A (T_p - T_a) \\ &= 0.65 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} (2 \text{ m}^2) (343 - 303) \text{ K} \\ &= 52 \text{ W} \end{aligned}$$

อัตราการสูญเสียความร้อนรวม

$$Q_L = Q_T + Q_b = 288 \text{ W}$$

ท่อจำนวน 45 ท่อต่อขนานกันในแผงรับแสงอาทิตย์

ความยาวท่อจากแผงไปยังถัง 1.55 m (L_b)

ความยาวท่อจากถังไปยังแผง 3.12 m (L_a)

การสูญเสียความดันภายในท่อ

cast iron $\epsilon = 0.26 \text{ mm}$ (ค่าความขรุขระ)

$$\frac{\epsilon}{d} = \frac{0.26}{20} = 0.013$$

$$Re = 1891.36$$

$$V = 0.0484 \text{ m/s}$$

$$f = \frac{64}{Re} = \frac{64}{1891.36} = 0.034$$

$$h_L = f \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{v^2}{2g} = 0.03 \left(\frac{1\text{m}}{0.02\text{m}} \right) \left(\frac{(0.0484\text{m/s})^2}{2 \times 9.81\text{m/s}^2} \right) = 2.03 \times 10^{-4} \text{ m}$$

$$= 2.03 \times 10^{-4} \text{ m}$$

การต่อท่อขนาน $\Delta h_{\text{tot}} = \Delta h_1 = \Delta h_2 = \Delta h_3 = \dots \Delta h_{45} = 2.03 \times 10^{-4} \text{ m}$

$$\dot{m}_{\text{tot}} = \dot{m}_1 + \dot{m}_2 + \dot{m}_3 + \dots + \dot{m}_{45} = 45(0.015) = 0.675 \text{ kg/s}$$

$$\therefore \dot{m}_{\text{tot}} = \dot{m}_B = 0.675 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_B = \rho A V_B$$

$$0.675 \text{ kg/s} = 987.172 \text{ kg/m}^3 \pi (0.01 \text{ m})^2 V_B$$

$$V_B = 2.177 \text{ m/s}$$

$$Re = \frac{Vd}{\nu} = \frac{2.177 \text{ m/s} (0.02 \text{ m})}{(0.5118 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s})} = 85072.29 > 2000 \text{ (turbulent)}$$

จาก Moody chart $\frac{\epsilon}{d} = 0.013$, $Re = 85072.29$

จะได้ $f = 0.047$

(ท่อ A)
$$h_L = 0.047 \left(\frac{3.12 \text{ m}}{0.02 \text{ m}} \right) \left(\frac{(2.117 \text{ m/s})^2}{2 \times 9.81 \text{ m/s}^2} \right) = 1.675 \text{ m}$$

(ท่อ B)
$$h_L = f \frac{L}{d} \cdot \frac{V_B^2}{2g} = 0.047 \left(\frac{1.515 \text{ m}}{0.02 \text{ m}} \right) \left(\frac{(2.117 \text{ m/s})^2}{2 \times 9.81 \text{ m/s}^2} \right) = 0.813 \text{ m}$$

$$V_A = V_B = 2.117 \text{ m/s}$$

คิดค่า h_L ของระบบ

$$\begin{aligned} \Delta h_{\text{tot}} &= \Delta h_{LA} + \Delta h_{LC} + \Delta h_{LB} \\ &= 1.675 + (2.03 \times 10^{-4}) + 0.813 \\ &= 2.488 \text{ m} \end{aligned}$$

จำนวนข้อต่อชนิดต่าง ๆ ที่นำมาใช้

45° regular 3 ตัว

90° regular 1 ตัว

180° regular 4 ตัว

Tees : Line flow 1 ตัว

ท่อร่วมทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ให้ใช้เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก

ความกว้างของท่อ (a) คือ 2 m

ความสูงของท่อ (b) คือ 0.03 m

$$d_h = \frac{2ab}{(a+b)}$$

$$d_h = 2 \frac{(2m \times 0.03m)}{(2+0.03m)}$$

$$d_h = 0.0295 \text{ m}$$

ใช้อัตรา d/d_h เพื่อไปหาค่า K จากรูปภาคผนวกที่ 1 และ 2

$$1. \frac{d}{d_h} = \frac{2}{2.95} = 0.6779 \quad K = 0.12 \text{ (sudden expansion)}$$

$$2. \frac{d}{d_h} = \frac{2}{2.95} = 0.6779 \quad K = 0.14 \text{ (sudden contraction)}$$

$$3. \frac{d}{d_h} = \frac{2}{2.95} = 0.6779 \quad K = 0.12 \text{ (sudden expansion)}$$

$$4. \frac{d}{d_h} = \frac{2}{2.95} = 0.6779 \quad K = 0.14 \text{ (sudden contraction)}$$

สัมประสิทธิ์การสูญเสียที่ทางออก = 1 สัมประสิทธิ์การสูญเสียที่ทางเข้า = 0.5

สัมประสิทธิ์การสูญเสียที่ข้อต่อชนิดต่าง ๆ จากตารางภาคผนวกที่ 6

Loss	K
Sharp entrance	0.5
90° regular	1.5
45° regular	$0.32(3) = 0.96$
180° regular	$0.72(4) = 2.88$

Tee : line flow	0.9
(1) Sudden expansion	0.12
(2) Sudden contraction	$0.14(45) = 6.3$
(3) Sudden expansion	$0.12(45) = 5.4$
(4) Sudden contraction	0.14
Sharp exit	1
	$\Sigma K = 19.70$

$$\Sigma h_m = \frac{v^2}{2g} \Sigma K$$

$$V_{av} = \frac{0.0484 + 2(2.117)}{3} = 1.427 \text{ m/s}$$

$$\Sigma h_m = \frac{(1.427 \text{ m/s})^2}{2(9.81 \text{ m/s}^2)} (19.70) = 1.432 \text{ m}$$

กิตทั้งระบบ

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 + \Sigma h_L + \Sigma h_m$$

$$\frac{P_1 - P_2}{\rho g} = Z_2 - Z_1 + \Sigma h_L + \Sigma h_m$$

$$\frac{P_1 - P_2}{\rho g} = 0.25 \text{ m} + 2.488 \text{ m} + 1.432 \text{ m}$$

$$= 4.17 \text{ m}$$

$$P_1 - P_2 = 4.17 \text{ m} (9.81 \text{ m/s}^2) (998 \text{ kg/m}^3) = 40.825 \text{ kPa}$$

$$\text{ความดันลด} = 40.825 \text{ kPa}$$

กำลังในการขับเคลื่อนของไหล

$$P = \frac{\dot{m} \Delta P}{\rho}$$

$$P = \frac{(0.675 \text{ kg/s} \times 98.707 \text{ kPa})}{998 \text{ kg/m}^3}$$

$$P = 66.76 \text{ W}$$

การสูญเสียความร้อนที่ท่อส่งน้ำ

ท่อน้ำจากถังเข้าสู่แผงรับแสงอาทิตย์ยาว 3.12 เมตร

ท่อน้ำจากแผงรับแสงอาทิตย์เข้าสู่ถังยาว 1.515 เมตร

ความยาวท่อส่งน้ำรวม $3.12 + 1.515 = 4.635$ เมตร

โดยอุณหภูมิของท่อส่งน้ำมีค่า 60°C , อุณหภูมิอากาศ 30°C

คุณสมบัติของน้ำที่อุณหภูมิ 60°C จากภาคผนวก ก.ตารางที่ 5

$$\rho = 985.46 \text{ kg/m}^3 \quad \text{Pr} = 3.02$$

$$C_p = 4.1843 \text{ kJ/(kg.K)} \quad \nu = 0.478 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$k = 0.625 \text{ W/(m.K)}$$

$$\begin{aligned} \text{Re} &= \frac{Vd}{\nu} \\ &= \frac{(2.177 \text{ m/s})(0.02 \text{ m})}{(0.478 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s})} \\ &= 9.10 \times 10^4 \end{aligned}$$

พบว่า $\text{Re} > 2000$ แสดงว่าเป็นการไหลแบบปั่นป่วน

นำ Re ไปหาค่าแพพเทิลนัมเบอร์ (Pr)

$$\begin{aligned} \text{Pr} &= \frac{\mu C_p}{k} = \frac{\rho \nu C_p}{k} \\ \text{Pr} &= \frac{(985.46 \text{ kg.m}^{-3})(0.478 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s})(4.1843 \text{ kJ/kg.K})(10^3)}{(0.625 \text{ W/m.K})} \\ \text{Pr} &= 3.15 \end{aligned}$$

นำค่า Pr หาค่านอสเซลนัมเบอร์ (Nu)

$$\text{Re} > 10^4, 0.7 < \text{Pr} < 17000, L/d > 60$$

$$\text{Nu} = 0.023 \text{Re}^{0.8} \text{Pr}^n \quad (\text{ให้ } n = 0.4 \text{ เพราะของไหลร้อนขึ้น})$$

$$\text{Nu} = 0.023(9.10 \times 10^4)^{0.8} (3.15)^{0.4}$$

$$\text{Nu} = 337.5$$

นำค่า Nu ไปหาค่าการพาความร้อน (h)

$$\frac{hd}{k} = \text{Nu}$$

$$h = \frac{(337.5 \times 0.625 \text{ m})}{(0.02 \text{ W/m.K})}$$

$$h = 10546.88 \text{ W/m}^2\text{K}$$

การสูญเสียความร้อนจากการนำและการพาความร้อนของท่อส่งน้ำหุ้มฉนวน

$$\begin{aligned}
 Q &= \frac{T_i - T_o}{\frac{1}{2\pi r_o L h} + \frac{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{2\pi k L}} \\
 &= \frac{(60 - 30)^\circ\text{C}}{\frac{1}{(2\pi \times 0.06\text{m} \times 4.635\text{m} \times 10546.88\text{W/m}^2\cdot\text{K})} + \frac{\ln\left(\frac{0.06}{0.01}\right)}{(2\pi \times 0.625\text{W/m}\cdot\text{K} \times 4.635\text{m})}} \\
 &= 304.59 \text{ J/s}
 \end{aligned}$$

ความร้อนที่สูญเสียออกจากท่อส่งน้ำหุ้มฉนวนทั้งหมด 304.59 J/s

การสูญเสียความร้อนในท่อร่วมหุ้มฉนวน

$$\begin{aligned}
 \text{จาก } Re &= \frac{V d_h}{\nu} \\
 Re &= \frac{(2.177\text{m/s} \times 0.0295\text{m})}{(0.478 \times 10^{-6}\text{m}^2/\text{s})} \\
 Re &= 134354.6
 \end{aligned}$$

ค่า $Re > 4000$ แสดงว่าเป็นการไหลแบบบอลลูน

$$\begin{aligned}
 Pr &= \frac{\mu C_p}{k} = \frac{\rho \nu C_p}{k} \\
 Pr &= \frac{(985.46\text{kg/m}^3)(0.478 \times 10^{-6}\text{m}^2/\text{s})(4.1843\text{kJ/kg}\cdot\text{K})(10^3)}{(0.625\text{W/m}\cdot\text{K})}
 \end{aligned}$$

$$Pr = 3.15$$

$$Nu = 0.037 Re^{\frac{4}{5}} Pr^{\frac{1}{3}}$$

$$Nu = 0.037 \times 134354.6^{\frac{4}{5}} \times 3.15^{\frac{1}{3}}$$

$$Nu = 686.92$$

$$\frac{h d}{k} = Nu$$

$$\bar{h} = \left(\frac{686.92 \times 0.625}{0.0295} \right)$$

$$\bar{h} = 14553.38 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$$

$$Q = \frac{T_i - T_o}{\frac{1}{2\pi r_o l h} + \frac{\ln \frac{r_o}{r_i}}{2\pi k l}}$$

$$Q = \frac{(60 - 30)}{\frac{1}{(2\pi \times 0.0795 \times 0.03 \times 14553.38)} + \frac{\ln(\frac{0.0795}{0.0295})}{(2\pi \times 0.625 \times 0.03)}}$$

$$Q = 3.563 \text{ J/s}$$

เนื่องจากมีท่อร่วมหุ้มฉนวน 2 ท่อ จึงสูญเสียความร้อนไป $3.563 \times 2 = 7.126 \text{ J/s}$

