

การทดสอบ และศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพ  
การถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อน



ธนาธิบดิ์ สะกุนา  
นันทวัฒน์ รัตนจันทร์

ปริญญาโท สาขาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา ๒๕๕๖

การทดสอบ และศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพ  
การถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อน



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี  
คณะวิศวกรรมศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงปีการศึกษา 2556 ถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**TESTING AND ANALYSIS OF INFLUENCING FACTORS ON  
HEAT TRANSFER PERFORMANCE IN HEAT PIPE**



A REPORT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR OF ENGINEERING CHEMICAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อาจเผยแพร่ไปโดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2013

ปริญญาานิพนธ์เรื่อง การทดสอบและศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน  
ของท่อความร้อน  
โดย นายธนาริษย์ สะกุนา  
นายนันท์วัฒน์ รัตนจันทร์  
อาจารย์ที่ปรึกษา อ.บุญชัย โชติวิริยาวิชย์  
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปริญญาานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญาานิพนธ์

  
.....ประธานกรรมการ  
(อ.บุญชัย โชติวิริยาวิชย์)

  
.....กรรมการ  
(ผศ.ดร.อภินันท์ นัมคณิศรณ)

  
.....กรรมการ  
(ดร.สันติ วัฒนานุสรณ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง	การทดสอบ และศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อน
โดย	นายธนวิชญ์ สะกุนา นายนันท์วัฒน์ รัตนจันทร์
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
ปีการศึกษา	2556
อาจารย์ที่ปรึกษา	อ.บุญชัย โชติวิริยวานิชย์

### บทคัดย่อ

ท่อความร้อนถือเป็นอุปกรณ์ถ่ายโอนความร้อนที่มีค่าการนำความร้อนสูงและมีการใช้อย่างแพร่หลาย ท่อความร้อน โดยปกติแล้วจะทำจากวัสดุที่มีค่าการนำความร้อนสูง เช่น ทองแดง และแตกต่างจากเทอร์โมไซฟอนตรงที่มีโครงสร้างวัสดุพรุน ซึ่งจะช่วยให้เกิดแรงดันแคปิลารีนำของเหลวจากส่วนควบแน่นกลับสู่ส่วนระเหยอีกครั้ง จึงทำให้ท่อความร้อนมีความสามารถในการถ่ายโอนความร้อนภายใต้แรงโน้มถ่วงของโลกได้ โครงงานนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการทดสอบและศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อน โดยการนำท่อความร้อนซึ่งเป็นท่อทองแดงที่มีน้ำเป็นสารทำงาน โครงสร้างของวัสดุพรุนเป็นตะแกรงลวดละเอียด จำนวน 3 ชั้นมาทำการศึกษา ซึ่งได้ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนใน 3 ปัจจัย ส่วนแรกเป็นการศึกษาผลของอุณหภูมิที่ผิวท่อความร้อนที่ 60, 80, 85, 90 และ 95 °C ส่วนที่สอง คือแนวองศาการวางของท่อความร้อนที่ต่างกันคือ -90, -45, 0, 45 และ 90 องศาจากแนวระดับ และสุดท้ายเป็นการทดลองเปลี่ยนแปลงสารทำงานภายในท่อความร้อนเป็นเอทานอลบริสุทธิ์ 99.99% ซึ่งจากการทดลองพบว่าอุณหภูมิที่ผิวท่อความร้อนที่สูงขึ้น แนวองศาการวางท่อที่ต่ำกว่าแนวระดับมีผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนเพิ่มสูงขึ้น และสุดท้ายการใช้สารทำงานเป็นเอทานอลมีผลทำให้ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนที่สูงกว่าการใช้สารทำงานเป็นน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Report Title</b>	Testing and Analysis of Influencing Factors on Heat Transfer Performance in Heat Pipe	
<b>By</b>	Mr. Tanatis	Sakuma
	Mr. Nuntawat	Rattanachan
<b>Degree</b>	Bachelor of Engineering	
<b>Program</b>	Chemical Engineering	
<b>Year</b>	2013	
<b>Advisor</b>	Mr. Boonchai Chotiviriyavanich	

## ABSTRACT

The heat pipe is a heat transfer device of very high thermal conductances and widely used. A typical heat pipe tube is made of a material with high thermal conductivity such as copper and differs from the thermosyphon in that a wick, constructed for capillary forces return the condensate to evaporator. Heat pipe has ability to transport heat against gravity by an evaporation-condensation cycle. In this project, we tested and analyzed of influencing factors of heat transfer performance of heat pipe. Heat pipe is made by copper tube and water is used as working fluid. The wick structure is constructed of 3 layers of stainless screen mesh. We studied the factors affecting the rate of heat transfer in three factors. First, effect of heat pipe surface temperature at 60, 80, 85, 90 and 95 °C. Second, effect of axial of heat pipe is placed at -90, -45, 0, 45, and 90 degrees from horizontal Last, we changed working fluid inside the heat pipe to a pure ethanol 99.99%. The experimental data showed that increasing heat pipe surface temperature and degree of placement of pipeline below horizontal resulted in an increase rate of heat transfer of the heat pipe. Finally, using ethanol as a working fluid resulted in higher heat transfer rate of the heat pipe than using water as a working fluid.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ทางผู้จัดทำขอขอบพระคุณ อ.บุญชัย โชติวิริยวาณิชย์ ที่คอยช่วยเหลือ ให้คำปรึกษา แนะนำ และแก้ไขปรับปรุงเนื้อหาของโครงการวิจัยจนสามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.ประกอบ กิจไชยา และผศ.ดร.อภิรักษ์ นัมคณิศรณ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในส่วนของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองรวมถึงส่วนประกอบของท่อความร้อนที่ได้ใช้ในการทำการทดลอง

ขอขอบพระคุณ คุณพิสันต์ ผลโพธิ์ ที่คอยให้คำปรึกษาในส่วนของการติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง เนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองเกี่ยวข้องกับการใช้กระแสไฟฟ้าซึ่งอาจเกิดอันตรายได้ทุกเมื่อ และช่วยแก้ปัญหาที่เกี่ยวข้องกับการเสียหายชำรุดของอุปกรณ์ จนมีความพร้อมที่จะใช้ในการทดลองได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีความปลอดภัยสูงสุด

ขอขอบพระคุณ คุณธีรภัทร์ กิตินิรันดร์กุล และ คุณศุขารัตน์ แดงจัน ที่ให้คำแนะนำในส่วนของการทำการทดลองเพื่อทดสอบอัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อน และได้จัดทำชุดอุปกรณ์สำหรับการทำการทดลองไว้อย่างเรียบร้อย

กราบขอบพระคุณบิดา มารดา และญาติพี่น้องที่อบรมสั่งสอน คอยเป็นกำลังใจ เป็นแรงบันดาลใจ ให้มีความมุ่งมั่นตั้งใจทำโครงการวิจัยจนประสบผลสำเร็จ ข้าพเจ้าหวังเป็นอย่างยิ่งว่า ปริญญาณิพนธ์นี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้สนใจ และหากมีสิ่งใดผิดพลาด ข้าพเจ้าขอน้อมรับและขออภัยมา ณ ที่นี้

ชนาธิษณ์ สะกุนา

นนทวัฒน์ รัตนจันทร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

## หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย .....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ .....	IV
สารบัญตาราง .....	VI
สารบัญรูป .....	VII
สัญลักษณ์ .....	IX
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ .....	2
1.3 ขอบเขตของโครงการ .....	2
1.4 ขั้นตอนในการดำเนินงาน.....	3
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ .....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง .....	4
2.1 ท่อความร้อน (Heat pipe) .....	4
2.2 หลักการทำงานโดยทั่วไปของท่อความร้อน.....	5
2.3 ปัจจัยที่ควรคำนึงถึงการออกแบบท่อความร้อน.....	6
2.4 การทดสอบประสิทธิภาพท่อความร้อน .....	15
2.5 คุณสมบัติทางกายภาพของ น้ำ และ เอทานอล .....	16
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	18
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย .....	22
3.1 การเตรียมท่อความร้อน .....	22
3.2 การทดสอบประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน .....	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

## หน้า

บทที่ 4 ผลการทดสอบประสิทธิภาพและวิเคราะห์ผล.....	28
4.1 ผลขององศาการวางท่อความร้อนที่มีต่ออัตราการถ่ายโอนความร้อน โดยใช้สารทำงานภายในท่อความร้อนเป็นน้ำ.....	29
4.2 ผลขององศาการวางท่อความร้อนที่มีต่ออัตราการถ่ายโอนความร้อน โดยใช้สารทำงานภายในท่อความร้อนเป็นเอทานอล.....	31
4.3 ผลจากการใช้งานท่อความร้อนที่อุณหภูมิผิวท่อความร้อน 60 °C, 80 °C, 85 °C, 90 °C และ 95 °C.....	32
4.4 ผลจากการใช้งานท่อความร้อนจากการเปลี่ยนแปลง สารทำงานจากน้ำเป็นเอทานอล.....	33
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	38
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	38
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	38
เอกสารอ้างอิง.....	39
ภาคผนวก.....	41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

## หน้า

ตารางที่ 2-1 ช่วงอุณหภูมิที่ใช้งานของของไหลบางชนิดในท่อความร้อน.....	6
ตารางที่ 2-2 ความเข้ากันได้ของวัสดุและของไหลทำงาน .....	9
ตารางที่ 2-3 ตารางแสดงคุณสมบัติทางกายภาพของสารชนิดต่างๆที่ความดันบรรยากาศ .....	17
ตารางที่ 2-4 ตารางสรุปผลการออกแบบท่อความร้อน .....	20
ตารางที่ 2-5 ผลการคำนวณค่าอัตราการถ่ายโอนความร้อนทั้ง4ชนิดจำกัดที่อุณหภูมิ 80°C.....	21
ตารางที่ 4-1 อัตราการถ่ายเทความร้อน (วัตต์) ของท่อความร้อนที่สภาวะต่างๆ.....	33
ตารางที่ 4-2 ปะสิทธิภาพถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนที่สภาวะต่างๆ .....	35



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

## หน้า

รูปที่ 2-1	เทอร์โมไจฟอนและท่อความร้อน .....	4
รูปที่ 2-2	โครงสร้างและส่วนประกอบของท่อความร้อน .....	5
รูปที่ 2-3	ภาพตัดแนวขวางของท่อความร้อนที่มีโครงสร้างวัสดุพอรุนที่ทำจากวัสดุชนิดเดียว .....	8
รูปที่ 2-4	ภาพตัดขวางของท่อความร้อนที่มีโครงสร้างวัสดุพอรุนที่ประกอบด้วยวัสดุ 2 ประเภท .....	8
รูปที่ 2-5	กราฟแสดงเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางเดินเฟสไอกับอัตราการถ่ายเทความร้อนของน้ำ .....	10
รูปที่ 2-6	กราฟแสดงความดันไอของของไหลทำงานชนิดต่างๆ .....	10
รูปที่ 2-7	กราฟแสดงค่าความเค้นแรงดึงสูงสุดของวัสดุ .....	11
รูปที่ 2-8	แสดงอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกต่อภายในของท่อกับความดันไอสูงสุด .....	11
รูปที่ 2-9	กราฟแสดงขีดจำกัดในการถ่ายโอนความร้อนของท่อความร้อน .....	12
รูปที่ 2-10	โปรไฟล์ของความดันเมื่อไหลผ่านนอซเซิล .....	13
รูปที่ 2-11	ชุดทดสอบประสิทธิภาพท่อความร้อน .....	15
รูปที่ 2-12	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันไอกับอุณหภูมิของสารชนิดต่างๆ .....	17
รูปที่ 3-1	ตะแกรงลวดละเอียด 3 ชั้นที่พันอยู่ในท่อทองแดง .....	22
รูปที่ 3-2	ท่อทองแดงที่ประกอบต่อกับท่อเดิมสารและวาล์ว .....	23
รูปที่ 3-3	ชุดอุปกรณ์เติมสารทำงาน .....	24
รูปที่ 4-1	ค่าอุณหภูมิของน้ำขาเข้า-ขาออกเทียบกับเวลาของการทดลองท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องโดยใช้สารทำงานเป็นน้ำ ที่แวนวงศาการวางเท่ากับ 45 องศา อุณหภูมิที่ผิวท่อความร้อนเท่ากับ 80 องศาเซลเซียส .....	28
รูปที่ 4-2	ค่าอุณหภูมิของน้ำขาเข้า-ขาออกเทียบกับเวลาของการทดลองท่อความร้อนแบบต่อเนื่องโดยใช้สารทำงานเป็นน้ำ ที่อุณหภูมิผิวท่อความร้อนเท่ากับ 80 องศาเซลเซียส .....	29
รูปที่ 4-3	ค่าอัตราการถ่ายโอนความร้อนของท่อความร้อนที่แวนวงศาการวางต่างๆ ที่อุณหภูมิ 60 °C, 80 °C, 85 °C, 90 °C และ 95 °C .....	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้ซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป ( ต่อ )

## หน้า

รูปที่ 4-4	ค่าอัตราการถ่ายโอนความร้อนของท่อความร้อนที่แนวองศาการวางต่างๆ ที่อุณหภูมิ 60 °C, 80 °C, 85 °C, 90 °C และ 95 °C .....	31
รูปที่ 4-5	ค่าอัตราการถ่ายโอนความร้อนที่แต่ละอุณหภูมิที่ผิวท่อความร้อนของ สารทำงานที่เป็นน้ำและเอทานอลที่แนวองศาการวางท่อเท่ากับ 0 .....	33
รูปที่ 4-6	ค่าอัตราการถ่ายโอนความร้อนที่แต่ละอุณหภูมิที่ผิวท่อความร้อนของ สารทำงานที่เป็นน้ำและเอทานอลที่แนวองศาการวางท่อเท่ากับ 45 .....	34
รูปที่ 4-7	ค่าอัตราการถ่ายโอนความร้อนที่แต่ละอุณหภูมิที่ผิวของท่อความร้อน ของสารทำงานที่เป็นน้ำและเอทานอลที่แนวองศาการวางท่อเท่ากับ 90 .....	34
รูปที่ 4-8	ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนที่แต่ละอุณหภูมิที่ผิวท่อความร้อน ของสารทำงานที่เป็นน้ำและเอทานอลที่แนวองศาการวางท่อเท่ากับ 0 .....	36
รูปที่ 4-9	ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนที่แต่ละอุณหภูมิที่ผิวท่อความร้อน ของสารทำงานที่เป็นน้ำและเอทานอลที่แนวองศาการวางท่อเท่ากับ 45 .....	36
รูปที่ 4-10	ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนที่แต่ละอุณหภูมิที่ใช้งานของท่อความร้อน ของสารทำงานที่เป็นน้ำและเอทานอลที่แนวองศาการวางท่อเท่ากับ 45 .....	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สัญลักษณ์

