



การประยุกต์ใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน
ในการทำน้ำร้อนจากการเผาไหม้แกลบ

Thermosyphon Heat Exchanger Application in Water Heating
by Rice Husk Combustion

นาย สมชาย อิมวงษ์ รหัสประจำตัว 49380318

นาย จินตกร หน่อไผ่ รหัสประจำตัว 49380721

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์
วันที่รับ...../...../.....
เลขทะเบียน..... 5067534 e.2
เลขเรียกหนังสือ.....
..... 239ก
มหาวิทยาลัยบูรพา 9550

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
ปีการศึกษา 2552



ใบรับรองปริญญาโท

หัวข้อโครงการ : การประยุกต์ใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนในการ
ทำน้ำร้อนจากการเผาไหม้แกลบ
(Thermosyphon Heat Exchanger Application in Water Heating by Rice
Husk Combustion)

ผู้ดำเนินโครงการ : นาย สมชาย อิ่มวงษ์ รหัสประจำตัว 49380318
: นาย ชินกร หน่อไชย รหัสประจำตัว 49380721

อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิยะนันท์ เจริญสุวรรณต์

ภาควิชา : วิศวกรรมเครื่องกล

ปีการศึกษา : 2552

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อนุมัติให้ปริญญาโทฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

.....ที่ปรึกษาโครงการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิยะนันท์ เจริญสุวรรณต์)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปฐมศก วิไลพล)

.....กรรมการ
(อาจารย์นพรัตน์ สีหะวงษ์)

หัวข้อโครงการ	: การประยุกต์ใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนในการ ทำน้ำร้อนจากการเผาไหม้แกลบ (Thermosyphon Heat Exchanger Application in Water Heating by Rice Husk Combustion)
ผู้ดำเนินโครงการ	: นาย สมชาย อิมวงษ์ รหัสประจำตัว 49380318 : นาย ชินกร หน่อไชย รหัสประจำตัว 49380721
อาจารย์ที่ปรึกษา	: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิยะนันท์ เจริญสวรรค์
ภาควิชา	: วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา	: 2552

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการออกแบบและสร้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนเพื่อนำไปใช้ในการผลิตน้ำร้อน 600 l/day โดยใช้แหล่งความร้อนจากก๊าซร้อนของการเผาไหม้แกลบ จากการออกแบบและสร้าง จะได้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีขนาด กว้าง 0.36 m ยาว 0.58 m และสูง 1.5 m โดยมีท่อเทอร์โมไซฟอนจำนวน 45 ท่อ ซึ่งทำจากท่อแตนเลสขนาด 0.0254 m ยาว 1.50 m อัตราการไหลของน้ำร้อนที่ไหลผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนคือ 1 l/min จากผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิก๊าซร้อนขาเข้ามีผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนและประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ที่อุณหภูมิก๊าซร้อนสูงสุดคือ 150 °C อัตราการถ่ายเทความร้อน ประสิทธิภาพ และอุณหภูมิน้ำร้อนที่ได้มีค่าสูงสุดคือ 1,501.6 W 22.8% และ 56°C ตามลำดับ เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับเชิงเศรษฐศาสตร์กับเครื่องทำน้ำร้อนแบบใช้ไฟฟ้าขนาดกำลังไฟฟ้าอยู่ที่ 6 kW และผลิตน้ำร้อนได้อุณหภูมิประมาณ 35 °C เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนมีราคาเครื่อง 25,520 บาท และเครื่องทำน้ำร้อนแบบใช้ไฟฟ้ามีราคาเครื่อง 6,490 บาท พบว่า เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน ที่ใช้ในการอุ่นน้ำป้อนก่อนเข้าหม้อไอน้ำโดยไม่เสียค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิงและด้านพลังงานไฟฟ้า สามารถคืนทุนได้ในเวลา 1 ปี 5 เดือน 22 วัน

Project title : Thermosyphon heat exchanger application in water heating by rice husk combustion

Name : Mr. Somchai Imwong ID. 49380318
 : Mr. Chinnakkorn Norchai ID. 49380721

Project advisor : Asst. Prof. Dr. Piyanun Charoensawan

Major : Mechanical Engineering

Department : Mechanical Engineering

Academic year : 2009

Abstract

The design and construction of thermosyphon heat exchanger that was applied to produce 600 *l/day* hot water was studied in this project. The hot flue gas of rice husk combustion was used as a heat source in water heating. The designed and constructed heat exchanger was 0.36 *m* wide, 0.58 *m* length and 1.5 *m* high and consisted of 45 pipes of thermosyphon which were made of stainless steel pipes with 0.0254 *m* diameter and 1.50 *m* total length. The volume flow rate of hot water moving through the heat exchanger was 1 *l/min*. It was found from the experimental results that the inlet hot gas temperature affected on the heat transfer rate and effectiveness of thermosyphon heat exchanger. At the maximum temperature of inlet hot gas of 150°C, the maximum values of heat transfer rate, effectiveness and hot water temperature were 1501.6 *W*, 22.8 % and 56 °C respectively. The thermosyphon heat exchanger application in water heating was economical analyzed and compared with the electrical water heater with 6 *kW* power input and 35°C hot water temperature. The first costs of thermosyphon heat exchanger and electrical water heater were 25,520 and 6,490 baht respectively. It was seen that the payback period of thermosyphon heat exchanger applied as a feed water heater of boiler without the expenses of fuel and electricity could be 1 year 5 months 22 days.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดีเพราะได้รับความช่วยเหลือในด้านการให้คำแนะนำในการ
ทำโครงการจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิยะนันท์ เจริญสุวรรณ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ
คณะผู้จัดทำจึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณอาจารย์ วาฤทธิ์ ภมร ที่คอยให้ความช่วยเหลือในด้านการสร้างเครื่อง
แลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน

ขอขอบคุณ นายชัยวัฒน์ วรรณโกมิษฐ์ ซึ่งเป็นนิสิตปริญญาโทที่ได้คอยให้ความช่วยเหลือ
ในด้านต่าง ๆ และขอขอบคุณเพื่อนทุกคนที่ได้ให้ความช่วยเหลือในด้านการทำโครงการและด้าน
เอกสาร

สุดท้ายนี้คณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่คอยสนับสนุนและเป็นกำลังใจ
สม่ำเสมอตลอดมา



คณะผู้จัดทำโครงการ

สารบัญ

	หน้า
ใบรับรองปริญญาโท	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ฅ
สารบัญสัญลักษณ์	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	4
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
1.4 ขอบเขตการทำโครงการ	5
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน	5
1.6 แผนการดำเนินงาน	6
1.7 รายละเอียดงบประมาณตลอดโครงการ	7
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี	8
2.1 เทอร์โมไซฟอน	8
2.1.1 ลักษณะของเทอร์โมไซฟอน	8
2.1.2 โครงสร้างของเทอร์โมไซฟอน	8
2.1.3 หลักการทำงานของเทอร์โมไซฟอน	8
2.1.4 ข้อดีของเทอร์โมไซฟอน	9
2.1.5 อัตราการเพิ่มสารทำงาน	9
2.1.6 การถ่ายเทความร้อนของเทอร์โมไซฟอน	10
2.2 การไหลขวางกลุ่มท่อ	16

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2.1 การพาความร้อนบนวัตถุรูปทรงกระบอก	19
2.2.2 การพาความร้อนในกลุ่มท่อ	20
2.2.3 อัตราการถ่ายเทความร้อนจากผิวท่อสู่ของไหลผ่านกลุ่มท่อ	22
2.2.4 ประสิทธิภาพของกลุ่มท่อ	22
2.3 ทฤษฎีการเผาไหม้	23
2.3.1 การวัดค่าความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวล	24
2.3.2 เชื้อเพลิงแกลบ	25
2.4 ทฤษฎีของเตาไซโคลน	29
บทที่ 3 วิธีดำเนินการทดลอง	31
3.1 ลักษณะและการทำงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน	31
3.2 ข้อมูลพื้นฐานและเงื่อนไขเริ่มต้นในการออกแบบ	32
3.3 การคำนวณการออก	33
3.3.1 การคำนวณการออกแบบในส่วนทำระเหย	33
3.3.2 การคำนวณการออกแบบในส่วนควบแน่น	35
3.3.3 การคำนวณหาค่าความต้านทานความร้อนรวม	36
3.4 การออกแบบ	40
3.4.1 การออกแบบท่อเทอร์โมไซฟอน	40
3.4.2 การออกแบบโครงสร้างของกล่องส่วนทำระเหย	41
3.4.3 การออกแบบโครงสร้างส่วนที่ไม่มีการถ่ายเทความร้อน	41
3.4.4 การออกแบบโครงสร้างของกล่องส่วนควบแน่น	42
3.5 ขั้นตอนการสร้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน	42
3.6 การดำเนินการทดลอง	45
3.6.1 อุปกรณ์และเครื่องมือ	46
3.6.2 ลำดับขั้นตอนการทดลอง	47
3.6.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์ผลการทดลอง	48

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์	49
4.1 การวิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบอัตราการถ่ายเทความร้อนและประสิทธิผลของ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โม ไซฟอนระหว่างผลที่ได้จากการ ทดลองกับผลที่ได้จากการออกแบบ	49
4.2 การวิเคราะห์อัตราการถ่ายเทความร้อนและประสิทธิผลของเครื่องแลกเปลี่ยน ความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน	51
4.3 การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์	55
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	59
5.1 บทสรุป	59
5.2 ข้อเสนอแนะ	60
บรรณานุกรม	61
ภาคผนวก ก ตารางข้อมูลการทดลอง	64
ภาคผนวก ข ตารางคุณสมบัติ	67
ภาคผนวก ค ตัวอย่างการคำนวณและรายละเอียดของเครื่องทำน้ำร้อนแบบไฟฟ้า	74
ประวัติผู้ดำเนินโครงการ	78

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 แสดงขั้นตอนการดำเนินงาน	6
ตารางที่ 2.1 ค่าคงที่ C และ m สำหรับสมการที่ 2.23	20
ตารางที่ 2.2 ค่าคงที่ A และ n สำหรับสมการที่ 2.24	21
ตารางที่ 2.3 แสดงคุณสมบัติทางเคมีของชีวมวลแต่ละชนิด	26
ตารางที่ 3.1 แสดงข้อมูลที่ได้จากการออกแบบ	39
ตารางที่ 4.1 แสดงการเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากการทดลองกับข้อมูลที่ได้จากการออกแบบ	49
ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงการเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนในกรณีที่ใช้ในการทำน้ำร้อนโดยใช้ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงแกลบ โดยตรงกับเครื่องทำน้ำร้อนแบบใช้ไฟฟ้า	56
ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงการเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนในกรณีที่ใช้ในการอุ่นน้ำป้อนเข้าหม้อไอน้ำที่ใช้เชื้อเพลิงแกลบในการเผาไหม้กับเครื่องทำน้ำร้อนแบบไฟฟ้า	57
ตารางที่ ก 1 แสดงใบบันทึกผลการทดลองของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน	65
ตารางที่ ก 2 แสดงผลการทดลองของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน	66
ตารางที่ ข 1 แสดงสมบัติของอากาศ	68
ตารางที่ ข 2 แสดงสมบัติวัสดุต่างๆ	69
ตารางที่ ข 3 แสดงสมบัติของก๊าซ	71
ตารางที่ ข 4 แสดงสมบัติของไอน้ำ	73
ตารางที่ ค 1 แสดงผลการคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนและประสิทธิผลในแต่ละช่วงเวลา	76
ตารางที่ ค 2 แสดงรายละเอียดของเครื่องทำน้ำร้อนแบบใช้ไฟฟ้า	77

สารบัญรูป

	หน้า	
รูปที่ 1.1	กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความร้อนจากการเผาไหม้ของวัสดุคืบต่างๆ	2
รูปที่ 1.2	เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน	3
รูปที่ 1.3	แสดงส่วนประกอบของท่อเทอร์โมไซฟอน	3
รูปที่ 2.1	ลักษณะการทำงานของเทอร์โมไซฟอน	9
รูปที่ 2.2	แสดงตำแหน่งค่าความต้านทานการถ่ายเทความร้อนทั้งหมด	11
รูปที่ 2.3	วงจรความต้านทานการถ่ายเทความร้อนภายในเทอร์โมไซฟอน	12
รูปที่ 2.4	การจัดเรียงของกลุ่มท่อ	17
รูปที่ 2.5	แสดงพื้นที่หน้าตัดของการไหล	18
รูปที่ 2.6	เตาเผาแลกเปลี่ยนแบบไซโคลน	30
รูปที่ 3.1	หลักการทำงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน	31
รูปที่ 3.2	แสดงส่วนประกอบของท่อเทอร์โมไซฟอน	40
รูปที่ 3.3	แสดงโครงสร้างของกล่องส่วนทำระเหย	41
รูปที่ 3.4	แสดงโครงสร้างของส่วนที่ไม่มีการถ่ายเทความร้อน	41
รูปที่ 3.5	แสดงโครงสร้างของกล่องส่วนควบแน่น	42
รูปที่ 3.6	แสดงการเดินสารทำงาน เข้าในท่อสแตนเลส	42
รูปที่ 3.7	แสดงประกอบท่อสแตนเลสที่เดินสารทำงานแล้วเข้ากับแผ่นที่ไม่มีการถ่ายเทความร้อน	43
รูปที่ 3.8	แสดงการติดสายเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) ที่ส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่น	43
รูปที่ 3.9	แสดงการประกอบกล่องส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นเข้ากับแผ่นที่ไม่มีการถ่ายเทความร้อน	44
รูปที่ 3.10	แสดงการเจาะรูวัดอุณหภูมิก๊าซร้อนที่ทางเข้าและทางออก	44
รูปที่ 3.11	การติดตั้งอุปกรณ์การวัด	45
รูปที่ 3.12	แสดงเครื่องบันทึกอุณหภูมิ (Data logger)	46
รูปที่ 3.13	แสดงสายเทอร์โมคัปเปิลที่ใช้ในการทดลอง	46
รูปที่ 3.14	แสดงเครื่องวัดอัตราการไหล	47
รูปที่ 4.1	กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อนกับอุณหภูมิก๊าซร้อนขาเข้า	52
รูปที่ 4.2	กราฟแสดงผลต่างของอุณหภูมิ	53

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.3	กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุด กับอุณหภูมิก๊าซร้อนขาเข้า	53
รูปที่ 4.4	กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยน ความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนกับอุณหภูมิก๊าซร้อนขาเข้า	54



สารบัญสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
A	พื้นที่หน้าตัดภายในของเทอร์โมไซฟอนมีค่าเท่ากับ $\pi D_i^2 / 4$	m^2
C_p	ค่าความจุความร้อนจำเพาะของสารทำงาน	$J/kg.K$
$C_{p_{hot\ air}}$	ค่าความจุความร้อนจำเพาะของก๊าซผสม	$J/kg.K$
D_i	เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อเทอร์โมไซฟอน	m
D_o	เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อเทอร์โมไซฟอน	m
h_{co}	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน โดยการพาที่พื้นผิวของส่วนควบแน่น	$W/m^2.K$
h_{eo}	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน โดยการพาที่พื้นผิวของส่วนทำระเหย	$W/m^2.K$
h_{fg}	ค่าความร้อนแฝงของสารทำงาน	J/kg
$k_{hot\ air}$	สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของก๊าซผสม	$W/m.K$
l_a	เป็นความยาวในส่วนที่ไม่มีการถ่ายเทความร้อน	m
l_e	เป็นความยาวในส่วนทำระเหย	m
l_c	เป็นความยาวในส่วนควบแน่น	m
\dot{m}	อัตราการไหล โดยมวลทั้งหมด	kg/s
N_L	จำนวนแถวแนวตั้งวัดจากจำนวนแถวที่มีทิศตั้งฉากกับการไหล	
N_T	จำนวนแถวแนวอนวัดจากจำนวนแถวตามทิศการไหล	
P_a	ความดันของบรรยากาศ	Pa
$Pr_{hot\ air}$	เลขพริ้นด์เทิล	
P_v	ความดันไอของสารทำงาน	Pa
\dot{Q}	อัตราการถ่ายเทความร้อน	W
\dot{Q}_{cond}	อัตราการถ่ายเทความร้อนในส่วนควบแน่น	W
\dot{Q}_{eva}	อัตราการถ่ายเทความร้อนในส่วนทำระเหย	W
\dot{Q}_{max}	อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุด	W
Re_{cond}	ตัวเลขเรย์โนลด์ส์ในส่วนควบแน่น	
$Re_{cond\ max}$	ตัวเลขเรย์โนลด์ส์สูงสุดในส่วนควบแน่น	
Re_{eva}	ตัวเลขเรย์โนลด์ส์ในส่วนทำระเหย	
$Re_{eva\ max}$	ตัวเลขเรย์โนลด์ส์สูงสุดในส่วนทำระเหย	
S_{co}	พื้นที่ผิวของส่วนควบแน่น	m^2
S_{eo}	พื้นที่ผิวของส่วนทำระเหย	m^2

สารบัญสัญลักษณ์ (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
S_D	ระยะพิศซ์ตามแนวทแยงมุมเป็นระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางท่อในแนวแถวที่ ประกอบด้วยท่อจ็คเรียงแนวเหลื่อมกัน	m
S_L	ระยะพิศซ์ตามยาววัดตามแนวทิศการไหล	m
S_T	ระยะพิศซ์ตามขวางวัดตามแนวตั้งฉากกับทิศการไหล	m
T_{s1}	อุณหภูมิแหล่งระบายความร้อน	$^{\circ}C$
T_{so}	อุณหภูมิแหล่งกำเนิดความร้อน	$^{\circ}C$
ΔT_{max}	ผลต่างของอุณหภูมิน้ำร้อนขาเข้ากับน้ำเย็นขาเข้า	$^{\circ}C$
V_1	ปริมาณของของเหลวในเทอร์โมไซฟอนขณะยังไม่ได้ทำงาน	m^3
Z_1	ค่าความต้านทานความร้อน โดยการพาระหว่างแหล่งกำเนิดความร้อนและผิวด้านนอกของส่วนทำระเหย	K/W
Z_2	ค่าความต้านทานความร้อน โดยการนำผ่านความหนาของผนังท่อเทอร์โมไซฟอนในส่วนทำระเหย	K/W
Z_3	ค่าความต้านทานความร้อนภายในของของไหลที่กำลังเดือดในเทอร์โมไซฟอน	K/W
Z_7	ค่าความต้านทานความร้อนภายในของของไหลที่กำลังควบแน่นในเทอร์โมไซฟอน	K/W
Z_8	ค่าความต้านทานความร้อน โดยการนำผ่านความหนาของผนังท่อเทอร์โมไซฟอนในส่วนควบแน่น	K/W
Z_9	ค่าความต้านทานความร้อน โดยการพาระหว่างผิวของส่วนควบแน่นกับแหล่งระบายความร้อน	K/W
ϵ	ประสิทธิผลของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน	
$\alpha_{hot\ air}$	ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของก๊าซผสม	m^2/s
λ_f	สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของสารทำงาน	$W/m.K$
λ_x	ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน	$W/m.K$
ρ_l	ความหนาแน่นของสารทำงานในสถานะของเหลว	kg/m^3
$\rho_{hot\ air}$	ความหนาแน่นของก๊าซผสม	kg/m^3
ρ_v	ความหนาแน่นของสารทำงานในสถานะก๊าซ	kg/m^3

สารบัญสัญลักษณ์ (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
$\mu_{hot\ air}$	สัมประสิทธิ์ความหนืดของก๊าซผสม	<i>Pa.s</i>
μ_f	สัมประสิทธิ์ความหนืดของสารทำงาน	m^2 / s
$\nu_{hot\ air}$	ความหนืด	m^2 / s



บทที่ 1

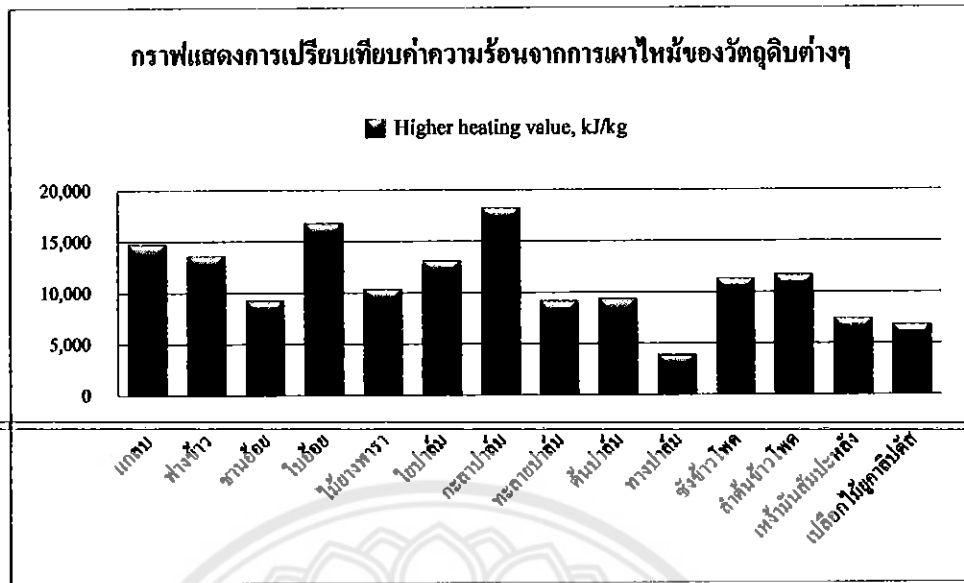
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ

ในปัจจุบันจะเห็นได้ว่าความต้องการทางด้านการใช้พลังงานของประเทศไทยมีแนวโน้มสูงขึ้นตามความเจริญของประเทศ ซึ่งพลังงานที่ใช้ส่วนใหญ่จะเป็นพลังงานที่มาจากแหล่งเชื้อเพลิง ที่ใช้แล้วหมดไป ประกอบกับเกิดวิกฤตการณ์ของพลังงานมีราคาที่สูงขึ้น ดังนั้นภาครัฐและเอกชนจึงมีนโยบายที่จะหาพลังงานอื่นๆ มาช่วยทดแทนพลังงานที่ใช้กันในปัจจุบัน อาทิเช่น พลังงานจากลม พลังงานความร้อนจากใต้พิภพ พลังงานจากแสงอาทิตย์ และพลังงานจากชีวมวล เป็นต้น

จากการศึกษาพบว่าเชื้อเพลิงชีวมวลที่เป็นเศษเหลือจากการเกษตรสามารถนำมาใช้เป็นพลังงานได้ในรูปของพลังงานความร้อน และเป็นแหล่งพลังงานทดแทนที่เหมาะสมที่สุดเพราะว่าประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม ทั่วทุกภาคของประเทศประกอบอาชีพเกษตรกรรม ซึ่งแหล่งพลังงานชีวมวลนี้ในประเทศไทยมีแหล่งพลังงานชนิดนี้อยู่มาก เช่น แกลบ ฟางข้าว ชานอ้อย ใบอ้อย ไม้ยางพารา ใบปาล์ม กะลาปาล์ม ทะลายปาล์ม ต้นปาล์ม ทางปาล์ม ชังข้าวโพด ลำต้นข้าวโพด เหง้ามันสำปะหลัง และเปลือกไม้ยูคาลิปตัส จากการเปรียบเทียบค่าความร้อนจากการเผาไหม้ของวัสดุชีวมวลต่างๆ พบว่า ค่าความร้อนจากการเผาไหม้ของกะลาปาล์มมีค่ามากที่สุด รองลงมาเป็น ใบอ้อย และแกลบ โดยมีค่าความร้อนจากการเผาไหม้เป็น 18,267 16,794 และ 14,755 kJ/kg ตามลำดับ ดังข้อมูลที่แสดงในรูปที่ 1.1