ความดันขับของไหลในระบบ

$$\Delta p_d = (\rho_{dc} - \bar{\rho}_r) \cdot Hg$$

$$\Delta p_d = (999.04 \text{ kg/m}^3 - 993.45 \text{ kg/m}^3)(1.55 \text{ m})(9.81 \text{ m/s}^2)$$

$$\Delta p_d = 85 \text{ Pa}$$

ความดันขับของไหลในระบบคือ 85 Pa

บทที่ 4

อุปกรณ์ วิธีทดลอง และผลการทดลอง

อุปกรณ์การทดลอง

1. แผงรับแสงอาทิตย์
2. เทอร์โมมิเตอร์วัดอุณหภูมิ (0-100)°C
3. เครื่องวัดอุณหภูมิแบบดิจิตอล (เทอร์โมคัปเปิล type K)
4. ถังเก็บน้ำปริมาตร 250 ลิตร

วิธีการทดลอง

ทำการเติมน้ำเข้าสู่ระบบโดยให้ตัวแผงรับแสงอาทิตย์ดูดกลืนคลื่นความร้อน แล้วทำการเก็บข้อมูลต่างๆทุก 5 นาที สำหรับการเก็บข้อมูลจะเริ่มทำตั้งแต่ 8.00น.-18.00 น. โดยจะทำการบันทึกข้อมูลที่ตำแหน่งต่างๆดังนี้

1. ที่อุณหภูมิภายในถัง
2. ที่อุณหภูมิผิวท่อภายในแผงรับแสง
3. ที่อุณหภูมิผิวกระจก
4. ที่อุณหภูมิน้ำทางเข้าแผง
5. ที่อุณหภูมิน้ำทางออกแผง
6. ที่อุณหภูมิบรรยากาศ

ค่าตัวแปรต่างๆที่ได้จากการทดลองโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์

- | | |
|----------------------------|------------------|
| 1. อุณหภูมิบรรยากาศ | (T_a) |
| 2. อุณหภูมิน้ำก่อนเข้าแผง | (T_{in}) |
| 3. อุณหภูมิน้ำออกจากแผง | (T_{out}) |
| 4. อุณหภูมิกระจก | (T_g) |
| 5. อุณหภูมิภายในถังเก็บน้ำ | (T_T) |
| 6. อุณหภูมิผิวท่อในแผง | ($T_{p,tube}$) |

ค่าตัวแปรต่างๆที่ได้จากการคำนวณจากการทดลองโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์

1. ความร้อนที่น้ำได้รับจากแผงรับแสงอาทิตย์ (Q)
2. อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำที่แผงรับแสงอาทิตย์ ($\dot{m}$)
3. ความเร็วของน้ำที่แผงรับแสงอาทิตย์ (V)



ผลการทดลอง

ตารางที่ 2 แสดงผลการทดลองโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ วันที่ 29 มีนาคม พ.ศ 2542

เวลา	T_{p-av}	T_C	T_T	T_a	T_{out}	T_{in}
8.00	28.33	27.00	27.00	28.00	29.00	27.00
8.05	29.00	27.00	27.00	29.00	30.00	27.50
8.10	30.67	28.00	27.00	29.00	31.50	27.50
8.15	31.00	28.50	27.50	30.00	33.00	28.50
8.20	31.67	28.50	28.00	30.00	33.50	28.50
8.25	32.00	29.00	28.50	31.00	34.00	28.50
8.30	33.33	29.50	29.00	33.00	35.00	29.00
8.35	33.83	29.50	29.00	33.50	36.00	29.50
8.40	34.00	30.00	29.50	34.00	36.50	31.00
8.45	34.83	31.50	30.00	34.50	37.50	31.50
8.50	36.00	33.00	30.50	35.00	38.50	32.50
8.55	37.00	34.00	31.00	35.00	40.50	32.50
9.00	37.83	35.00	31.50	36.00	42.00	33.00
9.05	39.00	36.00	32.00	36.00	42.00	34.00
9.10	40.33	37.00	32.50	36.00	42.00	35.00
9.15	41.83	38.00	33.00	37.00	42.00	35.50
9.20	43.17	39.00	34.00	37.00	43.00	36.00
9.25	45.50	39.50	35.00	37.00	43.00	37.00
9.30	46.67	40.00	35.50	38.00	44.00	38.00
9.35	48.50	41.00	36.00	39.00	45.00	39.00
9.40	50.17	42.00	37.00	40.00	46.00	39.00
9.45	51.50	43.00	37.50	40.00	48.00	39.00
9.50	53.33	44.00	38.00	41.00	49.00	39.50
9.55	54.50	45.00	39.00	42.00	50.00	39.50

ตารางที่ 2 แสดงผลการทดลองโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ วันที่ 29 มีนาคม พ.ศ 2542 (ต่อ 2)

เวลา	T_{p-av}	T_c	T_r	T_a	T_{out}	T_{in}
10.00	55.67	46.50	40.00	42.00	52.00	40.00
10.05	57.17	47.00	41.00	42.00	53.00	40.50
10.10	57.97	47.50	41.50	41.00	54.00	40.50
10.15	58.33	48.00	42.00	42.00	54.50	41.00
10.20	59.50	49.00	42.50	41.00	56.00	42.00
10.25	60.50	49.50	43.00	40.50	57.00	42.00
10.30	61.17	50.00	43.00	41.00	58.00	42.50
10.35	61.50	51.00	43.50	42.00	59.00	43.00
10.40	62.33	51.50	44.00	43.00	60.50	44.00
10.45	63.33	52.00	44.00	42.00	61.00	44.50
10.50	64.50	53.00	45.00	43.00	61.50	46.00
10.55	66.00	53.00	45.50	42.00	62.00	47.00
11.00	66.17	53.50	46.00	42.00	63.00	47.50
11.05	67.00	54.00	47.00	42.00	63.00	47.50
11.10	68.33	54.00	47.50	41.00	63.00	48.00
11.15	68.83	53.00	48.00	41.50	64.00	48.50
11.20	69.67	54.00	48.50	42.00	65.00	49.00
11.25	70.50	54.00	49.00	43.00	65.50	49.50
11.30	70.83	54.00	49.00	43.00	66.00	49.50
11.35	71.50	54.00	49.50	42.00	66.50	49.50
11.40	71.50	54.50	49.50	42.00	66.50	49.50
11.45	71.83	54.00	50.00	41.00	67.00	50.00
11.50	72.00	54.00	51.00	38.00	67.00	50.00
11.55	69.33	52.00	51.00	37.00	67.50	50.00
12.00	69.17	51.00	51.00	37.00	68.00	50.50

ตารางที่ 2 แสดงผลการทดลองโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ วันที่ 29 มีนาคม พ.ศ 2542 (ต่อ 3)

เวลา	T_{p-av}	T_c	T_T	T_n	T_{out}	T_{in}
12.05	68.17	50.00	51.00	36.00	67.00	50.50
12.10	68.50	48.00	51.00	37.00	67.50	50.00
12.15	68.17	48.00	51.50	37.00	67.50	50.50
12.20	64.50	45.00	51.50	35.00	67.00	50.00
12.25	64.33	46.00	51.50	35.00	67.50	50.00
12.30	65.50	46.00	52.00	36.50	67.50	51.00
12.35	66.50	46.50	52.00	38.00	67.50	51.50
12.40	66.17	46.50	52.50	38.00	68.00	52.00
12.45	66.83	47.00	52.50	38.00	68.00	52.00
12.50	67.33	48.00	53.00	40.00	69.00	52.00
12.55	67.83	49.00	53.50	40.00	69.00	52.00
13.00	68.67	50.00	53.50	41.00	69.50	52.50
13.05	68.33	50.50	53.50	40.50	69.50	52.50
13.10	68.67	50.00	54.00	41.00	69.50	53.00
13.15	67.67	49.00	54.00	42.00	69.50	54.00
13.20	67.00	48.00	54.00	40.00	70.00	55.00
13.25	67.67	49.00	55.50	41.00	70.00	55.50
13.30	68.00	50.00	55.50	42.00	70.50	55.50
13.35	68.50	52.00	56.00	43.00	71.00	56.00
13.40	70.00	53.00	56.00	43.00	71.00	56.00
13.45	71.33	54.00	57.00	44.00	71.00	56.50
13.50	72.83	54.50	57.00	45.00	71.50	57.00
13.55	74.00	54.50	57.00	44.00	71.50	57.00
14.00	74.50	55.00	57.50	43.00	71.50	57.50
14.05	74.00	55.00	57.50	42.00	71.00	57.50
14.10	73.83	54.50	58.00	42.00	70.50	57.00

ตารางที่ 2 แสดงผลการทดลองโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ วันที่ 29 มีนาคม พ.ศ 2542 (ต่อ 4)

เวลา	$T_{p,av}$	T_c	T_T	T_s	T_{out}	T_{in}
14.15	73.33	54.00	58.00	41.00	69.50	56.50
14.20	72.33	53.50	58.00	40.00	69.00	55.00
14.25	71.17	53.00	58.50	40.00	69.00	55.00
14.30	70.50	52.50	58.50	39.50	68.50	54.50
14.35	70.00	52.50	59.00	39.50	67.50	54.00
14.40	68.67	51.50	59.00	39.00	66.00	54.00
14.45	68.00	51.00	59.00	39.00	65.50	54.00
14.50	67.33	50.50	59.50	38.50	64.50	53.00
14.55	66.83	50.00	59.50	38.00	62.50	53.00
15.00	65.50	51.00	59.50	37.00	61.50	52.50
15.05	65.00	51.00	59.50	37.00	60.50	52.50
15.10	64.17	51.00	59.50	36.00	59.00	51.50
15.15	63.50	50.00	59.50	35.00	58.50	51.00
15.20	63.00	49.50	59.50	36.00	57.50	51.00
15.25	62.67	49.00	59.50	35.00	56.50	50.50
15.30	61.67	48.00	59.50	36.00	56.00	50.00
15.35	60.83	48.00	59.50	35.00	55.00	49.00
15.40	58.50	46.50	59.50	34.00	53.00	47.50
15.45	57.17	46.00	59.50	34.00	52.00	46.50
15.50	56.00	45.00	59.50	34.00	51.50	46.00
15.55	55.17	45.00	59.00	34.00	50.50	45.00
16.00	54.33	44.00	59.00	33.00	49.00	44.00
16.05	53.00	44.00	59.00	35.00	49.00	44.00
16.10	52.33	43.00	59.00	35.00	49.00	43.50
16.15	51.00	43.00	59.00	35.00	48.50	43.50
16.20	50.16	43.00	59.00	34.00	47.00	42.00
16.25	49.17	42.00	59.00	34.00	46.00	42.00

ตารางที่ 2 แสดงผลการทดลองโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ วันที่ 29 มีนาคม พ.ศ 2542 (ต่อ 5)

เวลา	$T_{p,av}$	T_c	T_T	T_s	T_{out}	T_{in}
16.30	48.17	42.00	59.00	34.00	45.00	42.00
16.35	47.00	40.00	59.00	33.00	44.00	40.00
16.40	45.83	40.00	59.00	32.00	43.00	40.00
16.45	45.17	39.00	59.00	32.00	42.00	39.00
16.50	44.33	38.00	59.00	31.00	41.00	37.50
16.55	43.50	36.00	59.00	30.00	40.00	36.00
17.00	42.67	35.00	59.00	29.50	39.00	35.50
17.05	41.83	35.00	59.00	29.50	38.00	34.50
17.10	41.33	34.00	58.50	29.00	37.50	34.50
17.15	40.67	34.00	58.50	29.00	37.50	34.50
17.20	40.00	33.00	58.50	28.50	37.50	34.50
17.25	39.67	33.00	58.50	28.50	37.00	33.00
17.30	39.00	33.00	58.50	28.50	37.00	33.00
17.35	38.67	33.00	58.50	28.50	36.50	33.00
17.40	38.33	32.50	58.50	28.00	36.00	32.00
17.45	38.00	32.50	58.50	28.00	36.00	31.50
17.50	37.33	32.00	58.50	28.00	36.00	31.00
17.55	37.00	31.50	58.50	28.00	35.00	31.00
18.00	36.50	31.00	58.50	28.00	34.00	31.00

ตารางที่ 3 แสดงผลการทดลองโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ วันที่ 30 มีนาคม พ.ศ 2542