$A_v$	พื้นที่หน้าตัดของช่องทางเดินเฟสไอ
$A_w$	พื้นที่หน้าตัดของโครงสร้างวัสดุพอรุน
$C_p$	ค่าความจุความร้อนจำเพาะ
$d$	เส้นผ่านศูนย์กลางของหลอด
$d_i$	เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อ
$d_o$	เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อ
$d_v$	เส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางเดินเฟสไอ
$D_v$	สัมประสิทธิ์แรงดันเคลื่อนที่ของไอ (Dynamic Pressure coefficient)
$f_v$	สัมประสิทธิ์แรงต้านการเคลื่อนที่ของไอ (Drag coefficient for vapor flow)
$F_l$	สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของการเคลื่อนที่ของของเหลว (frictional coefficient for liquid flow)
$F_v$	สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของการเคลื่อนที่ของไอ (frictional coefficient for vapor flow)
$g$	ค่าแรงโน้มถ่วงโลก
$I$	กระแสไฟฟ้า
$k_e$	ค่าการนำความร้อนประสิทธิผล (effective thermal conductivity)
$k_f$	ความหนาของครีบบรรเทาความร้อนใน โครงสร้างวัสดุพอรุนแบบร่องเล็ก (groove thickness)
$k_l$	ค่าการนำความร้อนของของเหลว (liquid thermal conductivity)
$k_w$	ค่าการนำความร้อนของวัสดุพอรุน (thermal conductivity of wick material)
$K$	ค่าการซึมผ่าน โครงสร้างวัสดุพอรุน (wick permeability)
$L_A$	ความยาวของส่วนที่ไม่มีการถ่ายเทความร้อน (adiabatic length)
$L_C$	ความยาวของส่วนควบแน่น (condenser length)
$L_E$	ความยาวของส่วนระเหย (evaporator length)
$L_t$	ความยาวรวมของท่อความร้อน (total length of heat pipe)
$L_w$	ความยาวของโครงสร้างวัสดุพอรุน
$m$	อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำ
$M_v$	Vapor Flow Mach number
$MW$	น้ำหนัก โมเลกุล (molecular weight)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังขอให้จัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$N$	จำนวนช่องของรูพรุนต่อหน่วยความยาว (mesh number)
$P$	กำลังไฟฟ้า
$P_c$	ความดันแคปิลลารี (Capillary Pressure)
$P_{cm}$	ความดันแคปิลลารีสูงสุด (Maximum Capillary Pressure)
$P_{cm,e}$	ความดันแคปิลลารีประสิทธิผลสูงสุด (Maximum Effective Capillary Pressure)
$\Delta P_{\perp}$	ความดันจากค่าแรงโน้มถ่วงของโลก (Normal Hydrostatic Pressure)
$Q$	อัตราการถ่ายโอนความร้อน
$Q_{b,max}$	ขีดจำกัดการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการเดือด (Boiling Limitation)
$Q_{c,max}$	ขีดจำกัดการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากแรงดันแคปิลลารี (Capillary Limitation on the Heat Transport Factor)
$Q_{e,max}$	ขีดจำกัดการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากของเหลวหลุดลอยตามไอ (Entrainment Limitation)
$Q_{s,max}$	ขีดจำกัดการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากความเร็วเสียง (Sonic Limitation)
$(QL)_{c,max}$	ความร้อนประสิทธิผลสูงสุดเนื่องจากแรงดัน (Maximum Effective Pumping Pressure)
$r_c$	รัศมีแคปิลลารี (effective capillary radius)
$r_{h,s}$	รัศมีรูพรุนในโครงสร้างวัสดุพรุน (surface pore hydraulic radius)
$r_{h,v}$	รัศมีช่องทางเดินเฟสไอ (hydraulic radius for vapor flow)
$r_n$	รัศมีฟองอากาศ (nucleation radius of the vapor bubbles)
$r_i$	รัศมีภายในของท่อ
$r_o$	รัศมีภายนอกของท่อ
$r_v$	รัศมีของช่องทางเดินเฟสไอ
$R$	ค่าคงที่ของแก๊ส (universal gas constant)
$R_v$	ค่าคงที่ของไอ (vapor constant)
$Re_v$	Vapor Flow Reynolds Number
$t_p$	ความหนาของท่อความร้อน
$t_w$	ความหนาของโครงสร้างวัสดุพรุน
$T$	อุณหภูมิ
$T_v$	อุณหภูมิของช่องทางเดินเฟสไอ
$V$	แรงดันไฟฟ้าตกคร่อม
$V_{wick}$	ปริมาตรของโครงสร้างวัสดุพรุน
$w$	ความกว้างของตะแกรงลวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าในกรณีใดๆทั้งสิ้น ปริมาตรของโครงสร้างวัสดุพรุนจะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\gamma_v$	อัตราส่วนความร้อนจำเพาะของเฟสไอ (vapor specific heat ratio)
$\varepsilon$	อัตราส่วนของปริมาตรของรูพรุนต่อปริมาตรของวัสดุทั้งหมด (wick porosity)
$\lambda$	ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ
$\mu_l$	ความหนืดของของเหลว
$\mu_v$	ความหนืดของไอ
$\rho_l$	ความหนาแน่นของของเหลว
$\rho_v$	ความหนาแน่นของไอ
$\sigma$	สัมประสิทธิ์แรงตึงผิวของของเหลว (surface tension coefficient)
$\psi$	มุมของท่อความร้อนที่ทำงานโดยวัดจากแนวระดับ (heat pipe inclination measured from horizontal position)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

ท่อความร้อน (Heat pipe) ถือเป็นอีกหนึ่งอุปกรณ์ที่สามารถถ่ายโอนความร้อนได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ แม้ในสภาพที่อุณหภูมิแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยโดยที่ท่อความร้อนเป็นอุปกรณ์ที่ถูกพัฒนามาจากอุปกรณ์ถ่ายโอนความร้อนประเภทเทอร์โมไซฟอน (Thermosyphon) ที่เป็นท่อโลหะปิดสนิทภายในเป็นสุญญากาศและมีของเหลวทำงานบรรจุอยู่ภายใน โดยในส่วนของท่อความร้อนจะมีโครงสร้างเพิ่มเติมเป็นโครงสร้างวัสดุพรุน (Wick Structure) หรือร่องตามแนวยาวขนาดเล็กภายในท่อ ซึ่งโครงสร้างนี้ทำให้เกิดความดันแคปิลลารี (Capillary Pressure) ส่งผลให้เฟสของเหลวเคลื่อนที่ไปในทิศทางตรงข้ามกับแรงโน้มถ่วงได้ ซึ่งจะทำให้เกิดการไหลเวียนอย่างต่อเนื่องภายในท่อความร้อน ดังนั้นจึงไม่มีความจำเป็นที่จะต้องใช้พลังงานอื่นหรือกลไกภายนอกใดๆ เพื่อขับเคลื่อนท่อความร้อนให้สามารถทำงานได้ และเนื่องจากเป็นท่อที่ปิดสนิท ไม่มีชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่ได้ ทำให้การดูแลรักษาเป็นไปได้ง่าย ไม่ต้องทำการซ่อมบำรุงรักษาบ่อย แค่เพียงการทำความสะอาดภายนอกก็เพียงพอ

การใช้งานท่อความร้อนในปัจจุบันนั้นเริ่มเป็นที่แพร่หลายมากขึ้น และได้มีการศึกษาทำการวิจัยอย่างกว้างขวางในด้านการพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ และการพัฒนาประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์อื่นๆ โดยส่วนใหญ่ที่พบในปัจจุบันมักใช้เป็นอุปกรณ์เสริมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบความร้อน ระบบทำความเย็นต่างๆ หรือใช้เป็นอุปกรณ์เสริม เพื่อช่วยยืดอายุการใช้งานของอุปกรณ์ที่ต้องทำงานในสภาวะที่มีอุณหภูมิสูง ไม่ให้ชิ้นส่วนในอุปกรณ์นั้นๆ เกิดความเสียหายจากการได้รับความร้อนเป็นระยะเวลาานาน ยกตัวอย่างเช่น คอมพิวเตอร์ อุปกรณ์ที่ประกอบด้วยวงจรอิเล็กทรอนิกส์ หรือเครื่องมือที่มีต้นทุนสูง อย่างอุปกรณ์ด้านเทคโนโลยีอวกาศ เป็นต้น

เนื่องจากท่อความร้อนเริ่มเป็นที่สนใจและได้รับการพัฒนาและประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวาง นอกจากนี้ยังได้มีงานวิจัยที่ได้ทำการศึกษาถึงการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนโดยใช้การเปลี่ยนแปลงของปัจจัยต่างๆ เช่น การเปลี่ยนสารทำงาน การเพิ่มจำนวนรูพรุนของโครงสร้างวัสดุพรุน การเพิ่มจำนวนชั้นของโครงสร้างวัสดุพรุน รวมถึงการเพิ่มหรือลดปริมาณของสารทำงานให้เหมาะสม ซึ่งล้วนแต่เป็นผลให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนมีค่าเพิ่มสูงขึ้น โครงการนี้จึงเป็นการศึกษาหลักการการทำงานของท่อความร้อน ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง และนำท่อความร้อนที่ได้มีการสร้างขึ้นแล้วมาทำการติดตั้งฮีตเตอร์ (Heater) และทำการ

ทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนเมื่อเทียบกับพลังงานความร้อนที่ให้จากฮีตเตอร์ (Heater) รวมถึงปัจจัยที่มีผลในการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อน โดยพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนอย่างมากก็คือการเปลี่ยนแปลงสารทำงาน (Working Fluid) ซึ่งมีงานวิจัยที่ได้ทำการศึกษาโดยมีการทดลองเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อน โดยการใช้สารเคมีที่มีคุณสมบัติทางกายภาพที่แตกต่างกันมาเป็นสารทำงาน ยกตัวอย่างเช่น สารละลายเอทานอลบริสุทธิ์ สารละลายเอทานอลผสม สารทำความเย็น รวมถึงสารละลายที่มีการผสมของอนุภาคนาโน (Nano Fluid) เป็นต้น ในโครงการชิ้นนี้จึงได้มีการทดลองใช้สารทำงานเป็นเอทานอลบริสุทธิ์เพื่อเปรียบเทียบผลการทดลองกับการใช้สารทำงานแบบเดิมซึ่งใช้น้ำ และทำการวิเคราะห์เพื่อหาเหตุผลของการเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนหลังจากที่ได้ทำการเปลี่ยนแปลงสารทำงาน ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าการใช้สารทำงานเป็นเอทานอลบริสุทธิ์ให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนที่ดีกว่าน้ำ เนื่องจากมีจุดเดือดที่ต่ำกว่า และค่าความดันไอที่สูงกว่าน้ำ ทำให้สารทำงานระเหยเป็นไอได้ในปริมาณที่มากกว่าน้ำ จึงส่งผลต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนที่สูงกว่า

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษาหลักการทำงาน และปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของท่อความร้อน
2. เพื่อทำการทดลองหาประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อน
3. เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแนวองศาในการวาง, อุณหภูมิที่ผิวท่อความร้อน และพลังงานไฟฟ้าที่ให้กับฮีตเตอร์
4. เพื่อทำการทดสอบประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อน โดยการใช้เอทานอลเป็นสารทำงานและเปรียบเทียบประสิทธิภาพของท่อความร้อนที่ใช้สารทำงานเป็นน้ำ

## 1.3 ขอบเขตของโครงการ

1. นำท่อความร้อนที่ได้สร้างขึ้นแล้วมาทำการติดตั้งฮีตเตอร์
2. ทดสอบประสิทธิภาพของการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแนวองศาในการวาง, อุณหภูมิที่ผิวท่อความร้อน และพลังงานไฟฟ้าที่ให้กับฮีตเตอร์
3. ทดสอบประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อน โดยใช้สารทำงานเป็นน้ำและเอทานอลบริสุทธิ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 1.4 ขั้นตอนในการดำเนินงาน

1. ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับท่อความร้อน
2. ทำการติดตั้งฮีตเตอร์ให้กับท่อความร้อนที่ได้มีการสร้างขึ้นแล้ว
3. ทดสอบการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแนวองศาในการวาง อุณหภูมิที่ผิวท่อความร้อน และพลังงานไฟฟ้าที่ให้กับฮีตเตอร์
4. ทำการทดลองโดยใช้สารทำงานเป็นน้ำและเอทานอลบริสุทธิ์เพื่อเปรียบเทียบผลของ ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อน
5. สรุปผลการดำเนินงานและเขียนรายงาน

#### 1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. เข้าใจถึงหลักการทำงานของท่อความร้อน รวมถึงทฤษฎีในการออกแบบท่อความร้อน
2. สามารถวิเคราะห์ผลของปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของท่อ ความร้อน
3. สามารถนำท่อความร้อนไปใช้งานได้

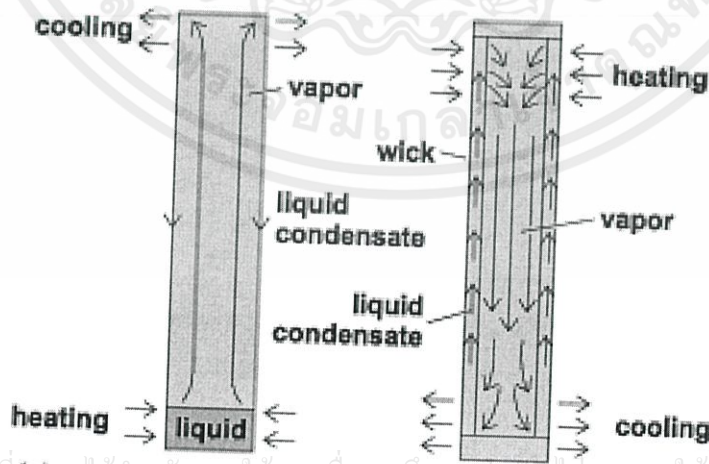
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

2.1 ท่อความร้อน (Heat pipe) [1]

ท่อความร้อนถือเป็นอุปกรณ์ที่มีความสามารถในการนำความร้อนที่สูงมากสามารถถ่ายเทความร้อนได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ยังสามารถทำงานได้แม้ในสภาพที่มีความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของแหล่งให้ความร้อนและแหล่งรับความร้อนที่แตกต่างกันเพียงเล็กน้อย

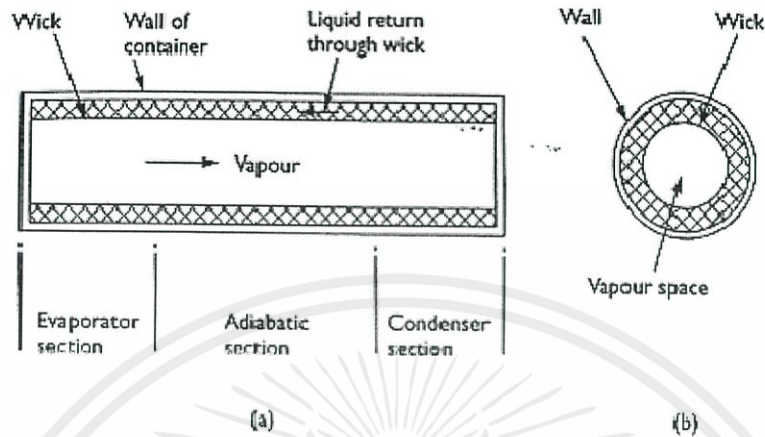
หลักการการทำงานของท่อความร้อนจะอาศัยหลักการเปลี่ยนเฟสของของไหลทำงานภายในท่อ ความร้อนเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นหรือลดต่ำลง ซึ่งท่อความร้อนนั้นได้มีการพัฒนาจากอุปกรณ์ถ่ายโอนความร้อนประเภทเทอร์โมไซฟอนแสดงดังรูปที่ 2-1a โดยมีผู้พัฒนาโดยการเพิ่มโครงสร้างวัสดุพรุนเพื่อทำให้เกิดแรงดันแคปิลารีซึ่งจะทำให้สารทำงานสามารถเคลื่อนที่ต้านทานแรงโน้มถ่วงของโลกเพื่อกลับมายังบริเวณที่รับความร้อนได้อีกครั้ง ดังแสดงในรูปที่ 2-1b โดยจะมีความแตกต่างที่ค่อนข้างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับเทอร์โมไซฟอนเนื่องจากเทอร์โมไซฟอนจะไม่มีโครงสร้างวัสดุพรุนเพื่อช่วยทำให้ของไหลทำงานเคลื่อนที่ต้านแรงโน้มถ่วงของโลกกลับมายังบริเวณที่รับความร้อน ดังนั้นจึงส่งผลให้การใช้งานของเทอร์โมไซฟอนสามารถทำได้ที่บริเวณที่มีการให้ความร้อนอยู่บริเวณด้านล่างของบริเวณที่รับความร้อนเท่านั้น การเพิ่มเข้ามาของโครงสร้างวัสดุพรุนจึงทำให้เกิดความแตกต่างอย่างชัดเจนเนื่องจากท่อความร้อนจะสามารถใช้งานได้ด้วยการวางตัวในแนวอื่นๆตามบริเวณที่มีการให้ความร้อน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ (a) นไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
รูปที่ 2-1 เทอร์โมไซฟอนและท่อความร้อน [1]

## 2.2 หลักการทำงานโดยทั่วไปของท่อความร้อน [2,3]

ท่อความร้อนจะประกอบไปด้วยโครงสร้างหลักๆ 2 อย่างได้แก่ ตัวท่อและโครงสร้างวัสดุพรุน แสดงดังรูป 2-2



รูปที่ 2-2 โครงสร้างและส่วนประกอบของท่อความร้อน [1]

ซึ่งโดยทั่วไปจะแบ่งการทำงานของท่อความร้อนออกเป็น 3 ส่วนหลักดังรูปที่ 2-2 คือ

1. ส่วนระเหย (Evaporator section) เป็นส่วนที่ได้รับความร้อนจากแหล่งความร้อนภายนอก (Heat source) และทำให้ของไหลทำงานระเหยเป็นไอ
2. ส่วนที่ไม่มีการถ่ายเทความร้อน (Adiabatic section) เป็นส่วนที่ใช้เป็นทางเดินของเฟสไอและเฟสของเหลว ซึ่งจะไม่มีการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นที่บริเวณนี้
3. ส่วนควบแน่น (Condenser section) เป็นบริเวณที่จะมีการแลกเปลี่ยนความร้อนกับสิ่งแวดล้อมภายนอก