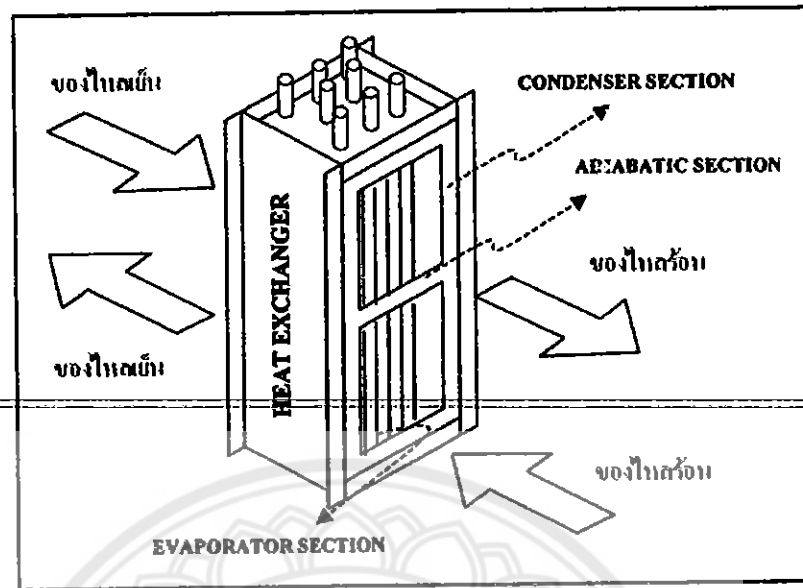
ส่วนมากเกษตรกรในภูมิภาค ภาคเหนือตอนล่างนี้มีการเพาะปลูกข้าวและอ้อยเป็นส่วนมาก แต่เกษตรกรที่ทำการเพาะปลูกอ้อยจะใช้ใบอ้อยไปทำอาหารเลี้ยงสัตว์ ทำเป็นปุ๋ยคลุมดินหลังการเก็บเกี่ยว หรือบางครั้งก็เผาทิ้งเพื่อความสะดวกในการเก็บเกี่ยว จึงทำให้ปริมาณใบอ้อยมีจำนวนน้อยกว่าเมื่อเทียบกับแกลบ แกลบ คือ วัสดุที่เหลือจากเก็บเกี่ยวผลผลิตเรียบร้อยแล้วจะต้องนำข้าวเปลือกไปสี เพื่อให้ได้เมล็ดข้าวออกมาสำหรับบริโภค ซึ่งการสีข้าวนั้นถ้าสีข้าว 1 ตันจะได้แกลบ ออกมาประมาณ 220 กิโลกรัม จึงน่าจะนำแกลบไปใช้เป็นเชื้อเพลิงผลิตพลังงานความร้อนต่อไป เพื่อใช้ให้เกิดประโยชน์และมีประสิทธิภาพสูงสุด



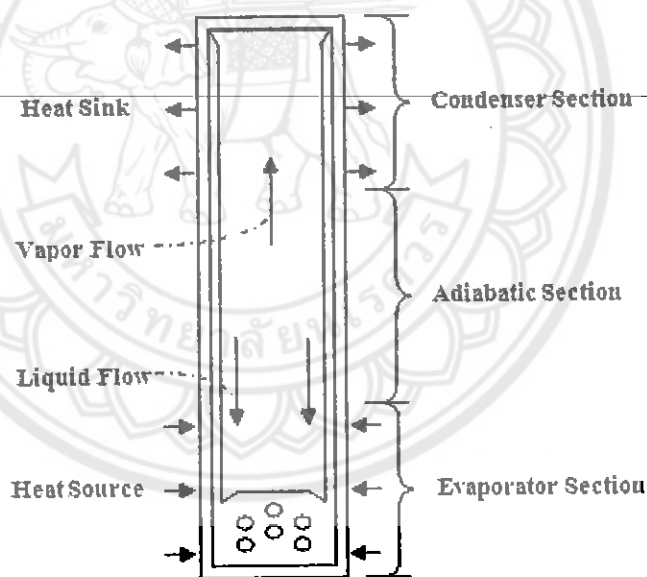
รูปที่ 1.1 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความร้อนจากการเผาไหม้ของวัสดุคิบต่างๆ [1]

นอกจากจะแก้ไขปัญหาด้วยพลังงานทดแทนแล้วการแก้ไขปัญหาสามารถทำได้อีกโดยการอนุรักษ์พลังงาน การประหยัดพลังงาน และการปรับปรุงอุปกรณ์ที่ใช้ให้มีประสิทธิภาพ วิธีหนึ่งที่สามารถช่วยในการอนุรักษ์พลังงานได้คือ การนำความร้อนที่กลับมาใช้ประโยชน์ โดยการประยุกต์ใช้ท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน (Thermosyphon) เป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน หรือที่เรียกว่า “เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน (Thermosyphon heat exchanger)” เนื่องจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดนี้ สามารถส่งถ่ายความร้อนได้เมื่อแหล่งรับความร้อนและระบายความร้อนอยู่ห่างกันมากๆ ไม่ต้องการพลังงานจากภายนอก สร้างและติดตั้งง่าย มีค่าอัตราการกินทุนต่ำ และยังคงสะดวกต่อการบำรุงรักษา เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน ประกอบด้วยกลุ่มท่อเทอร์โมไซฟอนซึ่งการทำงานจะอาศัยการเปลี่ยนสถานะและความร้อนแฝงที่เกิดขึ้นภายในของท่อความร้อนเป็นตัวส่งถ่ายความร้อน ดังแสดงในรูปที่ 1.2

เทอร์โมไซฟอน เป็นอุปกรณ์ส่งถ่ายความร้อนชนิดหนึ่งที่มีความสามารถส่งถ่ายความร้อนได้สูงมาก ประมาณ 200 เท่าเมื่อเทียบกับค่าการนำความร้อนของทองแดงที่มีมิติเท่ากัน [2] สร้างจากท่อปลายปิดทั้งสองด้านภายในเป็นสุญญากาศบรรจุด้วยสารทำงาน (Working fluid) ใ้จำนวนหนึ่ง ซึ่งชนิดของสารทำงานขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่จะนำเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนไปใช้งาน โดยทั่วไปเทอร์โมไซฟอนมีส่วนประกอบ 3 ส่วนคือ ส่วนที่ระเหย (Evaporator) ส่วนที่ไม่มีการถ่ายเทความร้อน (Adiabatic) และส่วนควบแน่น (Condenser) ดังแสดงในรูปที่ 1.3



รูปที่ 1.2 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน [2]



รูปที่ 1.3 แสดงส่วนประกอบของท่อเทอร์โมไซฟอน [2]

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนสามารถนำไปใช้ในการดึงความร้อนจากก๊าซไอเสียของการเผาไหม้จากการต้มน้ำเพื่อผลิตไอน้ำของหม้อน้ำ (Boiler) ก่อนที่จะปล่อยสู่บรรยากาศทางปล่องควัน โดยจะดึงความร้อนมาให้กับน้ำก่อนเข้าหม้อไอน้ำเพื่อเป็นการเพิ่มอุณหภูมิของน้ำ ทำให้ประหยัดเชื้อเพลิงในการต้มน้ำ พบว่าค่าประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมีค่ามากถึง 20 - 30% ซึ่งเป็นค่าที่สูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดอื่นๆ

ระบบทำน้ำร้อนเป็นระบบหนึ่งที่ต้องใช้พลังงานและสถานประกอบการหลายประเภท จำเป็นต้องใช้น้ำร้อนทั้งในการประกอบกิจการ ใช้ในการทำความสะอาด ใช้ในการฆ่าเชื้อโรคและอีกมากมาย เช่น โรงพยาบาล โรงแรม รีสอร์ท สถานบริการอาบอบนวด สปา ร้านอาหาร ร้านเสริมสวย และโรงงานอุตสาหกรรมเป็นต้น สำหรับการผลิตน้ำร้อนได้มีการใช้พลังงานหลายรูปแบบ ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้วิธีการต้มโดยใช้พลังงานจากก๊าซและไฟฟ้า หรือหากเป็นกิจกรรมขนาดใหญ่จะใช้หม้อต้ม (Boiler) ที่ใช้น้ำมันเตา หรือน้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิง เพราะฉะนั้นระบบทำร้อนก็เป็นระบบหนึ่งที่ส่งผลกระทบต่อการเกิดวิกฤตการณ์ของพลังงาน ดังนั้นจึงนำเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนมาประยุกต์ใช้ในการทำน้ำร้อน จากข้อมูลทั้งหมดที่ศึกษามาจึงนำกลับมาประยุกต์ใช้ร่วมกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในการทำน้ำร้อนจากก๊าซร้อนที่ได้จากการเผาไหม้แกลบ ในการเผาไหม้แกลบนั่นจะใช้เตาเผาแกลบแบบไซโคลนเพราะเป็นเตาที่ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิง มีขนาดเล็ก ประสิทธิภาพอยู่ที่ 50% และอุณหภูมิที่ 150 °C [3]

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.2.1 เพื่อออกแบบและสร้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนในการทำน้ำร้อนจากการเผาไหม้แกลบ

1.2.2 เพื่อวิเคราะห์อัตราการถ่ายเทความร้อนและประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนในการทำน้ำร้อนจากการเผาไหม้แกลบ เนื่องจากผลกระทบของตัวแปรต่างๆ

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.3.1 สามารถนำพลังงานชีวมวลมาประยุกต์ใช้ร่วมกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนในการทำน้ำร้อนแทนการใช้แหล่งพลังงานอื่นๆ

1.3.2 ทราบถึงผลกระทบจากตัวแปรที่มีผลต่อสมรรถนะเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนในการทำน้ำร้อนจากการเผาไหม้แกลบ

1.4 ขอบเขตการทำโครงการ

1.4.1 เทอร์โมไซฟอนสร้างจากท่อสแตนเลสขนาด 0.0254 m ยาว 1.50 m แบ่งเป็นส่วน ความแน่น 0.85 m ส่วนทำระเหย 0.60 m ส่วนที่ไม่มีการถ่ายเทความร้อน 0.05 m และใช้น้ำเป็น สารทำงานมีอัตราการเติมอยู่ที่ 50% ของปริมาตรของส่วนทำระเหย และโครงสร้างของส่วน ความแน่น ส่วนที่ไม่มีการถ่ายเทความร้อน และ ส่วนทำระเหยทำจากเหล็ก

1.4.2 ใช้เตาเผาไหม้แบบไซโคลน แบบเกษตรกรที่พัฒนาขึ้นโดยวิบูลย์ เทเพนทร์และคณะ

[3]

1.4.3 น้ำป้อนใช้น้ำประปาที่อุณหภูมิปกติ

1.4.4 อุณหภูมิน้ำร้อนขาออกจากเครื่องไม่ต่ำกว่า 50 °C อัตราการไหล 1 l/min

1.4.5 ระยะเวลาการทดลองตั้งแต่ 7.30 – 17.30 น.

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1.5.1 ศึกษาทฤษฎีพื้นฐาน

- เทอร์โมไซฟอน
- เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน
- การเผาไหม้
- เตาเผาแลกเปลี่ยนแบบไซโคลน

1.5.2 ออกแบบและสร้าง

- ออกแบบและสร้างท่อเทอร์โมไซฟอน
- ออกแบบและสร้าง โครงสร้างของกล่องส่วนทำระเหย
- ออกแบบและสร้าง โครงสร้างส่วนที่ไม่มีการถ่ายเทความร้อน
- ออกแบบและสร้าง โครงสร้างของกล่องส่วนความแน่น

1.5.3 ติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน ติดตั้งท่อน้ำและท่อก๊าซขาเข้า-ออก

1.5.4 เดินเครื่องให้น้ำเย็นไหลผ่านส่วนความแน่นของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน และเปิด การทำงานของเตาเผาเพื่อปล่อยก๊าซร้อนผ่านส่วนทำระเหยของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

1.7 รายละเอียดงบประมาณตลอดโครงการ

1.7.1	ท่อสแตนเลส	16,300	บาท
1.7.2	แผ่นที่ไม่มีการถ่ายเทความร้อน	2,000	บาท
1.7.3	กล่องของส่วนควบแน่น	3,300	บาท
1.7.4	กล่องของส่วนทำระเหย	1,400	บาท
1.7.5	ค่ากล้องเคลื่อนยวท่อเทอร์โมไซฟอน	1,400	บาท
1.7.6	ค่าน้ำกลั่น	120	บาท
1.7.7	ค่าหัวทองแดงปิดท่อ	1,000	บาท
รวมเป็นเงิน 25,520 บาท (สองหมื่นห้าพันห้าร้อยยี่สิบบาทถ้วน)			



บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีเบื้องต้น

ในการที่จะวิเคราะห์อัตราการถ่ายเทความร้อนและในการคำนวณประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนในการทำน้ำร้อนจากการเผาไหม้แก๊สเหล่านั้น จำเป็นต้องทราบถึงหลักการและทฤษฎีเบื้องต้น ดังจะกล่าวต่อไปนี้

2.1 เทอร์โมไซฟอน [4]

2.1.1 ลักษณะของเทอร์โมไซฟอน

เทอร์โมไซฟอนคือท่อความร้อนชนิดหนึ่งซึ่งเป็นอุปกรณ์ส่งถ่ายความร้อนที่มีความสามารถในการส่งถ่ายความร้อนได้สูงมาก ประมาณ 100 เท่า เมื่อเทียบกับค่าการนำความร้อนของท่อทองแดงที่มีมิติเท่ากัน ท่อที่ใช้ทำจากท่อปลายปิดทั้งสองด้าน ภายในเป็นสุญญากาศบรรจุฉนวนทำงานไว้จำนวนหนึ่ง

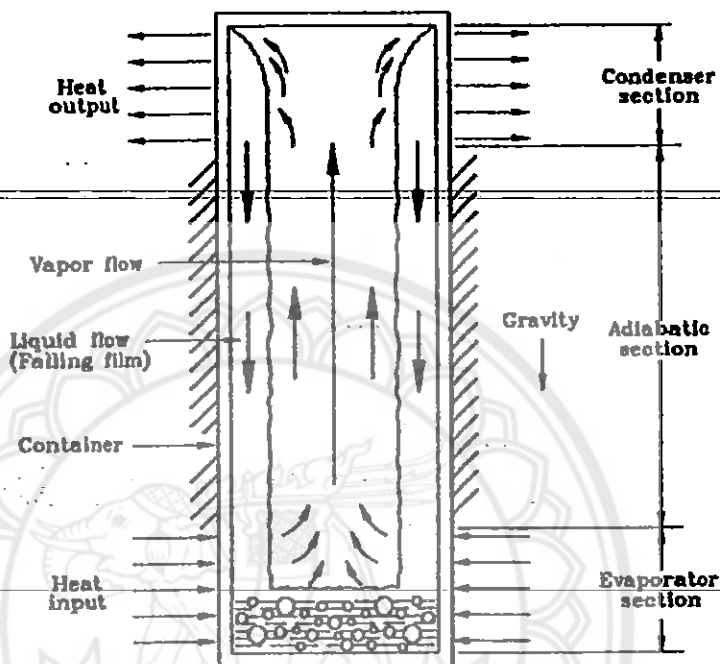
2.1.2 โครงสร้างของเทอร์โมไซฟอน

เทอร์โมไซฟอนมีส่วนประกอบ 3 ส่วน คือ ส่วนทำระเหย ซึ่งเป็นส่วนที่รับความร้อนจากแหล่งกำเนิดความร้อน ส่วนควบแน่น เป็นส่วนที่ระบายความร้อนออกจากสารทำงานไปสู่บรรยากาศ ส่วนกันความร้อน เป็นส่วนที่อุณหภูมิคงที่ ภายในท่อจะบรรจุสารทำงานปริมาณหนึ่งไว้ โดยสารทำงานจะเคลื่อนที่จากส่วนทำระเหยไปยังส่วนควบแน่นเพื่อระบายความร้อนที่ส่วนนี้ ชนิดของสารทำงานขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่จะนำเทอร์โมไซฟอนไปใช้งาน ซึ่งโครงสร้างของเทอร์โมไซฟอนดังแสดงในรูปที่ 2.1

2.1.3 หลักการทำงานของเทอร์โมไซฟอน

การทำงานของเทอร์โมไซฟอนจะอาศัยหลักการของการเปลี่ยนสถานะของสารทำงาน เมื่อสารทำงานรับความร้อนจากแหล่งกำเนิดความร้อน จะทำให้สารเกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะ

กลายเป็นไอ ทำให้เคลื่อนที่ขึ้นไปตามท่อจนถึงส่วนควบแน่นและทำให้เกิดการระบายความร้อนระหว่างสารทำงานกับบรรยากาศภายนอก จนทำให้สารทำงานเปลี่ยนสถานะกลับเป็นของเหลวอย่างเดิม และไหลกลับลงสู่ส่วนทำระเหย โดยแรงโน้มถ่วงของโลกเพื่อกลับไปรับความร้อนจากแหล่งกำเนิดความร้อนอีกครั้งหนึ่งซึ่งถือว่าเป็นการทำงานแบบวัฏจักร



รูปที่ 2.1 ลักษณะการทำงานของเทอร์โมไซฟอน [4]

2.1.4 ข้อดีของเทอร์โมไซฟอน

1. ง่ายต่อการสร้าง
2. สามารถนำความร้อนสูง
3. สามารถถ่ายเทความร้อนได้เมื่อแหล่งรับและระบายความร้อนอยู่ห่างกัน
4. สามารถใช้เป็นอุปกรณ์ระบายความร้อนในบริเวณที่มีพื้นที่เล็กและแคบได้
5. ไม่ต้องการแหล่งพลังงานจากภายนอกสำหรับใช้ในการทำงาน

2.1.5 อัตราการเติมสารทำงาน

ควรหลีกเลี่ยงการเติมสารทำงานที่มากเกินไป เพราะสารทำงานจะไปลดพื้นที่ในส่วนควบแน่น และทำให้การถ่ายเทความร้อนลดลง แต่ถ้าเติมสารทำงานไม่เพียงพอ จะเกิดการแห้ง (Dry out) ขึ้นที่ผิววนอกของส่วนทำระเหย อัตราการเติมสารทำงานแทนด้วยสัญลักษณ์ F เป็นสัดส่วน

กับปริมาตรของๆ เหลวในเทอร์โมไซฟอนที่ขณะยังไม่ได้ทำงาน (V_i) กับปริมาตรในส่วนทำระเหย
คือ

$$F = V_i / A l_e \quad (2.1)$$

โดยที่ V_i คือ ปริมาตรของของเหลวในเทอร์โมไซฟอนขณะยังไม่ได้ทำงาน, m^3
 A คือ พื้นที่หน้าตัดภายในของเทอร์โมไซฟอนมีค่าเท่ากับ $\pi D_i^2 / 4$, m^2

l_e คือ ความยาวในส่วนทำระเหย, m

D_i คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อเทอร์โมไซฟอน, m

สำหรับเทอร์โมไซฟอนที่วางตัวอยู่ในแนวตั้ง โดยปกติจะเติมของเหลวมากกว่าครึ่งหนึ่ง
ของส่วนทำระเหยเพื่อให้ความหนาฟิล์มมากกว่า 0.3 มิลลิเมตร ตลอดความยาวท่อ ซึ่งจะอยู่ในช่วง
40% ถึง 60% ของส่วนทำระเหยและ

$$V_d \geq 0.001 D_o (l_e + l_a + l_c) \quad (2.2)$$

เมื่อ D_o เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อเทอร์โมไซฟอน, m

l_e เป็นความยาวในส่วนทำระเหย, m

l_a เป็นความยาวในส่วนที่ไม่มีการถ่ายเทความร้อน, m

l_c เป็นความยาวในส่วนควบแน่น, m

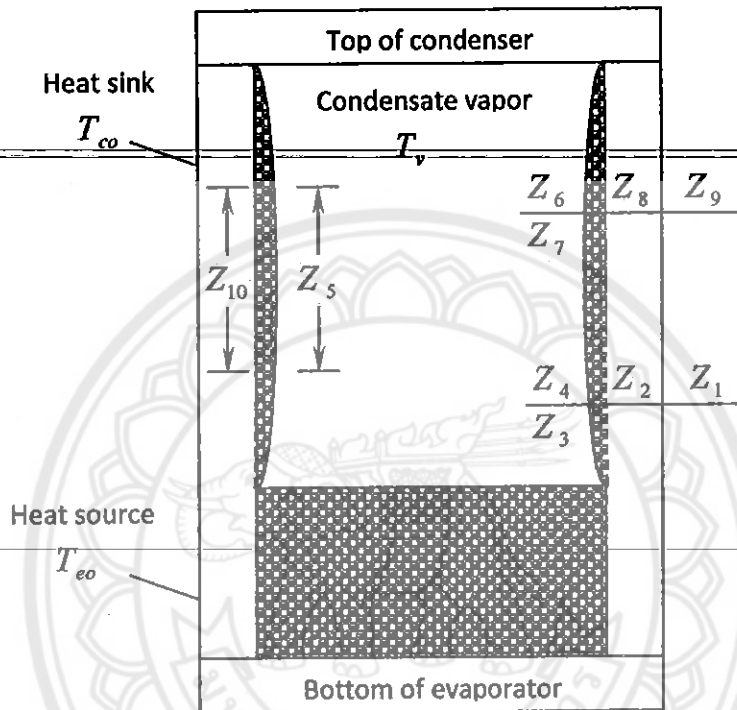
2.1.6 การถ่ายเทความร้อนของเทอร์โมไซฟอน

ความสัมพันธ์ของค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนจริง (Q_{Ts}) ค่าความต้านทานความร้อนรวม
(Z) และค่าความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างแหล่งกำเนิดความร้อนกับแหล่งระบายความร้อน
($\Delta T = T_{so} - T_{sl}$) คือ

$$Q_{Ts} = \Delta T / Z \quad (2.3)$$

โดยที่ T_{so} คือ อุณหภูมิแหล่งกำเนิดความร้อน, องศาเซลเซียส

T_{sl} คือ อุณหภูมิแหล่งระบายความร้อน, องศาเซลเซียส

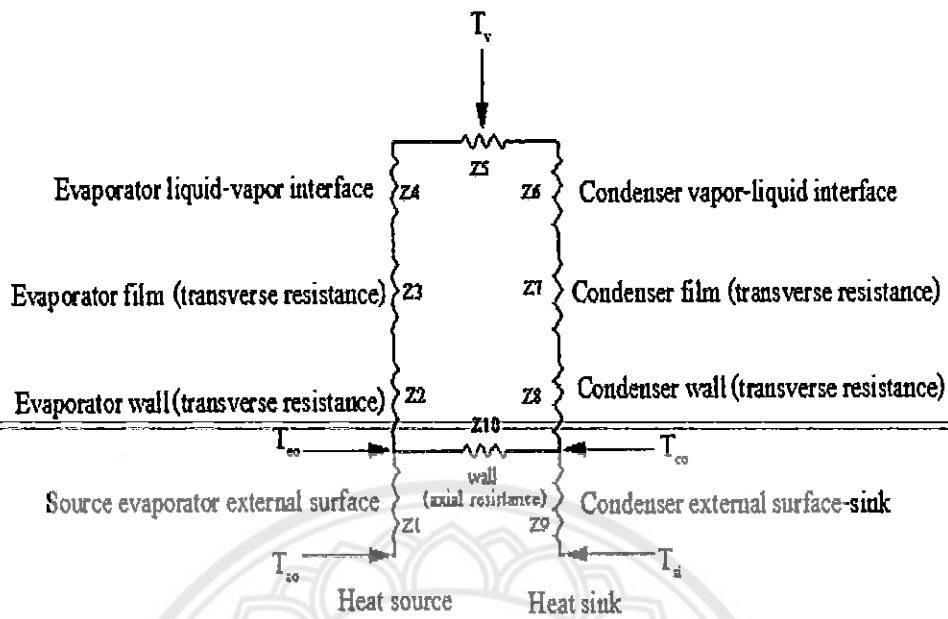


รูปที่ 2.2 แสดงตำแหน่งค่าความต้านทานการถ่ายเทความร้อนทั้งหมด [4]

ค่าความต้านทานความร้อนรวมประกอบด้วยค่าความต้านทานต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 และ 2.3

Z_1 คือ ค่าความต้านทานความร้อนโดยการพาระหว่างแหล่งกำเนิดความร้อนและผิวด้านนอกของส่วนทำระเหย, K/W