เวลา	$T_{p,av}$	T_c	T_T	T_a	T_{out}	T_{in}
8.00	29.50	27.00	52.00	27.00	31.00	28.00
8.05	29.50	27.50	52.00	27.00	31.00	28.50
8.10	30.00	28.00	52.00	28.00	31.50	29.50
8.15	30.50	28.00	52.00	28.00	31.50	29.50
8.20	31.00	28.00	52.00	29.50	32.00	29.50
8.25	32.67	29.00	52.00	32.00	33.00	30.00
8.30	34.17	30.50	53.00	33.50	34.00	31.00
8.35	34.83	31.00	53.00	33.50	34.50	31.50
8.40	35.67	31.50	53.00	33.50	35.00	32.00
8.45	37.00	32.50	53.00	34.00	36.00	32.50
8.50	38.50	34.00	53.50	35.00	37.50	33.00
8.55	40.17	34.00	53.50	35.00	39.00	34.00
9.00	41.50	36.00	54.00	35.50	41.00	35.00
9.05	43.83	38.00	54.00	37.00	43.00	36.00
9.10	46.33	39.00	55.00	37.00	45.00	37.00
9.15	48.33	41.00	55.00	38.00	47.00	37.50
9.20	50.33	41.00	55.00	39.00	48.50	38.00
9.25	52.83	43.00	55.00	39.50	51.00	38.00
9.30	55.17	44.00	55.00	39.50	52.00	38.00
9.35	57.00	45.00	56.00	39.50	53.50	38.50
9.40	58.33	46.00	56.00	39.50	54.50	39.50
9.45	58.67	46.00	56.00	39.50	55.00	40.00
9.50	58.67	46.00	56.00	40.00	56.00	41.00
9.55	58.67	48.00	56.00	40.50	56.50	41.00
10.00	59.00	49.00	56.00	42.00	57.00	41.00
10.05	60.00	47.00	55.00	40.00	57.00	42.50

ตารางที่ 3 แสดงผลการทดลองโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ วันที่ 30 มีนาคม พ.ศ 2542 (ต่อ 2)

เวลา	T_{p-ay}	T_c	T_r	T_a	T_{out}	T_{in}
10.10	61.67	49.00	55.00	40.00	58.00	43.50
10.15	62.00	49.50	56.00	41.00	59.00	43.50
10.20	63.67	50.00	56.00	40.00	59.50	44.00
10.25	64.33	51.00	56.00	41.50	60.50	44.50
10.30	64.83	51.00	56.00	41.00	61.00	45.00
10.35	65.67	50.00	56.00	40.00	61.50	45.50
10.40	66.33	52.00	56.00	41.00	63.00	46.00
10.45	67.00	51.00	57.00	41.00	63.00	46.50
10.50	67.33	53.00	57.00	43.00	63.50	46.50
10.55	67.67	53.00	57.00	42.50	64.00	47.00
11.00	68.33	54.00	57.00	43.50	64.50	47.50
11.05	69.33	54.00	57.00	42.50	65.00	48.50
11.10	69.67	55.00	57.50	44.00	66.00	48.50
11.15	70.33	54.00	58.00	42.50	66.00	49.00
11.20	70.33	53.00	58.00	42.50	66.50	49.50
11.25	70.67	54.00	58.00	42.00	67.00	49.50
11.30	70.67	53.00	58.00	42.00	67.00	49.50
11.35	70.33	50.00	57.00	42.00	67.50	50.00
11.40	71.33	55.00	58.00	43.50	68.00	50.50
11.45	72.17	56.00	59.00	43.50	68.00	50.50
11.50	72.50	56.00	59.50	43.00	68.50	50.50
11.55	71.67	54.00	58.00	43.50	68.50	51.00
12.00	72.17	56.00	59.00	45.00	69.00	51.50
12.05	72.50	53.50	59.50	43.00	69.00	51.50
12.10	73.17	55.50	60.50	43.50	69.00	51.50
12.15	73.00	55.50	60.50	43.00	69.00	51.50
12.20	73.83	35.50	61.00	43.50	69.50	52.00

ตารางที่ 3 แสดงผลการทดลองโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ วันที่ 30 มีนาคม พ.ศ 2542 (ต่อ 3)

เวลา	$T_{p,av}$	T_c	T_T	T_a	T_{out}	T_{in}
12.25	74.50	57.00	61.50	45.00	70.50	52.00
12.30	74.83	58.00	62.00	45.00	70.50	52.00
12.35	75.17	58.50	62.00	45.00	71.00	52.00
12.40	75.33	58.50	62.50	45.00	71.00	52.00
12.45	75.17	57.50	62.50	44.00	71.00	52.00
12.50	74.67	57.50	62.50	44.00	71.00	53.00
12.55	75.00	56.00	63.00	44.00	71.00	53.00
13.00	74.67	57.00	63.00	44.00	71.00	53.50
13.05	75.00	58.00	63.00	45.00	71.00	53.50
13.10	75.00	57.50	63.50	45.00	71.00	54.00
13.15	75.33	57.00	64.00	44.00	71.00	54.00
13.20	75.33	56.00	64.00	44.00	71.00	54.00
13.25	75.33	58.50	64.00	46.00	71.00	54.00
13.30	76.50	57.50	64.50	45.00	71.50	54.50
13.35	76.33	58.00	64.50	45.00	71.50	55.00
13.40	76.00	58.00	65.00	46.00	72.00	55.00
13.45	74.50	58.00	65.00	45.00	72.50	55.00
13.50	73.67	54.50	65.00	44.00	71.00	55.00
13.55	74.67	58.00	65.00	48.00	71.00	55.00
14.00	75.17	58.00	65.00	48.00	71.50	55.00
14.05	75.33	58.00	65.00	47.00	71.50	56.00
14.10	75.17	57.50	65.50	47.00	71.50	56.00
14.15	75.67	58.00	65.50	46.00	71.50	56.00
14.20	76.00	59.00	65.50	45.00	72.00	56.00
14.25	76.00	59.00	65.50	45.00	72.00	56.50
14.30	76.67	59.00	66.00	44.00	72.50	56.50
14.35	76.67	60.00	66.00	45.00	72.50	56.50

ตารางที่ 3 แสดงผลการทดลองโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ วันที่ 30 มีนาคม พ.ศ 2542 (ต่อ 4)

เวลา	T_{p-av}	T_c	T_T	T_a	T_{out}	T_{in}
14.40	77.00	60.00	66.00	43.00	72.50	56.50
14.45	77.50	60.00	66.00	43.00	72.50	56.50
14.50	77.17	60.00	66.00	41.00	72.00	56.50
14.55	77.17	59.50	66.00	40.00	72.00	57.00
15.00	75.50	59.00	66.00	40.00	70.00	55.00
15.05	73.17	59.00	66.00	39.00	68.00	54.00
15.10	71.50	59.50	66.00	39.00	67.00	53.00
15.15	70.00	58.00	66.00	39.00	66.00	52.00
15.20	68.67	58.00	66.00	38.00	65.00	51.00
15.25	67.67	57.00	66.00	38.00	64.00	50.00
15.30	66.33	56.00	66.00	38.00	63.00	49.00
15.35	65.00	55.00	65.50	37.50	62.00	48.00
15.40	63.83	54.00	65.50	37.00	61.00	47.00
15.45	63.17	53.00	65.50	37.00	60.00	46.00
15.50	61.83	52.00	65.50	38.00	59.00	45.00
15.55	61.00	50.00	65.50	38.00	58.00	44.00
16.00	60.00	50.00	65.50	38.00	56.00	42.00
16.05	58.33	50.00	65.50	37.50	54.00	41.00
16.10	57.33	49.00	65.50	37.00	52.00	40.00
16.15	56.50	48.00	65.50	37.00	51.00	39.00
16.20	55.17	47.00	65.50	36.00	50.00	38.00
16.25	53.83	47.00	65.50	35.00	49.00	37.00
16.30	52.83	46.00	65.50	35.50	49.00	36.00
16.35	52.00	46.00	65.00	35.00	48.50	35.00
16.40	51.00	45.00	65.00	35.50	48.50	34.00
16.45	50.17	44.00	65.00	35.00	48.50	34.00
16.50	49.67	43.00	65.00	35.00	47.50	34.00

ตารางที่ 3 แสดงผลการทดลองโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ วันที่ 30 มีนาคม พ.ศ 2542 (ต่อ 5)

เวลา	T_{p-av}	T_c	T_T	T_a	T_{out}	T_{in}
16.55	49.33	42.00	65.00	34.00	46.50	33.00
17.00	48.67	41.00	65.00	34.00	46.00	33.00
17.05	48.17	40.00	65.00	34.00	45.50	33.00
17.10	46.5	40.00	65.00	34.00	44.00	32.00
17.15	45.67	39.00	65.00	34.00	43.00	32.00
17.20	44.33	38.00	65.00	33.00	42.00	31.50
17.25	43.50	38.00	65.00	33.00	42.00	31.50
17.30	43.00	37.00	65.00	33.00	42.00	31.50
17.35	42.33	36.00	65.00	32.00	40.50	31.00
17.40	41.67	35.00	64.50	32.00	40.00	31.00
17.45	41.17	34.00	64.50	31.00	40.00	31.00
17.50	40.83	33.00	64.50	31.00	39.00	31.00
17.55	40.33	32.00	64.50	31.00	38.00	31.00
18.00	40.00	31.00	64.50	31.00	37.00	30.00

ตารางที่ 4 แสดงผลการทดลองโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ วันที่ 31 มีนาคม พ.ศ 2542

เวลา	$T_{p,av}$	T_c	T_T	T_s	T_{out}	T_{in}
8.00	30.00	28.00	58.00	29.00	32.00	29.00
8.05	31.00	28.50	58.00	30.00	32.00	29.00
8.10	31.50	29.50	58.00	31.50	33.00	29.50
8.15	32.50	29.50	58.00	31.50	33.50	29.50
8.20	33.50	30.00	58.00	32.00	34.00	29.50
8.25	34.83	30.00	58.00	32.00	35.00	30.00
8.30	35.33	31.00	58.00	33.00	36.00	31.00
8.35	36.17	31.50	58.00	33.00	36.50	31.00
8.40	37.00	32.00	58.00	33.00	37.00	31.50
8.45	38.00	32.00	58.00	34.00	37.50	32.00
8.50	38.83	33.00	58.00	34.00	38.00	32.00
8.55	40.00	34.00	58.00	34.00	39.00	33.00
9.00	42.17	35.00	58.50	35.00	41.00	33.50
9.05	43.83	36.50	58.50	36.50	43.00	34.00
9.10	45.67	38.00	58.50	37.00	45.00	35.00
9.15	47.33	40.00	58.50	37.50	47.00	36.50
9.20	49.83	41.00	59.00	39.00	49.50	38.00
9.25	52.00	43.00	59.00	39.00	51.00	38.00
9.30	54.17	44.00	59.50	39.50	52.00	38.50
9.35	57.00	45.00	60.00	40.00	54.50	39.00
9.40	58.67	45.00	60.00	40.00	55.00	40.00
9.45	59.50	46.00	60.50	40.00	55.50	40.00
9.50	60.17	46.50	60.50	40.50	57.00	40.50
9.55	60.33	47.50	60.50	41.00	57.50	41.00
10.00	61.00	49.00	61.00	41.50	58.50	42.00
10.05	62.00	49.00	61.50	41.00	59.00	43.50
10.10	62.33	48.50	62.00	40.00	59.00	43.50

ตารางที่ 4 แสดงผลการทดลองโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ วันที่ 31 มีนาคม พ.ศ 2542 (ต่อ 2)