หลักการทำงานโดยทั่วไปของท่อความร้อน เมื่อแหล่งความร้อนให้ความร้อนแก่ส่วนระเหย จะทำให้ของไหลทำงานภายในท่อความร้อนได้รับความร้อนเพิ่มขึ้นจนเปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอน้ำที่สุด และจะเคลื่อนที่ไปตามแนวช่องว่างของท่อความร้อนไปยังส่วนควบแน่น ที่ส่วนควบแน่นสิ่งแวดล้อมจะมีอุณหภูมิต่ำกว่าทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนขึ้นที่บริเวณนี้ ของไหลทำงานจะคายความร้อนตามปริมาณค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ จากนั้นจะควบแน่นกลับเป็นของเหลวอีกครั้งและจะเคลื่อนที่ไปตามแนวโครงสร้างวัสดุพรุนเพื่อกลับไปยังส่วนระเหยอีกครั้ง การไหลของสารทำงานจะหมุนเวียนเช่นนี้เรื่อยๆ เป็นวัฏจักรจึงทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนได้โดยไม่ต้องใช้เครื่องมือหรือกลไกใดๆเข้ามาเกี่ยวข้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 ปัจจัยที่ควรคำนึงถึงการออกแบบท่อความร้อน [2, 4]

การออกแบบท่อความร้อนเพื่อใช้งานจะต้องพิจารณาถึงปัจจัยต่างๆต่อไปนี้

### 2.3.1 การเลือกของไหลทำงาน (Selection of working fluid) [2, 4]

ของไหลทำงานสามารถแบ่งตามช่วงอุณหภูมิของท่อความร้อนเป็น 3 ชนิด คือ

1. ของไหลเย็นยิ่งยวด (Cryogenics liquid) ใช้ในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า  $-150^{\circ}\text{C}$  ( $122\text{ K}$ ) เช่น ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ออกซิเจน มีเทน เป็นต้น
2. ของไหลทั่วไป (Common liquid) ใช้ในช่วงอุณหภูมิ  $-150$ - $355^{\circ}\text{C}$  ( $122$ - $628\text{ K}$ ) เช่น สารทำความเย็น เมทานอล แอมโมเนีย น้ำ เป็นต้น
3. โลหะเหลว (Liquid metal) ใช้ในช่วงอุณหภูมิ  $355^{\circ}\text{C}$  ( $628\text{ K}$ ) ขึ้นไป เช่น โปรท ซีเซียม โซเดียม โพแทสเซียม ลิเทียม เงิน เป็นต้น

ในการพิจารณาเลือกของไหลทำงานที่เหมาะสมเพื่อใช้ในท่อความร้อน ประเด็นแรกที่ต้องคำนึงถึงคือ ช่วงอุณหภูมิที่จะนำท่อความร้อนไปใช้งานดังที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2-1 ซึ่งช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับของไหลทำงานมากที่สุดจะอยู่ระหว่างอุณหภูมิที่จุดวิกฤตและอุณหภูมิที่จุดเยือกแข็งและควรเป็นสารที่ไม่มีอันตราย เช่น ไม่มีฤทธิ์กัดกร่อน ไม่เป็นอันตราย หรือก่อให้เกิดความระคายเคือง เป็นต้น

ตารางที่ 2-1 ช่วงอุณหภูมิที่ใช้งานของของไหลบางชนิดในท่อความร้อน [1]

Medium	Melting point ( $^{\circ}\text{C}$ )	Boiling point at atmos. press. ( $^{\circ}\text{C}$ )	Useful range ( $^{\circ}\text{C}$ )
Helium	-271	-261	-271 to -269
Nitrogen	-210	-196	-203 to -160
Ammonia	-78	-33	-60 to 100
Pentane	-130	28	-20 to 120
Acetone	-95	57	0 to 120
Methanol	-98	64	10 to 130
Flutec PP2 <sup>1</sup>	-50	76	10 to 160
Ethanol	-112	78	0 to 130
Heptane	-90	98	0 to 150
Water	0	100	30 to 200
Toluene	-95	110	50 to 200
Flutec PP9 <sup>1</sup>	-70	160	0 to 225
Thermex <sup>2</sup>	12	257	150 to 350
Mercury	-39	361	250 to 650
Caesium	29	670	450 to 900
Potassium	62	774	500 to 1000
Sodium	98	892	600 to 1200
Lithium	179	1340	1000 to 1800
Silver	960	2212	1800 to 2300

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการใช้งานเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์  
ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม ห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และเผยแพร่ทางออนไลน์ถึงเจ้าของเอกสารโดยไม่ได้รับอนุญาต

นอกจากช่วงอุณหภูมิที่จะนำท่อความร้อนไปใช้งานแล้ว ยังต้องคำนึงถึงคุณสมบัติอื่นด้วย ตัวอย่างเช่น

- ความเข้ากันได้กับวัสดุที่ใช้ทำท่อ และ โครงสร้างวัสดุพอรุน นับเป็นปัจจัยที่สำคัญในการเลือกของไหลทำงานเพื่อใช้งานในท่อความร้อน เนื่องจากของไหลทำงานอาจจะทำปฏิกิริยาทางเคมีกับผนังท่อด้านในหรือกับ โครงสร้างวัสดุพอรุนทำให้เกิดความชำรุดเสียหายและใช้งานได้อย่างไม่เต็มประสิทธิภาพซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อน นอกจากนี้การเกิดปฏิกิริยาทางเคมีอาจทำให้เกิดแก๊สที่ไม่ควมแน่นขึ้นภายในท่อความร้อนซึ่งส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนลดลง
- ของไหลทำงานที่จะนำมาใช้งานควรจะมีค่าแรงดึงผิวที่สูงเนื่องจากการมีค่าแรงดึงผิวที่สูงจะทำให้ของเหลวมีความดันแคปิลารีสูงขึ้นซึ่งจะส่งผลให้ของเหลวสามารถเคลื่อนที่ด้านทานแรงโน้มถ่วงของโลกกลับมายังบริเวณที่ให้ความร้อนได้อีกครั้งเกิดการหมุนเวียนของของไหลทำงานอย่างเป็นเป็นวัฏจักรนอกจากนี้แรงดึงผิวที่สูงจะทำให้ของเหลวเกิดความเปียกต่อผนังด้านในท่อและ โครงสร้างวัสดุพอรุน ทำให้ของเหลวกระจายออกไปเป็นบริเวณกว้าง ได้รับความร้อนจากผนังท่อและ โครงสร้างวัสดุพอรุนดีขึ้น
- ความดันไอไม่ควรสูงหรือต่ำกว่าช่วงอุณหภูมิที่ใช้งาน เนื่องจากจะทำให้การไหลเกิดขึ้นไม่สม่ำเสมอ และเพื่อป้องกันไม่ให้ภายในตัวท่อเกิดความดันในปริมาณที่สูงมากเกินไป ซึ่งอาจทำให้เกิดอันตรายได้
- ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอสูงจะทำให้ปริมาณการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นในปริมาณที่สูง เนื่องจากสารทำงานเมื่อมีการเปลี่ยนเฟสเป็นไอ จะมีการสะสมของปริมาณความร้อนเท่ากับค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ และจะเคลื่อนที่ไปยังส่วนควบแน่นเพื่อไปคายความร้อนที่ส่วนควบแน่นที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า
- ของไหลทำงานควรจะต้องมีคุณสมบัติทางกายภาพที่มีความหนืดต่ำทั้งในกรณีที่เป็นเฟสไอและเฟสของเหลว เพื่อลดความต้านทานในการเคลื่อนที่ของสารทำงานภายในท่อความร้อน

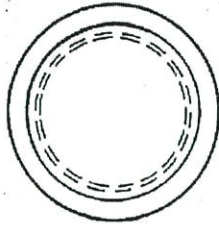
### 2.3.2 การเลือกโครงสร้างวัสดุพอรุน (Selection of wick structure) [2]

โครงสร้างวัสดุพอรุนถือเป็น โครงสร้างที่มีความสำคัญต่อการทำงานของท่อความร้อน โดยส่วนใหญ่ มักจะใช้ตะแกรงลวดละเอียด (Screen mesh) ซึ่ง โครงสร้างวัสดุพอรุนที่มีประสิทธิภาพจะต้องมีพื้นที่ผิวพอรุนที่เล็ก และจำนวนพอรุนที่มาก เพื่อเป็นการเพิ่มความดันแคปิลารีให้กับท่อความร้อน

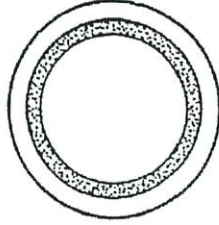
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่าในรูปแบบใดก็ตาม หากต้องการนำเอกสารนี้ไปใช้ และต้องอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารนี้ทุกครั้ง กรุณาติดต่อผู้จัดทำเอกสาร

โครงสร้างวัสดุพอรุนสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทหลักๆ คือ โครงสร้างวัสดุพอรุนที่เป็นเนื้อเดียว (Homogenous wicks) และแบบประกอบ (Composite wicks)

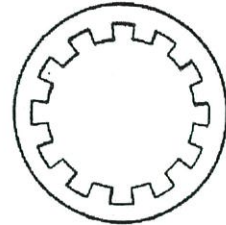
โครงสร้างวัสดุพรุนที่เป็นเนื้อเดียวเป็น โครงสร้างที่ทำจากวัสดุเพียงแค่นชนิดเดียว แสดงตัวอย่างไว้ดังรูปที่ 2-3



a. Wrapped Screen



b. Sintered Metal



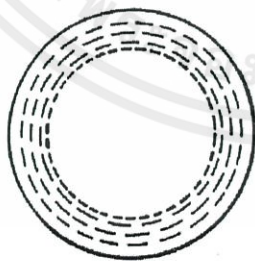
c. Axial Groove

รูปที่ 2-3 ภาพตัดแนวขวางของท่อความร้อนที่มีโครงสร้างวัสดุพรุนที่ทำจากวัสดุชนิดเดียว [2]

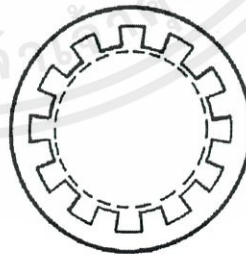
โครงสร้างแบบผงโลหะที่ผ่านความร้อน (Sintered porous metal) ดังรูป 2-3b โครงสร้างวัสดุพรุนชนิดนี้จะมีขนาดรูพรุนที่เล็ก ทำให้ความดันแคปปีลารีที่ผิวหน้าของเหลว-ไอสูง แต่ก็ส่งผลให้เกิดความดันตกคร่อมในทางเดินของเฟสของเหลว

โครงสร้างวัสดุพรุนที่นิยมชนิดหนึ่งคือการเจาะร่องตามแนวยาวของตัวท่อ (Axial Groove) ดังรูป 2-3c เหมาะสำหรับท่อความร้อนที่ใช้งานในช่วงอุณหภูมิที่กว้าง โดยครีบอลุหะนั้นจะช่วยในเรื่องของการนำความร้อน และลดค่าความต้านทานของความร้อนผ่านโครงสร้างวัสดุพรุน ซึ่งโครงสร้างวัสดุพรุนชนิดนี้สามารถทำได้ยาก

โครงสร้างวัสดุพรุนแบบประกอบเกิดจากวัสดุ 2 ประเภทหรือมากกว่า มีการสร้างขึ้นเพื่อให้เกิดการแบ่งหน้าที่ของโครงสร้างวัสดุพรุนที่ใช้เพิ่มความดันแคปปีลารีกับเส้นทางการเดินทางของเฟสของเหลวเพื่อให้เกิดความต้านทานของเฟสของเหลวที่ต่ำ ลักษณะโครงสร้างวัสดุพรุนแบบประกอบบางชนิด แสดงไว้ดังรูปที่ 2-4



a. Composite



b. Screen Covered Groove

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 2-4 ภาพตัดขวางของท่อความร้อนที่มีโครงสร้างวัสดุพรุนที่ประกอบด้วยวัสดุ 2 ประเภท [2]

หน้าที่หลักของโครงสร้างวัสดุพูน คือ ใช้เป็นทางเดินของเฟสของเหลวจากส่วนควบแน่น กลับไปยังส่วนระเหย และยังทำหน้าที่ในการสร้างความดันแคปิลารี เพื่อใช้ขนส่งของไหลทำงานเฟสของเหลวจากส่วนควบแน่นไปยังส่วนระเหย วัสดุพูนที่ดีจะต้องช่วยกระจายเฟสของเหลวให้ทั่วส่วนระเหย เพื่อจะได้ดูดซับความร้อนได้อย่างต่อเนื่อง และยังคงพิจารณาสภาพแวดล้อมที่จะนำความร้อนไปใช้งานด้วย

### 2.3.3 การเลือกวัสดุสำหรับท่อความร้อน (Selection of the container) [2]

การเลือกวัสดุที่จะนำมาใช้ทำท่อความร้อนสิ่งสำคัญในการเลือกคือ ความเข้ากันได้ (Compatibility) ระหว่างวัสดุที่ใช้ทำตัวท่อความร้อนและสารทำงานที่เลือกใช้ เพื่อป้องกันปัญหาการกัดกร่อน หรือการเกิดปฏิกิริยาเคมีภายในท่อความร้อนซึ่งจะทำให้เกิดความชำรุดเสียหายแก่ผนังท่อด้านในและมีแก๊สที่ไม่ควบแน่นเกิดขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 2-2 นอกจากนี้วัสดุที่ใช้จะต้องไม่มีรูพูน และนำความร้อนได้ดี เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อน

ตารางที่ 2-2 ความเข้ากันได้ของวัสดุและของไหลทำงาน [4]

Fluids	Solids					
	Al	Cu	Fe	Ni	SS 304	Ti
Nitrogen	C	C	C	C	C	
Methane	C	C			C	
Ammonia	C		C	C	C	
Methanol	I	C	C	C	C	
Water	I	C		C	C <sup>a</sup>	C
Potassium				C		I
Sodium				C	C	I

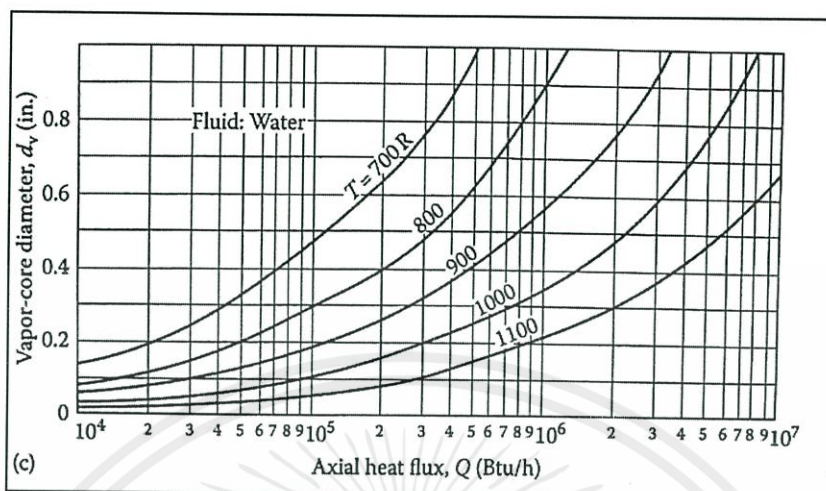
*Note:* SS, stainless steel; C, compatible; I, incompatible; blank, data not available.

<sup>a</sup> Possible hydrogen generation.