Z_9 คือ ค่าความต้านทานความร้อนโดยการพาระหว่างผิวของส่วนควบแน่นกับแหล่งระบายความร้อน, K/W



รูปที่ 2.3 วงจรความต้านทานการถ่ายเทความร้อนภายในเทอร์โมไซฟอน [4]

ถ้า Z_1 และ Z_9 หาได้จากสมการดังนี้

$$Z_1 = 1/(h_{eo}S_{eo}) \text{ และ } Z_9 = 1/(h_{co}S_{co}) \quad (2.4)$$

โดยที่ h_{eo} คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน โดยการพาที่พื้นผิวของส่วนทำระเหย,
 W/m^2K

S_{eo} คือ พื้นผิวของส่วนทำระเหย, m^2

h_{co} คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน โดยการพาที่พื้นผิวของส่วนควบแน่น,
 W/m^2K

S_{co} คือ พื้นผิวของส่วนควบแน่น, m^2

Z_2 คือ ค่าความต้านทานความร้อน โดยการนำผ่านความหนาของผนังท่อเทอร์โมไซฟอนในส่วนทำระเหย, K/W

Z_8 คือ ค่าความต้านทานความร้อน โดยการนำผ่านความหนาของผนังท่อเทอร์โมไซฟอนในส่วนควมแน่น, K/W

ค่า Z_2 และ Z_8 หาได้จากสมการดังนี้

$$Z_2 = \ln(D_o / D_i) / 2\pi_c \lambda_x \text{ และ } Z_8 = \ln(D_o / D_i) / 2\pi_c \lambda_x \quad (2.5)$$

โดยที่ D_o คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของเทอร์โมไซฟอน, m

D_i คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของเทอร์โมไซฟอน, m

λ_x คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน, $W/m.K$

Z_3 คือ ค่าความต้านทานความร้อนภายในของของไหลที่กำลังเคือคในเทอร์โมไซฟอน, K/W

Z_7 คือ ค่าความต้านทานความร้อนภายในของของไหลที่กำลังควมแน่นในเทอร์โมไซฟอน, K/W

ค่า Z_3 และ Z_7 จะขึ้นอยู่กับสมบัติของของไหล ขนาดของเทอร์โมไซฟอน และอัตราการถ่ายเทความร้อน ซึ่งสามารถหาได้ดังนี้

$$Z_{3f} = \frac{cQ^{1/3}}{D^{4/3} g^{1/3} \rho_c^{4/3} \phi_2} \quad (2.6)$$

$$\text{โดยที่ } \phi_2 = (h_{fg} \lambda_1^3 \rho_1 / \mu_1)^{4/3} \quad (2.7)$$

$$Z_{3p} = \frac{1}{\phi_3 g^{0.2} Q^{0.4} (\pi D_i)^{0.6}} \quad (2.8)$$

$$\text{โดยที่ } \phi_3 = \frac{\rho_l^{0.65} \lambda_l^{0.3} c_p^{0.7}}{\rho_v^{0.25} h_{fg}^{0.4} \mu_l^{0.1}} \left[\frac{P_v}{P_a} \right]^{0.23} \times 0.32 \quad (2.9)$$

โดยที่ ρ_l คือ ความหนาแน่นของสารทำงานในสถานะของเหลว, kg/m^3

ρ_v คือ ความหนาแน่นของสารทำงานในสถานะก๊าซ, kg/m^3

λ_l คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของสารทำงาน, $W/m.K$

h_{fg} คือ ค่าความร้อนแฝงของสารทำงาน, J/kg

c_p คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของสารทำงาน, $J/kg.K$

μ_l คือ สัมประสิทธิ์ความหนืดของสารทำงาน, m^2/s

P_v คือ ความดันไอของสารทำงาน, Pa

P_a คือ ความดันของบรรยากาศ, Pa

ถ้า $Z_{3p} < Z_{3f}$ ให้ $Z_3 = Z_{3p}$

ถ้า $Z_{3p} > Z_{3f}$ คำนวณ Z_3 จากสมการ

$$Z_3 = Z_{3p} F + Z_{3f} (1 - F) \quad (2.10)$$

และ Z_7 สามารถหาได้ดังนี้

$$Re_f = \frac{4Q}{h_{fg} \mu_l \pi D_i} \quad (2.11)$$

ถ้า $50 < Re_f < 1300$ คำนวณ Z_7 จากสมการ

$$Z_7 = \frac{cQ^{1/3}}{D_1^{4/3} g^{1/3} l_c \phi_2^{4/3}} \quad (2.12)$$

ถ้า $Re_f > 1300$ คำนวณ Z_7 จากสมการ

$$Z_7 = \frac{cQ^{1/3}}{D_1^{4/3} g^{1/3} l_c \phi_2^{4/3}} \times 191 Re_f^{-0.733} \quad (2.13)$$

โดยที่ $c = 0.235$

Z_4 และ Z_6 เป็นความต้านทานความร้อนระหว่างหน้าสัมผัสไอกับผิวของของเหลวในส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่น ตามลำดับ ซึ่งน้อยมาก ดังนั้นสามารถไม่นำมาพิจารณาได้

Z_5 เป็นความต้านทานความร้อนของ Pressure drop ระหว่างทางจากส่วนทำระเหยไปส่วนควบแน่น แต่มีค่าน้อยมาก ดังนั้นสามารถไม่นำมาพิจารณาได้

Z_{10} เป็นความต้านทานความร้อนในแนวแกนตามผนังท่อหาได้จาก

$$Z_{10} = (0.5l_e + l_o + 0.5l_c) / (A_x \lambda_x) \quad (2.14)$$

โดยที่ A_x เป็นพื้นที่หน้าตัดของผนังท่อ, m^2

สำหรับตำแหน่งการทำงานปกติ เมื่อส่วนทำระเหยอยู่ต่ำกว่าส่วนควบแน่น การนำความร้อนผ่านผนังตามแนวแกนท่อจะมีผลน้อยมากต่อสมรรถนะของเทอร์โมไซฟอน

เงื่อนไขการออกแบบเมื่อไม่พิจารณาการนำความร้อนในแนวแกน คือ

$$Z_{10} / (Z_2 + Z_3 + Z_5 + Z_7 + Z_8) > 20 \quad (2.15)$$

ถ้าเป็นไปตามสมการ ค่าความต้านทานความร้อนรวม คือ

$$Z = Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_5 + Z_7 + Z_8 + Z_9 \quad (2.16)$$

ถ้าไม่เป็นไปตามสมการ ค่าความต้านทานความร้อนรวม คือ

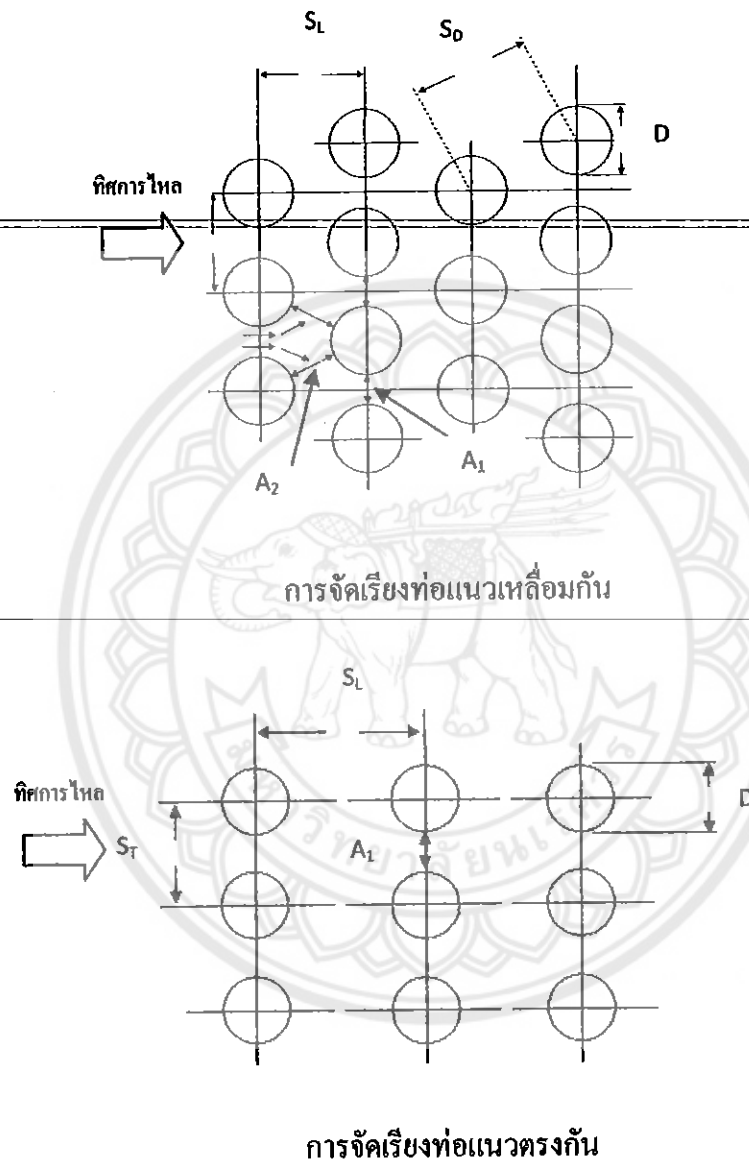
$$Z = Z_1 + [(Z_2 + Z_3 + Z_5 + Z_7 + Z_8)^{-1} + (1/Z_{10})]^{-1} + Z_9 \quad (2.17)$$

2.2 การไหลขวางกลุ่มท่อ [5]

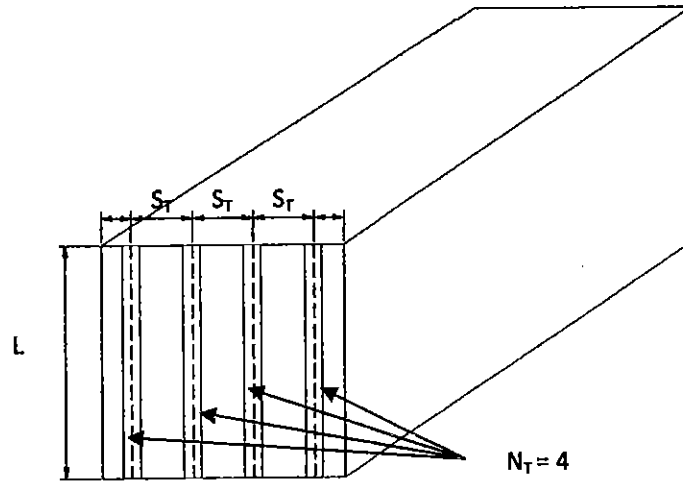
ในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่อาศัยการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างของไหลในท่อ และของไหลภายนอกท่อ กลุ่มท่อที่ใช้จะแบ่งเป็นการจัดเรียงแนวตรงกันและการจัดเรียงแนว เกลื่อนกัน จากการทดลองพบว่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแต่ละแถวที่ของไหลไหลผ่านนั้นค่า ไม่เท่ากัน ระดับความปั่นป่วนจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ในแถวท้ายๆ ดังนั้นสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ในแถวท้ายๆ จึงมีค่ามากกว่า

การกำหนดค่าดัชนีแถวของกลุ่มท่อพิจารณาตามแนวทิศทางการไหล โดยจำนวนแถว แนวตั้ง (N_r) วัดจากจำนวนแถวที่มีทิศตั้งฉากกับการไหล จำนวนแถวแนวนอน (N_p) วัดจากจำนวน แถวตามทิศการไหล ระยะพิศซ์ตามยาว (S_r) วัดตามแนวทิศการไหล ระยะพิศซ์ตามขวาง (S_p) วัด ตามแนวตั้งฉากกับทิศการไหล และระยะพิศซ์ตามแนวทแยงมุม (S_p) เป็นระยะห่างระหว่างจุด

ศูนย์กลางท่อในแนวแถวที่ประกอบด้วยท่อจัดเรียงแนวเหลื่อมกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.4 และรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.4 การจัดเรียงของกลุ่มท่อ [S]



รูปที่ 2.5 แสดงพื้นที่หน้าตัดของการไหล

เราสามารถหาความเร็วของของไหลได้จาก

$$V = \frac{\dot{m}}{\rho A} \quad (2.18)$$

โดยที่

$$A = N_T \times S_T \times L \quad (2.19)$$

ตัวเลขเรย์โนลด์ส์สำหรับการไหลผ่านกลุ่มท่อ नियามจาก

$$Re_D = \frac{\rho V_{\max} D}{\mu} = \frac{G_{\max} D}{\mu} \quad (2.20)$$

V_{\max} พิจารณาบนพื้นที่การไหลอิสระต่ำสุด (Minimum free-flow area, A_{\min}) ซึ่งพิจารณาบนพื้นที่อิสระแนวขวาง (A_1) หรือแนวทแยง (A_2) ดังแสดงในรูปที่ 2.4

m คือ อัตราการไหลโดยมวลทั้งหมด มีหน่วยเป็น kg/s

สำหรับท่อจัดเรียงแนวตรงกันและท่อจัดเรียงแนวเหลื่อมกัน และ V_{max} เกิดบนระนาบของ A_1 ใช้สมการ

$$V_{max} = \left(\frac{S_T}{S_T - D} \right) V \quad (2.21)$$

สำหรับท่อจัดเรียงแนวเหลื่อมกันอาจมี V_{max} เกิดบนระนาบ A_2 ก็ได้ถ้า

$S_D < (S_T + D)/2$ และจะใช้สมการ

$$V_{max} = \left(\frac{S_T}{S_D - D} \right) \frac{V}{2} \quad (2.22)$$

2.2.1 การพาความร้อนบนวัตถุรูปทรงกระบอก

สหสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยสำหรับการไหลขวางท่วมในทิศตั้งฉากกับแนวแกนวัตถุรูปทรงกระบอกที่มีอุณหภูมิผิวคงที่สำหรับของเหลวและก๊าซอยู่ในรูปของ

$$Nu_m = \frac{h_m D}{k} = C Re_D^m Pr^n \left(\frac{Pr}{Pr_s} \right)^{1/4} \quad (2.23)$$

ถ้า $Pr \leq 10$ ให้ใช้ $n = 0.37$ และถ้า $Pr > 10$ ให้ใช้ $n = 0.36$

ส่วน C และ m พิจารณาจากตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่าคงที่ C และ m สำหรับสมการที่ 2.23 [5]

Re_D	C	m
1 – 40	0.75	0.40
40 – 1×10^3	0.51	0.50
1×10^3 – 2×10^5	0.26	0.60
2×10^5 – 1×10^6	0.076	0.70

2.2.2 การพาความร้อนในกลุ่มท่อ

จากความสัมพันธ์ของซุเคลสคาสในรูปแบบของ

$$Nu_m = \frac{h_m D}{k} = A Re_D^n Pr^{0.36} \left(\frac{Pr}{Pr_s} \right)^{1/4} \quad (2.24)$$

สำหรับ จำนวนแลวในทิศทางการไหล $N_L \geq 20$

$$0.7 < Pr < 500$$

$$10^3 < Re_D < 2 \times 10^6$$

สมการที่ 2.24 สามารถใช้ได้ทั้งของเหลวและก๊าซ สำหรับก๊าซนั้น $(Pr/Pr_s) = 1.0$ และพิจารณาสมบัติทุกตัวในสมการที่อุณหภูมิฟิล์ม $T_f = (T_s + T_\infty)/2$ สำหรับของเหลว นั้นพิจารณาสมบัติทุกตัวในสมการที่อุณหภูมิเฉลี่ย $T_{bm} = (T_{mi} + T_{mo})/2$ ยกเว้น Pr_s พิจารณาที่อุณหภูมิผิวท่อ T_s

สำหรับค่าคงที่ A และ n ในสมการที่ 2.24 พิจารณาได้จากตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ค่าคงที่ A และ n สำหรับสมการที่ 2.24 [5]

แบบการจัดเรียงของกลุ่มท่อ	A	N
1)ท่อจัดเรียงแนวตรงกัน		
$10^3 < Re_D < 2 \times 10^5$	0.27	0.63
$2 \times 10^5 < Re_D < 2 \times 10^6$	0.021	0.84
2)ท่อจัดเรียงแนวเหลื่อมกัน		
$10^3 < Re_D < 2 \times 10^5, \left(\frac{S_T}{S_L} > 2\right)$	0.40	0.60
$10^3 < Re_D < 2 \times 10^5, \left(\frac{S_T}{S_L} < 2\right)$	$0.35 (S_T / S_L)^{0.2}$	0.60
$2 \times 10^5 < Re_D < 2 \times 10^6$	0.022	0.84

กรณีจำนวนแถวตามทิศการไหลที่ออกแบบ $N_L < 10$ จะมีการแก้ค่าสมการ

$$\frac{(Nu_m)_{N_L < 10}}{(Nu_m)_{eq(24)}} = \left(\frac{N_L}{10}\right)^{0.18} \quad (2.25)$$

2.2.3 อัตราการถ่ายเทความร้อนจากผิวท่อสู่ของไหลผ่านกลุ่มท่อ

กำหนดให้อุณหภูมิผิวท่อคงที่ T_s ของไหลไหลเข้ากลุ่มท่อที่อุณหภูมิ $T_{\infty 1}$ และออกที่อุณหภูมิ $T_{\infty 2}$ จากสมดุลของพลังงาน (จำนวนท่อทั้งหมดในกลุ่มท่อ = N ท่อ, ท่อยาว L) อัตราการถ่ายเทความร้อนทั้งหมดระหว่างท่อกับของไหล

$$\dot{Q} = \dot{m}C_p(T_{\infty 2} - T_{\infty 1}) = h_m N \pi D L \Delta T_{lm} \quad (2.26)$$

$$\text{โดยที่} \quad \Delta T_{lm} = \frac{(T_s - T_{\infty 1}) - (T_s - T_{\infty 2})}{\ln[(T_s - T_{\infty 1}) / (T_s - T_{\infty 2})]} \quad (2.27)$$

$$\text{ในที่นี้} \quad \dot{m} = A_{\infty} V \rho = N_T S_T L V \rho \quad \text{ดังนั้น}$$

$$\frac{T_s - T_{\infty 2}}{T_s - T_{\infty 1}} = \exp\left(-\frac{\pi D N h_m}{\rho V N_T S_T C_p}\right) \quad (2.28)$$

โดยที่ N_T คือจำนวนท่อใน 1 แถว และจำนวนท่อทั้งหมด $N = N_T N_L$

2.2.4 ประสิทธิภาพของกลุ่มท่อ

สำหรับประสิทธิภาพของกลุ่มท่อ สามารถหาได้จากสมการ

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_{Max}} = \frac{Q}{(\dot{m} C_p)_{\min} \Delta T_{\max}} \quad (2.29)$$

โดย $(\dot{m} C_p)_{\min}$ คือ $\dot{m} \times C_p$ ของของไหลระหว่างส่วนควบแน่นกับส่วนทำระเหยที่มีค่าน้อยที่สุด

ΔT_{\max} คือ ผลต่างของอุณหภูมิน้ำร้อนขาเข้ากับน้ำเย็นขาเข้า

2.3 ทฤษฎีการเผาไหม้

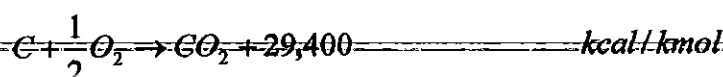
ปฏิกิริยาการเผาไหม้หรือการสันดาปเชื้อเพลิง (Combustion) เป็นปฏิกิริยาที่เชื้อเพลิงเกิดออกซิเดชัน (Oxidation) อย่างรวดเร็ว พร้อมกับปล่อยพลังงานความร้อนและแสงสว่างออกจากการสันดาปเชื้อเพลิง ประกอบด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารสันดาปชนิดต่างๆ ที่มีอยู่ในเชื้อเพลิง สมการการสันดาปและการคำนวณเกี่ยวกับกระบวนการเผาไหม้ที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้เป็น การคำนวณเชิงทฤษฎีในกรณีที่ถือว่าการเผาไหม้สมบูรณ์จะหมายถึงค่าความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ที่มีค่าความร้อนของเชื้อเพลิง และธาตุไนโตรเจนไม่เกิดปฏิกิริยากับธาตุอื่นในกระบวนการ

เผาไหม้การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงประกอบด้วยด้วยปฏิกิริยาเคมีต่างๆ ที่เกิดขึ้นซึ่งจะสามารถแสดง
ได้ดังสมการต่อไปนี้ [6]

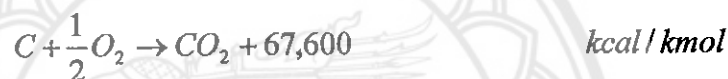
- (1) การเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการสันดาปอย่างสมบูรณ์ของคาร์บอน



- (2) การเกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์จากการสันดาปไม่สมบูรณ์ของคาร์บอน



- (3) การเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการสันดาปอย่างสมบูรณ์ของก๊าซคาร์บอน
มอนอกไซด์



- (4) การเกิดน้ำจากการสันดาปอย่างสมบูรณ์ของไฮโดรเจน



- (5) การเกิดไอน้ำจากการสันดาปอย่างสมบูรณ์ของไฮโดรเจน



- (6) การเกิดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จากการเกิดออกซิเดชันของซัลเฟอร์



2.3.1 การวัดค่าความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวล [6]

มีวิธีการวัด 3 แบบคือ

1. ค่าความร้อนต่ำ หรือ Lower heating value (LHV)

หมายถึงการนำชีวมวลหนัก 1 กิโลกรัม มาหาค่าความร้อน ค่าที่วัดได้คือ ค่าความร้อนต่ำ (LHV) ต่อ กิโลกรัม

2. ค่าความร้อนสูง หรือ Higher heating value (HHV)

หมายถึงการนำชีวมวลหนัก 1 กิโลกรัม มาลดความชื้นหรือกำจัดน้ำออกให้หมด จากนั้นนำมาหาค่าความร้อน ค่าที่วัดได้คือ ค่าความร้อนสูง (HHV) ต่อ กิโลกรัม และมีความสัมพันธ์กับค่าความร้อนต่ำดังนี้

$$HHV = LHV - 5.72(9H - M) \quad kcal / kg \quad (2.30)$$

หรือ

$$HHV = LHV + 23.95(9H + M) \quad kJ / kg \quad (2.31)$$

เมื่อ H เท่ากับปริมาณเปอร์เซ็นต์ของธาตุไฮโดรเจนในชีวมวล และ
เมื่อ M เท่ากับปริมาณเปอร์เซ็นต์ของความชื้นในชีวมวล

3. ค่าความร้อนแห้ง หรือ Dry Heating Value

หมายถึงการนำชีวมวลจำนวนหนึ่งมาลดความชื้นหรือกำจัดน้ำออกให้หมด จากนั้นแบ่งมา 1 กิโลกรัม เพื่อนำมาหาค่าความร้อน ค่าที่วัดได้คือ ค่าความร้อนแห้งต่อกิโลกรัม และมีความสัมพันธ์กับค่าความร้อนสูงดังนี้

$$\text{Dry Heating value} = HHV / (1 - M / 100) \quad kcal / kg \quad (2.32)$$

เมื่อ M เท่ากับปริมาณเปอร์เซ็นต์ของความชื้นในชีวมวล

7 ๕๐๐ 7534 16
 ๓2310
 2552

2.3.2 เชื้อเพลิงแกลบ

แกลบที่ใช้ในการทดลองเป็นแกลบที่ได้จากส่วนประกอบของเมล็ดข้าว ซึ่งสามารถอธิบายที่มาของแกลบได้ดังนี้ เมล็ดข้าวเป็นผลชนิดคาริออปซิส (Caryopsis) ส่วนที่เป็นเมล็ดที่ติดแน่นอยู่กับผนังของรังไข่หรือเชื้อหุ้มผล สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน คือ เปลือกใหญ่ (Lemma) เปลือกเล็ก (Pale) ประกบกันแบบตะขอยึด (Interlocking fold) ทั้งสองข้างตลอดแนวความยาว ภายในเปลือกที่หุ้มเมล็ดข้าวนี้มีช่องว่างระหว่างเม็ด และเปลือกที่ปลายทั้ง 2 ด้าน ผิวของเปลือกทั้งสองส่วนจะมีหนามแข็งเล็กๆติดอยู่โดยรอบทั่วไปข้อดี มีคุณสมบัติในการเป็นเชื้อเพลิงได้ดีพอสมควร และราคาถูกมากข้อเสีย เมื่อถูกเผาไหม้จะมีปริมาณเขม่าสูงพอประมาณ 15.7 – 21.3 เปอร์เซ็นต์ มีปริมาณความชื้นสูง