เวลา	T_{p-av}	T_c	T_T	T_a	T_{out}	T_{in}
10.15	63.00	48.00	62.00	40.00	59.00	43.00
10.20	64.33	49.00	62.50	40.00	60.00	43.50
10.25	65.17	50.00	63.00	41.50	60.50	44.00
10.30	66.67	50.00	63.00	41.50	61.00	45.00
10.35	67.67	51.00	63.00	42.00	62.00	45.50
10.40	68.33	51.00	63.00	42.00	63.00	47.00
10.45	69.00	52.00	63.50	42.00	64.00	48.00
10.50	70.33	52.00	63.50	42.00	64.00	48.00
10.55	70.33	51.00	63.50	41.00	64.00	48.00
11.00	71.00	51.00	64.00	41.00	65.50	48.00
11.05	72.83	51.00	64.00	42.00	66.00	48.50
11.10	74.17	52.00	64.00	42.50	67.50	49.00
11.15	75.33	53.00	64.50	43.00	69.00	49.50
11.20	76.67	53.00	64.50	43.00	70.00	49.50
11.25	77.33	54.00	65.00	44.00	70.50	49.50
11.30	78.00	54.00	65.00	43.00	70.50	49.00
11.35	78.67	55.00	65.00	43.50	70.50	49.00
11.40	79.33	56.00	65.00	43.50	71.00	49.50
11.45	80.00	57.00	65.00	43.00	71.00	49.50
11.50	80.83	57.00	65.50	43.00	71.50	50.50
11.55	80.83	56.00	65.50	42.00	71.50	50.00
12.00	80.83	56.00	65.50	43.00	71.50	50.00
12.05	81.00	56.00	65.50	44.00	71.50	49.50
12.10	81.50	56.00	65.50	44.00	72.00	50.00
12.15	79.67	53.00	65.50	41.00	72.00	49.00
12.20	80.00	54.00	65.50	42.00	72.00	49.00
12.25	80.33	54.00	65.50	42.00	72.00	49.50

ตารางที่ 4 แสดงผลการทดลองโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ วันที่ 31 มีนาคม พ.ศ 2542 (ต่อ 3)

เวลา	$T_{p,av}$	T_C	T_T	T_a	T_{out}	T_{in}
12.30	80.33	54.00	66.00	43.00	72.00	49.50
12.35	81.00	54.00	66.00	43.50	72.00	50.50
12.40	81.00	54.00	66.00	43.00	72.50	51.00
12.45	81.00	53.00	66.00	43.00	72.50	51.50
12.50	81.33	53.00	66.00	43.50	72.50	52.00
12.55	81.50	53.00	66.00	43.50	72.50	52.00
13.00	81.67	53.00	66.50	43.00	72.00	52.00
13.05	81.50	53.00	66.50	43.00	72.00	52.50
13.10	81.33	53.00	66.50	43.00	72.50	53.50
13.15	81.67	54.00	66.50	44.00	72.50	53.50
13.20	81.67	54.00	66.50	44.00	72.50	54.00
13.25	82.00	54.00	66.50	44.00	72.50	54.00
13.30	82.00	53.50	67.00	44.00	73.00	54.00
13.35	82.33	53.50	67.00	44.50	73.00	55.00
13.40	82.67	54.00	67.00	45.00	73.50	55.00
13.45	82.67	54.00	67.00	45.00	73.50	56.50
13.50	83.33	55.00	67.50	46.00	74.00	57.00
13.55	83.33	55.00	67.50	46.00	74.50	58.00
14.00	84.67	56.00	67.50	46.00	74.50	58.50
14.05	85.50	56.00	67.50	46.00	75.00	58.50
14.10	86.00	56.00	68.00	45.00	75.00	59.00
14.15	86.00	55.00	68.00	45.00	75.00	59.00
14.20	85.33	54.00	68.00	43.00	74.50	58.00
14.25	84.67	54.00	68.00	43.00	74.50	58.00
14.30	84.33	54.00	68.00	44.00	75.00	58.00
14.35	84.00	53.00	68.00	44.00	75.00	59.00
14.40	84.67	53.50	68.00	43.00	74.00	58.00

ตารางที่ 4 แสดงผลการทดลองโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ วันที่ 31 มีนาคม พ.ศ 2542 (ต่อ 4)

เวลา	$T_{p,av}$	T_c	T_T	T_a	T_{out}	T_{in}
14.45	84.33	52.00	68.00	42.00	74.00	58.00
14.50	82.00	50.00	68.00	39.00	73.00	55.00
14.55	80.00	49.00	68.00	38.50	72.00	54.00
15.00	79.33	48.50	68.00	37.00	71.50	52.00
15.05	78.00	46.50	68.00	37.80	71.00	52.50
15.10	76.67	46.00	68.00	36.50	69.50	50.50
15.15	74.33	46.00	68.00	37.00	69.00	49.00
15.20	72.50	45.00	67.50	37.00	68.00	48.50
15.25	71.33	45.00	67.50	37.00	68.00	48.00
15.30	71.00	45.00	67.50	37.00	68.50	47.50
15.35	70.50	45.00	67.50	37.50	67.00	47.00
15.40	70.00	45.00	67.50	37.50	67.00	46.50
15.45	69.33	43.00	67.50	37.00	67.00	45.50
15.50	69.83	42.00	67.50	37.00	67.00	44.00
15.55	69.67	40.50	67.50	37.00	66.50	43.50
16.00	68.33	40.00	67.50	36.50	64.50	43.00
16.05	64.67	40.00	67.50	36.50	63.00	43.00
16.10	64.00	38.50	67.50	36.50	62.50	40.00
16.15	63.00	38.50	67.50	37.00	60.00	40.00
16.20	62.50	38.00	67.50	36.00	59.50	39.50
16.25	61.50	37.00	67.50	36.00	58.00	38.50
16.30	60.00	36.50	67.50	35.00	56.00	38.50
16.35	59.00	36.50	67.50	35.00	55.50	37.00
16.40	58.50	36.00	67.50	35.00	54.00	36.50
16.45	58.00	36.00	67.50	35.00	53.50	36.50
16.50	57.50	35.00	67.50	34.00	52.00	36.50
16.55	57.00	35.00	67.50	34.00	51.50	36.00

ตารางที่ 4 แสดงผลการทดลองโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ วันที่ 31 มีนาคม พ.ศ 2542 (ต่อ 5)

เวลา	T_{ray}	T_c	T_r	T_a	T_{out}	T_{in}
17.00	56.00	35.00	67.50	33.50	51.00	36.00
17.05	55.00	35.00	67.50	33.50	50.50	36.00
17.10	54.00	34.00	67.50	33.50	49.00	36.00
17.15	53.00	34.00	67.00	33.50	48.00	36.50
17.20	52.00	33.00	67.00	32.50	47.50	36.00
17.25	51.00	32.50	67.00	31.00	46.00	35.50
17.30	50.00	32.50	67.00	30.50	45.50	35.50
17.35	48.00	32.50	67.00	30.50	44.00	35.50
17.40	47.00	32.00	67.00	29.50	43.00	34.00
17.45	45.00	32.00	67.00	29.50	42.00	33.50
17.50	43.00	32.00	67.00	29.00	41.00	33.00
17.55	41.50	32.00	67.00	29.00	40.00	32.00
18.00	39.50	31.00	67.00	29.00	39.00	32.00

ตารางที่ 5 แสดงการคำนวณผลการทดลอง วันที่ 29/03/42

เวลา	Q_c (W)	$\dot{m}_c$ (kg/s) $\times 10^{-2}$	V_c (m/s) $\times 10^{-2}$
8.00 – 9.00	8.855	0.0367	0.171
9.00 – 10.00	282.240	0.7910	2.550
10.00 – 11.00	527.380	1.1680	3.770
11.00 – 12.00	738.570	1.0800	3.480
12.00 – 13.00	418.520	0.6014	1.940
13.00 – 14.00	407.498	0.6330	2.050
14.00 – 15.00	541.480	1.0760	3.490
15.00 – 16.00	440.642	1.6700	5.380
16.00 – 17.00	248.460	1.4900	4.790
17.00 – 18.00	179.980	1.1450	3.660

ตารางที่ 6 แสดงการคำนวณผลการทดลองวันที่ 30/03/42

เวลา	Q_c (W)	$\dot{m}_c$ (kg/s) $\times 10^{-3}$	V_c (m/s) $\times 10^{-2}$
8.00 – 9.00	64.470	0.375	1.20
9.00 – 10.00	432.334	0.808	2.59
10.00 – 11.00	691.860	1.040	3.37
11.00 – 12.00	783.417	1.090	3.54
12.00 – 13.00	837.020	1.130	3.65
13.00 – 14.00	827.755	1.170	3.81
14.00 – 15.00	788.448	1.220	3.95
15.00 – 16.00	654.494	1.120	3.62
16.00 – 17.00	501.055	1.010	3.25
17.00 – 18.00	330.320	0.790	2.54

ตารางที่ 7 แสดงการคำนวณผลการทดลองวันที่ 31/03/42

เวลา	$Q_c(W)$	$\dot{m}_i (kg/s) \times 10^{-2}$	$V_i (m/s) \times 10^{-2}$
8.00 – 9.00	55.18	0.0024	0.0230
9.00 – 10.00	363.24	0.0059	0.0189
10.00 – 11.00	625.33	0.0095	0.0310
11.00 – 12.00	1175.91	0.0128	0.0415
12.00 – 13.00	1513.47	0.0166	0.0541
13.00 – 14.00	1270.79	0.0167	0.0542
14.00 – 15.00	1338.29	0.0187	0.0609
15.00 – 16.00	884.63	0.0105	0.0341
16.00 – 17.00	765.61	0.0105	0.0339
17.00 – 18.00	472.92	0.0010	0.0324

ตัวอย่างการคำนวณจากผลการทดลอง

ที่เวลา 8.00

$$T_{p,av} = 28.33$$

$$T_{out} = 29$$

$$T_m = 27$$

$$T_{sv} = \frac{27 + 29}{2} = 28^\circ C$$

$$T_{sv} \text{ ระหว่างผิวท่อ \& น้ำ} = \frac{28.33 + 28}{2} = 28.165^\circ C = 301.165^\circ K$$

ค่าคุณสมบัติต่างๆ ของน้ำที่อุณหภูมิ $28.165^\circ C$

$$\rho = 998.1 \text{ kg/m}^3$$

$$C_p = 4.1804 \text{ kJ/kg}^\circ C$$

$$\nu = 0.8639 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\beta = \frac{1}{301.165} \text{ K}^{-1}$$

$$G_n = \frac{l^3 \rho^2 \Delta T \beta g}{\mu^2} = \frac{l^3 \Delta T \beta g}{\nu^2}$$

$$G_n = \frac{l^3 (301.33 - 301.165) K (9.81 \text{ m/s}^2)}{301.165 K (0.8639 \times 10^{-6})^2 \text{ m}^4/\text{s}^2} = 7.2 \times 10^9$$

$$G_n P_n = 4.267 \times 10^{10}$$

$$G_n P_n > 10^8 \text{ ได้ } c = f = 0.33, B = 0.1$$

$$\begin{aligned}\bar{N}u_e &= B Gr_e^a Pr_e^f \\ \frac{h(1m)}{0.61W/m.K} &= 0.1(4.267 \times 10^{10})^{0.33} \\ \bar{h} &= 196.458 W/m^2K \\ \dot{Q} &= \bar{h} A (T_p - T_{\infty}) \\ &= 196.458 W/m^2K (2\pi)(0.01m)(1m)(301.33-301)K \\ \dot{Q} &= 4.037 W\end{aligned}$$

1st Law of Thermodynamic

$$\dot{Q} = \dot{m}(h_e - h_i) + \dot{m}g(Z_e - Z_i)$$

$$\Delta Z = \sin 14^\circ = 0.242 m$$

จากตารางภาคผนวกที่ 4 ได้

$$h_e = h_{e@27^\circ C} = 121.61 \text{ kJ/kg}$$

$$h_i = h_{i@27^\circ C} = 113.25 \text{ kJ/kg}$$

จากกฎข้อ 1

$$4.073 \times 10^{-3} \text{ kW} = \dot{m} (121.61 - 113.25) \text{ kJ/kg} + \dot{m} (9.81)(0.242)$$

$$4.073 \times 10^{-3} \text{ kW} = \dot{m} (10.8)$$

$$\dot{m} = 3.77 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$$

$$\dot{m} = \rho A V$$

$$3.77 \times 10^{-4} \text{ kg/s} = 998.1 \text{ kg/m}^3 (\pi \times 0.01^2) m^2 V$$

$$V = 1.2 \times 10^{-3} \text{ m/s}$$

ประสิทธิภาพของแผง

จากการทดลองในวันที่ 30 มีนาคม ช่วงเวลา 8.00-18.00 น. อุณหภูมิน้ำเริ่มต้น $28^\circ C$
ทำน้ำอุ่นได้ อุณหภูมิเฉลี่ย $57.58^\circ C$