### 2.3.4 ขนาดของท่อความร้อน

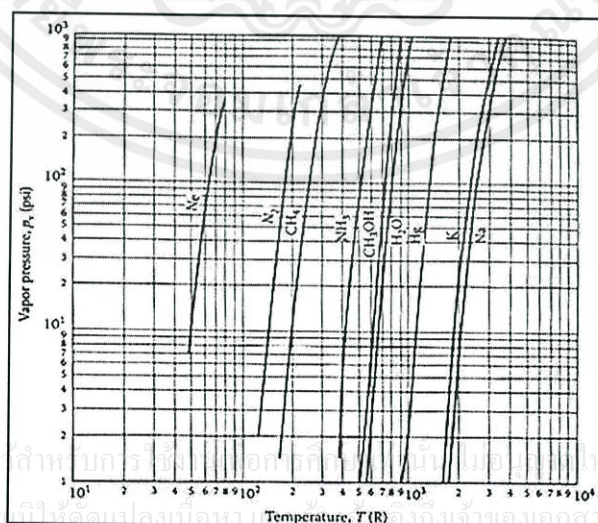
ในการออกแบบท่อความร้อนจะต้องคำนึงถึงขนาดของท่อความร้อน โดยดูได้จากรูปที่ 2-5 ซึ่งแสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางเดินเฟสไอ (Vapor core diameter) ซึ่งขนาดของท่อความร้อนจะส่งผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อน เนื่องจากเส้นผ่านศูนย์กลางของการค้าของท่อความร้อนที่มีค่ามากก็จะทำให้ช่องทางเดินของเฟสไอมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย ส่งผลให้ใช้

ความต้านทานการไหลของช่องทางเดินเฟสไอลดต่ำลง สารทำงานในเฟสไอก็จะเคลื่อนตัวไปยังส่วนควบแน่นเพื่อทำการถ่ายเทความร้อนได้ง่ายขึ้น

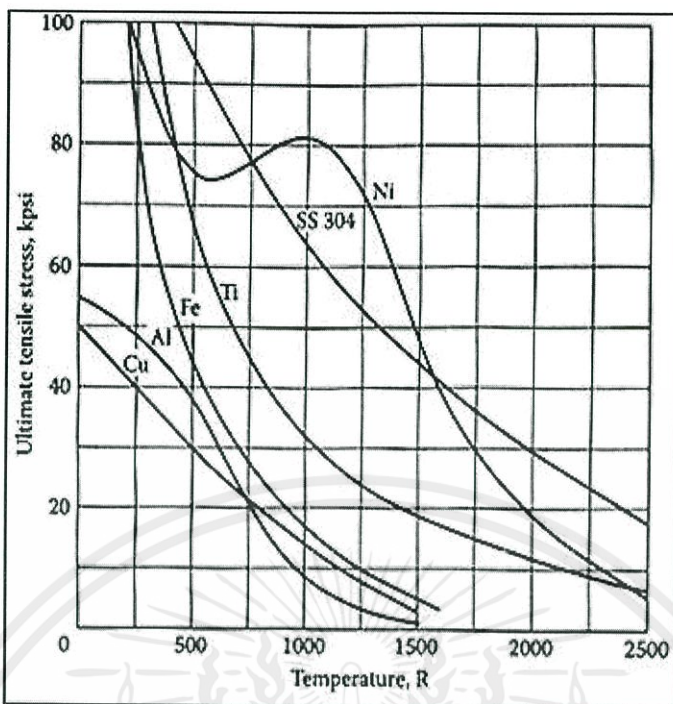


รูปที่ 2-5 กราฟแสดงเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางเดินเฟสไอกับอัตราการถ่ายเทความร้อนของน้ำ [4]

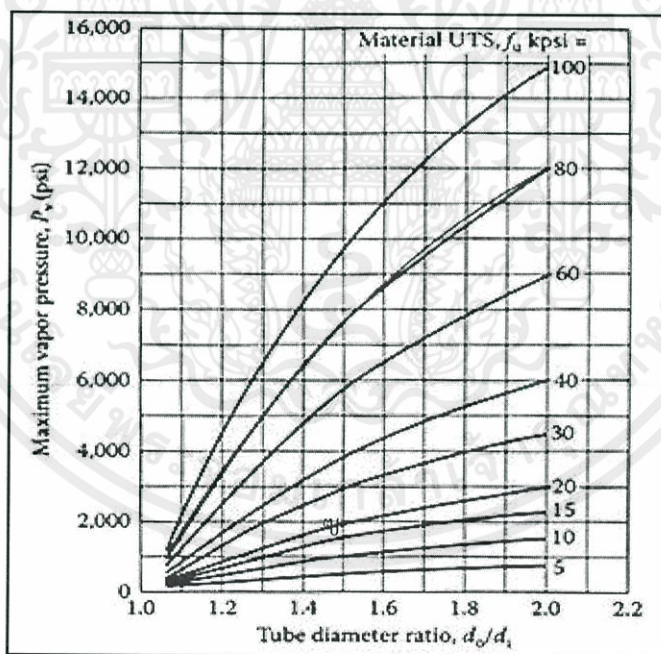
เนื่องจากหลักการทำงานของท่อความร้อนนั้นของไหลทำงานจะเกิดการเปลี่ยนเฟส สิ่งสำคัญที่ควรคำนึงถึงก็คือท่อความร้อนที่ปฏิบัติงานกับเฟสไอจะทำให้เกิดความดันไอกระทำที่ผนังของท่อซึ่งหากมีความดันไอที่สูงจนเกินไปอาจทำให้เกิดอันตรายได้ ดังนั้นเราจึงต้องพิจารณาถึงความสามารถในการทนต่อความดันไอกายในท่อความร้อน โดยในการออกแบบจะต้องใช้ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความดันไอของสารทำงาน อัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกต่อภายในของท่อกับความดันไอ เพื่อใช้เลือกขนาดความหนาของท่อที่เหมาะสมต่อการใช้งานท่อความร้อนโดยใช้ค่าจากรูปที่ 2-6, 2-7 และ 2-8 ประกอบตามลำดับ



รูปที่ 2-6 กราฟแสดงความดันไอของของไหลทำงานชนิดต่างๆ [4]



รูปที่ 2-7 กราฟแสดงค่าความเค้นแรงดึงสูงสุดของวัสดุ [4]

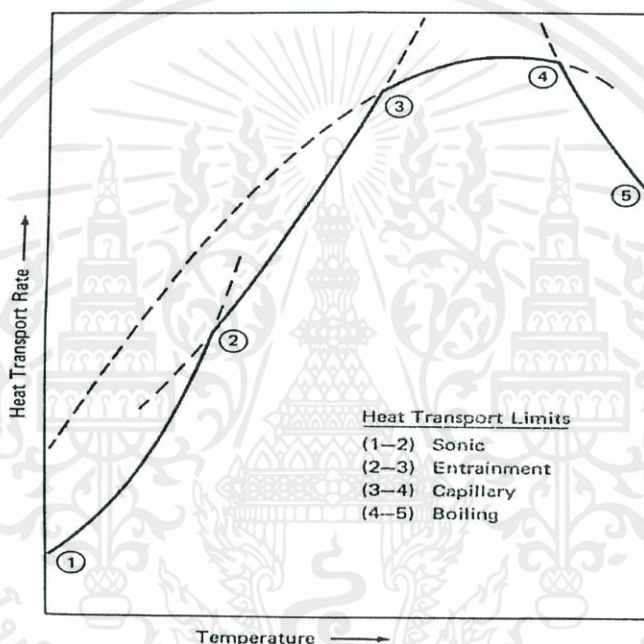


รูปที่ 2-8 แสดงอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางกลางภายนอกต่อภายในของท่อความร้อน กับความดันไอสูงสุด [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.5 ขีดจำกัดในการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อน [2, 4]

ปัจจัยที่มีผลต่อการเพิ่มหรือลดลงของประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อน เรียกว่า ขีดจำกัดในการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อน แสดงดังรูปที่ 2-9 ซึ่งปัจจัยทางกายภาพ เหล่านี้ได้แก่ ความดันแคปิลารี การไหลของไอ แรงเฉือนที่ผิวหน้าของเหลว และการเดือดอย่าง รุนแรง โดยที่ขีดจำกัดเหล่านี้จะมีมากขึ้นขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางกายภาพของสารทำงาน ขนาดและวัสดุที่ใช้ทำท่อความร้อน โครงสร้างวัสดุพอรุน เป็นต้น ซึ่งขีดจำกัดที่ได้จากการคำนวณที่มีค่าน้อยที่สุดจากขีดจำกัดทั้งหมด จะใช้เป็นค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดของท่อความร้อนที่สามารถทำได้ตามช่วงอุณหภูมิใช้งานนั้นๆ



รูปที่ 2-9 กราฟแสดงขีดจำกัดในการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อน [2]

2.3.5.1 ขีดจำกัดการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากความดันแคปิลารี (Capillary Limitation)

ท่อความร้อนจะสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องก็ต่อเมื่อสารทำงานภายในท่อความร้อนเกิดการควบแน่นที่ส่วนควบแน่นและเคลื่อนที่กลับมายังส่วนระเหยได้อีกครั้ง สิ่งที่เป็นปัจจัยสำคัญคือ แรงดันแคปิลารี ซึ่งแรงดันแคปิลารีที่มากพอจึงจะสามารถทำให้สารทำงานเคลื่อนที่จากส่วนควบแน่นกลับมายังส่วนระเหยได้ สมการอัตราการถ่ายเทความร้อนของขีดจำกัดแคปิลารี

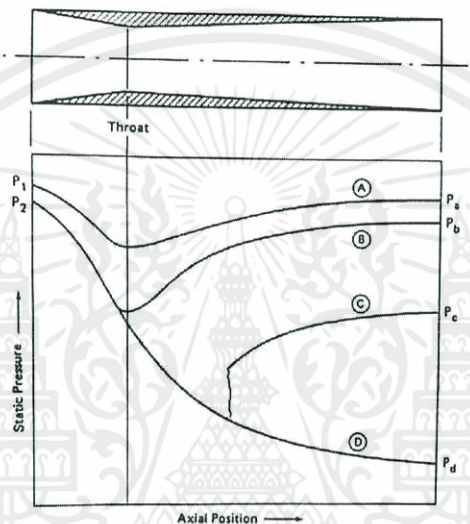
(Capillary Limitation on the Heat Transport Rate,  $Q_{c,max}$ ) สามารถแสดงได้ดังนี้

เป็ใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และ  $(QL_{c,max})$  ถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$(Q_{c,max}) = \frac{(QL_{c,max})}{0.5L_c + L_a + 0.5L_e} \tag{2-1}$$

### 2.3.5.2 ขีดจำกัดการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากความเร็วเสียง (Sonic Limitation)

เนื่องจากในท่อความร้อนมีขนาดช่องทางเดินเฟสไอที่คงที่ การระเหยกลายเป็นไอที่ส่วนระเหย และการลดลงของไอที่ส่วนควบแน่น ทำให้การไหลของไอเกิดความเร่งและความหน่วงขึ้น เป็นผลมาจากอัตราการไหลเชิงมวลที่คงที่ผ่านจุดต่างๆ ในท่อความร้อน แสดงดังรูปที่ 2-10 ในช่วงคอคอดของนอซเซิลความดันจะลดต่ำลง และทำให้ความเร็วการไหลเพิ่มขึ้น และในส่วนที่ขยายออก ความเร็วจะยิ่งเพิ่มขึ้นไปอีก จนเข้าสู่สภาวะความเร็วเหนือเสียง (Supersonic) หรือไม่อาจเกิดการอัดตัวของไอกลับอีกครั้ง เมื่อความดันเพิ่มขึ้นและส่งผลให้ความเร็วลดน้อยลง



รูปที่ 2-10 โปรไฟล์ของความดันเมื่อไหลผ่านนอซเซิล [2]

ได้มีการศึกษาและพบว่า การไหลของไอในท่อความร้อนค่อนข้างใกล้เคียงกับลักษณะการไหลในท่อนอซเซิล Levy, Kemme Deverall ได้อธิบายและแสดงให้เห็นถึงการเกิดขีดจำกัดเนื่องจากความเร็วเสียง ซึ่งที่อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดในท่อความร้อนจะขึ้นกับการไหลแบบ Choked และอุณหภูมิที่ส่วนระเหยมีค่าคงที่ หากเพิ่มอัตราการดึงความร้อนออกจากส่วนควบแน่นให้ต่ำกว่าอุณหภูมิในส่วนควบแน่น จะทำให้ไอเกิดการไหลด้วยความเร็วเหนือเสียงทำให้เกิดความต่างของอุณหภูมิในช่วงกว้างตลอดแนวความยาวของท่อความร้อน แต่ไม่เพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อน ซึ่งส่วนใหญ่เป็นผลมาจากการใช้งานท่อความร้อนที่ความหนาแน่นไอดำและความเร็วไอสูงโดยค่าอัตราการถ่ายโอนความร้อนสูงสุดของขีดจำกัดของเสียง (Sonic Limitation) หาได้จากสมการ (2-2)

$$Q_{S,max} = A_v \rho_v \lambda \left[ \frac{\gamma_v R_v T_v}{2(\gamma_v + 1)} \right]^{1/2} \quad (2-2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และนำข้อมูลของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขีดจำกัดประเภทนี้มักเกิดจากท่อความร้อนได้รับพลังงานความร้อนสูงที่รวดเร็วเกินไป หรือมีการดึงเอาความร้อนที่ส่วนควบแน่นออกเร็วเกินไป ทำให้มีความต่างของอุณหภูมิในท่อความร้อนมาก ขีดจำกัดประเภทนี้จึงไม่ค่อยขึ้นกับโครงสร้างวัสดุพอรุนเท่าไรนัก แต่จะขึ้นกับชนิดของของไหลทำงาน และขนาดของช่องทางเดินเฟสไอ (Vapor Core Site) กล่าวคือ ยังมีเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางเดินเฟสไอมากก็จะสามารถถ่ายโอนความร้อนได้มาก

### 2.3.5.3 ขีดจำกัดการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากของเหลวหลุดลอยตามไอ (Entrainment Limitation)

หลักการทำงานของท่อความร้อนเนื่องจากภายในท่อความร้อนจะมีการเคลื่อนที่ของเฟสไอและเฟสของเหลวเกิดขึ้นในทิศทางที่สวนทางกัน และเนื่องจากแรงโน้มถ่วงในเฟสไอเคลื่อนที่ผ่านช่องทางเดินของเฟสไอที่มีขนาดใหญ่กว่าช่องทางเดินของเฟสของเหลวที่เคลื่อนที่ได้โดยอาศัยแรงดันแคปิลารีจากโครงสร้างวัสดุพอรุน จึงทำให้สารทำงานในเฟสไอเคลื่อนที่ได้รวดเร็วกว่าเฟสของเหลวส่งผลให้เกิดการเสียดสีกันระหว่างพื้นผิวของสารทำงานในสองเฟส สารทำงานในเฟสของเหลวจึงมีการหลุดลอยเข้าไปในเฟสไอ ปริมาณของสารทำงานในเฟสของเหลวที่จะกลับไปยังส่วนระเหยจึงมีปริมาณที่น้อยลงจนทำให้เกิดการเดือดจนแห้งที่บริเวณส่วนระเหย กล่าวคือไม่เหลือสารทำงานในบริเวณของส่วนระเหยอยู่เลย โดยค่าการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากของเหลวหลุดลอยตามไอคำนวณได้จากสมการ (2-3)

$$Q_{E,max} = A_v \lambda \left[ \frac{\sigma \rho_v}{2r_{h,s}} \right]^{1/2} \quad (2-3)$$

### 2.3.5.4 ขีดจำกัดการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการเดือด (Boiling Limitation)

เนื่องจากในส่วนระเหย อุณหภูมิของของเหลวที่รอยต่อของผนังท่อและ โครงสร้างวัสดุพอรุน จะมากกว่าอุณหภูมิของเหลวที่รอยต่อ โครงสร้างวัสดุพอรุนและไอ โดยปริมาณอุณหภูมิจะไม่ขึ้นอยู่กัของเหลว และลักษณะของโครงสร้างวัสดุพอรุนเพียงอย่างเดียว แต่จะขึ้นอยู่กัความหนาแน่นของฟลักซ์ความร้อนอีกด้วย ซึ่งความดันไออิ่มตัวที่รอยต่อของผนังท่อและ โครงสร้างวัสดุพอรุน มีค่ามากกว่าความดันของของเหลวที่จุดเดียวกัน ดังนั้นเมื่อความต่างความดันเพิ่มขึ้น และฟลักซ์ความร้อนในแนวรัศมีของส่วนระเหยเพิ่มขึ้น จะทำให้เกิดแก๊สที่ไม่ควบแน่นขึ้นที่ โครงสร้างวัสดุพอรุน ซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการให้เกิดในท่อความร้อนอย่างยิ่ง เนื่องจากจะไปขัดขวางเส้นทางการไหลของของเหลว ไม่สามารถเคลื่อนที่หมุนเวียนได้ตลอดทั้งท่อ ทำให้โครงสร้างวัสดุพอรุนแห้งและเกิดความต้านทานความร้อนมากขึ้น

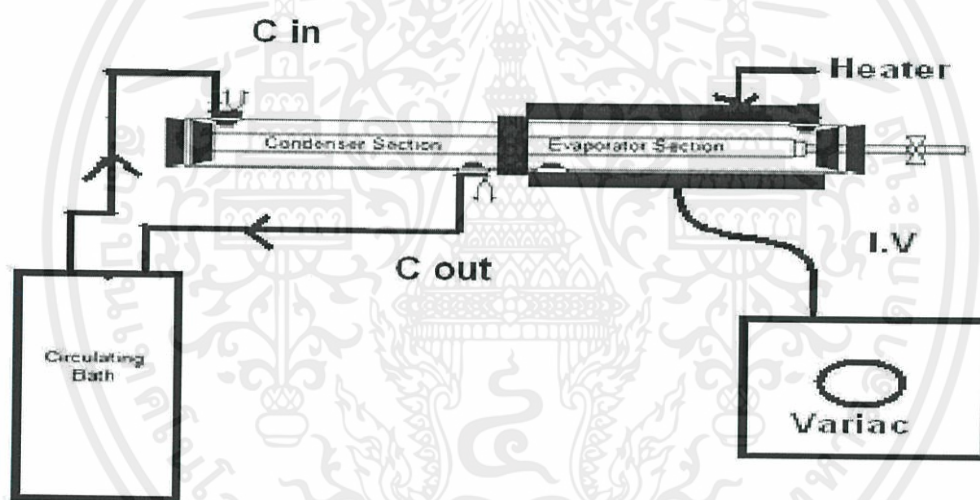
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่เพื่อเผยแพร่เป็นประโยชน์ในการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นการลดขีดจำกัดนี้ ทำได้โดยเลือกใช้โครงสร้างวัสดุพอร์ซเซอที่มีค่าความจุความร้อนสูง เพื่อช่วยลดอัตราการระเหยของไอที่ส่วนระเหย โดยค่าอัตราการถ่ายโอนความร้อนสูงสุดของขีดจำกัดเนื่องจากการเดือด หาได้จากสมการ (2-4)

$$Q_{B,max} = \frac{2\pi L_c k_c T_v}{\lambda \rho_v \ln(r_i / r_v)} \left( \frac{2\sigma}{r_n} - P_c \right) \quad (2-4)$$