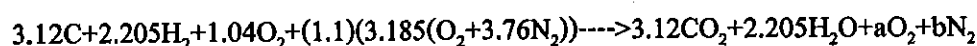
จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเชื้อเพลิงชีวมวลโดยวิธีการวิเคราะห์ทางเคมีทำให้ทราบองค์ประกอบของเชื้อเพลิงชีวมวลของแกลบดังนี้

ธาตุคาร์บอน	ประมาณ	37 – 40	เปอร์เซ็นต์
ออกซิเจน	ประมาณ	32 – 37	เปอร์เซ็นต์
ไฮโดรเจน	ประมาณ	5	เปอร์เซ็นต์
ไนโตรเจน	ประมาณ	1	เปอร์เซ็นต์
ซีเถ้า	ประมาณ	12 – 17	เปอร์เซ็นต์
LHV	ประมาณ	13.52	MJ/kg

ตารางที่ 2.3 แสดงคุณสมบัติทางเคมีของชีวมวลแต่ละชนิด [7]

	แคลบ	ฟางข้าว	ชานอ้อย	ใบอ้อย	ไม้ยางพารา	โตปาล์ม	กะลาปาล์ม	ทะเลปาล์ม	ต้นปาล์ม	ทงปาล์ม	รังข้าวโพด	ลำต้นข้าวโพด	แห้งมันสำปะหลัง	เปลือกไม้สุก
Proximate analysis														
Moisture, %	12.00	10.00	50.73	9.20	45.00	38.50	12.00	58.60	48.40	78.40	40.00	41.70	59.40	60.00
Ash, %	12.65	10.39	1.43	6.10	1.59	4.42	3.50	2.03	1.20	0.70	0.90	3.70	1.50	2.44
Volatile Matter, %	56.46	60.70	41.98	67.80	45.70	42.68	68.20	30.46	38.70	16.30	45.42	46.46	31.00	28.00
Fixed Carbon, %	18.88	18.90	5.86	16.90	7.71	14.39	16.30	8.90	11.70	4.60	13.68	8.14	8.10	9.56
Ultimate Analysis														
Carbon, %	37.48	38.17	21.33	41.60	25.58	30.82	44.44	21.15	23.90	10.13	28.19	27.83	18.76	18.60
Hydrogen, %	4.41	5.02	3.06	5.08	3.19	3.74	5.01	2.56	3.04	1.25	3.36	4.06	2.48	2.12
Oxygen, %	33.27	35.28	23.29	37.42	24.48	21.61	34.70	15.34	22.91	9.44	27.42	22.47	17.50	16.68
Nitrogen, %	0.17	0.58	0.12	0.40	0.14	0.84	0.28	0.27	0.56	0.07	0.12	0.13	0.032	0.15
Sulfur, %	0.04	0.09	0.03	0.17	0.02	0.08	0.02	0.04	0.06	0.02	0.05	Na	0.04	0.02
Chlorine, %	0.09	Na	Na	0.01	0.01	0.11	0.02	0.16	Na	0.12	0.05	Na	0.05	0.10
Ash, %	12.65	10.39	1.43	6.10	1.60	4.42	3.52	2.03	1.20	0.70	0.90	3.70	1.50	2.44
Moisture, %	12.00	10.00	50.73	9.20	45.00	38.50	12.00	58.60	48.40	78.40	40.00	41.70	59.40	60.00
Other Characteristics														
Bulk Density, kg/m ³	150	125	120	100	450	250	400	380	Na	Na	Na	Na	250	Na
Higher heating value, kJ/kg	14,755	13,650	9,243	16,794	10,365	13,127	18,267	9,196	9,370	3,908	11,298	11,704	7,451	6,811
Lower heating value, kJ/kg	13,517	12,330	7,368	15,479	8,600	11,400	16,900	7,240	7,556	1,760	9,615	9,830	5,494	4,917

การเผาไหม้ เป็นปฏิกิริยาเคมีประเภทหนึ่ง ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างสารต่าง ๆ กับออกซิเจนในอากาศ เกิดเป็นสารประกอบของออกซิเจน (ออกไซด์) ซึ่งในการเกิดปฏิกิริยาเคมีนี้ จะให้ความร้อนออกมาโดยทั่วไปเชื้อเพลิงจะประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้ คาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H₂) ออกซิเจน (O) ซัลเฟอร์ (S) ไนโตรเจน (N) น้ำ H₂O และเถ้า ในปฏิกิริยาการเผาไหม้เชื้อเพลิงแกลบ เป็นการเผาไหม้สมบูรณ์กับอากาศ 110% ของอากาศทางทฤษฎี คั่งสมการเคมีของการเผาไหม้แกลบ [3]



จากสมการจำนวนอะตอมของ O₂ จะได้

$$(2)(1.04) + (1.1)(3.185)(2) = (3.12)(2) + (2.205) + (2)(a)$$

$$2.08 + 7.007 = 6.24 + 2.205 + 2a$$

$$9.087 = 8.445 + 2a$$

$$a = 0.321$$

จากสมการจำนวนอะตอมของ N₂ จะได้

$$(1.1)(3.185)(3.76) = b$$

$$b = 13.173$$

คั่งนั้นสมการเคมีใหม่จะได้



และผลรวมจำนวน โมลของผลิตภัณฑ์คือ

$$\text{จำนวนโมลรวม} = 3.12 + 2.205 + 0.321 + 13.173 = 18.819$$

แปลงหน่วยจากหน่วย โดยมวล โมเลกุลของก๊าซให้เป็น โดยมวลของก๊าซคั่งนี้

$$\text{มวลก๊าซ } CO_2 = (3.12)(44) = 137.28$$

$$\text{มวลก๊าซ } H_2O = (2.205)(18) = 39.69$$

$$\text{มวลก๊าซ } O_2 = (0.321)(32) = 10.272$$

$$\text{มวลก๊าซ } N_2 = (13.173)(28) = 368.044$$

และสามารถคำนวณมวลรวมก๊าซผสมจากมวลก๊าซแต่ละตัวได้เป็น

$$\begin{aligned}\text{มวลรวมก๊าซผสม} &= \text{มวลก๊าซ CO}_2 + \text{มวลก๊าซ H}_2\text{O} + \text{มวลก๊าซ O}_2 + \text{มวลก๊าซ N}_2 \\ &= 18.819 \quad \times\end{aligned}$$

สามารถหาเศษส่วนโดยมวลของก๊าซแต่ละตัวในก๊าซผสมได้เป็น

$$\text{เปอร์เซ็นต์โดยมวล CO}_2 (\% \text{CO}_2) = \text{มวลก๊าซ CO}_2 / \text{มวลรวมก๊าซผสม}$$

$$= 0.1657$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์โดยมวล H}_2\text{O} (\% \text{H}_2\text{O}) = \text{มวลก๊าซ H}_2\text{O} / \text{มวลรวมก๊าซผสม}$$

$$= 0.1171$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์โดยมวล O}_2 (\% \text{O}_2) = \text{มวลก๊าซ O}_2 / \text{มวลรวมก๊าซผสม}$$

$$= 0.0170$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์โดยมวล N}_2 (\% \text{N}_2) = \text{มวลก๊าซ N}_2 / \text{มวลรวมก๊าซผสม}$$

$$= 0.6999$$

พิจารณาให้ก๊าซผสมเป็นก๊าซผสมในอุดมคติ (Ideal gas mixture) ดังนั้นสามารถคำนวณสมบัติของ
ก๊าซผสมแต่ละตัวได้ดังนี้

สมการการหา $\rho_{hot\ air}$

$$\rho_{hot\ air} = (\rho_{CO_2} \times \%CO_2) + (\rho_{H_2O} \times \%H_2O) + (\rho_{O_2} \times \%O_2) + (\rho_{N_2} \times \%N_2) \quad (2.33)$$

สมการการหา $Cp_{hot\ air}$

$$Cp_{hot\ air} = (Cp_{CO_2} \times \%CO_2) + (Cp_{H_2O} \times \%H_2O) + (Cp_{O_2} \times \%O_2) + (Cp_{N_2} \times \%N_2) \quad (2.34)$$

สมการการหา $\mu_{hot\ air}$

$$\mu_{hot\ air} = (\mu_{CO_2} \times \%CO_2) + (\mu_{H_2O} \times \%H_2O) + (\mu_{O_2} \times \%O_2) + (\mu_{N_2} \times \%N_2) \quad (2.35)$$

สมการการหา $v_{hot\ air}$

$$v_{hot\ air} = (v_{CO_2} \times \%CO_2) + (v_{H_2O} \times \%H_2O) + (v_{O_2} \times \%O_2) + (v_{N_2} \times \%N_2) \quad (2.36)$$

สมการการหา $k_{hot\ air}$

$$k_{hot\ air} = (k_{CO_2} \times \%CO_2) + (k_{H_2O} \times \%H_2O) + (k_{O_2} \times \%O_2) + (k_{N_2} \times \%N_2) \quad (2.37)$$

สมการการหา $\alpha_{hot\ air}$

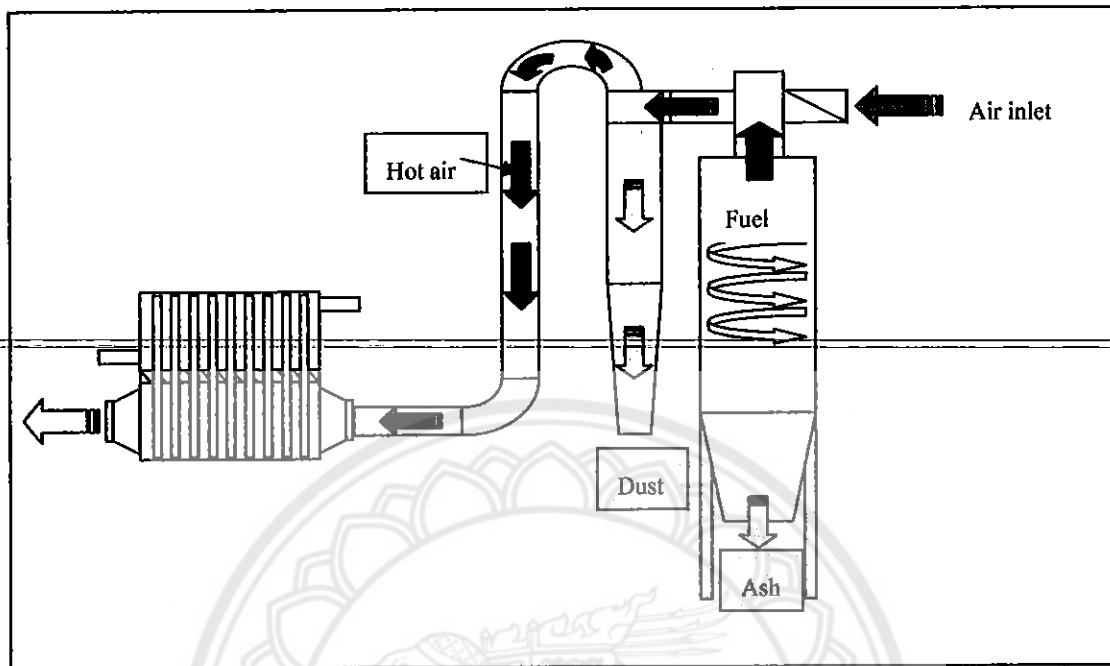
$$\alpha_{hot\ air} = (\alpha_{CO_2} \times \%CO_2) + (\alpha_{H_2O} \times \%H_2O) + (\alpha_{O_2} \times \%O_2) + (\alpha_{N_2} \times \%N_2) \quad (2.38)$$

สมการการหา $Pr_{hot\ air}$

$$Pr_{hot\ air} = (Pr_{CO_2} \times \%CO_2) + (Pr_{H_2O} \times \%H_2O) + (Pr_{O_2} \times \%O_2) + (Pr_{N_2} \times \%N_2) \quad (2.39)$$

2.4 ทฤษฎีของเตาไซโคลน [3]

ลักษณะของเตาเป็นรูปทรงกระบอกมีโครงสร้างเป็นเหล็กตัวเตาก่อด้วยอิฐทนไฟภายในห้องเผาไหม้เป็นรูปทรงกระบอกด้านล่างเตาเป็นรูปกรวยมีตะกรับอยู่ด้านล่างของเตา ขี้เถ้าจะออกทางด้านล่างของเตา เชื้อเพลิงแกลบจะถูกป้อนเข้าทางส่วนบนของเตามีลมเป่าแกลบเข้าเตาด้วยความเร็วสูงซึ่งวางมุมของท่อลมในแนวเส้นรอบวงของเตา ทำให้เกิดการหมุนวนของลมและแกลบ ทำให้เชื้อเพลิงแกลบติดไฟถูกไหม้ได้ดี ความร้อนจากการเผาไหม้จะออกทางส่วนบนของเตาเข้ามาผสมกับอากาศเย็นเพื่อให้ได้อุณหภูมิที่เหมาะสมจากนั้นอากาศร้อนจะผ่านชุดไซโคลนดักฝุ่นเพื่อให้อากาศร้อนสะอาดแล้วจะถูกดูดเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 เตาเผาแลกเปลี่ยนแบบไซโคลน [3]



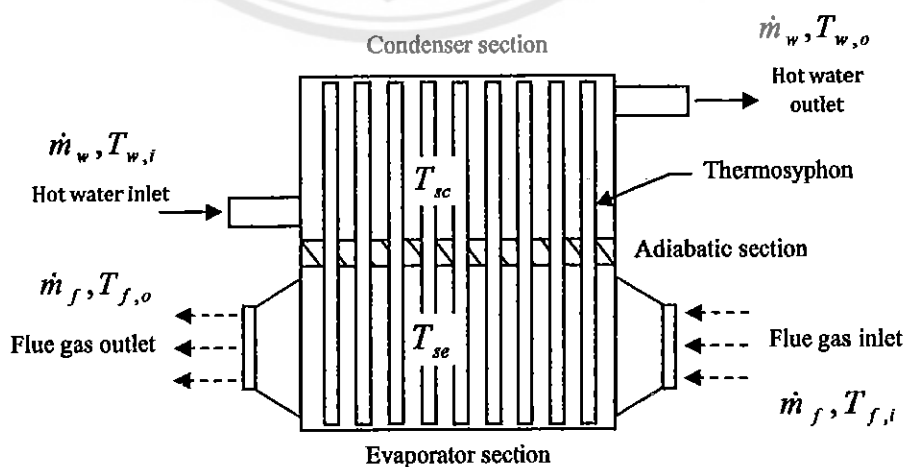
บทที่ 3

วิธีดำเนินการทดลอง

ในการออกแบบและสร้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน จำเป็นต้องทราบถึงลักษณะการทำงาน of เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ข้อมูลพื้นฐานและเงื่อนไขเริ่มต้นในการออกแบบ เพื่อให้เป็นข้อมูลในการออกแบบและสร้างต่อไป โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 ลักษณะและการทำงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

หลักการการทำงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนจะมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.1 หลังจากเริ่มการเผาไหม้แก๊สจากเตาไซโคลนแล้ว แก๊สร้อนจากการเผาไหม้จะถูกส่งผ่านท่อเทอร์โมไซฟอนที่ส่วนทำระเหย ทำให้ท่อเทอร์โมไซฟอนส่วนทำระเหยมีอุณหภูมิสูงขึ้น สารทำงานภายในส่วนทำระเหยเมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้นก็จะเดือดและระเหยเป็นไอแล้วลอยขึ้นไปยังส่วนควบแน่นของเทอร์โมไซฟอนซึ่งสัมผัสกับน้ำจากเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์หรือน้ำธรรมดา ไอของสารทำงานจะควบแน่นที่ส่วนควบแน่นของท่อเทอร์โมไซฟอนและเกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนกับน้ำที่ผิวของท่อเทอร์โมไซฟอน จากนั้นสารทำงานก็จะควบแน่นไหลลงตามผนังท่อเทอร์โมไซฟอนด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก ลงสู่ส่วนทำระเหยเพื่อไปรับความร้อนอีกครั้ง



รูปที่ 3.1 หลักการทำงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน

3.2 ข้อมูลพื้นฐานและเงื่อนไขเริ่มต้นในการออกแบบ

เนื่องจากการทำงานจริงของระบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อความร้อนมีปัจจัยหลายอย่างที่เกี่ยวข้อง ดังนั้นเพื่อให้เกิดความสะดวกและง่ายต่อการออกแบบ จึงกำหนดเงื่อนไขต่างๆ ดังต่อไปนี้

3.2.1 น้ำร้อนที่ได้จากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนต้องมีอุณหภูมิไม่ต่ำกว่า 50°C

3.2.2 อัตราการไหลของก๊าซร้อนในส่วนทำระเหย $3\text{ m}^3 / \text{min}$ อุณหภูมิก๊าซร้อนขาเข้าส่วน

ทำระเหย 150°C

3.2.3 อัตราการไหลของน้ำในส่วนควบแน่น $1\text{ l} / \text{min}$ จะได้ปริมาณน้ำร้อน $600\text{ l} / \text{day}$

3.2.4 อุณหภูมิน้ำประปาขาเข้าส่วนควบแน่นคือ 37°C

3.2.5 เทอร์โมไซฟอนใช้ท่อสแตนเลสวงตัวในแนวตั้ง สารทำงานที่ใช้เป็นน้ำกลั่น อัตราการเติมสารทำงานอยู่ที่ 50% ของปริมาตรส่วนทำระเหย ความยาวรวมของท่อเทอร์โมไซฟอนแต่ละท่อเท่ากับ 1.5 m และความยาวส่วนที่ไม่มีการส่งถ่ายพลังงานความร้อนเท่ากับ 0.05 m

3.2.6 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจัดเรียงท่อแบบแนวเหลี่ยมกันเพราะจะทำให้เกิดความปั่นป่วนในของไหลมาก ซึ่งส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนที่เพิ่มขึ้น

3.2.7 ระยะห่างระหว่างท่อที่วัดตามแนวทิศการไหลและระยะห่างระหว่างท่อวัดตามแนวตั้งฉากกับทิศการไหล (S_T, S_L) มีค่าเท่ากับ 0.06 m

3.2.8 วัสดุท่อเทอร์โมไซฟอนทำจากท่อสแตนเลส AISI 304

3.2.9 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกท่อเทอร์โมไซฟอน (D_o) เท่ากับ 0.0254 m และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อเทอร์โมไซฟอน (D_i) เท่ากับ 0.0218 m

3.2.10 สารทำงานที่ใช้ในเทอร์โมไซฟอนคือน้ำกลั่น โดยมีอัตราส่วนการเติมสารทำงานที่ 50 % ของปริมาตรส่วนทำระเหย

3.3 การคำนวณการออกแบบ

ในการคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนจากผิวท่อสู่ของไหลผ่านกลุ่มท่อในส่วนท่อกว้างและส่วนควมแน่น กำหนดให้ความยาวส่วนท่อกว้างเท่ากับ 0.6 m ความยาวส่วนควมแน่นเท่ากับ 0.85 m จำนวนแถวในทิศขวางการไหลคือ 6 และจำนวนแถวในทิศตามแนวการไหลคือ 8

3.3.1 การคำนวณการออกแบบในส่วนท่อกว้าง

จากการคำนวณค่าสมบัติของก๊าซร้อนขาเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่อุณหภูมิ 150 °C

และอุณหภูมิผิวท่อส่วนท่อกว้าง (T_s) เท่ากับ 69.25 °C ใช้สมการที่ 2.33 ถึง 2.39 ในการคำนวณหาค่าสมบัติของก๊าซร้อนได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\rho &= 0.862078 && \text{kg/m}^3 \\ C_p &= 1.1378 \times 10^3 && \text{J/kg.K} \\ \mu &= 212.4535 \times 10^{-7} && \text{Pa.s} \\ \nu &= 26.1745 \times 10^{-6} && \text{m}^2/\text{s} \\ k &= 31.6292 \times 10^{-3} && \text{W/m.K} \\ \alpha &= 35.60595 \times 10^{-6} && \text{m}^2/\text{s} \\ Pr &= 0.747244 \\ Pr_s &= 0.74998 \\ \dot{m}_{\text{fuel gas}} &= 0.05 && \text{m}^3/\text{s}\end{aligned}$$

จากสมการ 2.19 คำนวณหาพื้นที่ของส่วนท่อกว้างได้ดังนี้

$$A_{\text{cav}} = 8 \times 0.06 \times 0.6 = 0.288 \text{ m}^2$$

โดยที่ระยะพิศตามขวาง ($S_T = 0.06 \text{ m}$) ระยะพิศตามแนวทแยงมุม ($S_D = 0.06 \text{ m}$) เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเทอร์โมไซฟอน ($D = 0.025 \text{ m}$) และระยะพิศตามยาว ($S_L = 0.051 \text{ m}$) จากสมการ 2.18 จะได้ความเร็วของการไหลของก๊าซร้อน ณ ส่วนท่อกว้างดังนี้

$$\begin{aligned}V_{\text{eva}} &= \frac{0.05}{0.862078 \times 0.288} \\ V_{\text{eva}} &= 0.2014 \text{ m/s}\end{aligned}$$

เนื่องจากท่อมีการจัดเรียงแบบสลับกันและ V_{max} เกิดบนระนาบของ A_1 จึงสามารถหา V_{max} ได้จากสมการ 2.21 จะได้ V_{max} ของก๊าซร้อน ณ ส่วนท่อกว้างดังนี้

$$V_{\max \text{ eva}} = \left(\frac{0.06}{0.06 - 0.0254} \right) 0.2014$$

$$V_{\max \text{ eva}} = 0.35 \text{ m/s}$$

คำนวณหา Re ของก๊าซร้อน ณ ส่วนทำระเหย จากสมการ 2.20 จะได้ Re ของก๊าซร้อน ณ ส่วนทำระเหยดังนี้

$$\text{Re}_{\text{eva max}} = \left(\frac{0.862078 \times 0.35 \times 0.0254}{212.4535 \times 10^{-7}} \right)$$

$$\text{Re}_{\text{eva max}} = 359.933$$

$$\text{Re}_{\text{eva}} = \left(\frac{0.862078 \times 0.2014 \times 0.0254}{212.4535 \times 10^{-7}} \right)$$

$$\text{Re}_{\text{eva}} = 207.56$$

คำนวณการพาความร้อนในกลุ่มท่อ

จากตารางที่ 2.1 และจากสมการที่ 2.23 จะได้

$$\text{Nu}_{\text{eva}} = (0.51)(183.45)^{0.5} (0.747244)^{0.37} (0.747244/0.74)^{0.25}$$

$$\text{Nu}_{\text{eva}} = 8.708$$

คำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนจากผิวท่อสู่ของไหลผ่านกลุ่มท่อ

$$\text{โดยที่ } h_{\text{hot air}} = \left(\frac{8.708 \times 31.6292 \times 10^{-3}}{0.0254} \right)$$

$$= 10.84 \text{ kJ/kg}$$

หาอุณหภูมิทางออกของก๊าซร้อน ณ ส่วนทำระเหยจากสมการที่ 2.28 จะได้

$$T_{\text{out hot air}} = 69.25 - (69.25 - 150) \exp \left(\frac{-\pi(0.0254)(45)(10.84)}{(0.862078)(0.103)(8)(0.06)(1.1378 \times 10^3)} \right)$$

$$T_{\text{out hot air}} = 122.8 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