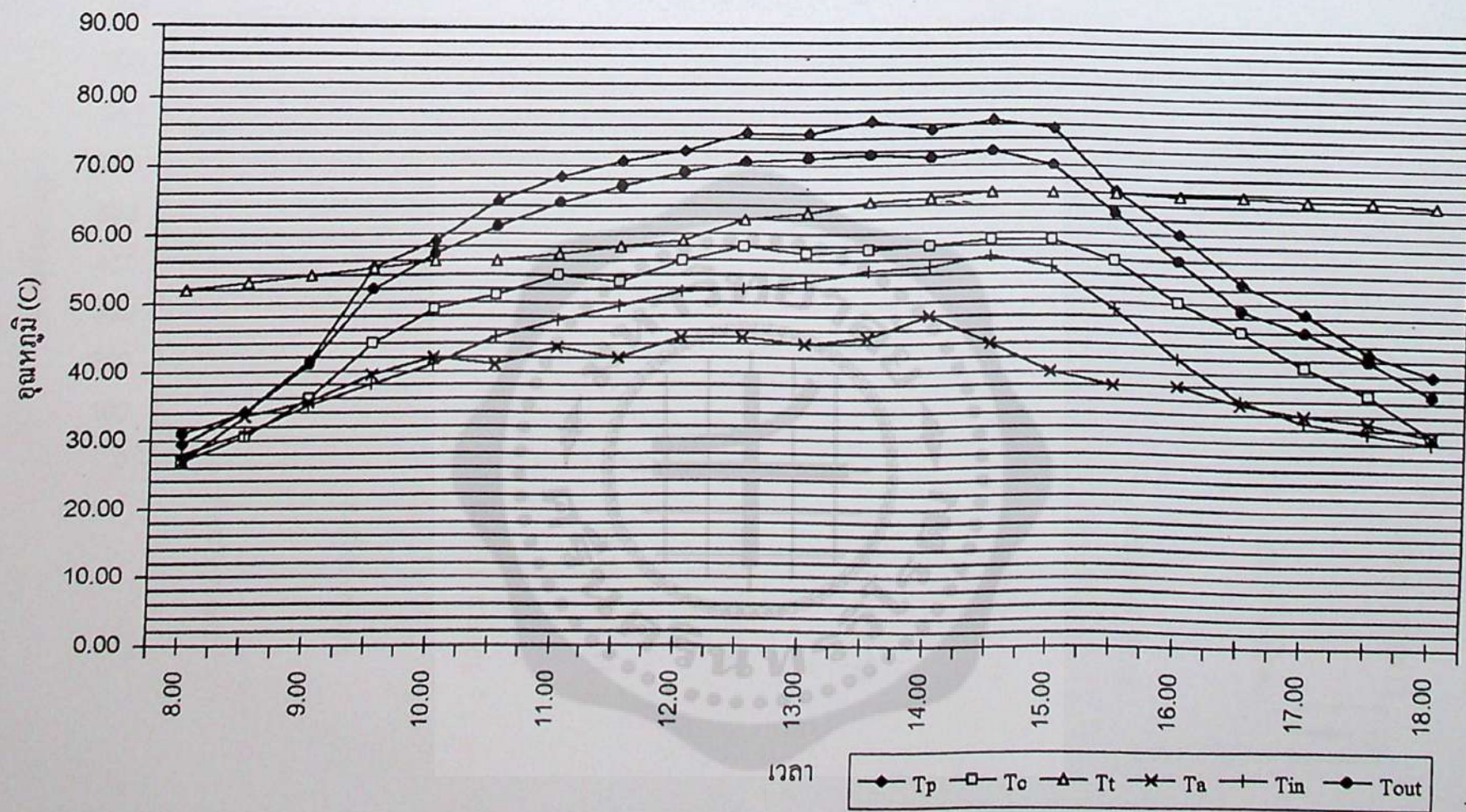
$$\tau G A \eta = m C_p \Delta T = \rho \bar{V} c_p \Delta T$$

$$\eta = \frac{\rho \bar{V} c_p \Delta T}{\tau G A}$$

$$\eta = \frac{(992.29 \text{ kg/m}^3)(0.25 \text{ m}^3)(4.19 \text{ kJ/kg.K})(330.87 - 301)K}{(0.9 \times 19.5 \times 10^{-3} \text{ kJ/m}^2)(2 \text{ m}^2)}$$

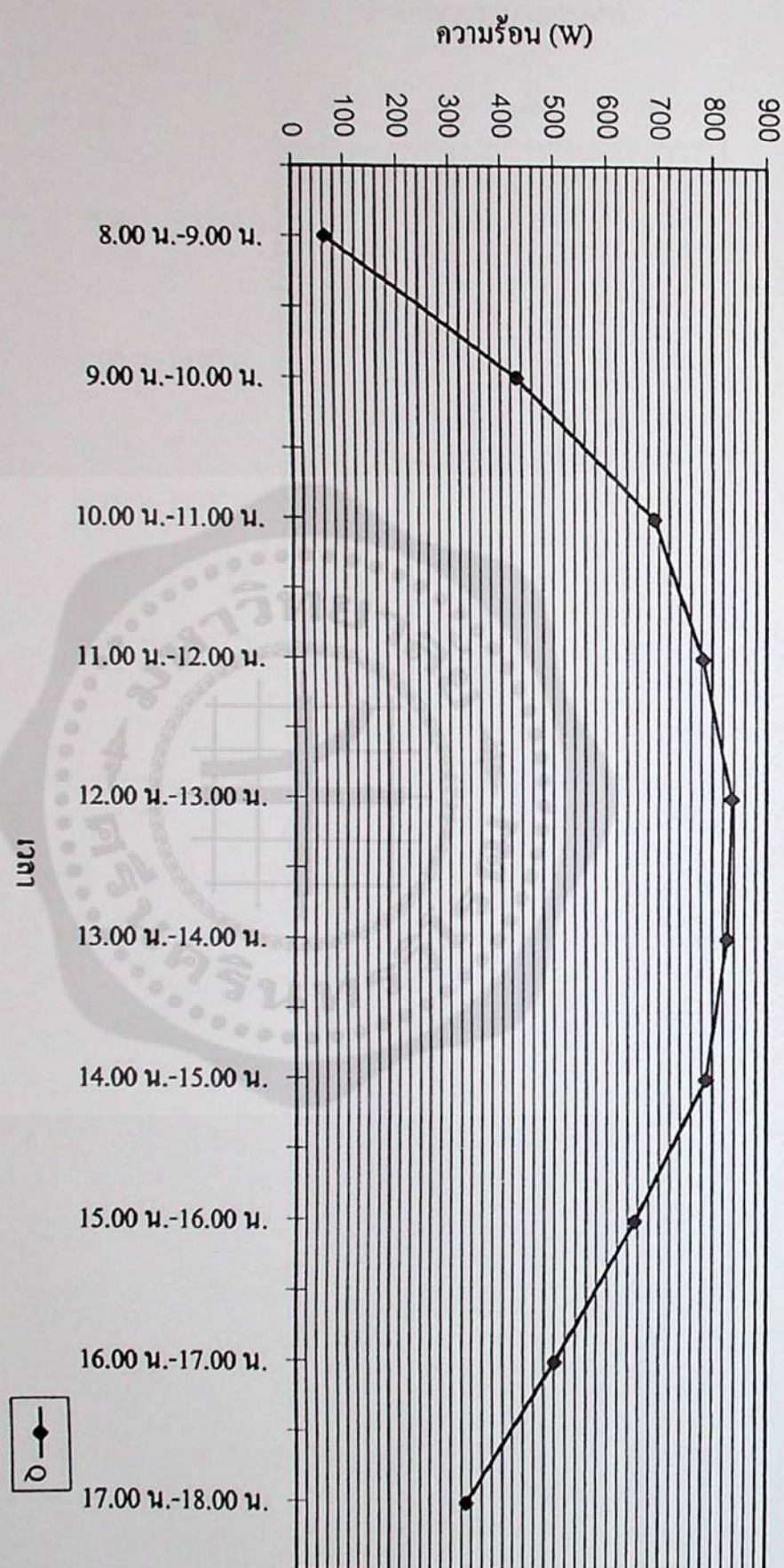
$$\eta = 88.45 \%$$

จากการทดลองได้ประสิทธิภาพของแผง = 88.45 เปอร์เซ็นต์

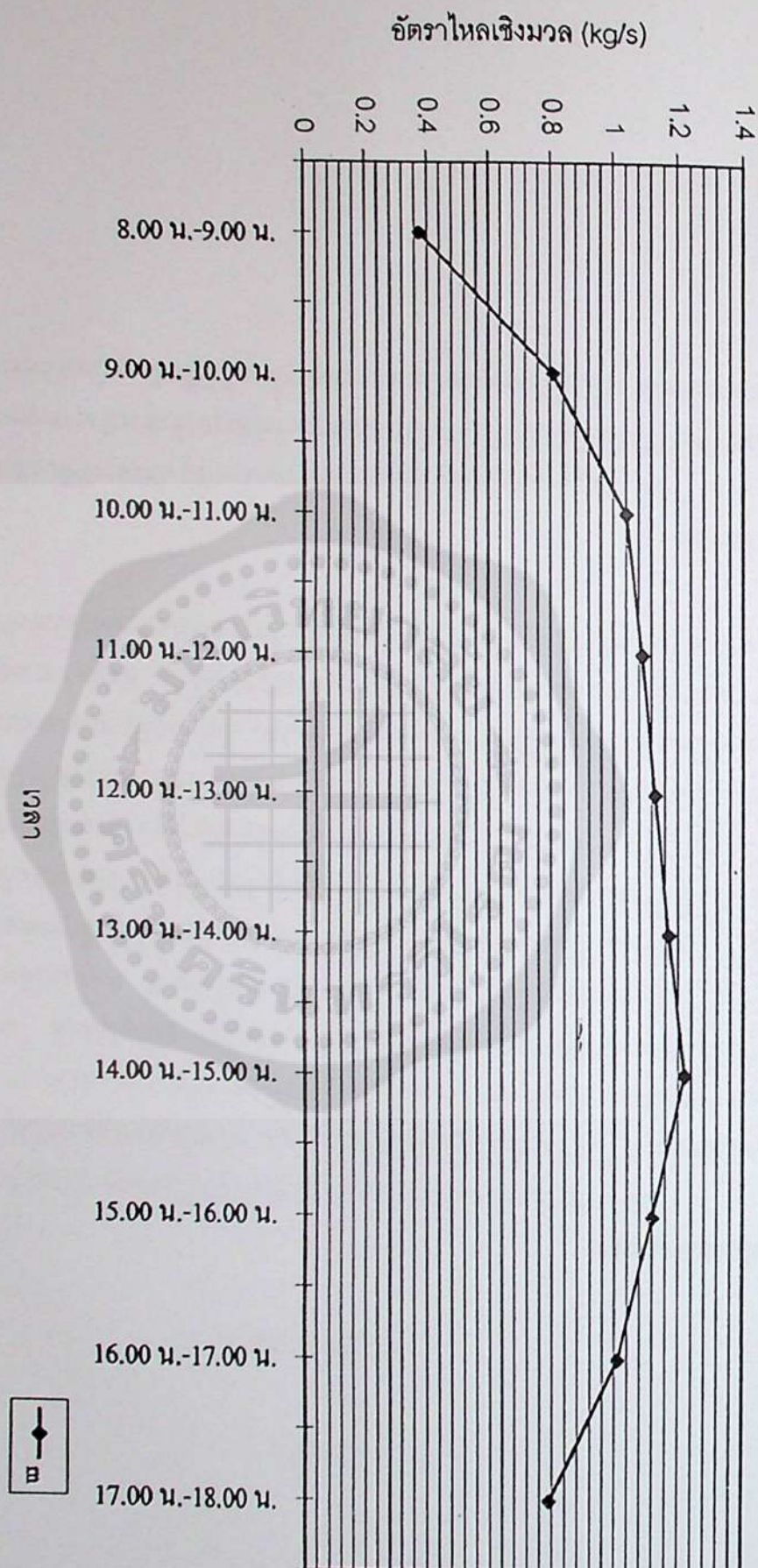


รูปที่ 4.1 กราฟแสดงค่าอุณหภูมิ ณ เวลาต่างๆ วันที่ 30/3/42

รูปที่ 4.2 กราฟแสดงค่าความร้อน ณ ช่วงเวลาต่างๆ วันที่ 30/3/42



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงค่าอัตราการไหลเชิงมวล วันที่ 30/3/42



บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

สรุปผลการทดลอง

จากการทดลอง โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ไปใช้ในการอุ่นน้ำ พบว่าสามารถทำให้น้ำอุณหภูมิเฉลี่ย 27°C ไปเป็นน้ำอุณหภูมิโดยเฉลี่ย 60°C โดยในการทดลองนั้นเราจะทำการบันทึกผลการทดลองทุกๆ 5 นาที โดยเริ่มทำการบันทึกผลตั้งแต่เวลา 8.00 น.- 18.00 น. เป็นเวลาทั้งสิ้น 10 ชั่วโมง พบว่าปริมาณความร้อนที่น้ำได้รับในแต่ละช่วงเวลานั้นไม่คงที่ จากกราฟแสดงผลการทดลองแสดงค่าอุณหภูมิ, ปริมาณความร้อน, อัตราการไหล ณ ช่วงเวลาต่างๆพบว่าช่วงเวลา 12.00 น.- 14.00 น. เป็นช่วงเวลาที่อุณหภูมิที่จุดต่างๆ ของระบบมีค่าสูงที่สุดและเป็นช่วงเวลาที่น้ำของระบบได้รับปริมาณความร้อนจากแผงรับแสงสูงสุดด้วย ซึ่งจะทำให้สามารถวิเคราะห์ได้ว่า ณ ช่วงเวลา 12.00 น.- 14.00 น. เป็นช่วงที่มีค่าความเข้มของแสงสูงสุด ในส่วนอัตราการไหลของน้ำจะขึ้นอยู่กับปริมาณความร้อนที่น้ำได้รับ โดยจากกราฟพบว่าช่วงเวลาที่น้ำได้รับปริมาณความร้อนสูงขึ้นจะเป็นช่วงที่น้ำมีอัตราการไหลสูงขึ้นเช่นกัน เกี่ยวกับปริมาณความร้อนที่สูญเสียจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิภายในและภายนอกระบบว่าแตกต่างกันมากเท่าใด ซึ่งพบว่าการสูญเสียความร้อนของระบบจะไม่คงที่ เพราะว่าอุณหภูมิภายนอกระบบในแต่ละช่วงนั้นมีค่าไม่เท่ากัน

ข้อเสนอแนะ

จากการทดลองค่าต่างๆ ที่ได้มาจากการทดลองนั้น เป็นช่วงที่ท้องฟ้าไม่แจ่มใสนักซึ่งอาจจะทำให้น้ำนั้นไม่ร้อนเท่าที่ต้องการ ในการสร้างเพื่อใช้งานจริงควรทำการทดลองทั้งปี เพื่อเป็นการหาประสิทธิภาพที่แท้จริงของแผงรับแสงอาทิตย์ เพื่อจะได้เป็นข้อมูลในการออกแบบเพิ่มเติม

เอกสารอ้างอิง

1. นักสิทธิ์ คุ้มฉายชัย การถ่ายเทความร้อน กรุงเทพมหานคร : ห้างหุ้นส่วน จำกัด สำนักพิมพ์ ฟิสิกส์เซนเตอร์.2526
2. สมาน เจริญกิจพุทธผล และ มนตรีพิรุณเกษมศร กลศาสตร์ของไหล : บริษัท ซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัด (มหาชน)
3. John A. Duffie, William A. Beckman , Solar Engineering of Thermal Process, 2nd edition, John Wiley & Son Inc., 1991
4. R.H.B. Exell and K.Saracali, The Avalibity of Solar Energy in Thailand, Research Report No.63





ภาคผนวก



ตารางภาคผนวกที่ 1 Conversion factor สำหรับเปลี่ยนหน่วย SI หน่วยอังกฤษ

ปริมาณ	สัญลักษณ์	หน่วย		Conversion factor	Reciprocal conversion factor
		SI	อังกฤษ		
มวล	M	kg	lb	0.4536	2.245
ความยาว	L	m	ft	0.3048	3.3808
แรง	F	N	lbf	0.4482	0.2248
เวลา	T	s	h	1/3600	3600
ความร้อน	H	J	Btu	1055.06	9.4781×10^{-1}
อัตราการทำงาน	P	W	hp	745.69	1.341×10^{-3}
อัตราการเคลื่อนที่ของความร้อน	Q	W	Btu/hr	0.2931	3.4118
อัตราการเคลื่อนที่ของความร้อนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่	Q	W/m ²	Btu/hr.ft ²	3.115	0.3169
สัมประสิทธิ์การพาความร้อน	h,U	W/m ² .K	Btu/hr.ft ² .°F	5.678	0.1761
ค่าการนำความร้อน	K	W/m ² .K	Btu/hr.ft ² .°F	1.731	0.5777
ค่าความร้อนจำเพาะ	C _p	J/kg.K	Btu/lb°F	4186.8	2.388×10^{-4}
ความหนาแน่น	ρ	kg/m ³	lb/ft ³	16.0185	0.06243
ความหนืด	μ	kg/m.s	lb/ft	4.134×10^{-4}	2.4189×10^3
ความดัน	P	N/m ²	lb./in ²	6.8948×10^3	1.4503×10^{-4}

หมายเหตุ: คูณค่าในหน่วยอังกฤษด้วย Conversion factor เพื่อจะได้ค่าในหน่วย SI และคูณค่าในหน่วย SI ด้วย Reciprocal conversion factor เพื่อจะได้ค่าในหน่วยอังกฤษ

ตารางภาคผนวกที่ 2 ค่าการแผ่รังสีความร้อน (E) ของผิววัตถุชนิดต่างๆ

ชนิดวัตถุ	อุณหภูมิ	ค่าการแผ่รังสี ความร้อน (E)
อลูมิเนียม		
ผิวขัดมันมาก	237-576	0.039-0.057
ผิวหยาบ	100	0.18
เป็นแผ่นที่ขายทั่วไป	100	0.09
ทองเหลือง ขัดมันปกติ	100	0.06
ทองแดง ขัดมันปกติ	100	0.052
ตะกั่ว ผิวมีสนิมจับ	24	0.28
เงินบริสุทธิ์ ขัดมัน	227-627	0.02-0.032
ดีบุก	23	0.043
สังกะสี ผิวเคลือบด้วยเหล็ก	28	0.23
เหล็ก		
เหล็กกล้า ผิวขัดสะอาด	100	0.066
เหล็กหล่อ ผิวขัดสะอาด	200	0.21
เหล็กหล่อเหนียว ผิวขัดสะอาด	38-249	0.28
แผ่นเหล็กหล่อ ผิวมีสนิมมาก	19	0.59
เหล็กกันสนิมผิวขัดมัน	100	0.074
แผ่นเอสเบสตอส	23	0.96
อิฐ		
สีแดงและผิวหยาบ	21	0.93
ใช้ในการก่อสร้าง	1000	0.45
คอนกรีต	1000	0.63
กระจกใส	22	0.94
ผนังทาสีน้ำมัน	100	0.92-0.96
ผนังทาสีออลูมิเนียม	100	0.27-0.67
ผิวน้ำ	0-100	0.95-0.963

ตารางภาคผนวกที่ 3 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของก๊าซ ชนิดต่างๆ ที่ความดันบรรยากาศ

	ρ		μ	ν	k	α	
T.K	kg/m^3	$\text{kJ/kg}^\circ\text{C}$	kJ/m.s	m^2/s	W/m.K	m^2/s	P_r
			$\times 10^5$	$\times 10^6$		$\times 10^4$	
Air							
100	3.6010	1.0026	0.6924	1.923	0.00924	0.0250	0.770
150	2.3675	1.0099	1.0283	4.343	0.01373	0.0574	0.753
200	1.7684	1.0061	1.3289	7.490	0.01809	0.1016	0.739
250	1.4128	1.0053	1.4880	9.490	0.02227	0.1316	0.722
300	1.1774	1.0057	1.9830	15.08	0.02024	0.2216	0.708
350	0.9980	1.0090	2.0750	20.76	0.03003	0.2983	0.697
400	0.8826	1.0140	2.2860	25.90	0.03365	0.3760	0.689
450	0.7833	1.0207	2.4840	28.86	0.03707	0.4222	0.683
500	0.7048	1.0295	2.6710	37.90	0.04038	0.5546	0.680
550	0.6423	1.0392	2.8480	44.34	0.04360	0.6532	0.680
600	0.5879	1.0551	3.0180	51.34	0.04659	0.7512	0.680
650	0.5430	1.0635	3.1770	58.51	0.04953	0.8578	0.682
700	0.5030	1.0752	3.3320	66.26	0.05230	0.9672	0.684
750	0.4709	1.0856	3.4810	73.91	0.05509	1.0774	0.686
800	0.4405	1.0978	3.6250	82.29	0.05779	1.1951	0.689
850	0.4149	1.1095	3.7650	90.75	0.06028	1.3097	0.692
900	0.3925	1.1212	3.8990	99.30	0.06279	1.4271	0.696
950	0.3716	1.1321	4.0230	108.2	0.06525	1.5510	0.699
1000	0.3524	1.1417	4.1520	117.8	0.06752	1.6779	0.702
1100	0.3204	1.1600	4.4400	138.6	0.07320	1.9690	0.704
1200	0.2947	1.1790	4.6900	159.1	0.07820	2.2510	0.707
1300	0.2707	1.1970	4.9300	182.1	0.08370	2.5830	0.705
1400	0.2515	1.2140	5.1700	205.5	0.08910	2.9200	0.705

ตารางภาคผนวกที่ 4 คุณสมบัติของไอน้ำอิ่มตัว

อุณหภูมิ °C	ความดัน Pa $\times 10^5$	เอนทาลปี kJ/kg		เอนโทรปี kJ/kg.K	
		h_f	h_g	S_f	S_g
10	0.0122	42.01	2519.8	0.1510	8.9008
12	0.0140	50.41	2523.4	0.1806	8.8524
14	0.0159	58.80	2527.1	0.2099	8.8048
16	0.0181	67.19	2530.8	0.2390	8.7582
18	0.0206	75.58	2531.4	0.2679	8.7123
20	0.0233	83.96	2538.1	0.2966	8.6672
22	0.0264	92.33	2541.7	0.3251	8.6229
24	0.0298	100.70	2545.4	0.3534	8.5794
26	0.0336	109.07	2549.0	0.3814	8.5367
28	0.0378	117.43	2552.6	0.4093	8.4946
30	0.0424	125.79	2556.3	0.4369	8.4533
32	0.0475	134.15	2559.9	0.4644	8.4127
34	0.0532	142.50	2563.5	0.4917	8.3728
36	0.0594	150.86	2567.1	0.5188	8.3336
38	0.0663	159.21	2570.7	0.5458	8.2950
40	0.0738	167.57	2574.3	0.5725	8.2570
42	0.0820	175.91	2577.9	0.5991	8.2197
44	0.0809	184.27	2581.4	0.6255	8.1829
46	0.0911	192.62	2585.0	0.6581	8.1468
48	0.1175	200.97	2588.5	0.6779	8.1113
50	0.1234	209.33	2592.1	0.7038	8.0763
52	0.1362	217.69	2595.6	0.7296	8.0419
54	0.1501	226.04	2599.1	0.7552	8.0080
56	0.1652	234.41	2603.6	0.7807	7.9747

ตารางภาคผนวกที่ 4 คุณสมบัติของไอน้ำอิ่มตัว (ต่อ)

อุณหภูมิ °C	ความดัน Pa $\times 10^5$	เอนทัลปี kJ/kg		เอนโทรปี kJ/kg.K	
		h_f	h_g	S_f	S_g
58	0.1816	242.77	2606.1	0.8060	7.9419
60	0.1994	251.13	2609.6	0.8312	7.9096
62	0.2186	259.49	2613.2	0.8562	7.8778
64	0.2393	267.86	2616.5	0.8811	7.8465
66	0.2617	276.23	2620.0	0.9058	7.8156
68	0.2859	284.61	2623.4	0.9304	7.7852
70	0.3119	292.98	2626.8	0.9549	7.7553
72	0.3399	301.36	2630.2	0.9792	7.7258
74	0.3699	309.74	2633.6	1.0034	7.6968
76	0.4022	318.13	2637.0	1.0275	7.6682
78	0.4368	326.51	2640.3	1.0515	7.6400
80	0.4739	334.91	2643.7	1.0753	7.6122
82	0.5136	343.30	2647.0	1.0990	7.5848
84	0.5560	351.70	2650.3	1.1225	7.5578
86	0.6014	360.10	2653.6	1.1460	7.5312
88	0.6498	668.51	2656.6	1.1693	7.5050
90	0.7014	376.92	2660.1	1.1950	7.4719
92	0.7564	385.33	2663.3	1.2156	7.4536
94	0.8149	393.75	2666.5	1.2386	7.4284
96	0.8771	402.17	2669.7	1.2615	7.4036
98	0.9433	410.62	2672.9	1.2842	7.3791
100	1.0135	419.04	2676.1	1.3069	7.3549