## 2.4 การทดสอบประสิทธิภาพท่อความร้อน

สำหรับการทดสอบประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนจะทำการแบ่งท่อความร้อนออกเป็น 2 ส่วน ดังรูปที่ 2-11 ซึ่งจะประกอบไปด้วย ส่วนระเหย (Evaporator section) โดยจะมีการให้ความร้อนด้วยฮีตเตอร์ และส่วนควบแน่น (Condenser section) โดยจะมีการนำน้ำเย็นมาระบายความร้อนในส่วนนี้เพื่อนำค่าอุณหภูมิของน้ำเย็นที่เพิ่มขึ้นไปคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อน



รูปที่ 2-11 ชุดทดสอบประสิทธิภาพท่อความร้อน

ชุดทดสอบประสิทธิภาพท่อความร้อนจะประกอบด้วยการคำนวณ 2 ส่วนคือที่บริเวณส่วนระเหยและส่วนควบแน่นตามลำดับ เพื่อนำไปใช้ในการหาประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อน ดังนี้

2.4.1 การคำนวณค่ากำลังไฟฟ้า ในการทดสอบประสิทธิภาพท่อความร้อนจะต้องมีการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าที่ให้แกฮีตเตอร์ซึ่งสามารถหาได้จากสมการ (2-5)  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P = IV \quad (2-5)$$

เมื่อ  $P$  = กำลังไฟฟ้า (วัตต์)  
 $I$  = กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)  
 $V$  = แรงดันไฟฟ้าตกคร่อม (โวลต์)

2.4.2 การคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อน โดยจะใช้การคำนวณความร้อนสัมผัส (Sensible Heat) ซึ่งเป็นความร้อนที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของวัตถุ หรือระบบนั้นๆ ซึ่งสามารถที่จะคำนวณได้จากสมการ (2-6)

$$Q = mc_p \Delta T \quad (2-6)$$

เมื่อ  $Q$  = อัตราการถ่ายเทความร้อน (วัตต์)  
 $m$  = อัตราการไหลเชิงปริมาตร (ลิตรต่อชั่วโมง)  
 $c_p$  = ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ (กิโลจูลต่อกิโลกรัมเคลวิน)  
 $\Delta T$  = ผลต่างของอุณหภูมิระหว่างน้ำเย็นขาเข้าและขาออก (เคลวิน)

ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนเท่ากับสัดส่วนระหว่างการถ่ายเทความร้อนที่ส่วนควบแน่น (วัตต์) ต่อ กำลังไฟฟ้าที่ให้แก่ส่วนระเหย (วัตต์)

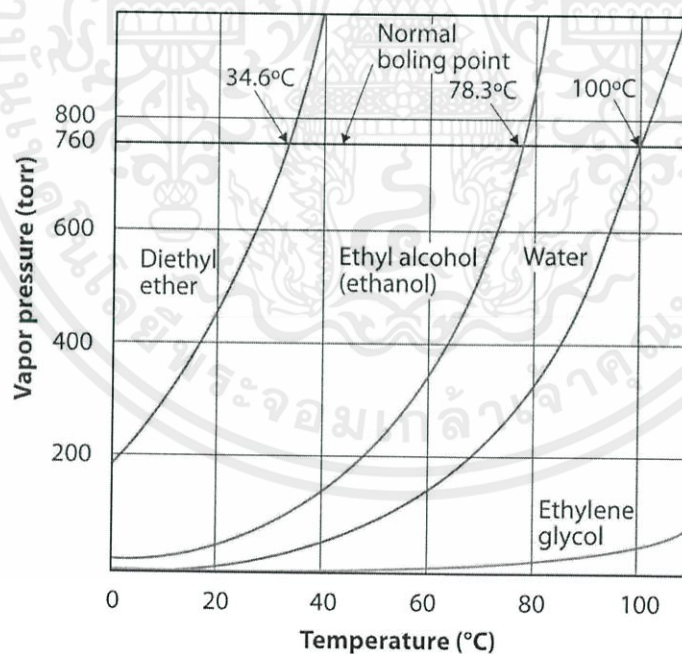
## 2.5 คุณสมบัติทางกายภาพของ น้ำ และ เอทานอล

ในการทดลองจะมีการใช้สารทำงาน 2 ชนิด ได้แก่ น้ำ และ เอทานอล ซึ่งมีคุณสมบัติทางกายภาพของสารที่แตกต่างกันในด้านต่างๆ เช่น จุดเดือด จุดหลอมเหลว ค่าความดันไอ และค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ เป็นต้น ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้แสดงอยู่ในตารางที่ 2-3 และรูปที่ 2-12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2-3 ตารางแสดงคุณสมบัติทางกายภาพของสารชนิดต่างๆที่ความดันบรรยากาศ [5]

Latent Heats of Fusion and Vaporization				
Substance	Melting Point (°C)	Latent Heat of Fusion (J/kg)	Boiling Point (°C)	Latent Heat of Vaporization (J/kg)
Helium	-269.65	$5.23 \times 10^3$	-268.93	$2.09 \times 10^4$
Nitrogen	-209.97	$2.55 \times 10^4$	-195.81	$2.01 \times 10^5$
Oxygen	-218.79	$1.38 \times 10^4$	-182.97	$2.13 \times 10^5$
Ethyl alcohol	-114	$1.04 \times 10^5$	78	$8.54 \times 10^5$
Water	0.00	$3.33 \times 10^5$	100.00	$2.26 \times 10^6$
Sulfur	119	$3.81 \times 10^4$	444.60	$3.26 \times 10^5$
Lead	327.3	$2.45 \times 10^4$	1 750	$8.70 \times 10^5$
Aluminum	660	$3.97 \times 10^5$	2 450	$1.14 \times 10^7$
Silver	960.80	$8.82 \times 10^4$	2 193	$2.33 \times 10^6$
Gold	1 063.00	$6.44 \times 10^4$	2 660	$1.58 \times 10^6$
Copper	1 083	$1.34 \times 10^5$	1 187	$5.06 \times 10^6$



เอกสารนี้เป็น รูปที่ 2-12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันไอกับอุณหภูมิของสารชนิดต่างๆ [6] โดยชนด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Senthilkumar, R. และคณะ [7] ได้ทำการศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงสารทำงานจากสารทำงานแบบเดิมที่โดยปกติของสารทำงานจะมีค่าแรงดึงผิวที่ลดลงเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิซึ่งไม่เป็นผลดีต่อการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อน โดยสารทำงานที่ได้ทำการศึกษาเป็นสารละลายแอลกอฮอล์ผสมที่มีจำนวนคาร์บอนมากกว่า 4 ซึ่งพบว่าพฤติกรรมของสารทำงานชนิดนี้จะทำให้ค่าแรงดึงผิวเพิ่มสูงขึ้นเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่ให้แก่ท่อความร้อน โดยสารทำงานที่ได้ทำการศึกษาดังกล่าวเกิดจากการผสม n-butanol กับน้ำ และ n-pentanol กับน้ำ โดยให้มีความเข้มข้น 0.001 โมลต่อลิตร และได้มีการนำมาทดลองเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนเทียบกับท่อความร้อนที่ใช้น้ำเป็นสารทำงาน ซึ่งผลการทดลองพบว่าสารละลายผสม n-pentanol ให้ประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนสูงสุดรองลงมาคือสารละลายผสม n-butanol และน้ำ ตามลำดับ

Savino R. และคณะ [8] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับสารทำงานประเภท Binary mixtures และได้ทำการวัดค่าแรงดึงผิวโดยใช้กล้อง IR พบว่าแอลกอฮอล์โซ่ยาวบางชนิดมีพฤติกรรมที่แตกต่างไปจากสารทำงานทั่วไปกล่าวคือ จะมีค่าแรงดึงผิวที่สูงขึ้นเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ ดังรูป 2-8 ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการเคลื่อนที่ของสารทำงานจากส่วนควบแน่น ไปยังส่วนระเหย และยังส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อน ซึ่งหลังจากได้มีการทำการทดลองพบว่าสารทำงานประเภท Binary mixtures ที่เหมาะสมจะมีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนที่ดีกว่าน้ำ โดยจากผลการทดลองจะเห็นว่า มีสารละลายแอลกอฮอล์บางชนิดที่มีพฤติกรรมที่แตกต่างไปจากสารละลายแอลกอฮอล์ตัวอื่น โดยที่จะมีค่าแรงดึงผิวที่เพิ่มสูงขึ้นเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิที่ให้แก่ท่อความร้อน ดังนั้นการเลือกใช้สารทำงานที่เหมาะสมในช่วงอุณหภูมิใช้งานจะส่งผลต่อค่าแรงดึงผิวของสารทำงาน ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนเนื่องจากทำให้เกิดแรงดันแคปิลลารีเป็นแรงขับเคลื่อนให้สารทำงานจากส่วนควบแน่นเคลื่อนที่กลับมายังส่วนระเหยได้อีกครั้ง นอกจากนี้การใช้แอลกอฮอล์ที่มีสายโซ่ยาวจะทำให้การเคลื่อนที่ของไอน้ำในท่อเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและมีพลังงานมากส่งผลให้อุณหภูมิที่ผิวท่อบริเวณส่วนระเหยและส่วนควบแน่นแตกต่างกันน้อยมาก โอกาสที่จะเกิดความร้อนสูญเสียจะน้อยตามไปด้วยซึ่งเป็นผลให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนดีขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pramod R. Pachghare [9] ได้มีการทดลองเกี่ยวกับประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบ Closed Loop Pulsating Heatpipe โดยมีการใช้สารทำงานได้แก่ เอทานอล บริสุทธิ์ เอทานอลผสม และ น้ำ ซึ่งได้ทำการแสดงผลการทดลองในรูปของค่าความต้านทานความร้อนเทียบกับปริมาณความร้อนที่ให้แก่ท่อความร้อนซึ่งจากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าแนวโน้มของค่าความต้านทานความร้อนของเอทานอลบริสุทธิ์จะมีค่าต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับเอทานอลผสมและน้ำ จึงส่งผลให้ท่อความร้อนที่ใช้สารทำงานเป็นเอทานอลบริสุทธิ์ มีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนที่ดีที่สุดตามด้วยท่อความร้อนที่ใช้เอทานอลผสมและน้ำตามลำดับ

ธีรพงศ์ บริรักษ์ และรศ.ดร.สมบัติ ทิฆมทรัพย์ [10] ได้ทำการศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการทำงานของท่อความร้อนในกรณีที่ใช้สารทำงานประกอบด้วยน้ำ, แอลกอฮอล์ และสารทำความเย็น R134a โดยเติมลงในท่อความร้อนทำจากทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 mm ยาว 600 mm ส่วนรับความร้อนใช้ฮีตเตอร์ในการให้ความร้อนแก่ท่อความร้อนสามารถปรับค่าความร้อนที่ป้อนให้ระหว่าง 30 - 70 W และใช้น้ำระบายความร้อนแก่ท่อความร้อน ควบคุมอุณหภูมิของน้ำที่ทางเข้าชุดระบายความร้อนระหว่าง 20 - 25 °C ผลการทดสอบพบว่าที่มุมเอียง 0 องศาและปริมาตรสารทำความเย็น R134a 40% ให้ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุดเท่ากับ 92.02% และที่มุมเอียง 45 องศาและปริมาตรแอลกอฮอล์ 66% ให้ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุดเท่ากับ 69.3% ในขณะที่ใช้น้ำเป็นสารทำงานพบว่าที่มุมเอียง 60 องศาให้ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุดเท่ากับ 66.6%

ธีรภัทร์ กิตินิรันดร์กุล และศุภวรัตน์ แดงจั่น [11] ได้ศึกษาหลักการทํางานและปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อน โดยทำการออกแบบท่อความร้อน ซึ่งเป็นท่อทองแดงที่มีน้ำเป็นสารทำงาน โครงสร้างวัสดุพูนเป็นตะแกรงลวดละเอียด จำนวน 3 ชั้น โดยปัจจัยที่ศึกษาได้แก่อุณหภูมิที่ใช้งาน แนวองศาการวางที่ต่างกันคือ -90,-45,-30,-15, 0, 5, 45, 90 จากแนวระดับและรูปแบบ Gas-Loaded ของท่อความร้อน จากการศึกษาผลของอุณหภูมิแหล่งความร้อนที่ 60 °C และ 80°C พบว่าอุณหภูมิที่สูงกว่าจะทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนสูงขึ้นจากการศึกษาผลของแนวการวางท่อความร้อนพบว่าเมื่อมุมของท่อความร้อนจากแนวระดับมีค่าสูงขึ้น โดยที่ด้านที่ได้รับความร้อนอยู่ด้านบน จะส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนลดลง นอกจากนี้ยังได้ศึกษารูปแบบของท่อความร้อนเพื่อแก้ปัญหาแก๊สที่ไม่ควบแน่นคือใช้ท่อความร้อนรูปแบบ Gas-Loaded ซึ่งมีส่วนที่กักเก็บแก๊สที่ไม่ควบแน่นอยู่บริเวณด้านท้ายของส่วนควบแน่น เพื่อเพิ่มพื้นที่การแลกเปลี่ยนความร้อนของไอกับสิ่งแวดล้อมภายนอก โดยไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คิดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พบว่าท่อความร้อนรูปแบบ Gas-Loaded นี้ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของท่อความร้อนได้ดีกว่าท่อความร้อนรูปแบบปกติ

ซึ่งจากงานวิจัยที่ได้ทำการศึกษาทำให้คณะผู้จัดทำมีความสนใจที่จะศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อน จึงได้ทำการทดลองเปลี่ยนสารทำงานเป็นเอทานอลที่มีความบริสุทธิ์ 99.99% โดยท่อความร้อนที่นำมาใช้ในการทดสอบเป็นท่อความร้อนที่ได้มีการออกแบบและสร้างขึ้นมาไว้เป็นที่เรียบร้อยแล้วจากงานวิจัย ชีรภัทร์ กิตตินิรันดร์กุล และศุขารัตน์ แดงจั่น [11] โดยมีการสรุปขั้นตอนและผลการออกแบบดังนี้

ตารางที่ 2-4 ตารางสรุปผลการออกแบบท่อความร้อน [11]

ชนิดของของไหลทำงาน	น้ำ
วัสดุที่ใช้ทำท่อความร้อน	ทองแดง
วัสดุที่ใช้ทำโครงสร้างวัสดุพูน	สแตนเลส
เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อ ( $d_o$ )	$1.91 \times 10^{-2}$ เมตร
เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อ ( $d_i$ )	$1.63 \times 10^{-2}$ เมตร
ผ่านศูนย์กลางของทางเดินเฟสไอ ( $d_v$ )	$1.50 \times 10^{-2}$ เมตร
จำนวนชั้นโครงสร้างวัสดุพูน	3
จำนวนช่องของรูพูนต่อหน่วยความยาว (mesh)	70
เส้นผ่านศูนย์กลางของลวดตะแกรง ( $d$ )	$1.04 \times 10^{-4}$ เมตร
อัตราส่วนของปริมาตรของรูพูนต่อปริมาตรของวัสดุทั้งหมด ( $\epsilon$ )	0.7638
ความยาวรวมท่อความร้อน ( $L_t$ )	0.3 เมตร
ความยาวท่อส่วนควบแน่น ( $L_c$ )	0.135 เมตร
ความยาวท่อส่วนที่ไม่มีมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ( $L_a$ )	0.03 เมตร
ความยาวท่อส่วนระเหย ( $L_e$ )	0.135 เมตร
มุมของท่อความร้อนที่วัดจากแนวระดับ ( $\psi$ )	0 องศา
ช่วงอุณหภูมิที่ใช้งาน	80 °C
ปริมาตรของไหลทำงาน	10 มิลลิลิตร
ความดันไอของของไหลทำงาน	5 นิ้วปรอท
อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกต่อภายใน ( $D_o/D_i$ )	1.1753

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตให้หน้าไป 1.1753 โยชน์ดำเนินการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการคำนวณค่าอัตราการถ่ายโอนความร้อนทั้ง 4 ชนิดจำกัด ในที่อุณหภูมิ 80°C แสดงได้ดังตารางที่ 2-5