จากสมการ 2.26 จะได้อัตราการถ่ายเทความร้อนจากผิวท่อสู่ของไหลผ่านกลุ่มท่อในส่วน
ของส่วนทำระเหยดังนี้

$$\dot{Q}_{\text{eva}} = (0.05)(1.1378 \times 10^3)(150 - 122.8)$$

$$\dot{Q}_{\text{eva}} = 1547.23 \text{ W}$$

3.3.2 การคำนวณการออกแบบในส่วนควบแน่น

จากการคำนวณค่าคุณสมบัติของน้ำขาเข้าที่อุณหภูมิ 37°C และอุณหภูมิผิวท่อส่วนควบแน่น (T_s) เท่ากับ 68.25°C ซึ่งเป็นอุณหภูมิขาออกของน้ำที่ได้จากเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

$$\begin{aligned}\rho &= 999 && \text{kg/m}^3 \\ C_p &= 4.178 \times 10^3 && \text{J/kg.K} \\ \mu &= 695 \times 10^{-6} && \text{Pa.s} \\ k &= 628 \times 10^{-3} && \text{W/m.K}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Pr} &= 4.62 \\ \text{Pr}_s &= 2.14\end{aligned}$$

$$\dot{m}_w = 0.01667 \quad \text{l/s}$$

จากสมการ 2.19 คำนวณหาพื้นที่ของส่วนควบแน่น ได้ดังนี้

$$A_{\text{cond}} = 8 \times 0.06 \times 0.85 = 0.408 \text{ m}^2$$

โดยที่ระยะพิตซ์ตามขวาง ($S_T = 0.06 \text{ m}$) ระยะพิตซ์ตามแนวทแยงมุม ($S_D = 0.06 \text{ m}$) เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเทอร์โมไซฟอน ($D = 0.025 \text{ m}$) และระยะพิตซ์ตามยาว ($S_L = 0.051 \text{ m}$) จากสมการ 2.18 จะได้ความเร็วของการไหลของก๊าซร้อน ณ ส่วนควบแน่นดังนี้

$$\begin{aligned}V_{\text{cond}} &= \frac{0.01667}{999 \times 0.408} \\ V_{\text{cond}} &= 0.0000408 \text{ m/s} \\ V_{\text{cond max}} &= \left(\frac{0.06}{0.06 - 0.0254} \right) 0.0000408 \\ V_{\text{cond max}} &= 0.00007 \text{ m/s}\end{aligned}$$

คำนวณหา Re ของก๊าซร้อน ณ ส่วนควบแน่น จากสมการ 2.20 จะได้ Re ของก๊าซร้อน ณ ส่วนควบแน่นดังนี้

$$\begin{aligned}\text{Re}_{\text{cond max}} &= \left(\frac{999 \times 0.00007 \times 0.0254}{695 \times 10^{-6}} \right) \\ \text{Re}_{\text{cond max}} &= 2.55 \\ \text{Re}_{\text{cond}} &= \left(\frac{999 \times 0.0000408 \times 0.0254}{695 \times 10^{-6}} \right) \\ \text{Re}_{\text{cond}} &= 1.489\end{aligned}$$

คำนวณการพาความร้อนในกลุ่มท่อ

จากตารางที่ 2.1 และจากสมการที่ 2.23 จะได้

$$Nu_{cond} = (0.75)(2.55)^{0.4} (4.62)^{0.37} (4.62/2.14)^{0.25}$$

$$Nu_{cond} = 1.92$$

คำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนจากผิวท่อสู่ของไหลผ่านกลุ่มท่อ

โดยที่
$$h_{cold\ water} = \left(\frac{1.92 \times 628 \times 10^{-3}}{0.0254} \right)$$

$$= 47.47\ \text{kJ/kg}$$

หาอุณหภูมิทางออกของน้ำ ณ ส่วนควบแน่นจากสมการที่ 2.28 จะได้

$$T_{out\ cold\ water} = 68.25 - (68.25 - 37) \exp\left(\frac{-\pi(0.0254)(45)(47.47)}{(999)(0.00007)(8)(0.06)(4.178 \times 10^3)} \right)$$

$$T_{out\ cold\ water} = 58.98\ ^\circ\text{C}$$

จากสมการ 2.26 จะได้อัตราการถ่ายเทความร้อนจากผิวท่อสู่ของไหลผ่านกลุ่มท่อในส่วน
ของส่วนควบแน่นดังนี้

$$\dot{Q}_{cond} = (0.01667)(4.178 \times 10^3)(58.98 - 37)$$

$$\dot{Q}_{cond} = 1531\ \text{W}$$

3.3.3 การคำนวณหาค่าความต้านทานความร้อนรวม

$$h_{eo} = 10.84\ \text{W/m}^2.\text{K}$$

$$h_{co} = 47.47\ \text{W/m}^2.\text{K}$$

$$S_{eo} = 0.478\ \text{m}^2$$

$$S_{co} = 0.638\ \text{m}^2$$

ค่า Z_1 และ Z_9 หาได้จากสมการ 2.4 จะได้

$$Z_1 = 1/(10.84 \times 0.478 \times 45)$$

$$Z_1 = 0.004287\ \text{K/W}$$

$$Z_9 = 1/(47.47 \times 0.638 \times 45)$$

$$Z_9 = 0.000734\ \text{K/W}$$

ค่า Z_2 และ Z_8 หาได้จากสมการ 2.5

โดยที่ $D_o = 0.0254$ และ $D_i = 0.0218$ และ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน = 16.1 W/m.K

[12] จะได้

$$Z_2 = \ln(0.0254/0.0218)/2\pi(0.6)(16.6)$$

$$Z_2 = 0.00252 \quad K/W$$

$$Z_8 = \ln(0.0254/0.0218)/2\pi(0.85)(16.6)$$

$$Z_8 = 0.00173 \quad K/W$$

ดังนั้นจะได้ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อเทอร์โมไซฟอนออกมาดังนี้

$$Z_{totl} = 0.004287 + 0.000734 + \left(\frac{0.00252 + 0.00173}{45} \right)$$

$$= 0.005116 \quad K/W$$

$$\dot{Q}_{Syphon} = \left(\frac{150 - 37}{0.005116} \right)$$

$$= 22088.76 \text{ W}$$

$$\dot{Q}_{Syphon \text{ Singlel}} = \frac{22088.76}{45}$$

$$= 490.86 \text{ W}$$

จากสมการ 2.6, 2.7, 2.8, 2.9 และ 2.10 จะสามารถหา Z_3 ได้ดังนี้

$$T_{syphon} = (150 + 37)/2$$

$$T_{syphon} = 93.5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\rho = 960.61 \quad \text{kg/m}^3$$

$$Cp = 4.18 \times 10^3 \quad \text{J/kg.K}$$

$$\mu = 598.6 \times 10^{-6} \quad \text{Pa.s}$$

$$k = 679 \times 10^{-3} \quad \text{W/m.K}$$

$$\mu = 298 \times 10^{-6} \quad \text{Pa.s}$$

$$P_v = 0.904 \times 10^5 \quad \text{Pa}$$

$$P_b = 1.013 \times 10^5 \quad \text{Pa}$$

$$F = 0.5$$

$$\phi_2 = \left(\frac{(2265 \times 10^3)(679 \times 10^{-3})^3 (960)}{298 \times 10^{-6}} \right)^{0.25}$$

$$\phi_2 = 1229.56$$

$$\phi_3 = 63 \left(\frac{0.904 \times 10^5}{1.013 \times 10^5} \right)^{0.23}$$

$$\phi_3 = 61.37$$

$$Z_{3f} = \left(\frac{(0.235)(490.86)^{1/3}}{(0.0218)^{4/3} (9.81)^{1/3} (0.85)(1229.561)^{4/3}} \right)$$

$$Z_{3f} = 0.0127$$

$$Z_{3p} = \left(\frac{1}{(63.955)(9.81)^{0.2} (490.86)^{0.4} (\pi(0.0218)(0.6))^{0.6}} \right)$$

$$Z_{3p} = 0.005638$$

เนื่องจาก $Z_{3p} < Z_{3f}$ ให้ $Z_3 = Z_{3p}$

$$Z_3 = 0.005638 \quad K/W$$

และ Z_7 สามารถหาได้ดังนี้

จากสมการ 2.11

$$Re_f = \left(\frac{4 \times (490.86)}{\pi(2265 \times 10^3)(298 \times 10^{-6})(0.0218)} \right)$$

$$Re_f = 42.474$$

เนื่องจาก $Re_f < 1300$ คำนวณ Z_7 จากสมการ 2.12

$$Z_7 = \left(\frac{(0.235)(490.86)^{1/3}}{(0.0218)^{4/3} (9.81)^{1/3} (0.6)(1229.5613)^{4/3}} \right)$$

$$Z_7 = 0.01814 \quad K/W$$

ค่าความต้านทานความร้อนรวมหาได้จากสมการ 2.16

$$Z_{tot} = 0.004287 + 0.000734 + 0.005638 + 0.01814$$

$$Z_{tot} = 0.0288 \quad K/W$$

ดังนั้น

$$\dot{Q}_{\text{Syphon Single 2}} = \frac{69.25 - 68.25}{0.0288}$$

$$\dot{Q}_{\text{Syphon Single 2}} = 34.72 \text{ W}$$

และ

$$\dot{Q}_{\text{Syphon all}} = 34.72 \times 45$$

$$\dot{Q}_{\text{Syphon all}} = 1562.54 \text{ W}$$

คำนวณหาค่าการถ่ายเทความร้อนสูงสุดจากสมการที่ 2.29

$$(\dot{m}Cp)_{\text{cond}} = (0.01667)(4.178 \times 10^3) = 69.647 \text{ W/K}$$

$$(\dot{m}Cp)_{\text{eva}} = (0.05)(1.1378 \times 10^3) = 56.89 \text{ W/K}$$

$$(\dot{m}Cp)_{\text{min}} = 56.89 \text{ W/K}$$

ดังนั้น $Q_{\text{max}} = 69.647 \times (150 - 37)$

$$Q_{\text{max}} = 6428.57 \text{ W}$$

คำนวณค่าประสิทธิภาพของกลุ่มท่อจากสมการ 2.29 จะได้

$$\varepsilon = \frac{1531}{6428.57} \times 100$$

$$\varepsilon = 23.82\%$$

จากการคำนวณการออกแบบ สามารถสรุปข้อมูลที่ได้จากการออกแบบทั้งหมด ดังแสดงในตารางที่

3.1

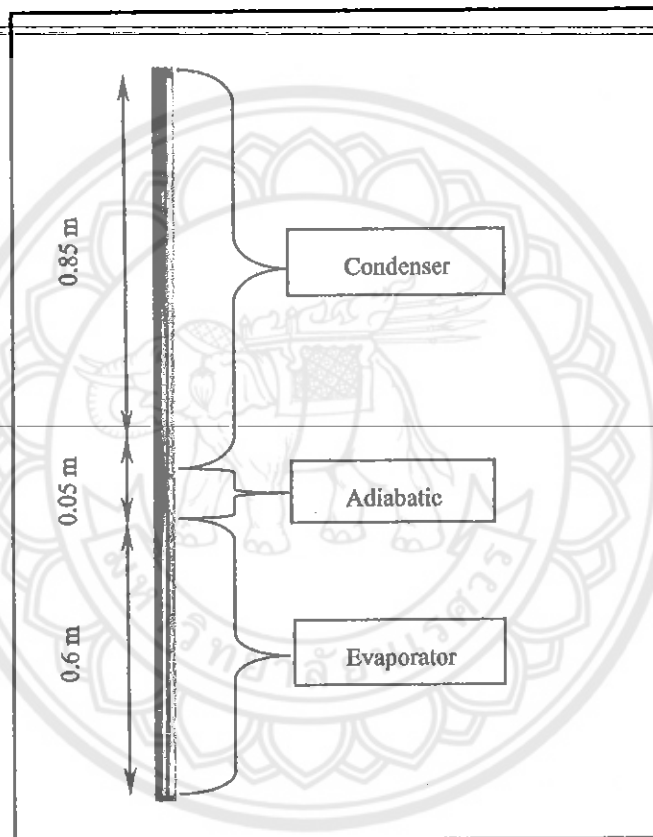
ตารางที่ 3.1 แสดงข้อมูลที่ได้จากการออกแบบ

- จำนวนแถวในทิศขวางการไหล	6 แถว
- จำนวนแถวในทิศตามแนวการไหล	8 แถว
- ระยะห่างระหว่างท่อที่วัดตามแนวทิศการไหล	0.06 m
- ระยะห่างระหว่างท่อวัดตามแนวตั้งฉากกับทิศการไหล	0.06 m
- วัสดุท่อเทอร์โมไซฟอน	ท่อสแตนเลส AISI 304
- ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกท่อเทอร์โมไซฟอน	0.0254 m
- ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อเทอร์โมไซฟอน	0.0218 m
- ความยาวท่อรวม	1.5 m
- ความยาวส่วนทำระเหย	0.6 m
- ความยาวส่วนควบแน่น	0.85 m
- ความยาวส่วนที่ไม่มีการส่งถ่ายพลังงานความร้อน	0.05 m
- สารทำงานในเทอร์โมไซฟอน	น้ำกลั่น
- อัตราส่วนการเดินสารทำงาน	50 % ของปริมาตรส่วนทำระเหย
- ประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน	23.82%

3.4 การออกแบบ

3.4.1 การออกแบบท่อเทอร์โมไซฟอน

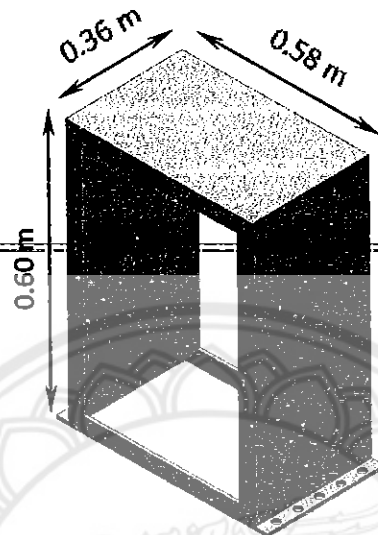
ในการทดลองนี้ได้ทำการออกแบบท่อเทอร์โมไซฟอนให้มีขนาดความยาว 1.50 m เส้นผ่านศูนย์กลางกลาง 0.0254 m โดยกำหนดให้ส่วนควบแน่นมีความยาว 0.85 m ส่วนทำระเหย 0.60 m ส่วนที่ไม่มีการถ่ายเทความร้อน 0.05 m โดยใช้ น้ำ เป็นสารทำงานมีอัตราการเติมสาร 50% ของปริมาตรของส่วนทำระเหยดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แสดงส่วนประกอบของท่อเทอร์โมไซฟอน

3.4.2 การออกแบบโครงสร้างของกล่องส่วนทำระเหย

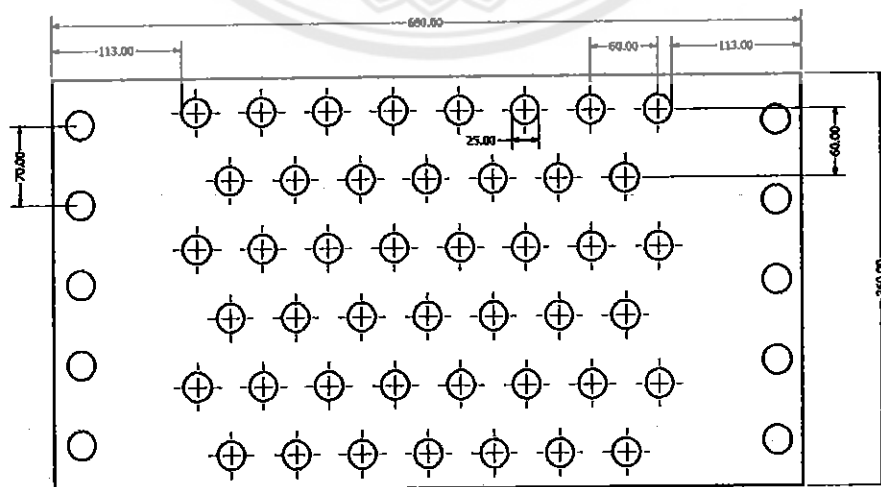
สำหรับโครงสร้างของส่วนทำระเหยได้ออกแบบให้มีขนาดความกว้าง 0.58 m ความยาว 0.60 m และความหนา 0.36 m ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ภาพ 3 มิติของ โครงสร้างของกล่องส่วนทำระเหย

3.4.3 การออกแบบโครงสร้างส่วนที่ไม่มีการถ่ายเทความร้อน

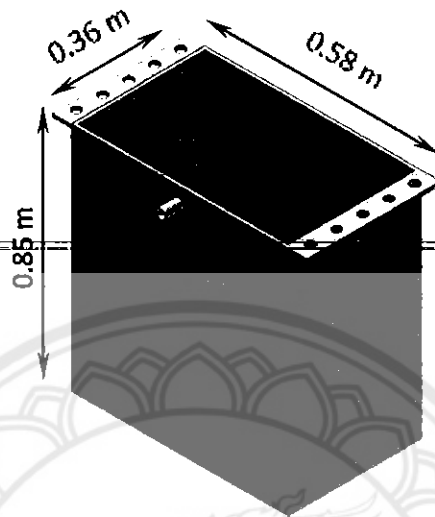
สำหรับโครงสร้างของส่วนที่ไม่มีการสูญเสียความร้อนได้ออกแบบให้มีขนาดความกว้าง 0.36 m ความยาว 0.68 m และความหนา 10 mm และทำการเจาะรูเพื่อใส่ท่อเทอร์โมไซฟอน ทั้งหมด 45 รู เรียงตัวแบบเหลื่อมกัน โดยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.0254 m และมีระยะห่างระหว่างแถว 0.06 m ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ภาพฉายของ โครงสร้างของส่วนที่ไม่มีการถ่ายเทความร้อน

3.4.4 การออกแบบโครงสร้างของกล่องส่วนควบแน่น

สำหรับโครงสร้างของส่วนควบแน่นได้ออกแบบให้มีขนาดความกว้าง 0.58 m ความยาว 0.85 m และความหนา 0.36 m ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ภาพ 3 มิติของโครงสร้างของกล่องส่วนควบแน่น

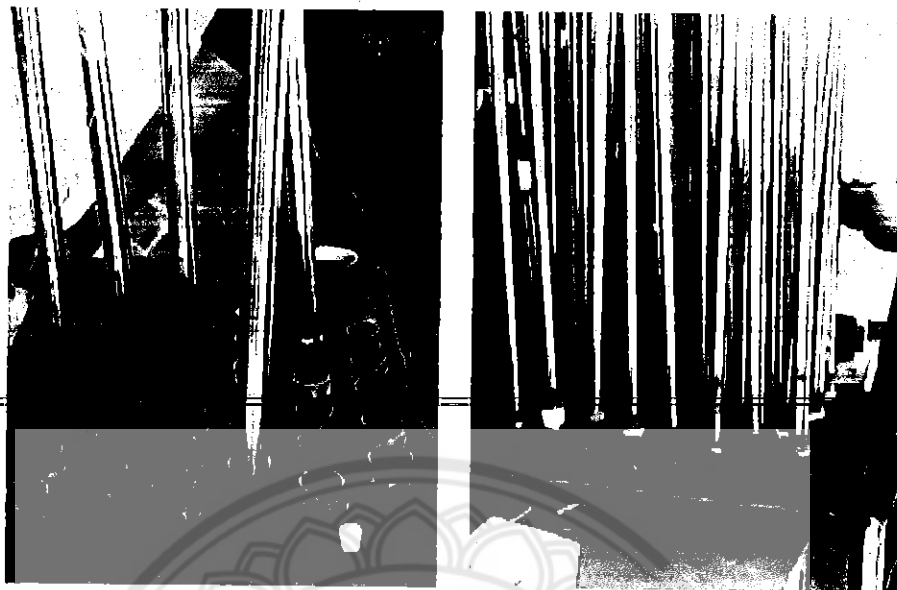
3.5 ขั้นตอนการสร้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

3.5.1 เดิมสารทำงานเข้าในท่อสแตนเลส



รูปที่ 3.6 แสดงการเติมสารทำงาน เข้าในท่อสแตนเลส

3.5.2 ประกอบท่อสแตนเลสที่เติมสารทำงานแล้วเข้ากับแผ่นที่ไม่มีการถ่ายเทความร้อน



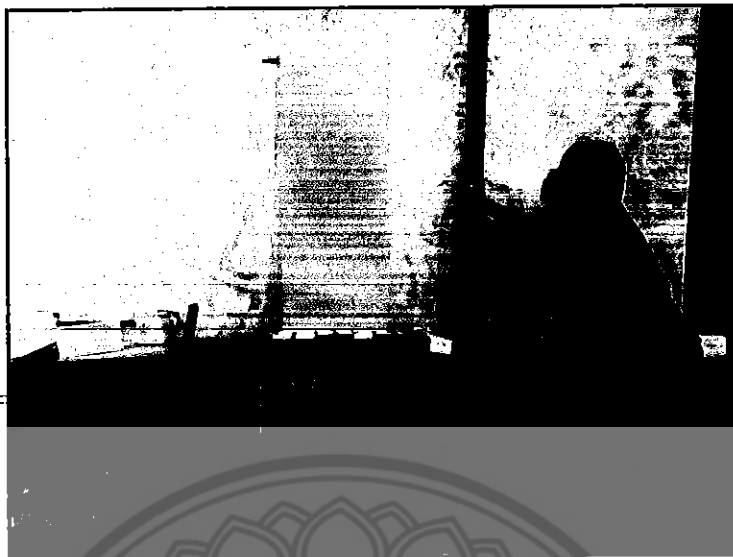
รูปที่ 3.7 แสดงประกอบท่อสแตนเลสที่เติมสารทำงานแล้วเข้ากับแผ่นที่ไม่มีการถ่ายเทความร้อน

3.5.3 ติดสายเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) ที่ส่วน ทำระเหยและส่วนควบแน่น



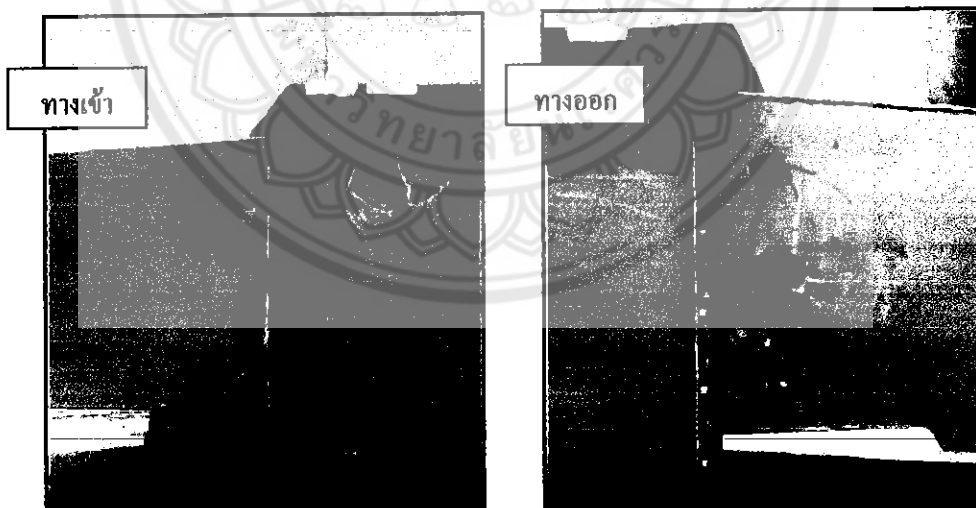
รูปที่ 3.8 แสดงการติดสายเทอร์โมคัปเปิลที่ส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่น

3.5.5 ประกอบกล่องส่วน ทำระเหยและส่วนควบแน่นเข้ากับแผ่นที่ไม่มีการถ่ายเทความร้อน



รูปที่ 3.9 แสดงการประกอบกล่องส่วน ทำระเหยและส่วนควบแน่นเข้ากับแผ่นที่ไม่มีการถ่ายเทความร้อน