ตารางภาคผนวกที่ 5 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของน้ำที่ความดันบรรยากาศ

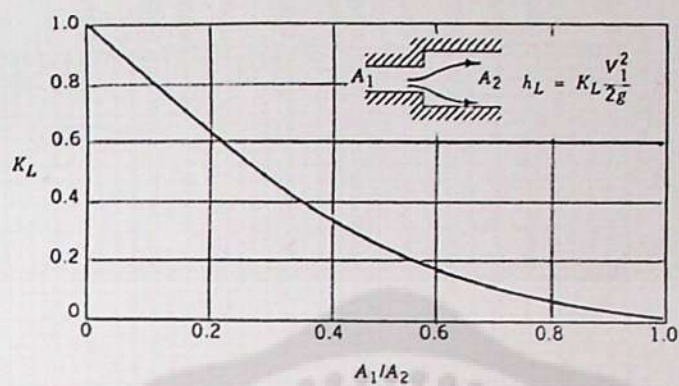
T, °C	ρ kg/m ³	C_p kJ/kg.°C	ν m ² /s $\times 10^{-6}$	k W/m.K	α m ² /s	P_r	β K ⁻¹ $\times 10^{-3}$
0	1002.28	4.2178	1.788	0.552	1.308	13.600	0.18 × 10 ⁻³
20	1000.52	4.1818	1.006	0.597	1.430	7.020	
40	994.59	4.1784	0.658	0.628	1.512	4.340	
60	985.46	4.1843	0.478	0.651	1.554	3.020	
80	974.08	4.1964	0.364	0.668	1.636	2.220	
100	960.63	4.2161	0.294	0.680	1.680	1.740	
120	945.25	4.2500	0.247	0.685	1.708	1.446	
140	928.27	4.2830	0.214	0.684	1.724	1.241	
160	909.69	4.3420	0.190	0.680	1.729	1.099	
180	889.03	4.4170	0.173	0.675	1.724	1.004	
200	866.76	4.5050	0.160	0.665	1.706	0.937	
220	842.41	4.6100	0.150	0.652	1.680	0.891	
240	815.66	4.7560	0.143	0.635	1.639	0.871	
260	785.87	4.9490	0.137	0.611	1.577	0.874	
280	752.55	5.2080	0.135	0.580	1.481	0.910	
300	714.26	5.7280	0.135	0.540	1.324	1.019	

ตารางภาคผนวกที่ 6 สัมประสิทธิ์ความต้านทาน $K = h_m/[V^2/(2g)]$

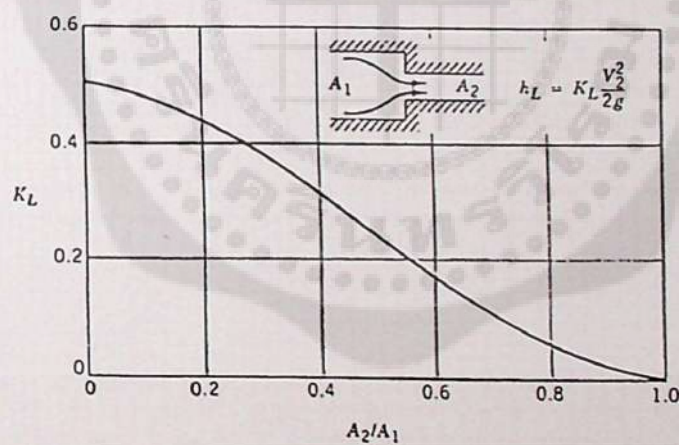
	Nominal diameter, in (Screwed)			
	1/2	1	2	4
Valves (fully open):				
Globe	14.00	8.20	6.90	5.70
Gate	0.30	0.24	0.16	0.11
Swing check	5.10	2.90	2.10	2.00
Angle	9.00	4.70	2.00	1.00
Elbows:				
45° regular	0.39	0.32	0.30	0.29
45° long radius				
90° regular	2.00	1.50	0.95	0.64
90° long radius	1.00	0.72	0.41	0.23
180° regular	2.00	1.50	0.95	0.64
180° long radius				
Tees:				
Line flow	0.90	0.90	0.90	0.90
Branch flow	2.40	1.80	1.40	1.10

ตารางภาคผนวกที่ 7 คุณสมบัติที่เกี่ยวข้องกับความร้อนของเหล็ก

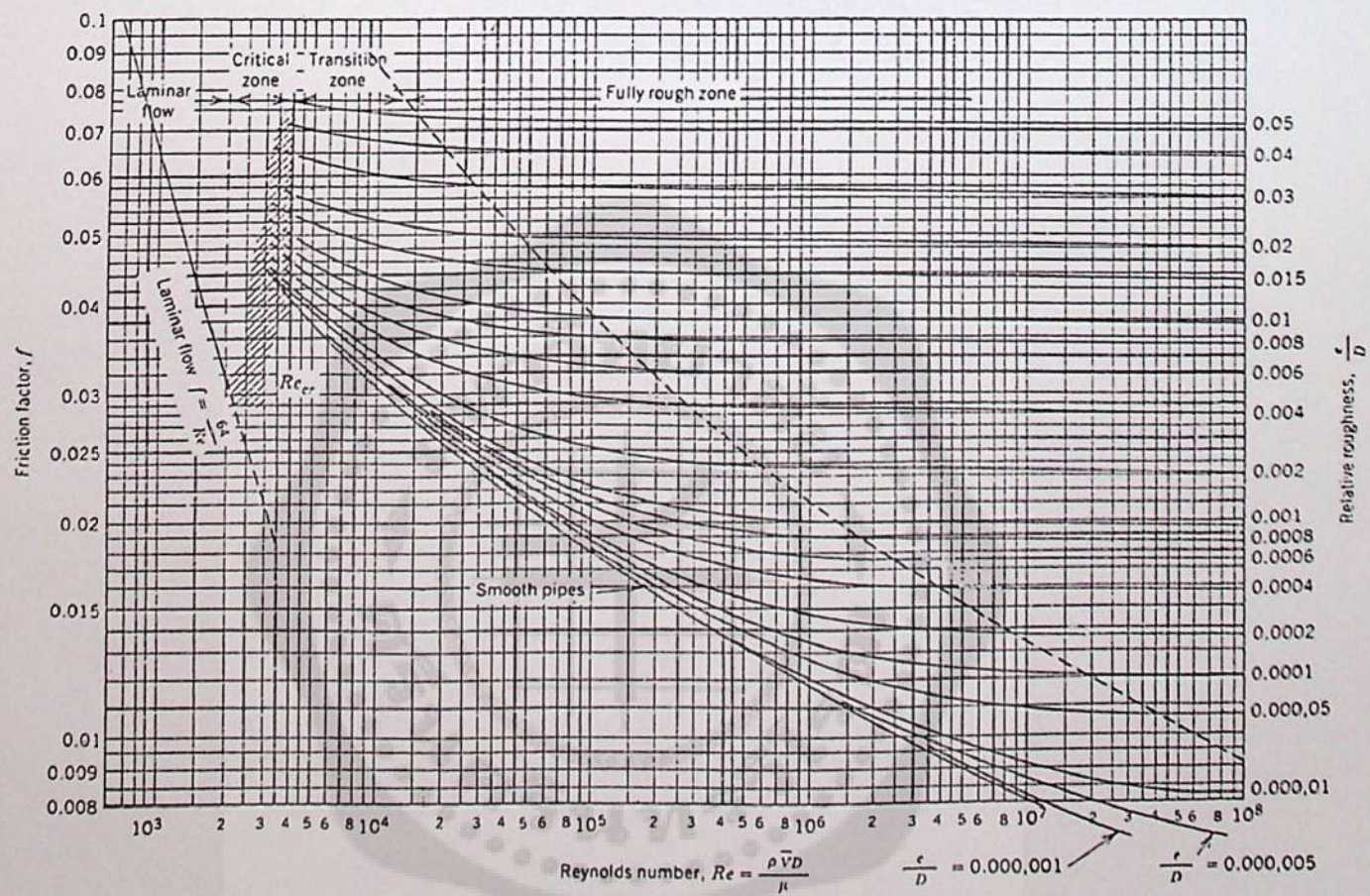
ชนิดของโลหะ	คุณสมบัติที่ 20 °C				k(W/m.K)				
	ρ	C_p	k	$\alpha \times 10^{-3}$	อุณหภูมิ (°C)				
	(kg/m ³)	(J/kg.K)	(W/m.K)	(m ² /s)	100	200	300	400	600
เหล็กบริสุทธิ์	7879	452	72.7	2.03	67.5	62.3	55.4	48.5	39.8
เหล็กกล้า (C<0.5%)	7849	460	58.9	1.63	57.1	51.9	48.0	45.0	36.4
เหล็กหล่อ (C= 4.0%)	7272	419	51.9	1.70	-	-	-	-	-
เหล็กกล้า (C= 5.0%)	7833	465	53.7	1.47	51.9	48.5	45.0	41.5	34.6
เหล็กกล้า (C= 1.5%)	7753	486	36.4	0.97	36.3	36.3	34.6	32.9	31.2



รูปภาคผนวกที่ 1 สัมประสิทธิ์การสูญเสียของท่อจากการขยายทันที



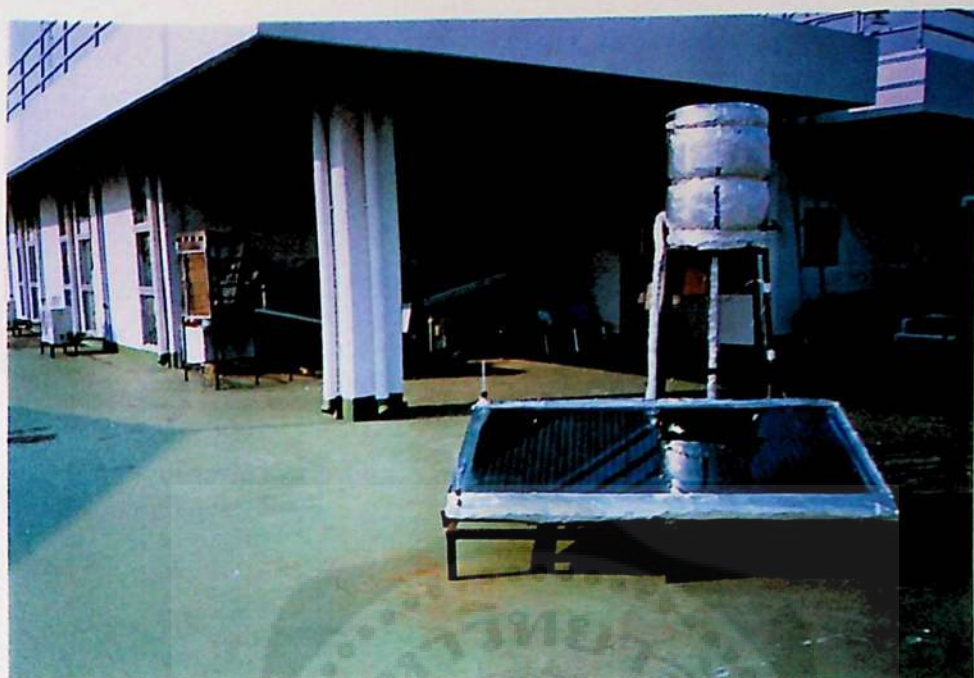
รูปภาคผนวกที่ 2 สัมประสิทธิ์การสูญเสียของท่อจากการหดทันที