ตารางที่ 2-5 ผลการคำนวณค่าอัตราการถ่ายโอนความร้อนทั้ง 4 ชนิดจำกัดที่อุณหภูมิ 80°C [11]

ประเภทของชนิดจำกัดการถ่ายโอนความร้อน	อัตราการถ่ายโอนความร้อน (วัตต์)
ชนิดจำกัดการถ่ายโอนความร้อนเนื่องจากความดันแคปปิลารี (QC,max)	456.69
ชนิดจำกัดการถ่ายโอนความร้อนเนื่องจากความความเร็วเสียง (QS,max)	9,401.01
ชนิดจำกัดการถ่ายโอนความร้อนเนื่องจากของเหลวหลุดลอยตามไอ (QE,max)	2,100.83
ชนิดจำกัดการถ่ายโอนความร้อนเนื่องจากการเดือด(QB,max)	7,274.26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

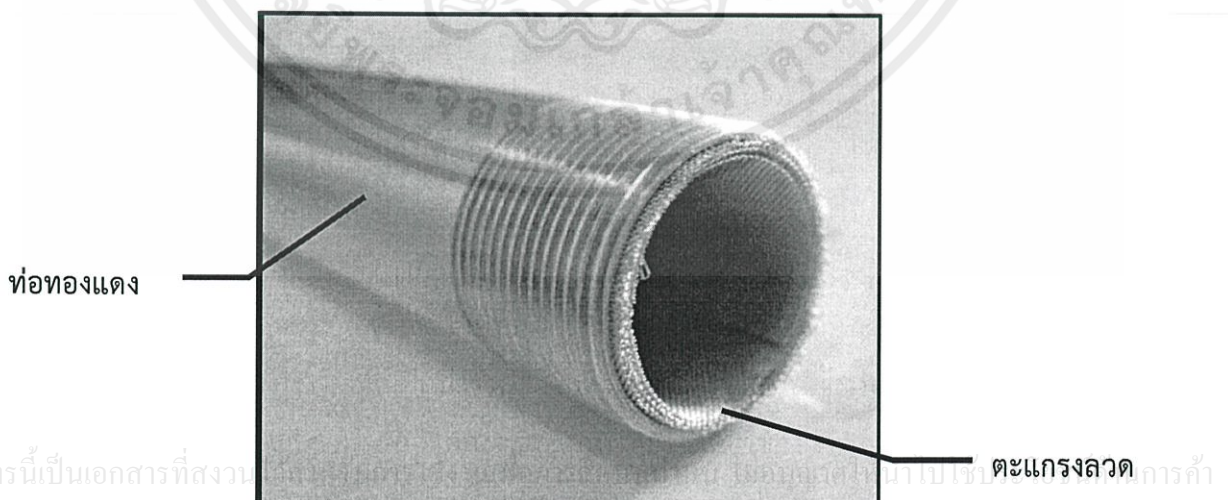
ท่อความร้อนที่ใช้นั้นจะใช้เป็นท่อทองแดง โดยจะมีตะแกรงลวดละเอียดสแตนเลสขนาด 70 mesh เป็นโครงสร้างวัสดุพรุน และมีน้ำเป็นสารทำงาน ซึ่งในการทดลองนั้นจะแบ่งวิธีการทดลองออกเป็น 2 ส่วนคือ

1. การเตรียมท่อความร้อน
2. การทดสอบประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน

#### 3.1 การเตรียมท่อความร้อน

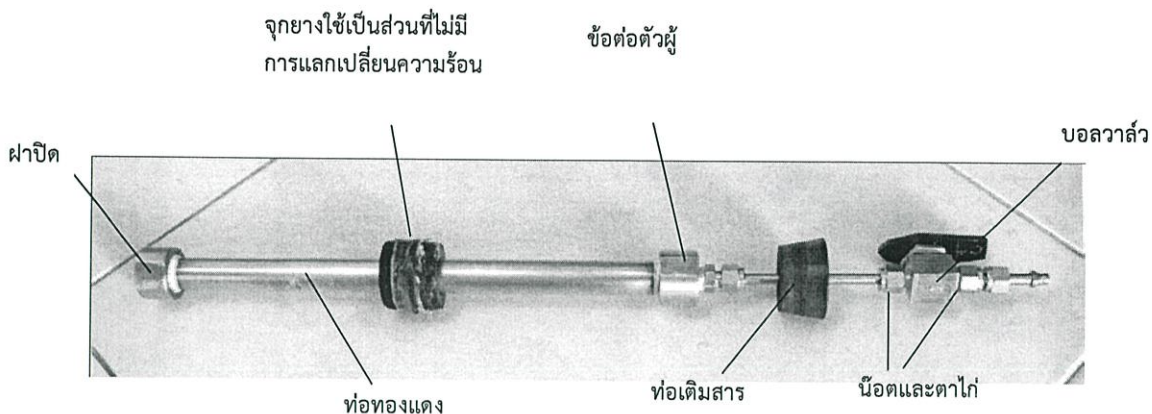
##### 3.1.1 การประกอบท่อความร้อนเพื่อใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน

ท่อความร้อนนั้นประกอบไปด้วยท่อทองแดงกลวง ซึ่งใช้เป็นตัวท่อความร้อน ภายในประกอบด้วยตะแกรงลวดละเอียดสแตนเลส ม้วนเป็นวงแนบติดกับผนังด้านในของท่อ ดังรูปที่ 3-1 โดยก่อนจะทำการประกอบ ต้องทำความสะอาดชิ้นส่วนอุปกรณ์ต่างๆ ให้สะอาดเสียก่อน ในการทดลองนี้คิดท่อเดิมสารและบอလာลวไว้ที่ปลายด้านหนึ่งของท่อความร้อนดังรูปที่ 3-2 เพื่อความสะดวกในการเติมสารทำงาน แต่เมื่อนำไปใช้งานจริงตัวท่อความร้อนจะต้องเชื่อมปิดสนิท และหลังจากการประกอบท่อความร้อนจะต้องตรวจสอบรอยรั่วโดยใช้แรงดันอากาศอัดเข้าไปในท่อทองแดงที่อยู่ในน้ำ เพื่อตรวจสอบว่าไม่มีรอยรั่ว โดยมีขั้นตอนการประกอบท่อความร้อนดังนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่ายหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต หากมีข้อสงสัยหรือต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่อผู้จัดทำเอกสาร

รูปที่ 3-1 ตะแกรงลวดละเอียด 3 ชั้นที่พันอยู่ในท่อทองแดง



รูปที่ 3-2 ท่อทองแดงที่ประกอบต่อกับท่อเติมสารและวาล์ว

1. ทำความสะอาดท่อทองแดง เพลาทองแดง และตะแกรงลวดละเอียดให้สะอาด
2. นำตะแกรงลวดที่ใช้เป็น โครงสร้างวัสดุพูน สอดเข้าไปในท่อทองแดง โดยให้ตะแกรง ลวดแนบสนิทกับผนังท่อด้านใน
3. ปิดฝาครอบทั้งสองด้าน โดยใช้เทปพันเกลียวพันรอบเกลียวให้แน่นขึ้น จากนั้นต่อท่อเติม สารทำงานและบอลวาล์ว
4. ตรวจสอบรอยรั่วที่ข้อต่อทุกจุด โดยการอัดอากาศเข้าไปในท่อทองแดงที่จุ่มอยู่ในน้ำ เพื่อ ตรวจสอบให้แน่ใจว่าไม่มีรอยรั่วที่จุดใดๆ

### 3.1.2 การติดตั้งฮีตเตอร์

จากการศึกษางานวิจัย ทำให้มีความสนใจในการติดตั้งฮีตเตอร์ เนื่องจากฮีตเตอร์สามารถให้ ความร้อนได้อย่างทั่วถึงทั่วทั้งท่อและยังสามารถนำไปสู่การวิเคราะห์กำลังไฟฟ้าที่ให้กับท่อความ ร้อนอย่างแท้จริงได้ ซึ่งการติดตั้งฮีตเตอร์มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

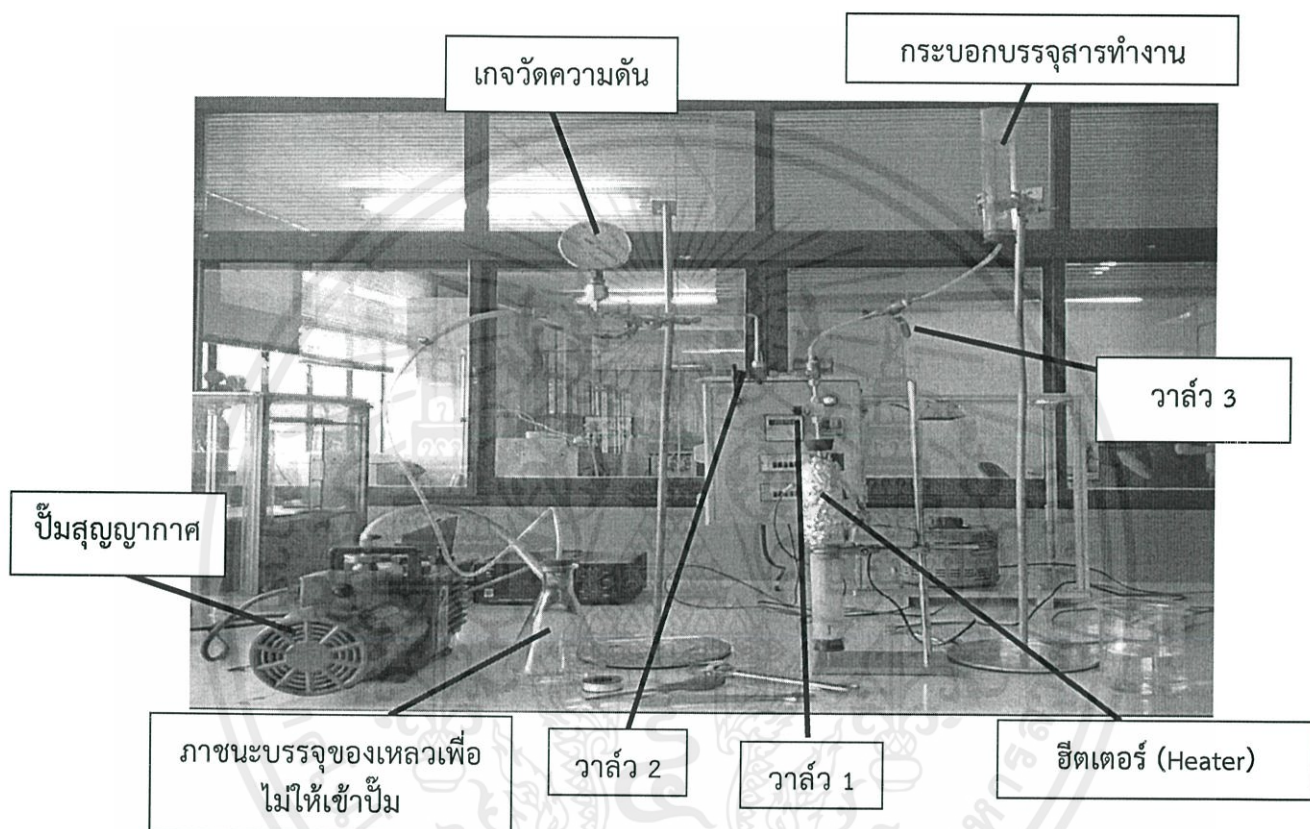
1. นำท่อความร้อนที่ประกอบเรียบร้อยแล้วจากหัวข้อ 3.1.1 มาติดตั้งฮีตเตอร์โมดูลเปิดให้แนบ ติดตัวท่อเพื่อที่จะใช้คุณสมบัติที่พื้นผิวของท่อ จากนั้นพันฮีตเตอร์ทางด้านส่วนระเหยหรือทางด้าน ที่ติดกับท่อเติมสารให้ทับกับเทอร์โมคัปเปิล โดยจะพันให้แนบชิดติดกันไม่ให้เหลือช่องว่าง ซ้อน กันจำนวน 2 ชั้น
2. ปลอกปลายสายฮีตเตอร์ทั้งสองด้านแล้วนำไปพันติดกับทองแดงจากปลั๊กตัวผู้เพื่อใช้ เสียบต่อเข้ากับหม้อแปลงปรับแรงดันไฟฟ้าสำหรับการปรับเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าเพื่อควบคุม กำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับท่อความร้อนอย่างเหมาะสม

3. หุ้มฉนวนในส่วนที่ติดฮีตเตอร์เพื่อช่วยลดการสูญเสียความร้อน และเพื่อความสะดวก ในการปฏิบัติงาน โดยฉนวนที่ใช้จะเป็นใยแก้วพร้อมทั้งพันเทปฟอยล์ปิดทับด้านนอกอีกที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อวัตถุประสงค์ทางการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.3 การเติมสารทำงาน

ชุดเติมสารทำงาน ประกอบไปด้วยส่วนประกอบหลัก 2 ส่วนคือ ส่วนทำสุญญากาศ และส่วนเติมสารทำงาน โดยสารทำงานที่ใช้ในการทดลองนี้คือ น้ำ จำนวน 10 ml ซึ่งในส่วนทำสุญญากาศ จะทำหน้าที่ดึงเอาอากาศและแก๊สที่ไม่ควมแน่นออกจากท่อความร้อน และส่วนเติมสารทำงานจะทำหน้าที่เติมน้ำเข้าสู่ท่อความร้อนดังรูปที่ 3-3 ซึ่งมีขั้นตอนดังต่อไปนี้



รูปที่ 3-3 ชุดอุปกรณ์เติมสารทำงาน

1. ไล่ท่ออะคริลิกที่ส่วนควมแน่นของท่อความร้อน จากนั้นอัดจุกยางปิดท่ออะคริลิกให้แน่น และต่อชุดท่อความร้อนเข้ากับชุดเติมสารทำงานดังรูปที่ 3-3
2. เปิดเครื่อง Circulating Bath เพื่อให้ความร้อนกับท่อความร้อน
3. ปิดวาล์ว 3 เพื่อเติมสารทำงานในกระบอกบรรจุสารทำงาน จากนั้นเปิดวาล์ว 1 และ 2 แล้วจึงเปิดปั๊มสุญญากาศเพื่อดึงอากาศออกจากท่อความร้อนจนกว่าความดันรวมของระบบจะคงที่ (ระบบเป็นสุญญากาศ)

4. ปิดวาล์ว 1, 2 และเครื่องปั๊มสุญญากาศตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. เปิดวาล์ว 3 ให้สารทำงานไหลลงมาที่วาล์ว 1 แล้วเติมสารทำงานในกระบอกบรรจุสารทำงานใหม่เพื่อให้ได้ปริมาตรตามที่ต้องการ จากนั้นค่อยๆเปิดวาล์ว 1 เพื่อเติมสารทำงานลงไปในท่อความร้อนเพียงเล็กน้อย (5-10 ml) เพื่อช่วยขับแก๊สที่ไม่ควบแน่นออกมา

6. ปิดวาล์ว 3 และ 1 เปิดวาล์ว 2 จากนั้นเปิดปั๊มสุญญากาศเพื่อดึงเอาสารทำงานที่อยู่ตามชุดเติมสารหรือข้อต่อต่างๆออก

7. ให้ความร้อนเรื่อยๆ เพื่อให้สารทำงานที่อยู่ในท่อระเหยเป็นไอ เปิดปั๊มสุญญากาศและเปิดวาล์ว 1 ทุก 5 นาที เพื่อช่วยดึงไอน้ำออกจากท่อความร้อนออกให้หมด จากนั้นปิดวาล์ว 1 และปั๊มสุญญากาศตามลำดับ ทำซ้ำจนความดันของระบบคงที่

8. เปิดวาล์ว 1 และปั๊มสุญญากาศเพื่อดึงเอาไอน้ำออกจากท่อความร้อน ปิดวาล์ว 1 และปั๊มสุญญากาศ ตามลำดับ ทำข้อ 4-7 ซ้ำอีก 1 ครั้ง

9. ถอดชุดท่อความร้อนออกจากข้อต่อสามทาง นำไปชั่งน้ำหนัก บันทึกผลเป็นน้ำหนักท่อความร้อนแห้ง

10. นำท่อความร้อนไปต่อเข้ากับชุดเติมสาร เปิดวาล์ว 3 เพื่อให้สารทำงานอยู่ในช่องว่างระหว่างวาล์วทั้งสาม จากนั้นเติมสารทำงานในกระบอกบรรจุสารทำงานใหม่ให้ได้ปริมาตรตามที่ต้องการแล้วค่อยๆเปิดวาล์ว 1 เพื่อเติมสารทำงาน ลงไปในท่อความร้อน 10 ml แล้วจึงปิดวาล์ว 1