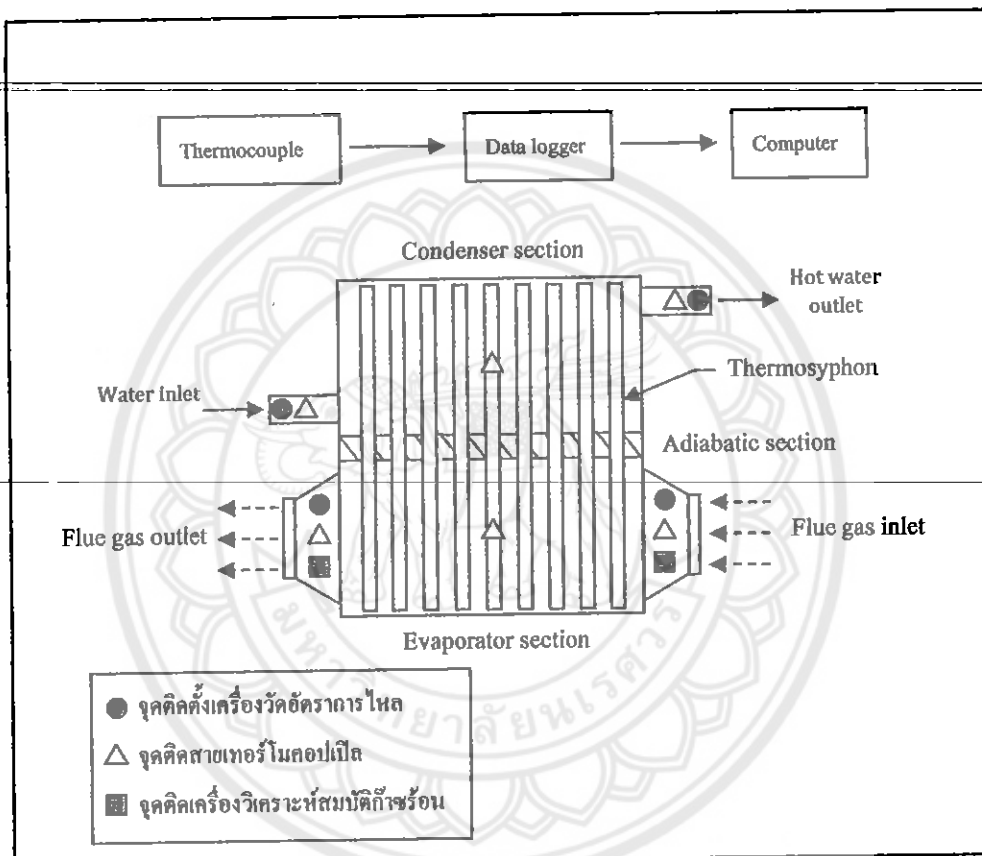
3.5.5 เจาะรูวัดอุณหภูมิก๊าซร้อนที่ทางเข้าและทางออก



รูปที่ 3.10 แสดงการเจาะรูวัดอุณหภูมิก๊าซร้อนที่ทางเข้าและทางออก

3.6 การดำเนินการทดลอง

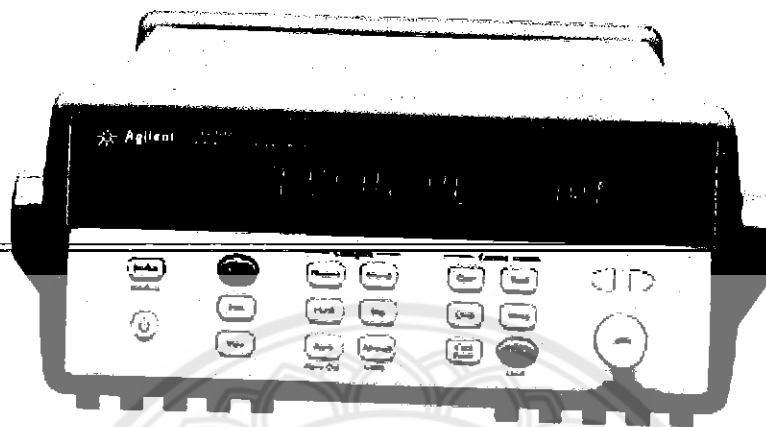
ในการดำเนินการทดลอง เพื่อวิเคราะห์อัตราการถ่ายเทความร้อนและคำนวณประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนในการทำน้ำร้อนจากการเผาไหม้แก๊ส จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์และเครื่องมือวัดต่างๆ ดังรูปที่ 3.11 และออกแบบลำดับขั้นตอนการทดลองดังจะกล่าวต่อไปนี้



รูปที่ 3.11 การติดตั้งอุปกรณ์การวัด

3.6.1 อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. เครื่องบันทึกอุณหภูมิ (Data Logger) ยี่ห้อ Agilent รุ่น 34970 ใช้ในการบันทึกอุณหภูมิ ความผิดพลาดอยู่ในช่วง 0.004% ถึง 0.006% ดังรูปที่ 3.12



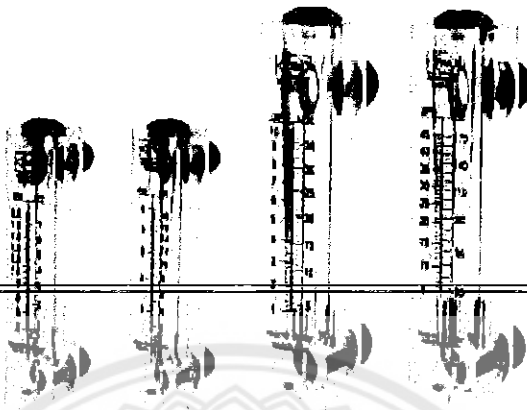
รูปที่ 3.12 แสดงเครื่องบันทึกอุณหภูมิ (Data logger) [8]

2. เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) ยี่ห้อ Omega ที่ใช้ในการทดลองเป็นชนิด K สามารถวัดอุณหภูมิในช่วง -200 ถึง 1350 °C ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 แสดงสายเทอร์โมคัปเปิลที่ใช้ในการทดลอง [9]

3. เครื่องวัดอัตราการไหล (Flow meter) ยี่ห้อ UNI-PURE สามารถวัดอัตราการไหลของน้ำได้ในช่วง 0 – 9 LPM ดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 แสดงเครื่องวัดอัตราการไหล [10]

3.6.2 ลำดับขั้นตอนการทดลอง

1. ติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน ติดตั้งท่อน้ำและท่อก๊าซขาเข้า-ออก
2. เดินเครื่องให้น้ำเย็นไหลผ่านส่วนควบแน่นของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน และเปิดการทำงานของแผงเพื่อปล่อยก๊าซร้อนผ่านส่วนทำระเหยของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน
3. อ่านค่าอัตราการใช้แก๊ส อุณหภูมิน้ำทั้งขาเข้า ขาออกของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน พร้อมบันทึกผลการทดลอง โดยบันทึกผลทุก 30 นาที เริ่มตั้งแต่เวลา 7.30 ถึง 17.30 น. ดังแสดงในภาคผนวก ตารางที่ ก 1
4. คำนวณห้ออัตราการถ่ายเทความร้อน และประสิทธิผลของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน
5. วิเคราะห์ผลการทดลองและสรุป

3.6.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์ผลการทดลอง

การวิเคราะห์ผลการทดลองเป็นการนำข้อมูลที่ได้จากการทดลอง มาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการออกแบบ เพื่อหาผลกระทบของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนและประสิทธิภาพเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อเทอร์โมไซฟอน โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองในแต่ละจุดวัดข้อมูลมาหาค่าเฉลี่ย
2. นำข้อมูลที่เฉลี่ยแล้วไปคำนวณหาอัตราการถ่ายเทความร้อน และประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน
3. นำข้อมูลที่ได้จากการคำนวณมาเขียนกราฟ เพื่อวิเคราะห์หาผลกระทบจากตัวแปรต่างๆ
4. นำค่าอัตราการถ่ายเทความร้อน และประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ได้จากการทดลองมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการออกแบบ
5. วิเคราะห์หาระยะการคืนทุนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน โดยเปรียบเทียบกับเครื่องทำน้ำร้อนแบบใช้ไฟฟ้า

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

จากการทดลองได้ทำการบันทึกผลการทดลองต่างๆ เช่น อัตราการไหลของน้ำ อัตราการ
การป้อนแก๊สและอุณหภูมิตามจุดต่างๆของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อเทอร์โมไซฟอน
เพื่อจะนำค่าที่ได้จากการทดลองนี้ไปใช้ในการวิเคราะห์ผลหาค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนและ
ประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อเทอร์โมไซฟอน เพื่อที่จะเปรียบเทียบกับค่าที่
ได้ทำการออกแบบไว้ ซึ่งได้ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลดังนี้

**4.1 การวิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบอัตราการถ่ายเทความร้อนและประสิทธิภาพของเครื่อง
แลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนระหว่างผลที่ได้จากการทดลองกับผลที่ได้จาก
การออกแบบ**

ตารางที่ 4.1 แสดงการเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากการทดลองกับข้อมูลที่ได้จากการออกแบบ

ข้อมูล	จากการทดลอง	จากการออกแบบ
อัตราการไหลของน้ำ (l/min)	1	1
อัตราการไหลของก๊าซร้อน (m^3/min)	3	3
อุณหภูมิก๊าซร้อนขาเข้า ($^{\circ}C$)	150	150
อุณหภูมิน้ำขาเข้า ($^{\circ}C$)	37	37
อุณหภูมิก๊าซร้อนขาออก ($^{\circ}C$)	113.6	122.8
อุณหภูมิน้ำขาออก ($^{\circ}C$)	55.7	58.9
อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุด (W)	6462.7	6428.6
อัตราการถ่ายเทความร้อนของส่วนทำระเหย (W)	2103	1547.2
อัตราการถ่ายเทความร้อนของส่วนควบแน่น (W)	1303	1531
ประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ เทอร์โมไซฟอน (%)	20.2	23.8

ในการวิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนและประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนนั้น ได้กำหนดให้อัตราการไหลของน้ำคองที่ที่ 1 l/min อัตราการไหลของก๊าซร้อนคองที่ที่ $3 \text{ m}^3/\text{min}$ อุณหภูมิก๊าซร้อนขาเข้าคองที่ที่ 150°C อุณหภูมิน้ำขาเข้าคองที่ที่ 37°C และใช้อัตราการถ่ายเทความร้อนในส่วนควบแน่นในการคำนวณค่าประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน เพราะเป็นอัตราการถ่ายเทความร้อนที่นำไปใช้งานจริง จากตารางที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของส่วนทำระเหยที่ได้จากการออกแบบมีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากการทดลอง เพราะว่าการทดลองเกิดการสูญเสียความร้อนออกจากระบบ ทำให้ได้อุณหภูมิของก๊าซร้อนขาออกที่ 113.6°C และค่าที่ได้จากการออกแบบนั้นไม่คำนึงถึงการสูญเสียความร้อนของระบบ จึงทำให้ได้อุณหภูมิของก๊าซร้อนขาออกที่ 122.8°C เมื่อเปรียบเทียบทั้ง 2 ค่าพบว่าอุณหภูมิก๊าซร้อนขาออกที่ได้จากการออกแบบมีค่ามากกว่าคิดเป็น 8.1% และเมื่อนำอุณหภูมิก๊าซร้อนขาออกที่ได้ไปคำนวณหาอัตราการถ่ายเทความร้อนของส่วนทำระเหย จึงทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนของส่วนทำระเหยจากการออกแบบมีค่าน้อยกว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของส่วนทำระเหยจากการทดลอง และจากตารางที่ 4.1 จะเห็นได้อีกว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของส่วนควบแน่นที่ได้จากการออกแบบมีค่ามากกว่าค่าที่ได้จากการทดลอง เพราะว่าการทดลองเกิดการสูญเสียความร้อนออกจากระบบ ทำให้ได้อุณหภูมิของน้ำขาออกที่ 55.7°C และค่าที่ได้จากการออกแบบนั้นไม่คำนึงถึงการสูญเสียความร้อนของระบบ จึงทำให้ได้อุณหภูมิของน้ำขาออกที่ 58.9°C เมื่อเปรียบเทียบทั้ง 2 ค่าพบว่าอุณหภูมิน้ำขาออกที่ได้จากการออกแบบมีค่ามากกว่าคิดเป็น 5.9% และเมื่อนำอุณหภูมิน้ำขาออกที่ได้ไปคำนวณหาอัตราการถ่ายเทความร้อนของส่วนควบแน่น จึงทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนของส่วนควบแน่นจากการออกแบบมีค่ามากกว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของส่วนควบแน่นจากการทดลอง

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน พบว่าประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจากการออกแบบมีค่ามากกว่าค่าที่ได้การทดลอง โดยมีค่าประสิทธิภาพอยู่ที่ 23.8% และ 20.2% ตามลำดับ เพราะว่าการถ่ายเทความร้อนของส่วนควบแน่นซึ่งเป็นอัตราการถ่ายเทความร้อนที่นำมาคำนวณประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจากการออกแบบมีค่ามากกว่าค่าที่ได้จากการทดลอง และอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดจากการออกแบบมีค่าไม่ต่างจากค่าที่ได้จากการทดลองมากนัก โดยค่าที่ได้จากการออกแบบคือ 6428.6 W และค่าที่ได้จากการทดลองคือ 6462.7 W ดังแสดงในตารางที่ 4.1

4.2 การวิเคราะห์อัตราการถ่ายเทความร้อนและประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน

จากการทดลองพบว่าตัวแปรที่มีผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนและประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนคือ อุณหภูมิก๊าซร้อนขาเข้าและอุณหภูมิน้ำขาเข้า แต่เนื่องจากอุณหภูมิน้ำขาเข้าที่ใช้ในการทดลองเป็นอุณหภูมิน้ำของน้ำประปา ซึ่งมีค่าอุณหภูมิก่อนข้างที่จะคงที่ไม่แตกต่างกันมากอยู่ในช่วง $29 - 38^{\circ}\text{C}$ ดังนั้นอุณหภูมิก๊าซร้อนขาเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจึงมีผลกระทบ ต่อสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนอย่างชัดเจนมากกว่า ดังนั้นจึงพิจารณา

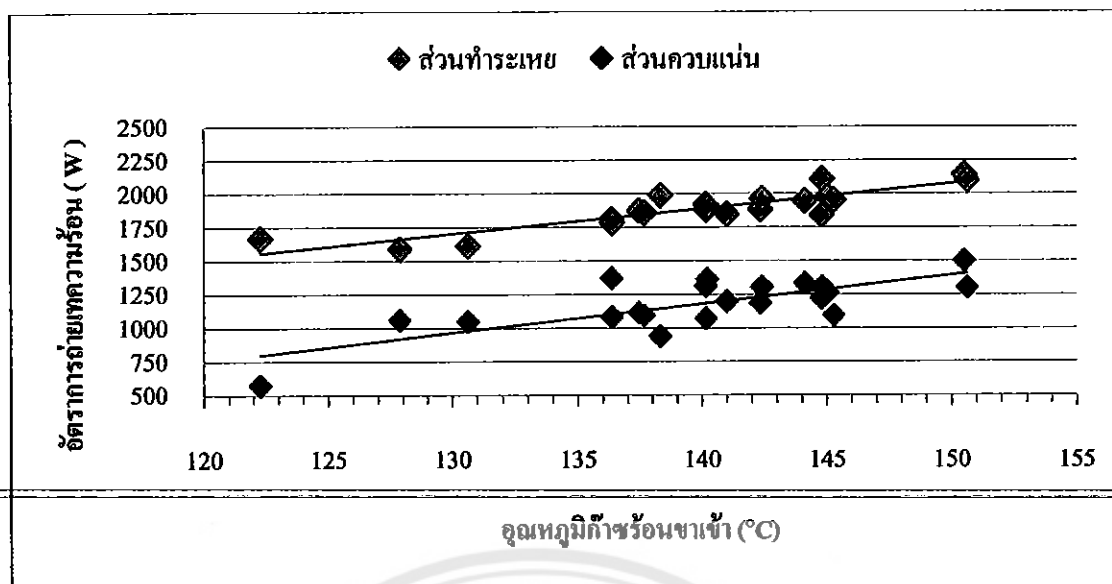
เฉพาะผลกระทบของอุณหภูมิก๊าซร้อนขาเข้าเท่านั้น ซึ่งอุณหภูมิก๊าซร้อนขาเข้านั้นได้จากการเผาเชื้อเพลิงแกลบโดยใช้เตาเผาแบบไซโคลน ในกระบวนการเผาแกลบอุณหภูมิของก๊าซร้อนจะไม่สม่ำเสมอตลอดกระบวนการ ซึ่งสามารถแบ่งกระบวนการเผาแกลบได้ 3 ช่วงดังนี้

1.เริ่มการเผาไหม้ เป็นกระบวนการที่เริ่มจากการเริ่มจุดไฟ จนถึงเกิดเปลวไฟลุกไหม้ ซึ่งอุณหภูมิในช่วงนี้อยู่ระหว่าง $120 - 140^{\circ}\text{C}$

2.เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นหลังจากเปลวไฟที่ลุกไหม้ดับลง ซึ่งในช่วงนี้ความร้อนในเตาเผาจะสูงที่สุด มีอุณหภูมิอยู่ระหว่าง $140 - 150^{\circ}\text{C}$ ข้อสังเกตคือ เชื้อเพลิงในช่วงนี้จะมีสีดำเหมือนถ่าน

3.เป็นกระบวนการสุดท้ายของการเผาไหม้เชื้อเพลิง เมื่อเชื้อเพลิงเผาไหม้หมดแล้วความร้อนในเตาจะต่ำลง อุณหภูมิในช่วงนี้อยู่ระหว่าง $100 - 120^{\circ}\text{C}$ ข้อสังเกตคือ เชื้อเพลิงในช่วงนี้จะเป็นขี้เถ้า มีสีเทา ขาว

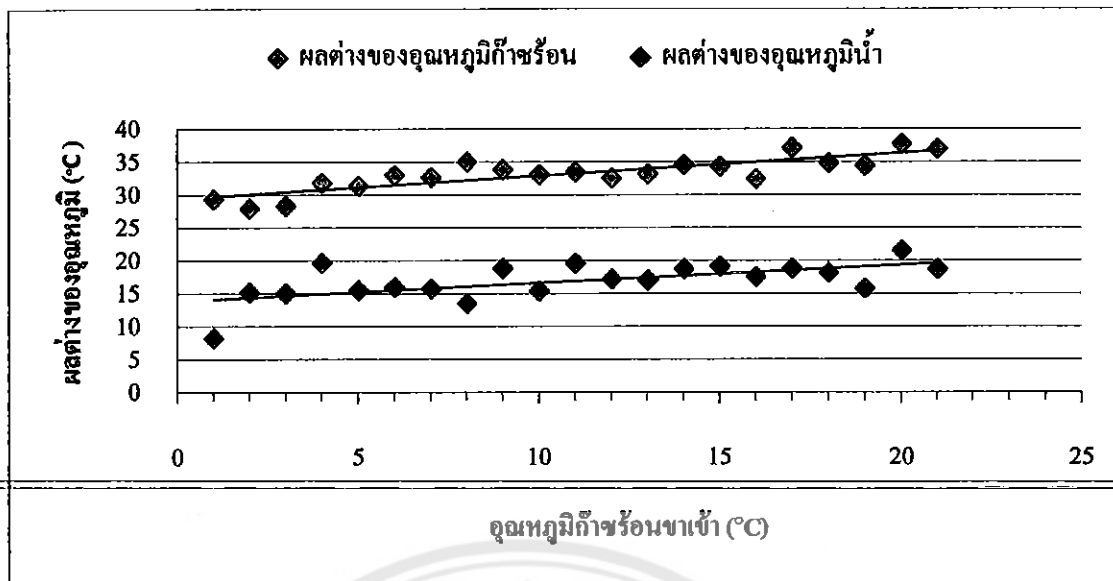
สำหรับการทดลองนี้ใช้อุณหภูมิก๊าซร้อนที่ได้จากการเผาเชื้อเพลิงแกลบแค่ 2 ช่วงเท่านั้น คือ ช่วงที่ 1 และช่วงที่ 2 เพราะช่วงที่ 3 นั้นมีค่าต่ำเกินไป



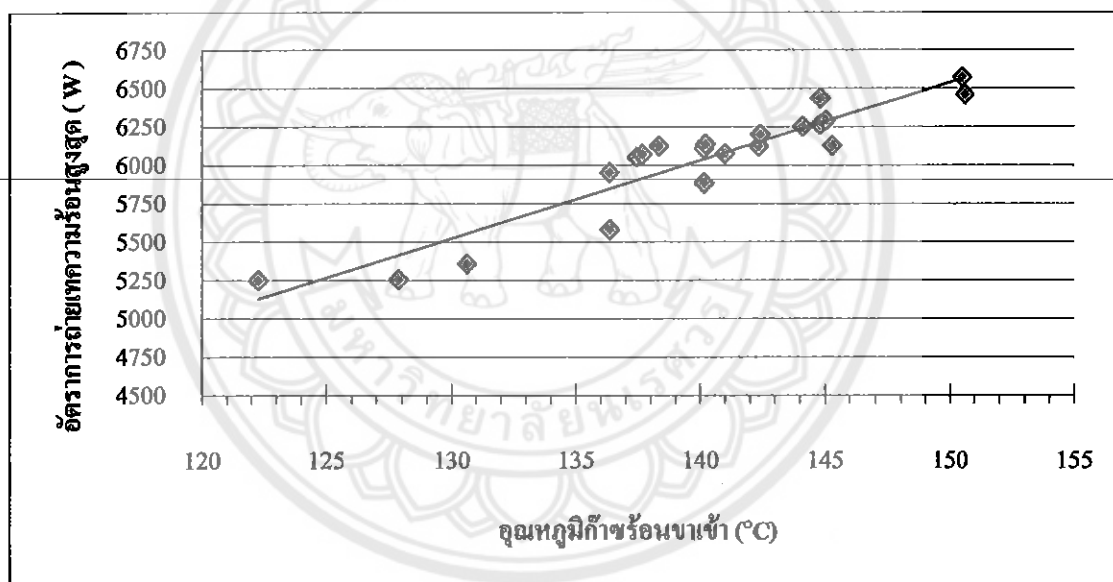
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อนกับอุณหภูมิน้ำเข้า

จากรูปที่ 4.1 เป็นกราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อนของส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นกับอุณหภูมิน้ำเข้า โดยที่อัตราการถ่ายเทความร้อนของส่วนทำระเหยอยู่ในช่วง 1593.9 – 2145.7 W อัตราการถ่ายเทความร้อนของส่วนควบแน่นอยู่ในช่วง 578.4 – 1501.6 W และอุณหภูมิน้ำเข้าอยู่ในช่วง 120 – 150 °C จากกราฟจะเห็นได้ว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนมีแนวโน้มสูงขึ้นตามอุณหภูมิน้ำเข้า โดยแบ่งได้เป็น 3 ช่วงดังนี้ ในช่วงแรกอุณหภูมิน้ำเข้าอยู่ในช่วง 122.2 – 130.6 °C อัตราการถ่ายเทความร้อนอยู่ในช่วง 578.3 – 1673.5 W อุณหภูมิน้ำเข้า ในช่วงที่ 2 เป็นช่วงอุณหภูมิค่อนข้างคงที่ที่อยู่ในช่วง 130.6 – 145.3 °C อัตราการถ่ายเทความร้อนอยู่ในช่วง 1673.5 – 1979.7 W และในช่วงสุดท้ายเป็นช่วงที่อุณหภูมิน้ำเข้าสูงที่สุดอยู่ในช่วง 145.3 – 150.6 °C อัตราการถ่ายเทความร้อนอยู่ในช่วง 1979.7 – 2145.7 W เนื่องจากว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนคำนวณจากผลต่างระหว่างอุณหภูมิขาเข้าและขาออก จากรูปที่ 5.2 จะเห็นได้ว่าผลต่างของอุณหภูมิมิแนวโน้มสูงขึ้นตามอุณหภูมิน้ำเข้า โดยที่ผลต่างของอุณหภูมิน้ำอยู่ในช่วง 29.4 – 37.7 °C และผลต่างของอุณหภูมิน้ำอยู่ในช่วง 8.3 – 21.5 °C ดังนั้นอัตราการถ่ายเทความร้อนจึงมีแนวโน้มสูงขึ้นตามอุณหภูมิน้ำเข้าดังแสดงในรูปที่ 4.1