รูปภาคผนวกที่ 3 แผนภูมิมูดี

ภาคผนวก ข
ภาพถ่ายเครื่องทำน้ำอุ่นด้วยโครงสร้างอย่างง่าย





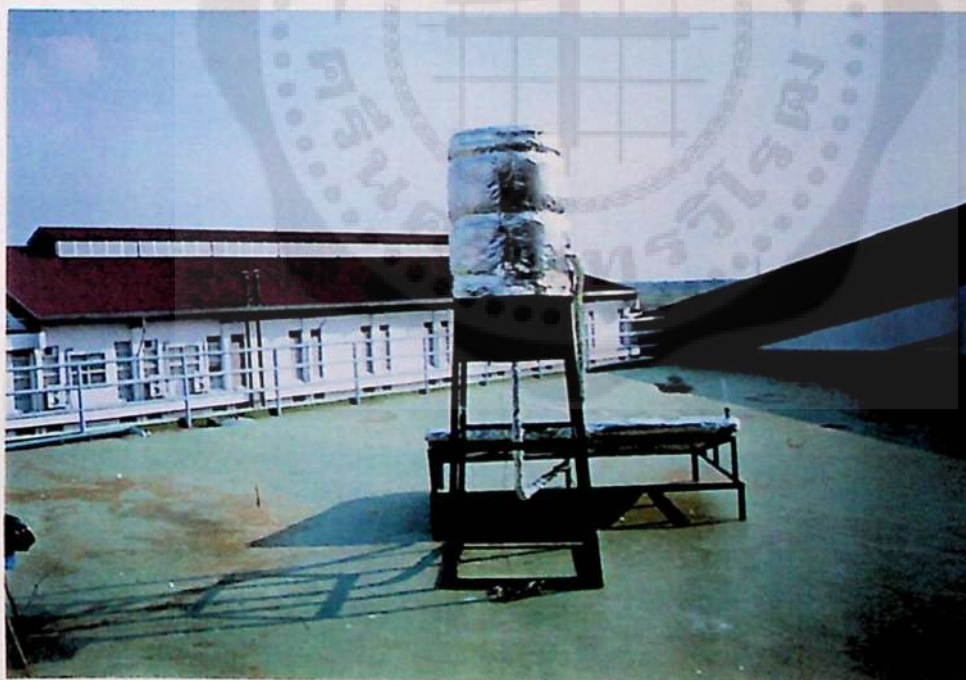
รูปภาคผนวกข.ที่1 ภาพด้านหน้าของเครื่องทำน้ำอุ่นด้วยโครงสร้างอย่างง่าย



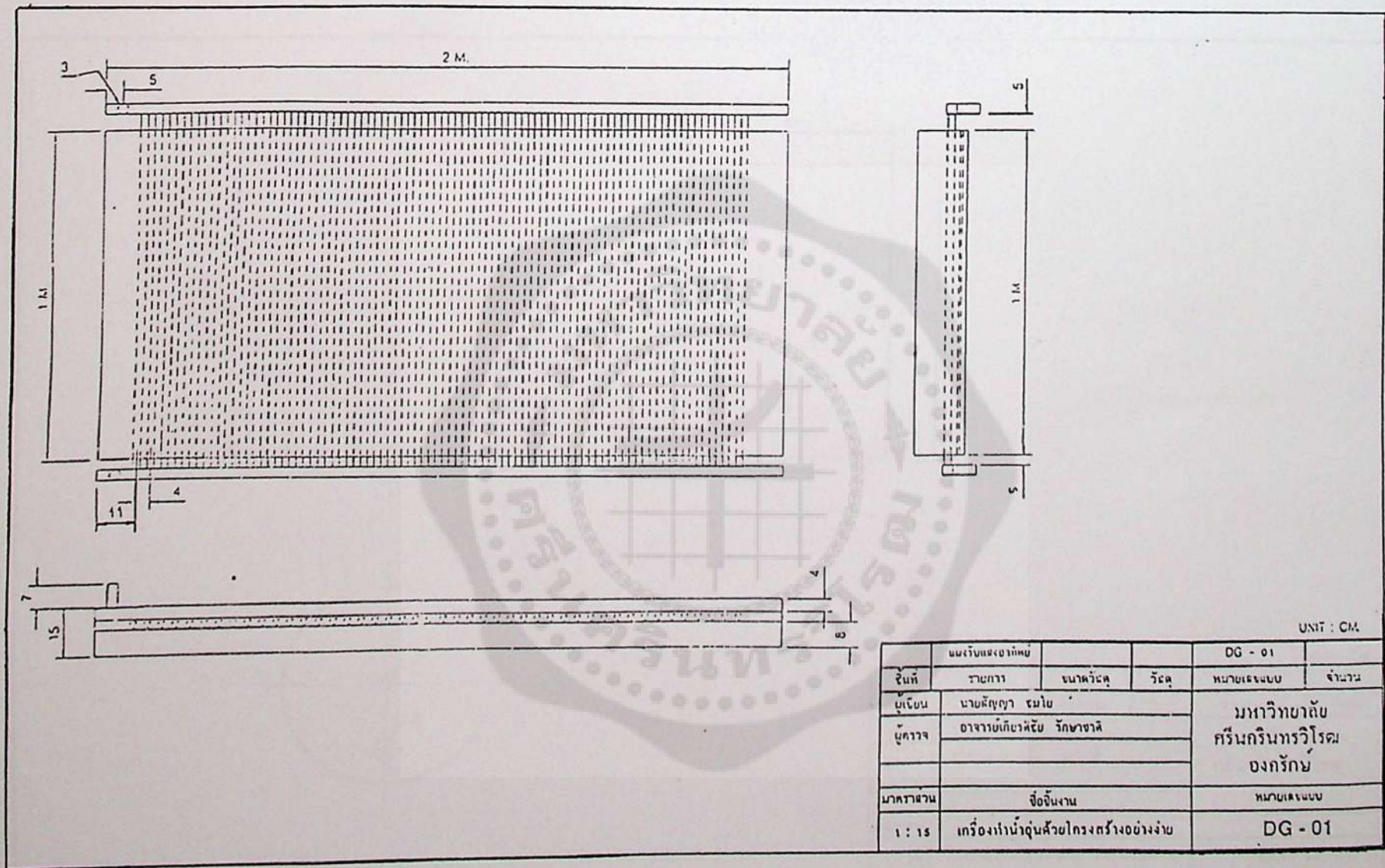
รูปภาคผนวกข.ที่2 ภาพด้านซ้ายของเครื่องทำน้ำอุ่นด้วยโครงสร้างอย่างง่าย



รูปภาคผนวกข.ที่3 ภาพด้านขวาของเครื่องทำน้ำอุ่นด้วยโครงสร้างอย่างง่าย

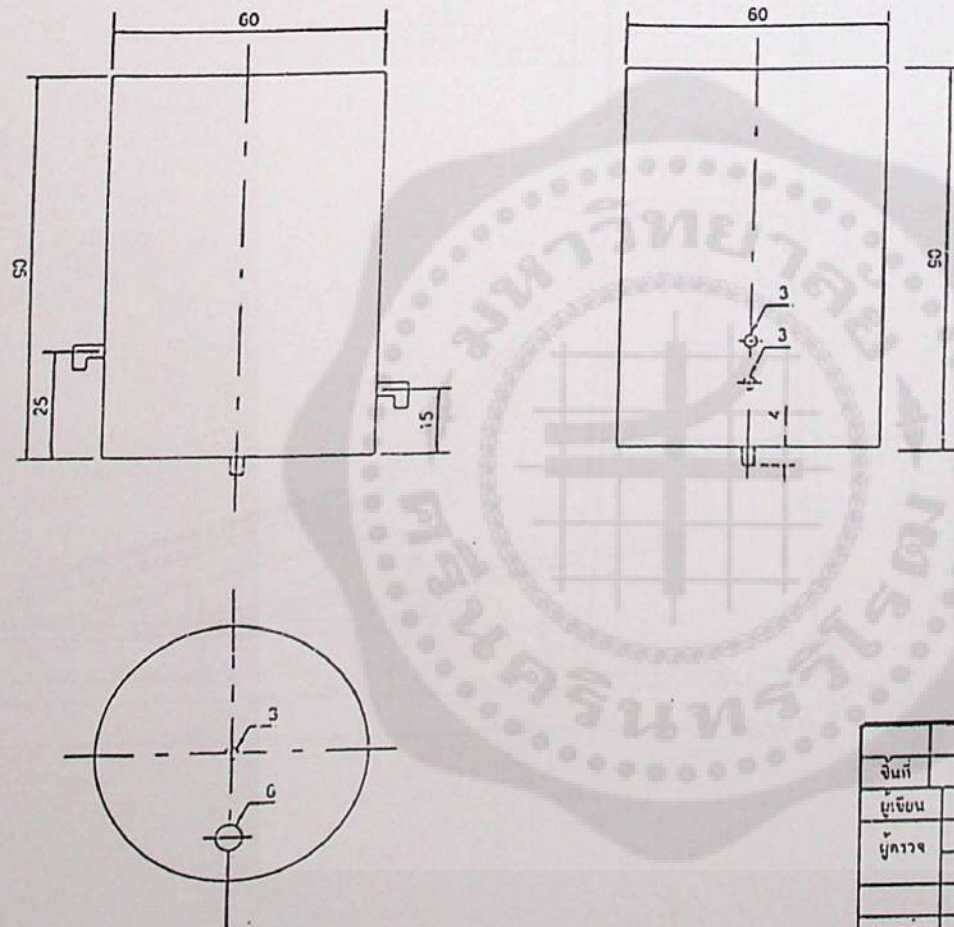


รูปภาคผนวกข.ที่4 ภาพด้านหลังของเครื่องทำน้ำอุ่นด้วยโครงสร้างอย่างง่าย



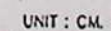
UNIT : CM.

	แบบรับและเอกสาร			DG - 01	
วันที่	รายการ	ขนาดวัสดุ	วัด	หมายเลขแบบ	จำนวน
ผู้เขียน	นายสุพจน์ งามไพบูลย์	มหาวิทยาลัย ศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์			
ผู้ตรวจ	อาจารย์เกียรติชัย รักชาติ				
มาตราส่วน	ชื่อชิ้นงาน	หมายเลขแบบ			
1 : 15	เครื่องให้น้ำด้วยโครงข่ายอย่างง่าย	DG - 01			



UNIT : CM

DG - 02				UNIT : CM	
วันที่	รายการ	ขนาดวัสดุ	วัน	หมายเลขแบบ	จำนวน
ผู้เขียน	นายสุกัญญา ชนไช			มหาวิทยาลัย ศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์	
ผู้ตรวจ	อาจารย์เกียรติชัย รักชาติ				
มาตรฐาน	ชื่อชิ้นงาน			หมายเลขแบบ	
1 : 15	เครื่องกำเนิดน้ำดันไฮดรอลิกอย่างง่าย			DG - 02	



	ภาพถ่ายคนขาว			DG - 03	
พิมพ์	รายการ	นางสาววิเศษ	วิเศษ	หมายเลขแบบ	จำนวน
ผู้เขียน	นายสุกัญญา ชนไช			มหาวิทยาลัย ศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์	
ผู้ตรวจ	อาจารย์เกียรติชัย ภิชาชาดี				
ภาคทฤษฎี	ข้อเขียนงาน			หมายเลขแบบ	
1 : 20	เครื่องทำน้ำอุ่นด้วยโซลาร์พลังงานแสงอาทิตย์			DG - 03	

ประวัติผู้จัดทำโครงการ

ชื่อ นาย ทิระศักดิ์ ถิ่นะวานิชพันธ์
ที่อยู่ปัจจุบัน 61/60 ถ. พระราม9 แขวงห้วยขวาง เขตห้วยขวาง กรุงเทพฯ 10320
การศึกษา สำเร็จการศึกษามัธยมศึกษาชั้นปีที่ 6 ที่โรงเรียนเซนต์ดอมินิก

ชื่อ นาย วุฒิชัย โพธิ์ทอง
ที่อยู่ปัจจุบัน 24/47 ถ. สระหลวง ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดพิจิตร 66000
การศึกษา สำเร็จการศึกษามัธยมศึกษาชั้นปีที่ 6 ที่โรงเรียนพิจิตรพิทยาคม

ชื่อ นาย สัณญา ชมโย
ที่อยู่ปัจจุบัน 337/68 ถ. พัฒนาการ แขวงปากคลอง เขตภาษีเจริญ กรุงเทพฯ 10160
การศึกษา สำเร็จการศึกษามัธยมศึกษาชั้นปีที่ 6 ที่โรงเรียนทวีธาภิเศก