11. ถอดท่อความร้อนออกจากข้อต่อสามทาง นำไปชั่งน้ำหนักอีกครั้งบันทึกผลเป็นน้ำหนักท่อความร้อนที่มีสารทำงานอยู่ภายใน นำค่าน้ำหนักที่อ่านได้ไปหักลบกับน้ำหนักท่อความร้อนแห้ง เพื่อตรวจสอบว่าปริมาณสารทำงานที่เติมลงในท่อความร้อนมีค่าเท่ากับ 10 ml

หมายเหตุ : สารทำงานที่ใช้คือ น้ำ และเอทานอล 99.99%

### 3.2 การทดสอบประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน

ชุดทดสอบประสิทธิภาพ จะใช้ฮีตเตอร์ให้ความร้อนกับส่วนระเหยที่อุณหภูมิ 60 °C, 80 °C, 85 °C, 90 °C และ 95 °C และใช้น้ำเย็นระบายความร้อนในส่วนควบแน่น ซึ่งขั้นตอนการทดสอบประสิทธิภาพของการถ่ายเทความร้อนจะแบ่งเป็น 2 ส่วนดังนี้

#### 3.2.1. การวิเคราะห์หาค่าลึงไฟฟ้า

เป็นการหาค่าลึงไฟฟ้าที่ให้กับท่อความร้อนที่แท้จริง เพื่อให้มั่นใจได้ว่าฮีตเตอร์สามารถให้ความร้อนกับท่อความร้อนได้อย่างสม่ำเสมอและคงที่โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. นำปลั๊กตัวผู้จากฮีตเตอร์ที่พันติดอยู่กับท่อความร้อนมาเสียบเข้ากับหม้อแปลงปรับแรงดันไฟฟ้าที่ถูกต้องโดยตรงกับ Temperature Controller
2. เปิดเครื่อง Temperature Controller แล้วเซตอุณหภูมิให้มากกว่าอุณหภูมิที่ต้องการ เช่น ต้องการทำให้  $60^{\circ}\text{C}$  ก็ต้องเซตอุณหภูมิให้มีค่ามากกว่า  $60^{\circ}\text{C}$
3. ปรับเปลี่ยนหม้อแปลงปรับแรงดันไฟฟ้า จนกว่าอุณหภูมิที่อ่านได้จะมีค่าเท่ากับที่ต้องการ เช่น ทดสอบที่  $60^{\circ}\text{C}$  ก็ปรับหม้อแปลงปรับแรงดันไฟฟ้าจนอุณหภูมินิ่งที่  $60^{\circ}\text{C}$  และไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ
4. เมื่ออุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญแล้ว ให้นำเครื่องวัดกระแสไฟฟ้ามาวัดค่าแล้วบันทึกค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า ณ ตอนนั้น เพื่อนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าจากสูตร

$$P = IV \quad (3-1)$$

เมื่อ

$P$  = กำลังไฟฟ้า (วัตต์)

$I$  = กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)

$V$  = แรงดันไฟฟ้าตกคร่อม (โวลต์)

เมื่อได้กำลังไฟฟ้าแล้วจะสามารถนำไปหาประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนได้จากสัดส่วนระหว่างการถ่ายเทความร้อนที่ส่วนควบแน่น (วัตต์) ต่อ กำลังไฟฟ้าที่ให้แก่ส่วนระเหย (วัตต์)

### 3.2.2 การทดสอบประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน

การทดสอบประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนจะทำการทดสอบโดยใช้สารทำงาน 2 ชนิด คือ น้ำและเอทานอลเพื่อนำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบกัน โดยจะมีปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนต่างๆ เช่น แนวองศาการวางท่อ อุณหภูมิที่ให้กับส่วนระเหย เป็นต้น ซึ่งมีขั้นตอนการทดลองดังต่อไปนี้

1. ประกอบชุดอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน โดยวางในแนวนอน 0 องศา
2. ต่อเครื่อง Circulating Bath เพื่อป้อนน้ำเย็นเข้าไประบายความร้อนในส่วนควบแน่น ส่วนอีกฝั่งหนึ่งที่เป็นส่วนระเหยจะให้ความร้อนโดยใช้ฮีตเตอร์
3. เปิดเครื่อง Circulating Bath เพื่อให้ น้ำไหลหมุนเวียนในระบบ โดยทำการเซตอุณหภูมิของน้ำเย็นที่ไหลเข้าทางส่วนควบแน่นให้เหมาะสมเพื่อใช้เป็นอุณหภูมิเริ่มต้น จากนั้นปรับระดับน้ำให้เต็มท่ออะคริลิก และหุ้มฉนวน พร้อมทั้งวัดอัตราการไหลเชิงปริมาตรและปรับแก้ให้มีค่าที่เหมาะสม

4. ปรับอุณหภูมิที่ Temperature Controller ให้เครื่องทำงานแบบ on-off เมื่ออุณหภูมิที่ผิวท่อความร้อนมีค่าตามที่ต้องการทำการทดลอง ในกรณีนี้จะทำการทดลองที่ 60°C จากนั้นเริ่มจับเวลาและบันทึกผลอุณหภูมิทุก 2 นาที จนกระทั่งท่อความร้อนเข้าสู่สภาวะคงตัว คืออุณหภูมิไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ

5. ทำซ้ำตั้งแต่ข้อ 1 – 4 แต่เปลี่ยนแนวองศาการวางท่อความร้อนเป็น 90°, 45°, 0°, -45° และ -90° โดยถ้าส่วนระเหยหรือส่วนที่ได้รับความร้อนอยู่ต่ำกว่าส่วนควบแน่นมุมมองที่วัดได้จากแนวระดับจะบอกเป็นค่าลบ

6. ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1-5 แต่เปลี่ยนอุณหภูมิของฮีตเตอร์เป็น 80 °C, 85 °C, 90 °C และ 95 °C

7. ทำการทดลองเช่นเดียวกันอีกครั้ง แต่เป็นการทดลองในกรณีที่ต้องการให้ค่ากำลังไฟฟ้าคงที่ (วัตต์ คงที่) โดยการทดลองปรับค่าแรงดันไฟฟ้าจากเครื่องปรับแรงดันไฟฟ้าเพื่อให้ได้ค่าอุณหภูมิที่ผิวท่อตามต้องการ โดยไม่ให้ Temperature controller ทำงานแบบ on-off จากนั้นทำการทดลองในลักษณะเดียวกันที่อุณหภูมิผิวท่อความร้อนต่างๆ

หมายเหตุ : ในการทดลอง อุณหภูมิของน้ำร้อนจะต้องค่อยๆเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิต่ำ ไปยังอุณหภูมิที่ตั้งไว้ เพื่อป้องกันไม่ให้ความเร็วไอในท่อความร้อนสูงเกินไป จนไม่สามารถปฏิบัติงานได้

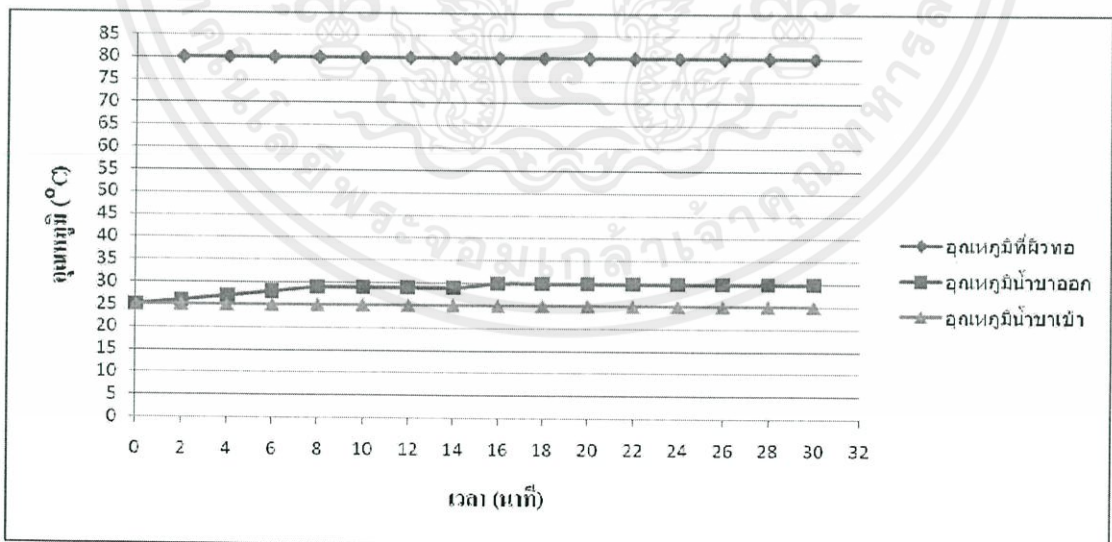
## บทที่ 4

### ผลการทดสอบประสิทธิภาพและวิเคราะห์ผล

ในการทดสอบประสิทธิภาพต่อความร้อน ได้ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อน ซึ่งสามารถแบ่งเป็น 4 ตอน ได้ดังนี้

1. ผลขององศาการวางท่อความร้อนที่มีต่ออัตราการถ่ายโอนความร้อนโดยใช้สารทำงานภายในท่อความร้อนเป็นน้ำ
2. ผลขององศาการวางท่อความร้อนที่มีต่ออัตราการถ่ายโอนความร้อนโดยใช้สารทำงานภายในท่อความร้อนเป็นเอทานอล
3. ผลจากการใช้งานท่อความร้อนที่อุณหภูมิ 60 °C, 80 °C, 85 °C, 90 °C และ 95 °C
4. ผลจากการใช้งานท่อความร้อนจากการเปลี่ยนแปลงสารทำงานจากน้ำเป็นเอทานอล

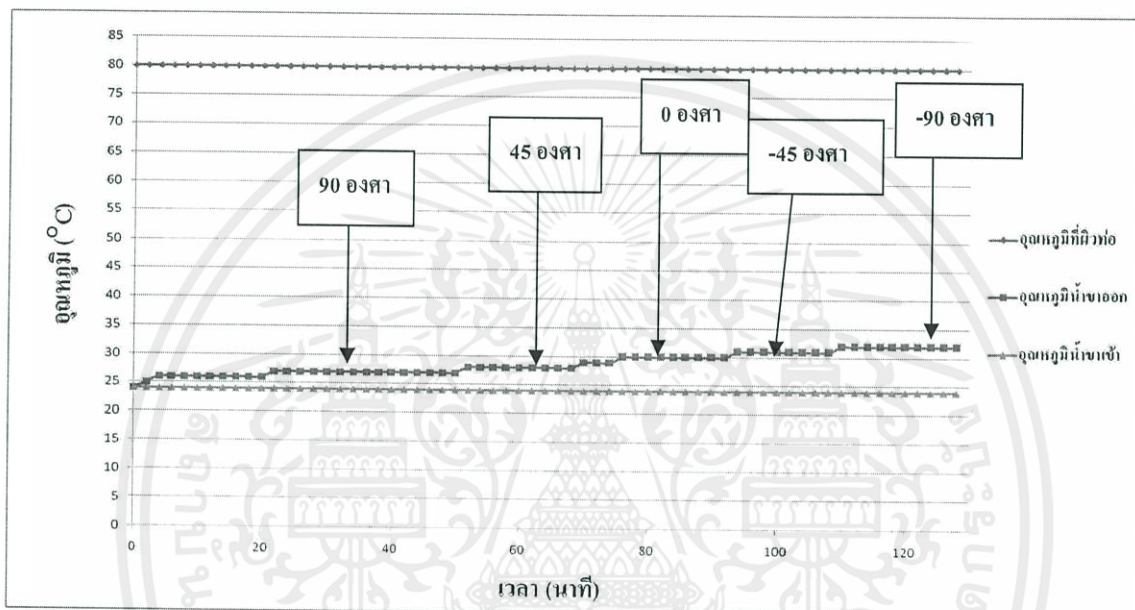
ซึ่งในการทดลองได้มีการบันทึกผลการใช้งานของท่อความร้อนแบบจับเวลาใหม่เมื่อมีการเปลี่ยนแนวองศาการวางท่อ (ไม่ต่อเนื่อง) โดยมีการบันทึกผลระหว่างอุณหภูมิขาเข้า-ขาออกของน้ำเย็นเทียบกับเวลาที่ใช้ในการทดลองในแต่ละอุณหภูมิที่ผิวและแนวองศาการวางของท่อความร้อน ดังรูป 4-1 เพื่อนำผลที่ได้ไปคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อน และทำการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนในหัวข้อต่อไป



รูปที่ 4-1 ค่าอุณหภูมิของน้ำขาเข้า-ขาออกเทียบกับเวลาของการทดลองท่อความร้อนแบบจับเวลาใหม่เมื่อมีการเปลี่ยนแนวองศาการวางท่อ (ไม่ต่อเนื่อง) โดยใช้สารทำงานเป็นน้ำ ที่แนวองศาการวางเท่ากับ 45 องศา อุณหภูมิที่ผิวท่อความร้อนเท่ากับ 80 องศาเซลเซียส

สำหรับผลการทดลองการใช้งานท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่อง ที่สภาวะอื่นๆสามารถดูได้จากภาคผนวก ข

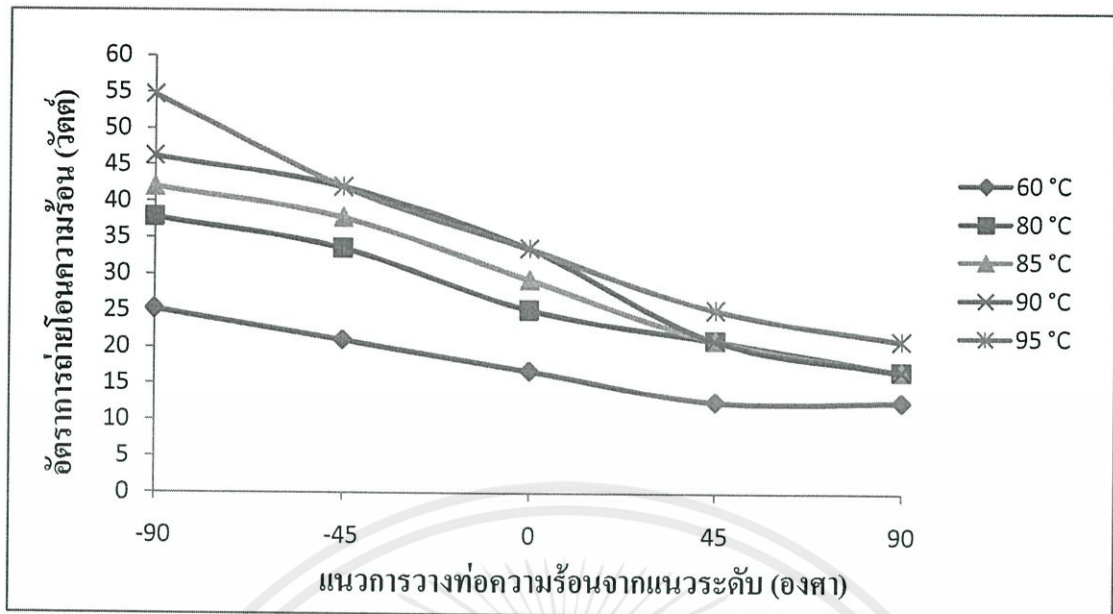
นอกจากนี้ยังได้มีการบันทึกผลการทดลองเมื่อมีการทดลองใช้ท่อความร้อนแบบจับเวลาต่อเนื่องเมื่อมีการเปลี่ยนแนวองศาการวางท่อ (ต่อเนื่อง) ทุกแนวองศาการวางของท่อความร้อน โดยมีการบันทึกค่าอุณหภูมิของน้ำขาเข้า-ขาออกเทียบกับเวลาที่ใช้ในการทดลองในแต่ละอุณหภูมิที่ผิวท่อความร้อน เช่นเดียวกับการทดลองใช้ท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่อง ดังรูปที่ 4-2 สำหรับผลการทดลองการใช้งานท่อความร้อนแบบต่อเนื่อง ที่สภาวะอื่นๆสามารถดูได้จากภาคผนวก ข



รูปที่ 4-2 ค่าอุณหภูมิของน้ำขาเข้า-ขาออกเทียบกับเวลาของการทดลองท่อความร้อนแบบจับเวลาต่อเนื่องเมื่อมีการเปลี่ยนแนวองศาการวางท่อ (ต่อเนื่อง) โดยใช้สารทำงานเป็นน้ำ ที่อุณหภูมิผิวท่อความร้อนเท่ากับ 80 องศาเซลเซียส