และจากรูปที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าผลต่างของอุณหภูมิของน้ำร้อนมีค่าสูงกว่าผลต่างของอุณหภูมิของน้ำ ทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนของส่วนทำระเหยมีค่ามากกว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของส่วนควบแน่น



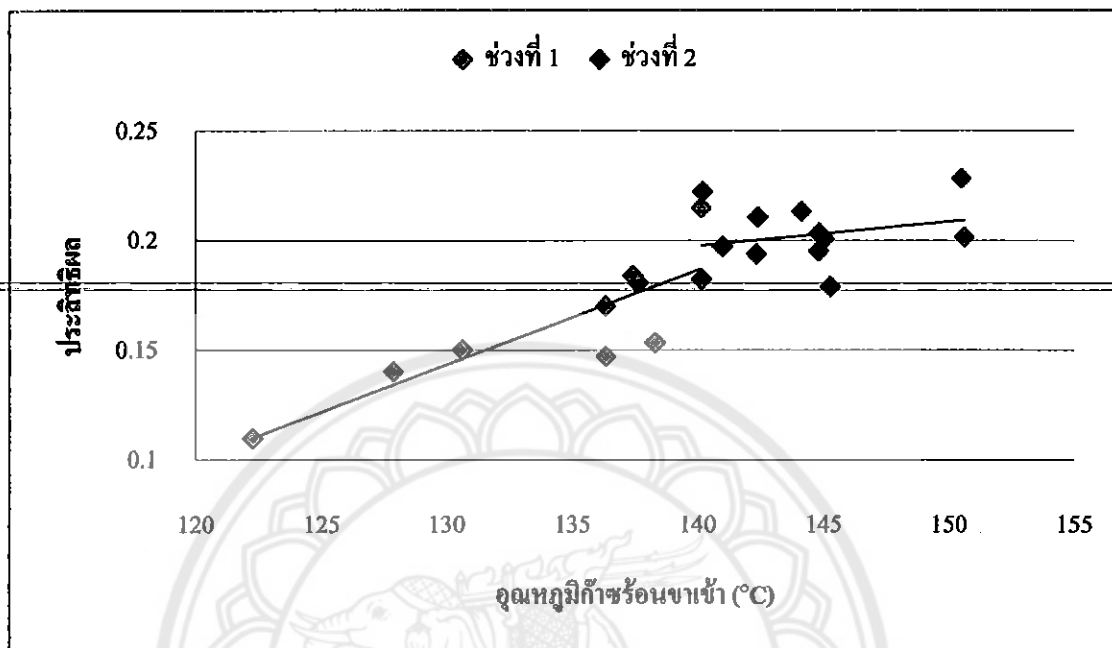
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงผลต่างของอุณหภูมิ



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดกับอุณหภูมิก๊าซร้อนขาเข้า

จากรูปที่ 4.3 เป็นกราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดกับอุณหภูมิก๊าซร้อนขาเข้า โดยที่อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดอยู่ในช่วง 5253.8 – 6575.5 W และอุณหภูมิก๊าซร้อนขาเข้าอยู่ในช่วง 120 – 150 °C จากกราฟจะเห็นได้ว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดมีแนวโน้มสูงขึ้นตามอุณหภูมิก๊าซร้อนขาเข้า เพราะอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดคำนวณจากผลต่างของอุณหภูมิก๊าซร้อนขาเข้ากับอุณหภูมิน้ำขาเข้า แต่อุณหภูมิน้ำขาเข้าเป็นอุณหภูมิของน้ำประปาที่อุณหภูมิปกติ ดังนั้นอุณหภูมิน้ำขาเข้าจะมีค่าค่อนข้างคงที่ แต่อุณหภูมิก๊าซร้อนขาเข้า

เพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้ผลต่างระหว่างอุณหภูมิก๊าซร้อนขาเข้ากับอุณหภูมิน้ำขาเข้าเพิ่มขึ้น อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดจึงมีแนวโน้มสูงขึ้นตามอุณหภูมิก๊าซร้อนขาเข้า



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างประสิทธิผลของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนกับอุณหภูมิก๊าซร้อนขาเข้า

จากรูปที่ 4.4 เป็นกราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างประสิทธิผลของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนกับอุณหภูมิก๊าซร้อนขาเข้า โดยที่ประสิทธิผลมีค่าอยู่ในช่วง 11–22.8% และอุณหภูมิก๊าซร้อนขาเข้าอยู่ในช่วง 120 – 150 °C จากกราฟจะเห็นได้ว่าประสิทธิผลของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในช่วงที่ 1 มีแนวโน้มสูงขึ้นตามอุณหภูมิก๊าซร้อนขาเข้าซึ่งอุณหภูมิก๊าซร้อนขาเข้าอยู่ในช่วง 120 – 140 °C ประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นจาก 11 – 19.7% สำหรับช่วงที่ 2 ประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนค่อนข้างคงที่ โดยที่อุณหภูมิก๊าซร้อนขาเข้าอยู่ในช่วง 140 – 150 °C ประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนอยู่ในช่วง 20 – 22.8% เนื่องจากประสิทธิผลของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนคำนวณจากอัตราส่วนระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อนและอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุด จากรูปที่ 4.1 และรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าทั้งอัตราการถ่ายเทความร้อนและอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดมีแนวโน้มสูงขึ้นตามอุณหภูมิก๊าซร้อนขาเข้า ดังนั้นประสิทธิผลของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนจึงมีค่าค่อนข้างคงที่ โดยจะคงที่ที่อุณหภูมิก๊าซร้อนขาเข้าอยู่ในช่วง 140 – 150 °C

4.3 การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์

การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์เป็นการวิเคราะห์ เพื่อเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายระหว่างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนกับเครื่องทำน้ำร้อนแบบใช้ไฟฟ้า ที่ใช้ในการผลิตน้ำร้อน 600 l/day

เครื่องทำน้ำร้อนแบบใช้ไฟฟ้าที่นำมาเปรียบเทียบกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน มีกำลังวัตต์อยู่ที่ 6 kW อัตราการไหล 5 l/min อุณหภูมิน้ำร้อนที่ผลิตได้อยู่ในช่วง $32 - 48^\circ\text{C}$ ระยะเวลาการใช้งาน 2 hr/day ราคาของเครื่องทำน้ำร้อนแบบใช้ไฟฟ้า $6,490$ บาท [11]

สามารถคำนวณค่าใช้จ่ายได้ดังนี้

ค่าไฟของเครื่องทำน้ำร้อนแบบใช้ไฟฟ้า

$$\text{หน่วยการใช้ไฟฟ้าต่อเดือน} = (\text{จำนวนวัตต์} \times \text{จำนวนชั่วโมงที่ใช้ต่อเดือน}) / 1000$$

$$\text{หน่วยการใช้ไฟฟ้าต่อเดือน} = \frac{6000 \times 2 \times 30}{1000}$$

$$\text{หน่วยการใช้ไฟฟ้าต่อเดือน} = 360 \text{ หน่วย}$$

โดยคิดอัตราค่าไฟฟ้าตามหน่วยงานผู้ใช้ไฟฟ้าของการไฟฟ้า อัตราค่าไฟฟ้าเท่ากับ 2.978 บาทต่อหน่วย [12] ดังนั้นค่าไฟฟ้าของเครื่องทำน้ำร้อนแบบใช้ไฟฟ้ามีค่าใช้จ่ายต่อเดือนเท่ากับ

$$360 \times 2.978 = 1072.1 \text{ บาทต่อเดือน}$$

สำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน สามารถพิจารณาได้ 2 กรณีดังนี้

กรณีที่ 1 การทำน้ำร้อนโดยใช้ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงแกลบโดยตรง

ในกรณีนี้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน จะมีอุปกรณ์ต่อพ่วงคือ พัดลมดูดอากาศ ซึ่งมีกำลังวัตต์ 1.5 kW และมีอัตราการใช้แกลบที่ได้จากการทดลองวัดจริงอยู่ที่ประมาณ 125.6 กิโลกรัมต่อวันหรือ $3,766.8$ กิโลกรัมต่อเดือน สามารถคำนวณค่าใช้จ่ายได้ดังนี้

ค่าไฟของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน

$$\text{หน่วยการใช้ไฟฟ้าต่อเดือน} = (\text{จำนวนวัตต์} \times \text{จำนวนชั่วโมงที่ใช้ต่อเดือน}) / 1000$$

$$\text{หน่วยการใช้ไฟฟ้าต่อ} = \frac{1500 \times 10 \times 30}{1000}$$

$$\text{เดือน} = 450 \text{ หน่วย}$$

คิดอัตราค่าไฟฟ้าเหมือนกับเครื่องทำน้ำร้อนแบบใช้ไฟฟ้า และ ดังนั้นค่าไฟฟ้าของเครื่อง

แลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนต่อเดือนเท่ากับ $450 \times 2.978 = 1340.1$ บาทต่อเดือน

ราคาแลกเปลี่ยนตามท้องถิ่นราคา กิโลกรัมละ 1 บาท คิดเป็นค่าใช้จ่ายใน 1 เดือน เท่ากับ 3766.8 บาทต่อเดือน

จากการคำนวณค่าใช้จ่ายทั้งหมดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนในกรณีที่ใช้ในการทำน้ำร้อน โดยใช้ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงแลกเปลี่ยนโดยตรงและเครื่องทำน้ำร้อนแบบใช้ไฟฟ้า สามารถสรุปค่าใช้จ่ายทั้งหมดได้ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงการเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนในกรณีที่ใช้ในการทำน้ำร้อนโดยใช้ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงแลกเปลี่ยนโดยตรงกับเครื่องทำน้ำร้อนแบบใช้ไฟฟ้า

อัตราการใช้และเวลา	เครื่องทำน้ำร้อนแบบไฟฟ้า	เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน
กำลังไฟ (W)	6,000	1,500
อัตราการไหล (l / min)	5	1
อุณหภูมิน้ำร้อนเฉลี่ย (°C)	35	50.8
เวลาที่ใช้ (ชั่วโมง/เดือน)	60	300
เชื้อเพลิงชีวมวล(บาท/เดือน)	-	3,766.8
ค่าไฟ (บาท/เดือน)	1,072.1	1,340.1
รวมค่าใช้จ่ายต่อเดือน	1,072.1	5,106.9
ราคาของเครื่อง	6,490	25,520
จุดคืนทุน	-	-

กรณีที่ 2 การอุ่นน้ำป้อนเข้าหม้อไอน้ำที่ใช้เชื้อเพลิงแกลบในการเผาไหม้

จากการนำเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนไปประยุกต์ใช้ในการอุ่นน้ำป้อนหม้อไอน้ำที่ใช้เชื้อเพลิงแกลบในการเผาไหม้ เพื่อตัดค่าใช้จ่ายในส่วนของคุณค่าไฟฟ้าจากพัดลมดูดอากาศและค่าใช้จ่ายในส่วนของคุณค่าเชื้อเพลิงแกลบ

จากการคำนวณค่าใช้จ่ายทั้งหมดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนในกรณีที่ใช้ในการอุ่นน้ำป้อนเข้าหม้อไอน้ำที่ใช้เชื้อเพลิงแกลบในการเผาไหม้และเครื่องทำน้ำร้อนแบบใช้ไฟฟ้า สามารถสรุปค่าใช้จ่ายทั้งหมดได้ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงการเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนในกรณีที่ใช้ในการอุ่นน้ำป้อนเข้าหม้อไอน้ำที่ใช้เชื้อเพลิงแกลบในการเผาไหม้กับเครื่องทำน้ำร้อนแบบไฟฟ้า

อัตราการใช้และเวลา	เครื่องทำน้ำร้อนแบบไฟฟ้า	เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน
กำลังไฟ (W)	6,000	-
อัตราการไหล (l / min)	5	1
อุณหภูมิน้ำร้อนเฉลี่ย (°C)	35	50.8
เวลาที่ใช้(ชั่วโมง/เดือน)	60	300
เชื้อเพลิงชีวมวล(บาท/เดือน)	-	-
ค่าไฟ (บาท/เดือน)	1,072.1	-
รวมค่าใช้จ่ายต่อเดือน	1,072.1	-
ราคาของเครื่อง	6,490	25,520
จุดคืนทุน	-	1 ปี 5 เดือน 22 วัน

ดังนั้นสามารถคำนวณหาระยะเวลาคืนทุนได้ดังนี้

$$\text{ระยะเวลาคืนทุน} = \frac{25520 - 6490}{1072.1}$$

$$\text{ระยะเวลาคืนทุน} = 17.75$$

$$\text{ระยะเวลาคืนทุน} = 1 \text{ ปี } 5 \text{ เดือน } 22 \text{ วัน}$$

จากตารางที่ 4.2 เมื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติต่างๆ พบว่าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนสามารถผลิตน้ำร้อนได้อุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ที่ 50.8°C ซึ่งสูงกว่าเครื่องทำน้ำร้อนแบบใช้ไฟฟ้าที่ผลิตน้ำร้อนได้อุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ที่ 35°C แต่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะใช้ระยะเวลาในการผลิตนานกว่าเครื่องทำน้ำร้อนแบบใช้ไฟฟ้า และเมื่อเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในกรณีที่ใช้ในการทำน้ำร้อนโดยใช้ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงแกลบ โดยตรงกับเครื่องทำน้ำร้อนแบบใช้ไฟฟ้าที่มีค่าใช้จ่ายทั้งหมด 1,072.1 บาทต่อเดือน ซึ่งมีค่าใช้จ่ายที่น้อยกว่าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมด 5,106.9 บาทต่อเดือน ดังนั้นจึงไม่คุ้มที่จะลงทุนสร้างและนำเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมาใช้ แต่เมื่อเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในกรณีที่ใช้ในการอุ่นน้ำป้อนเข้าหม้อไอน้ำที่ใช้เชื้อเพลิงแกลบในการเผาไหม้กับเครื่องทำน้ำร้อนแบบใช้ไฟฟ้างดตารางที่ 4.3 ซึ่งไม่คิดค่าใช้จ่ายในส่วนของการพัฒนาคุณภาพอากาศ และค่าใช้จ่ายในส่วนของการซื้อเชื้อเพลิง จึงเหลือแค่ค่าใช้จ่ายในการสร้างเครื่องรวมทั้งสิ้น 25,520 บาท ถึงแม้จะมีราคาสูงกว่าเครื่องทำน้ำร้อนแบบใช้ไฟฟ้าที่มีราคา 6,490 บาท แต่เมื่อคำนวณหาระยะเวลาคืนทุนแล้ว สามารถคืนทุนได้ในเวลา 1 ปี 5 เดือน 22 วัน เพราะฉะนั้นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนที่ใช้ในการอุ่นน้ำป้อนก่อนเข้าหม้อไอน้ำที่ใช้เชื้อเพลิงแกลบในการเผาไหม้จึงมีความเหมาะสมที่จะลงทุนสร้างและนำไปใช้งาน

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการออกแบบและสร้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน จะได้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีขนาด กว้าง 0.36 m ยาว 0.58 m และสูง 1.5 m โดยมีท่อเทอร์โมไซฟอน จำนวน 45 ท่อ ซึ่งทำจากท่อแตนเลสขนาด 0.0254 m ยาว 1.50 m มีความจุน้ำที่ 177 l และอัตราการไหลของน้ำที่ไหลผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 1 l/min

จากการทดลองและบันทึกข้อมูลในวันที่ 5 พฤษภาคม พ.ศ. 2553 และนำค่าที่ได้มาวิเคราะห์หาค่าอัตราการถ่ายเทความร้อน ค่าประสิทธิผลของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน รวมถึงตัวแปรที่มีผลต่อสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน และวิเคราะห์ผลทางเศรษฐศาสตร์สามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 อัตราการถ่ายเทความร้อนและประสิทธิผลของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนจากการออกแบบมีค่ามากกว่าค่าที่ได้จากการทดลองนั่นคือจากการทดลองมีได้ค่า อัตราการถ่ายเทความร้อน 1,303 W ประสิทธิผลของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 20.2% และผลที่ได้จากการออกแบบได้ค่า อัตราการถ่ายเทความร้อน 1,531 W ประสิทธิผลของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 23.8% เพราะในการคำนวณการออกแบบไม่ได้คำนึงถึงการสูญเสียความร้อนออกจากระบบ ผลต่างของอุณหภูมิระหว่างขาเข้ากับขาออกจึงมีค่าสูง ทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนมีค่ามากกว่า การทดลอง และส่งผลให้ประสิทธิผลของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจากการออกแบบมีค่ามากกว่า การทดลองด้วย

5.1.2 อัตราการถ่ายเทความร้อนมีแนวโน้มสูงขึ้นตามอุณหภูมิก๊าซร้อนขาเข้า โดยแบ่งได้ เป็น 3 ช่วงดังนี้ ในช่วงแรกอุณหภูมิก๊าซร้อนขาเข้าอยู่ในช่วง 122.2 – 130.6 °C อัตราการถ่ายเท

ความร้อนอยู่ในช่วง 578.3 – 1673.5 W ประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 11 – 15% อุณหภูมิก๊าซร้อนในช่วงที่ 2 เป็นช่วงอุณหภูมิค่อนข้างคงที่อยู่ในช่วง 130.6 – 145.3 °C อัตราการถ่ายเทความร้อนอยู่ในช่วง 1673.5 – 1979.7 W ประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 15 – 20% และในช่วงสุดท้ายเป็นช่วงที่อุณหภูมิก๊าซร้อนขาเข้าสูงที่สุดอยู่ในช่วง 145.3 – 150.6 °C อัตราการถ่ายเทความร้อนอยู่ในช่วง 1979.7 – 2145.7 W ประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 20 – 23%

5.1.3 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนมีความเหมาะสมที่ลงทุนสร้างและ

นำไปใช้ในการอุ่นน้ำป้อนเข้าหม้อไอน้ำที่ใช้เชื้อเพลิงแกลบในการเผาไหม้ สามารถผลิตน้ำร้อนได้ อุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ที่ 50.8 °C และเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับเชิงเศรษฐศาสตร์กับเครื่องทำน้ำร้อนแบบใช้ไฟฟ้าขนาดกำลังวัตต์อยู่ที่ 6 kW ที่ผลิตน้ำร้อนได้อุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ที่ 35 °C เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนมีราคาเครื่อง 25,520 บาท และเครื่องทำน้ำร้อนแบบใช้ไฟฟ้ามีราคาเครื่อง 6,490 บาท พบว่า เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน สามารถคืนทุนได้ในเวลา 1 ปี 5 เดือน 22 วัน ดังนั้นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนที่ใช้ในการอุ่นน้ำป้อนก่อนเข้าหม้อไอน้ำที่ใช้เชื้อเพลิงแกลบในการเผาไหม้มีความเหมาะสมที่ลงทุนสร้างและนำไปใช้งาน

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรมีการพัฒนาโครงการนี้ต่อ โดยการหุ้มฉนวนกันความร้อนให้มีความหนาที่เหมาะสม และครอบคลุมพื้นที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน เพื่อลดการสูญเสียความร้อนออกจากระบบ

5.2.2 เปลี่ยนวัสดุที่ใช้ในการสร้างท่อเทอร์โมไซฟอน เพื่อเปรียบเทียบอัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อเทอร์โมไซฟอน

5.2.3 ควรมีการติดครีปเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวท่อเทอร์โมไซฟอน

5.2.4 เปลี่ยนเป็นท่อความร้อนชนิดพิเศษ เช่น ท่อความร้อนแบบสั่น (Pulsating Heat Pipe)

บรรณานุกรม

- [1] <http://www.dld.go.th/inform/article/artilea.html> (สืบค้นเมื่อวันที่ 28 สิงหาคม พ.ศ. 2552)
- [2] ถนัด เกษประดิษฐ์, บทความ, เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน แบบเทอร์โมไซฟอน, ปีที่ 5, ฉบับที่ 16 กรกฎาคม - ตุลาคม, 2545
- [3] วิบูลย์ เทเพนทร์ เวียง อากรชีและพุทธินันท์ จารุวัฒน์, วิจัยและพัฒนาเตาเผาแลกเปลี่ยนสำหรับเครื่องลดความชื้นลำไยทั้งเปลือก, กลุ่มวิจัยวิศวกรรมหลังการเก็บเกี่ยว สถาบันวิจัยเกษตรวิศวกรรม, 2547
-
- [4] HEAT PIPES- PERFORCEMANCE OF TWO-PHASE CLOSED THERMOSYPHONS, ESDU, 1981
- [5] รองศาสตราจารย์มนตรี พิรุณเกษตร, การถ่ายเทความร้อนฉบับเตรียมสอบและเสริมประสบการณ์, วิทยพัฒน์, กรุงเทพฯ, 2548, หน้า 494-497
- [6] ชูรัตน์ ชารารักษ์, การทดลองเตาเผาแลกเปลี่ยนแบบไซโคลนขนาดเล็กใช้ร่วมกับเครื่องอบแห้งแบบได้หวั่น, บทความการประชุมวิชาการสหภาพของมหาวิทยาลัยต่อการศึกษาที่เน้นการปฏิบัติงานจริงครั้งที่ 1, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จ.เชียงใหม่, 2552
- [7] <http://www.efe.or.th/home.php/home.php?ds=preview&back=content&mid=hGtTu8zx7jWvD4by&doc=26nANzbwf3SYaIPH> (สืบค้นเมื่อวันที่ 18 ธันวาคม พ.ศ. 2552)
- [8] <http://www.kmitl.ac.th/foodeng/new/articles.php?lng=en&pg=33> (สืบค้นเมื่อวันที่ 22 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2553)
- [9] <http://www.ies-thailand.com/index.php?lay=show&ac=article&Id=538773521> (สืบค้นเมื่อวันที่ 22 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2553)
- [10] <http://hydroproperty.com/download/Page/LZM-Flowmeter.jpg> (สืบค้นเมื่อวันที่ 22 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2553)
- [11] http://www.spairc.com/product.detail_308636_th_2474530 (สืบค้นเมื่อวันที่ 8 พฤษภาคม พ.ศ. 2553)
- [12] <http://www.student.chula.ac.th/~49718863/elec.htm> (สืบค้นเมื่อวันที่ 8 พฤษภาคม พ.ศ. 2553)

[13] กันยารัตน์ เรืองเดช, วิทยา บุญบัวทอง, สนิท คำเงิน, เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ระบบเทอร์โมไซฟอน (Thermosyphon Solar Water Heater), ปรินูญานิพนธ์ วศ.บ.วิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยนเรศวร, 2544







ตารางที่ ก 2 แสดงผลการทดลองของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบทอว์ไรซ์ฟอน

	7.30	8.00	8.30	9.00	9.30	10.00	10.30	11.00	11.30	12.00	12.30	13.00	13.30	14.00	14.30	15.00	15.30	16.00	16.30	17.00	17.30
$T_{cyclone}$ (°C)	380	445	480	430	458	416.9	454.1	430.7	431.9	444.8	477	440	396.9	500	330	476.5	424	430	466	461	443.4
$T_{win 1}$ (°C)	29.8	30.5	30.8	30.7	31.5	32.1	31.4	32.4	32.8	34	34	34.4	34.4	34.4	35.3	36.1	36.4	38.2	37.4	36.9	34.8
$T_{win 2}$ (°C)	30	30.7	31.2	31.1	31.7	32.4	31.9	33	33.9	34.3	34.3	34.3	34.9	34.9	35.5	36.6	37	38.2	37.6	37.1	35
$T_{w out 1}$ (°C)	38.4	44.2	47.2	50.1	50.8	52.2	51.6	51.7	52.2	53.5	52.1	53.2	53.1	52.3	51	51.6	52.1	53.9	55.1	56	56.9
$T_{w out 2}$ (°C)	38	44	46.8	43.2	50	51.5	51.1	51.4	52	53.1	50.6	51.8	51.3	51.1	50.3	51.3	52.1	53.6	51.4	55.4	56
$T_{gin 1}$ (°C)	127	145	143.4	142.8	150.5	145	141.3	145	147.3	151	146.7	150.6	151.6	148.2	131.2	135.7	146.5	142.4	150.8	156.6	156.5
$T_{gin 2}$ (°C)	128	147.2	145.7	142.2	150	146.8	141.6	145.2	146.8	149.4	144.4	149.8	150.7	146.3	128.8	130.2	143.9	139.6	149.7	155.4	154.9
$T_{gin 3}$ (°C)	126.7	143.4	141.9	141.3	149.5	143.8	139.5	143.6	145.5	148.7	145.2	149.7	149.6	145.9	129.5	133.5	144	139.6	149.6	155.3	153.6
$T_{gin 4}$ (°C)	115.4	130	130.5	132.8	140	135.4	131.2	135.9	137.1	137.4	135.6	139.5	138.6	138.5	126.2	129.2	134.7	131.8	138.6	143.8	142.5
$T_{gin 5}$ (°C)	121.8	136.8	134.8	135.9	140.7	139.8	134.8	136.2	140.3	142.4	140.5	143.5	143.5	142.2	125.8	130.2	136.6	133.4	1344.6	149.6	147.7
$T_{gin 6}$ (°C)	114.6	127.4	128.2	130.8	138	130.3	129.5	134.8	137.3	135.6	133.4	136.9	134.6	132.8	125.6	124.8	135.1	131.2	138.2	142.8	147.7
$T_{g out 1}$ (°C)	93.3	97.2	99.8	103.6	103.1	103.6	104.5	103.9	105	104.9	106.1	106.6	106.6	106.1	108.5	110.2	106.1	105.4	108.7	109.7	110.7
$T_{g out 2}$ (°C)	92.9	102.1	104.9	105.6	106.8	105.9	105.8	103.6	107.9	109.1	108.2	110.2	111.2	109.8	111.1	114.5	109.2	113.3	113.1	115.2	115.6
$T_{g out 3}$ (°C)	92.3	100.2	102	104.1	104.9	103.7	104.5	102.4	106	107.1	105.8	108.5	109.7	107.6	109.8	112.3	107.7	111.9	110.8	113.4	114.6
$T_{se,1}$ (°C)	45	49.5	53	54.6	55.6	56.5	56.1	56.5	57.9	58.4	57.6	58.4	58.9	58.3	56.5	57.6	59.3	60.9	62.5	62.9	63.4
$T_{se,2}$ (°C)	51.5	55.8	56.8	58	59.3	60.6	60.4	61.2	62.2	61.5	61.4	62.3	62.7	61.9	60.6	61.5	63.2	64.3	67	67.5	67.4
$T_{sc,1}$ (°C)	44.5	48.8	52.2	54	54.6	55.7	55.3	55.7	56.7	57.3	56.3	57	57.4	56.8	55.6	56.5	57.9	59.4	60.7	61	62.1
$T_{sc,2}$ (°C)	44.7	48.3	52	53.4	53.8	55	54.7	55.1	56.3	56.5	55.7	56.5	56.5	55.9	55	56.1	57.5	59.2	60.2	60.5	60.4
T น้ำในถัง (°C)	38	43.5	46.4	48.5	49.4	50.4	49.8	50.1	50.7	51.9	50.9	52	52.4	50.7	50.6	51.3	52.2	53.9	55.2	56	56.3



ตารางที่ ข 1 แสดงสมบัติของอากาศ [13]

T (K)	ρ (kg/m ³)	c_p (J/kg·K)	μ (kg/m·s)	ν (m ² /s)	k (W/m·K)	α (m ² /s)	Pr
Air							
100	3.605	1039	0.711×10^{-5}	0.197×10^{-5}	0.00941	0.251×10^{-5}	0.784
150	2.368	1012	1.035	0.437	0.01406	0.587	0.745
200	1.769	1007	1.333	0.754	0.01836	1.031	0.731
250	1.412	1006	1.606	1.137	0.02241	1.578	0.721
260	1.358	1006	1.649	1.214	0.02329	1.705	0.712
270	1.308	1006	1.699	1.299	0.02400	1.824	0.712
280	1.261	1006	1.747	1.385	0.02473	1.879	0.711
290	1.217	1006	1.795	1.475	0.02544	2.078	0.710
300	1.177	1007	1.857	1.578	0.02623	2.213	0.713
310	1.139	1007	1.889	1.659	0.02684	2.340	0.709
320	1.103	1008	1.935	1.754	0.02753	2.476	0.708
330	1.070	1008	1.981	1.851	0.02821	2.616	0.708
340	1.038	1009	2.025	1.951	0.02888	2.821	0.707
350	1.008	1009	2.090	2.073	0.02984	2.931	0.707
400	0.8821	1014	2.310	2.619	0.03328	3.721	0.704
450	0.7840	1021	2.517	3.210	0.03656	4.567	0.703
500	0.7056	1030	2.713	3.845	0.03971	5.464	0.704
550	0.6414	1040	2.902	4.524	0.04277	6.412	0.706
600	0.5880	1051	3.082	5.242	0.04573	7.400	0.708
650	0.5427	1063	3.257	6.001	0.04863	8.430	0.712
700	0.5040	1075	3.425	6.796	0.05146	9.498	0.715
750	0.4704	1087	3.588	7.623	0.05425	10.61	0.719
800	0.4410	1099	3.747	8.497	0.05699	11.76	0.723
850	0.4150	1110	3.901	9.400	0.05969	12.96	0.725
900	0.3920	1121	4.052	10.34	0.06237	14.19	0.728
950	0.3716	1131	4.199	11.30	0.06501	15.47	0.731
1000	0.3528	1142	4.343	12.31	0.06763	16.79	0.733
1100	0.3207	1159	4.622	14.41	0.07281	19.59	0.736
1200	0.2940	1175	4.891	16.64	0.07792	22.56	0.738
1300	0.2714	1189	5.151	18.98	0.08297	25.71	0.738
1400	0.2520	1201	5.403	21.44	0.08798	29.05	0.738
1500	0.2352	1211	5.648	23.99	0.09296	32.64	0.735

ตารางที่ ข 2 แสดงค่าสมบัติของวัสดุต่างๆ [13]

Metal	Properties at 20°C						Thermal Conductivity k (W/m.K)							
	ρ (kg/m ³)	C_p (J/kg.K)	k (W/m.K)	α (10 ⁻⁵ m ² /s)	-170°C	-100°C	0°C	100°C	200°C	300°C	400°C	600°C	800°C	1000°C
Aluminums														
Pure	2,707	905	237	9.61	302	242	236	240	238	234	228	215	≈95 (liq.)	
99% pure	2,787	883	164	6.66	220	206	209	182	194					
Duralumin (≈4% Cu, 0.5% Mg)														
Alloy 6061-T6	2,700	896	167	6.90			166	172	177	180				
Alloy 7075-T6	2,800	841	130	5.52	76	100	121	137	172	177				
Chromium	7,190	453	90	2.77	158	120	95	88	85	82	77	69	64	62
Cupreous metals														
Pure Copper	8,954	384	398	11.57	483	420	401	391	389	384	378	366	352	336
DS-C15715*	8,900	≈384	365	≈10.7			367	355	345	335	320			
Beryllium copper (2.2% Be)	8,250	420	103	2.97				117						
Brass (30% Zn)	8,522	385	109	3.32	73	89	106	133	143	146	147			
Bronze (25% Sn) [§]	8,666	343	26	0.86										
Constantan (40% Ni)	8,922	410	22	0.61	17	19	22	26	35					
German silver (15% Ni, 22% Zn)	8,618	394	25	0.73	18	19	24	31	40	45	48			
Gold	19,320	129	318	12.76	327	324	319	313	306	299	293	279	264	249
Ferrous metals														
Pure iron	7,897	447	80	2.26	132	98	84	72	63	56	50	39	30	29.5
Cast iron (4% C)	7,272	420	52	1.70										
Steels (C ≤ 1.5%)														
AISI 1010 ^{††}	7,830	434	64	1.88	70		65	61	55	50	45	36	29	29
0.5% carbon	7,833	465	54	1.47			55	52	48	45	42	35	31	29
1.0% carbon	7,801	473	43	1.17			43	43	42	40	36	33	29	28
1.5% carbon	7,753	486	36	0.97			36	36	36	35	33	31	28	28

* Dispersion-strengthened copper (0.3% Al₂O₃ by weight), strength comparable to stainless steel.

§ Conductivity data for this and other bronzes vary by a factor of about two.

|| k and α for carbon steels can vary greatly, owing to trace elements.

†† 0.1% C, 0.42% Mn, 0.28% Si; hot-rolled.

ตารางที่ ๒ แสดงค่าสมบัติของวัสดุต่างๆ [13] (ต่อ)

Metal	Properties at 20°C						Thermal Conductivity, k (W/m.K)							
	ρ (kg/m ³)	C_p (J/kg.K)	k (W/m.K)	α (10 ⁻⁵ m ² /s)	-170°C	-100°C	0°C	100°C	200°C	300°C	400°C	600°C	800°C	1000°C
	Stainless steels:													
AISI 304	8,000	400	13.8	0.4		15	17 ⁺	19 ⁻	21	25	21 ⁺	24	26 ⁺	28
AISI 316	8,000	460	13.5	0.37	12	15	16	17 ⁺	19 ⁻	21 ⁺	23	26	28	
AISI 347	8,000	420	15	0.44	13	16 ⁺	18 ⁻	19	20	23	27 ⁺	28 ⁺		
AISI 410	7,700	460	25	0.7		25 ⁺	26	27	27 ⁺	28 ⁺	21	22		
AISI 446	7,500	460			40	37	36	33	19 ⁻	20	21	22		
Lead	11,373	130	35	2.34	169	160	157	154	152	150	148	145	89 (liq.)	
Magnesium	1,746	1023	156	8.76	32	30	7.8 (liq.)							
Mercury†					175	146	139	135	131	127	123	116	109	103
Molybdenum	10,220	251	138	5.38	156	114	94	83	74	67	64	69	73	78
Nickels	8,906	445	91	2.30	8.8	10.6	11.3	13.0	14.7	16.0	18.3	21.8	25.3	29
Inconel X-750 ¹	8,510	442	11.6	0.23				13						
Nichrome (24% Fe, 16% Cr)	8,250	448		0.34										
Nichrome V (20% Cr)	8,410	466	13	0.33						17	19			
Platinum	21,450	133	71	2.50	78	73	72	72	72	73	74	77	80	84
Silicon†	2,330	705.5	153	9.31	856	342	168	112	82	66	54	38	29	25
Silver					449	431	428	422	417	409	401	386	370	176 (liq.)
99.99+% pure	10,524	236	427	17.19	422	405	68	63	60	367	364			
99.9% pure	10,524	236	411	16.55						32 (liq.)	34 (liq.)	38 (liq.)		
Tin†	7,304	≈ 220	67	4.17	85	76								
Titanium Pure†	4,540	523	22	0.93	31	26	22	21	20	20	19	21	21	22
Ti-6Al-4%V	4,430	580	7.1	0.28				7.8	8.8	10	12 ⁻			
Tungsten	19,350	133	178	6.92	235	223	182	166	153	141	134	125	122	114
Uranium	18,700	116	28	1.29	22	24	27	29	31	33	36	41	46	
Zinc	7,144	388	121	4.37	124	122	122	117	110	106	100	60 (liq.)		

† Polycrystalline form. ‡ Single crystal form. ¹ 73% Ni, 15% Cr, 6.75% Fe, 2.5% Ti, 0.85% Nb, 0.8% Al, 0.7% Mn, 0.3% Si

ตารางที่ ข 3 แสดงสมบัติของก๊าซ [13]

T(K)	ρ (kg/m ³)	c_p (J/kg·K)	μ (kg/m·s)	ν (m ² /s)	k (W/m·K)	α (m ² /s)	Pr
Argon							
100	4.982	547.4	0.799×10^{-5}	0.160×10^{-5}	0.00632	0.232×10^{-5}	0.692
150	3.269	527.7	1.20	0.366	0.00939	0.544	0.673
200	2.441	523.7	1.59	0.652	0.01245	0.974	0.669
250	1.950	522.2	1.95	1.00	0.01527	1.50	0.668
300	1.624	521.5	2.29	1.41	0.01787	2.11	0.667
350	1.391	521.2	2.59	1.86	0.02029	2.80	0.666
400	1.217	520.9	2.88	2.37	0.02256	3.56	0.666
450	1.082	520.8	3.16	2.92	0.02470	4.39	0.666
500	0.9735	520.7	3.42	3.51	0.02675	5.28	0.666
550	0.8850	520.6	3.67	4.14	0.02870	6.23	0.665
600	0.8112	520.6	3.91	4.82	0.03057	7.24	0.665
650	0.7488	520.5	4.14	5.52	0.03238	8.31	0.665
700	0.6953	520.5	4.36	6.27	0.03412	9.43	0.665
Ammonia							
240	0.8888	2296	8.06×10^{-6}	0.907×10^{-5}	0.0210	0.1028×10^{-4}	0.882
273	0.7719	2180	9.19	1.19	0.0229	0.1361	0.874
323	0.6475	2176	11.01	1.70	0.0274	0.1943	0.876
373	0.5589	2238	12.92	2.31	0.0334	0.2671	0.866
423	0.4920	2326	14.87	3.01	0.0407	0.3554	0.850
473	0.4396	2425	16.82	3.82	0.0487	0.4565	0.838
Carbon dioxide							
220	2.4733	783	11.06×10^{-6}	4.472×10^{-6}	0.01090	0.05628×10^{-4}	0.795
250	2.1657	804	12.57	5.804	0.01295	0.07437	0.780
300	1.7973	853	15.02	8.357	0.01677	0.1094	0.764
350	1.5362	900	17.40	11.33	0.02092	0.1513	0.749
400	1.3424	942	19.70	14.68	0.02515	0.1989	0.738
450	1.1918	980	21.88	18.36	0.02938	0.2516	0.730
500	1.0732	1013	24.02	22.38	0.03354	0.3085	0.725
550	0.9739	1047	26.05	26.75	0.03761	0.3688	0.725
600	0.8938	1076	28.00	31.33	0.04159	0.4325	0.724

ตารางที่ ข 3 แสดงสมบัติของก๊าซ [13] (ต่อ)

$T(K)$	$\rho (kg/m^3)$	$c_p (J/kg \cdot K)$	$\mu (kg/m \cdot s)$	$\nu (m^2/s)$	$k (W/m \cdot K)$	$\alpha (m^2/s)$	Pr
Carbon monoxide							
250	1.367	1042	1.54×10^{-5}	1.13×10^{-5}	0.02306	1.62×10^{-5}	0.697
300	1.138	1040	1.77	1.56	0.02656	2.24	0.694
350	0.975	1040	1.99	2.04	0.02981	2.94	0.693
400	0.853	1039	2.19	2.56	0.03285	3.70	0.692
450	0.758	1039	2.38	3.13	0.03571	4.53	0.691
500	0.682	1040	2.55	3.74	0.03844	5.42	0.691
600	0.5687	1041	2.89	5.08	0.04357	7.36	0.690
700	0.4874	1043	3.20	6.56	0.04838	9.52	0.689
800	0.4265	1046	3.49	8.18	0.05297	11.9	0.689
900	0.3791	1049	3.77	9.94	0.05738	14.4	0.689
1000	0.3412	1052	4.04	11.8	0.06164	17.2	0.689
Helium							
50	0.9732	5201	0.607×10^{-5}	0.0624×10^{-4}	0.0476	0.0940×10^{-4}	0.663
100	0.4871	5194	0.953	0.196	0.0746	0.295	0.664
150	0.3249	5193	1.25	0.385	0.0976	0.578	0.665
200	0.2437	5193	1.51	0.621	0.118	0.932	0.667
250	0.1950	5193	1.76	0.903	0.138	1.36	0.665
300	0.1625	5193	1.99	1.23	0.156	1.85	0.664
350	0.1393	5193	2.22	1.59	0.174	2.40	0.663
400	0.1219	5193	2.43	1.99	0.190	3.01	0.663
450	0.1084	5193	2.64	2.43	0.207	3.67	0.663
500	0.09753	5193	2.84	2.91	0.222	4.39	0.663
600	0.08128	5193	3.22	3.96	0.252	5.98	0.663
700	0.06967	5193	3.59	5.15	0.281	7.77	0.663
800	0.06096	5193	3.94	6.47	0.309	9.75	0.664
900	0.05419	5193	4.28	7.91	0.335	11.9	0.664
1000	0.04877	5193	4.62	9.46	0.361	14.2	0.665
1100	0.04434	5193	4.95	11.2	0.387	16.8	0.664
1200	0.04065	5193	5.27	13.0	0.412	19.5	0.664
1300	0.03752	5193	5.59	14.9	0.437	22.4	0.664
1400	0.03484	5193	5.90	16.9	0.461	25.5	0.665
1500	0.03252	5193	6.21	19.1	0.485	28.7	0.665

ตาราง ข 4 แสดงสมบัติของไอน้ำ [13]

T (K)	p (MPa)	ρ (kg/m ³)	c_p (J/kg·K)	k (W/m·K)	μ (kg/m·s)	Pr	β (K ⁻¹)
Water vapor							
273.16	0.0006177	0.004855	1884	0.01707	0.9216×10^{-5}	1.02	0.003681
275.0	0.0006985	0.005507	1886	0.01717	0.9260	1.02	0.003657
280.0	0.0009918	0.007681	1891	0.01744	0.9382	1.02	0.003596
285.0	0.001389	0.01057	1897	0.01773	0.9509	1.02	0.003538
290.0	0.001920	0.01436	1902	0.01803	0.9641	1.02	0.003481
295.0	0.002621	0.01928	1908	0.01835	0.9778	1.02	0.003428
300.0	0.003537	0.02559	1914	0.01867	0.9920	1.02	0.003376
305.0	0.004719	0.03360	1920	0.01901	1.006	1.02	0.003328
310.0	0.006231	0.04366	1927	0.01937	1.021	1.02	0.003281
320.0	0.01055	0.07166	1942	0.02012	1.052	1.02	0.003195
340.0	0.02719	0.1744	1979	0.02178	1.116	1.01	0.003052
360.0	0.06219	0.3786	2033	0.02369	1.182	1.01	0.002948
373.15	0.1014	0.5982	2080	0.02510	1.227	1.02	0.002902
380.0	0.1289	0.7483	2110	0.02587	1.250	1.02	0.002887
400.0	0.2458	1.369	2218	0.02835	1.319	1.03	0.002874
420.0	0.4373	2.352	2367	0.03113	1.388	1.06	0.002914
440.0	0.7337	3.833	2560	0.03423	1.457	1.09	0.003014
460.0	1.171	5.983	2801	0.03766	1.526	1.13	0.003181
480.0	1.790	9.014	3098	0.04145	1.595	1.19	0.003428
500.0	2.639	13.20	3463	0.04567	1.665	1.26	0.003778
520.0	3.769	18.90	3926	0.05044	1.738	1.35	0.004274
540.0	5.237	26.63	4540	0.05610	1.815	1.47	0.004994
560.0	7.106	37.15	5410	0.06334	1.901	1.62	0.006091
580.0	9.448	51.74	6760	0.07372	2.002	1.84	0.007904
600.0	12.34	72.84	9181	0.09105	2.135	2.15	0.01135
620.0	15.90	106.3	14,940	0.1267	2.337	2.76	0.02000
640.0	20.27	177.1	52,590	0.2500	2.794	5.88	0.07995
642.0	20.76	191.5	737,900	0.2897	2.894	7.37	0.1144
644.0	21.26	211.0	1,253,000	0.3596	3.034	10.6	0.1988
646.0	21.77	243.5	3,852,000	0.5561	3.325	23.0	0.6329
647.0	22.04	286.5	53,340,000	1.573	3.972	135.	9.274



ตัวอย่างการคำนวณ

การคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนและประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน จากผลที่ได้จากการทดลอง

ตัวอย่างการคำนวณที่ เวลา 7.30 น.

คำนวณหาอัตราการถ่ายเทความร้อนของส่วนทำระเหย

$$\dot{Q}_{eva} = (0.05)(1.1378 \times 10^3)(122.2 - 92.8)$$

$$\dot{Q}_{eva} = 1673.5 \text{ W}$$

คำนวณหาอัตราการถ่ายเทความร้อนของส่วนควบแน่น

$$\dot{Q}_{cond} = (0.01667)(4.178 \times 10^3)(38.2 - 29.9)$$

$$\dot{Q}_{cond} = 578.3 \text{ W}$$

คำนวณหาค่าการถ่ายเทความร้อนสูงสุด

$$(\dot{m}Cp)_{cond} = (0.01667)(4.178 \times 10^3) = 69.647 \text{ W / K}$$

$$(\dot{m}Cp)_{eva} = (0.05)(1.1378 \times 10^3) = 56.89 \text{ W / K}$$

$$(\dot{m}Cp)_{min} = 56.89 \text{ W / K}$$

ดังนั้นจะได้ $Q_{max} = 69.647 \times (150 - 37)$

$$Q_{max} = 6428.57 \text{ W}$$

คำนวณค่าประสิทธิภาพของกลุ่มท่อ จะได้

$$\varepsilon = \frac{578.3}{6428.57} \times 100$$

$$\varepsilon = 11.0 \%$$

จากการคำนวณสามารถสรุปดังตารางดังนี้

ตารางที่ ๑ แสดงผลการคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนและประสิทธิภาพในแต่ละช่วงเวลา

เวลา	$\dot{Q}_{eva} (W)$	$\dot{Q}_{cond} (W)$	ϵ (%)
7.30	1673.5	578.3	11
8.00	1991.1	940.7	15.4
8.30	1878.3	1114.9	18.4
9.00	1860.3	1097.5	18.1
9.30	2111.6	1310.0	20.3
10.00	1904.7	1365.7	22.2
10.30	1813.8	1372.7	23.0
11.00	1923.8	1313.5	21.5
11.30	1965.5	1306.5	21.1
12.00	1950.4	1334.4	21.3
12.30	1850.8	1198.5	19.7
13.00	1979.8	1264.7	20.1
13.30	1845.1	1222.9	19.5
14.00	1885.9	1188.1	19.4
14.30	1593.9	1062.6	20.2
15.00	1613.8	1052.2	19.6
15.30	1883.0	1073.1	18.2
16.00	1786.3	1083.5	19.4
16.30	1956.1	1097.5	17.9
17.00	2103.0	1303.0	20.2
17.30	2145.7	1501.6	22.8

รายละเอียดเครื่องทำน้ำร้อนแบบใช้ไฟฟ้า



ตารางที่ ค 2 แสดงรายละเอียดของเครื่องทำน้ำร้อนแบบใช้ไฟฟ้า [11]

ระบบจ่ายน้ำ	ระบบหลายจุด (ควบคุมด้วยก๊อกน้ำตามจุดจ่ายน้ำ)
กำลังไฟฟ้า	6.0 kW / 220 v
ปุ่มปรับกำลังไฟฟ้า	หมุนเปิด/ 2.5/ 3.5/ 6.0 kW
ทำอุณหภูมิได้	32 – 48 °C
แรงดันน้ำต่ำสุดที่เครื่องต้องการ	0.2 kg / cm ³
ระบบความปลอดภัย	6 ระบบนิรภัย
แผ่นฝาครอบผลิตจากวัสดุ UL-94VO	ใช่
แผ่นหลังผลิตจากวัสดุ UL-94VO	ใช่
เทอร์โมสแตท แบบอัตโนมัติ	2 ตัว
เทอร์โมสแตท แบบรีเซ็ต	2 ตัว
ไฟแสดงการทำงาน	ไฟแสดงการทำงาน ELB
ขนาด : สูง × กว้าง × ลึก (mm)	320×180×90
น้ำหนัก (kg)	2.3
อุปกรณ์พิเศษ	ชุดกรองน้ำ
ปริมาณน้ำ และการทำอุณหภูมิของเครื่อง	
2.0 l / min	-
3.0 l / min	ที่ กำลังไฟ LOW 37°C MED 42°C HIGH 54°C
4.0 l / min	ที่ กำลังไฟ LOW 34°C MED 38°C HIGH 46°C
5.0 l / min	ที่ กำลังไฟ LOW 33°C MED 35°C HIGH 43°C