#### 4.1 ผลขององศาการวางท่อความร้อนที่มีต่ออัตราการถ่ายโอนความร้อนโดยใช้สารทำงานภายในท่อความร้อนเป็นน้ำ

ในการทดลองนี้เป็นการศึกษาผลขององศาการวางท่อความร้อนที่ส่งผลต่ออัตราการถ่ายโอนความร้อน เมื่อใช้งานท่อความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆกันดังนี้ 60 °C, 80 °C, 85 °C, 90 °C และ 95 °C ซึ่งองศาการวางท่อที่ได้ทำการศึกษาได้แก่ -90°, -45°, 0°, 45° และ 90° จากแนวระดับ โดยองศาการวางที่มีค่าเป็นลบหมายถึงส่วนระเหยที่ได้รับความร้อนอยู่ด้านล่าง ส่วนค่าบวก หมายถึง ส่วนระเหยที่ได้รับความร้อนจะอยู่ทางด้านบน ซึ่งจะแสดงผลดังรูปที่ 4-3 อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-3 ค่าอัตราการถ่ายโอนความร้อนของท่อความร้อนที่แนวองศาการวางต่างๆ ที่อุณหภูมิที่ผิวท่อความร้อนเท่ากับ 60 °C, 80 °C, 85 °C, 90 °C และ 95 °C

จากรูปที่ 4-3 จะเห็นได้ว่าทุกค่าของอุณหภูมิที่ผิวท่อความร้อนจะให้ผลไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ เมื่อมีการเพิ่มมุมองศาให้ส่วนระเหยอยู่สูงขึ้นไปจากแนวองศาเดิมจะทำให้อัตราการถ่ายโอนความร้อนลดลง โดยเราจะทำการแบ่งการวิเคราะห์ห้อออกเป็นสองส่วนคือในส่วนที่แนวองศาการวางท่อมีการทำงานแบบเทอร์โมไซฟอน และในส่วนที่แนวองศาการวางท่อมีการทำงานแบบท่อความร้อน

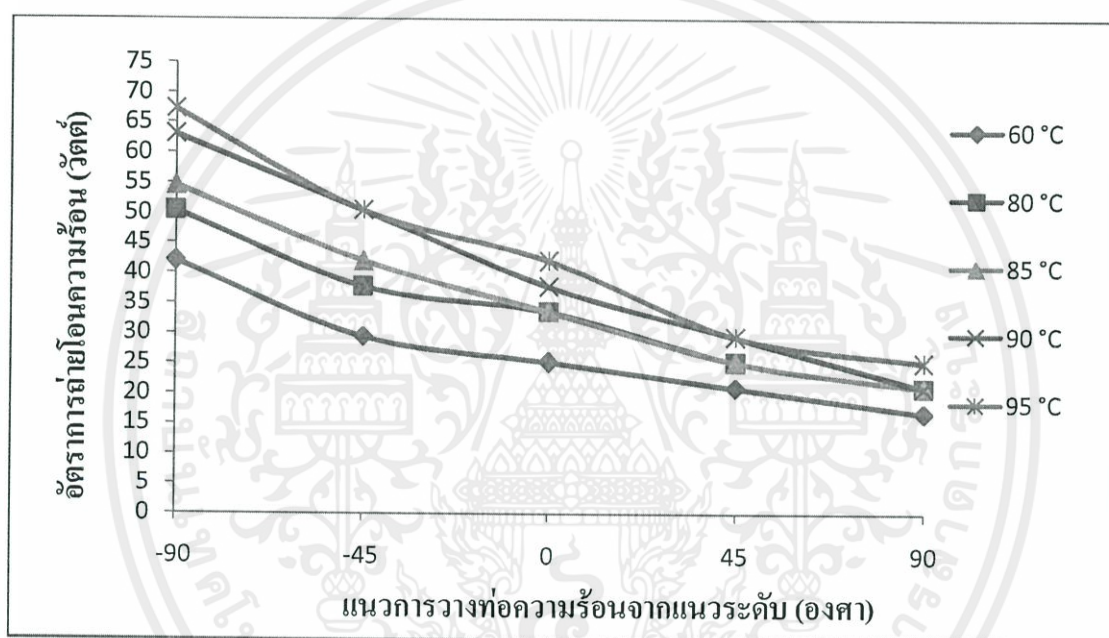
ในส่วนที่มีแนวองศาการวางท่อตั้งแต่ -90 ถึง 0 จะพบว่าท่อความร้อนมีการทำงานแบบเทอร์โมไซฟอน ซึ่งจากการทดลองพบว่าเมื่อมีการปรับแนวองศาการวางท่อให้เข้าใกล้แนวระดับเพิ่มมากขึ้นจะทำให้อัตราการถ่ายโอนความร้อนของท่อความร้อนลดลง ทั้งนี้เนื่องจากหลักการการทำงานของเทอร์โมไซฟอนจะใช้แรงโน้มถ่วงของโลกเพื่อให้สารทำงานที่ควบแน่นในส่วนควบแน่นเคลื่อนที่ตกกลับลงมายังส่วนระเหยได้และหมุนเวียนเช่นนี้เป็นวัฏจักร ดังนั้นเมื่อมีการปรับแนวองศาการวางท่อที่เข้าใกล้แนวระดับเพิ่มมากขึ้นจึงทำให้สารทำงานในส่วนควบแน่นเคลื่อนที่กลับมายังส่วนระเหยได้ยากขึ้น จึงเป็นผลทำให้อัตราการถ่ายโอนความร้อนลดลง

ในส่วนที่มีแนวองศาการวางท่อตั้งแต่ 0 ถึง 90 เนื่องจากเมื่อมุมองศาเพิ่มมากขึ้น ส่วนระเหยจะอยู่สูงกว่าแนวเดิม ทำให้ท่อความร้อนต้องใช้แรงดันแคปิลารีที่เกิดจากโครงสร้างวัสดุพูนเพิ่มมากขึ้น เพื่อหมุนเวียนสารที่ควบแน่นบริเวณส่วนควบแน่นให้สามารถเคลื่อนที่กลับไปยังส่วนระเหยได้อีกครั้ง ดังนั้นการที่อัตราการถ่ายโอนความร้อนลดลงจึงเกิดจากการที่แรงดันแคปิลารีที่เกิดจาก

โครงสร้างวัสดุพูนมีไม่เพียงพอที่จะสามารถดึงเอาของเหลวให้เคลื่อนที่สวนทางกับแรงโน้มถ่วงของโลกได้ จึงส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนลดลง

#### 4.2 ผลขององศาการวางท่อความร้อนที่มีต่ออัตราการถ่ายโอนความร้อนโดยใช้สารทำงานภายในท่อความร้อนเป็นเอทานอล

ในการทดลองนี้เป็นการทดลองในลักษณะเช่นเดียวกันกับหัวข้อ 4.1 แต่ได้มีการเปลี่ยนแปลงสารทำงานซึ่งสารทำงานที่ใช้ คือ เอทานอล ผลการทดลองแสดงดังรูป 4-4



รูปที่ 4-4 ค่าอัตราการถ่ายโอนความร้อนของท่อความร้อนที่แนวองศาการวางต่างๆ ที่อุณหภูมิที่ผิวท่อความร้อนเท่ากับ 60 °C, 80 °C, 85 °C, 90 °C และ 95 °C

ในการทดลองนี้ให้ผลการทดลองที่สอดคล้องและมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับผลการทดลองในหัวข้อที่ 4-1 แต่มีความแตกต่างกันที่เมื่อเปลี่ยนสารทำงานเป็นเอทานอลจะพบว่าอัตราการถ่ายโอนความร้อนที่อุณหภูมิที่ผิวท่อความร้อนเดียวกับที่ใช้สารทำงานเป็นน้ำ มีค่าเพิ่มมากขึ้น

ดังนั้นทำให้สามารถสรุปได้ว่า แนวองศาการวางท่อเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อน และการเปลี่ยนสารทำงานที่ทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนมีค่าเพิ่มสูงขึ้นซึ่งจะทำการอธิบายในหัวข้อ 4-4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 ผลจากการใช้งานท่อความร้อนที่อุณหภูมิผิวท่อความร้อน 60 °C, 80 °C, 85 °C, 90 °C และ 95 °C

จากผลการทดลองกราฟ รูปที่ 4-3 และ 4-4 พบว่า ในหลายตำแหน่งองศาการวางท่อเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิที่ผิวท่อความร้อน จะพบว่าอัตราการถ่ายโอนความร้อนของท่อความร้อนมีค่าเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากค่าอัตราการถ่ายโอนความร้อนจะเพิ่มขึ้นตามค่าความร้อนที่ป้อนให้แก่ท่อความร้อนซึ่งจะทำให้เกิดความร้อนสะสมแก่ท่อความร้อนในส่วนระเหยและเกิดการนำความร้อนผ่านตัวกลางซึ่งก็คือตัวท่อทองแดงส่งผ่านความร้อนไปตามแนวท่อความร้อนจนถึงส่วนควบแน่นส่งผลให้อุณหภูมิในด้านถ่ายเทความร้อนสูงขึ้น อัตราการถ่ายเทความร้อนจึงเพิ่มขึ้น

นอกจากนี้จากผลการทดลองทำให้สามารถวิเคราะห์ได้ว่าท่อความร้อนในส่วนระเหยเมื่อได้รับความร้อนในปริมาณที่มากขึ้นจะทำให้สารทำงานภายในท่อความร้อนเกิดการระเหยในปริมาณที่มากขึ้นทำให้เกิดการเคลื่อนที่และมีการควบแน่นในส่วนควบแน่นได้ในปริมาณที่มากขึ้นจึงส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนมีค่าเพิ่มมากขึ้น

#### 4.3.1 ในกรณีของการให้กำลังไฟฟ้าคงที่ (วัตต์ คงที่)

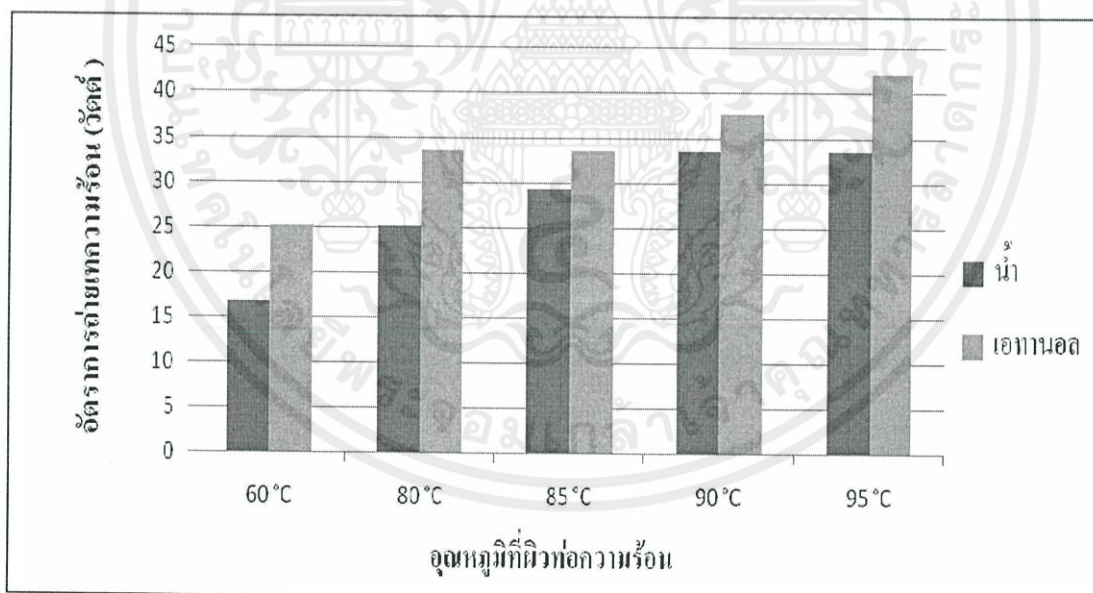
จากการทดลองเมื่อให้ค่ากำลังไฟฟ้าที่ให้แก่อิเล็กตรอนมีค่าคงที่ พบว่าผลการทดลองที่ได้ไม่แตกต่างจากการให้อุณหภูมิที่ผิวท่อมีค่าคงที่ เนื่องจากการทดลองได้มีการปรับหาค่าแรงดันไฟฟ้าที่ให้ค่าอุณหภูมิที่ผิวท่อความร้อนสูงสุดเท่าที่จะสามารถทำได้ ที่อุณหภูมิ 60 °C, 80 °C, 85 °C, 90 °C และ 95 °C ตามลำดับ ทำให้อุณหภูมิที่ผิวท่อความร้อนมีค่าคงที่เสมือนกับการทดลองโดยการให้อุณหภูมิที่ผิวมีค่าคงที่ด้วยการปรับ Temperature controller แบบ on-off โดยพบว่าหากต้องการอุณหภูมิที่ผิวท่อเป็น 60 °C จะต้องใช้แรงดันไฟฟ้าประมาณ 75 Volt, 80 °C จะต้องใช้แรงดันไฟฟ้าประมาณ 80 Volt, 85 °C จะต้องใช้แรงดันไฟฟ้าประมาณ 80 Volt, 90 °C จะต้องใช้แรงดันไฟฟ้าประมาณ 85 Volt และ 95 °C จะต้องใช้แรงดันไฟฟ้าประมาณ 90 Volt ตามลำดับ สำหรับค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้ Ac-amp ก็จะมีค่าแตกต่างกันไปตามแต่สถานะที่ได้ทำการทดลองซึ่งการทดลองโดยให้กำลังไฟฟ้ามีค่าคงที่นี้ทำให้สามารถนำค่าแรงดันไฟฟ้าและค่ากระแสไฟฟ้าไปใช้ในการคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าและนำไปสู่การคำนวณประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนได้ต่อไป

#### 4.4 ผลจากการใช้งานต่อความร้อนจากการเปลี่ยนแปลงสารทำงานจากน้ำเป็นเอทานอล

ในการทดลองนี้เป็นการเปรียบเทียบผลของการเปลี่ยนแปลงสารทำงานจากน้ำเป็นเอทานอลที่มีต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อน (วัตต์) แสดงดังตารางที่ 4-1 และมีการแสดงผลในลักษณะของกราฟแท่ง ที่เนวองศาการวางท่อ 0, 45, 90 ดังรูป 4-5 - 4-7

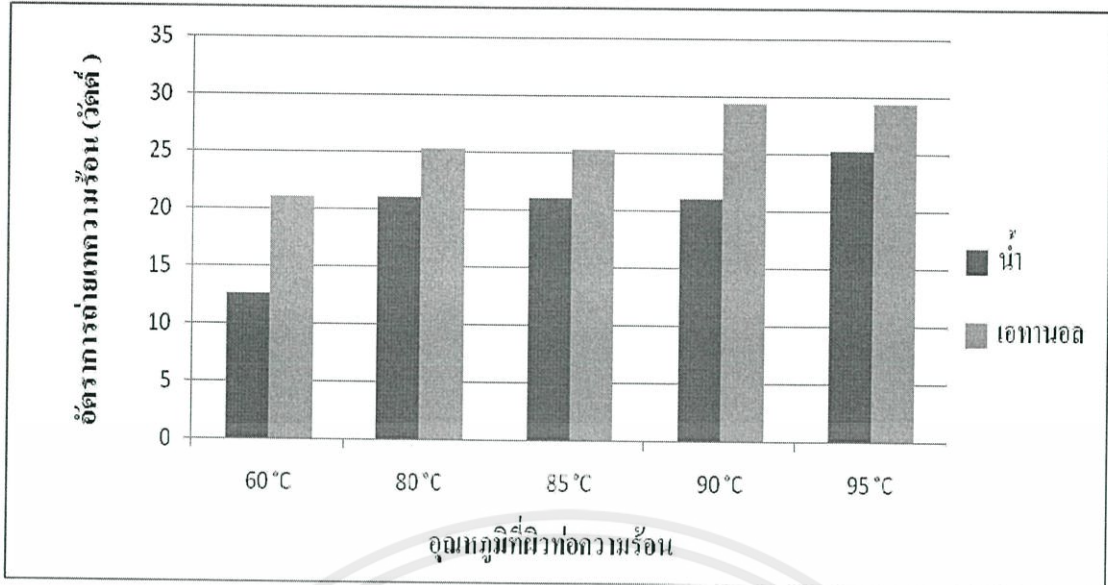
ตารางที่ 4-1 อัตราการถ่ายเทความร้อน (วัตต์) ของท่อความร้อนที่สภาวะต่างๆ

แนวองศาการวางท่อ	อุณหภูมิที่ผิวท่อความร้อน (°C)									
	60		80		85		90		95	
	น้ำ	เอทานอล	น้ำ	เอทานอล	น้ำ	เอทานอล	น้ำ	เอทานอล	น้ำ	เอทานอล
-90	25.2	42.0	37.8	50.4	42.0	54.6	46.2	63.0	54.6	67.2
-45	21.0	29.4	33.6	37.8	37.8	42.0	42.0	50.4	42.0	50.4
0	16.8	25.2	25.2	33.6	29.4	33.6	33.6	37.8	33.6	42.0
45	12.6	21.0	21.0	25.2	21.0	25.2	21.0	29.4	25.2	29.4
90	12.6	16.8	16.8	21.0	16.8	21.0	16.8	21.0	21.0	25.2

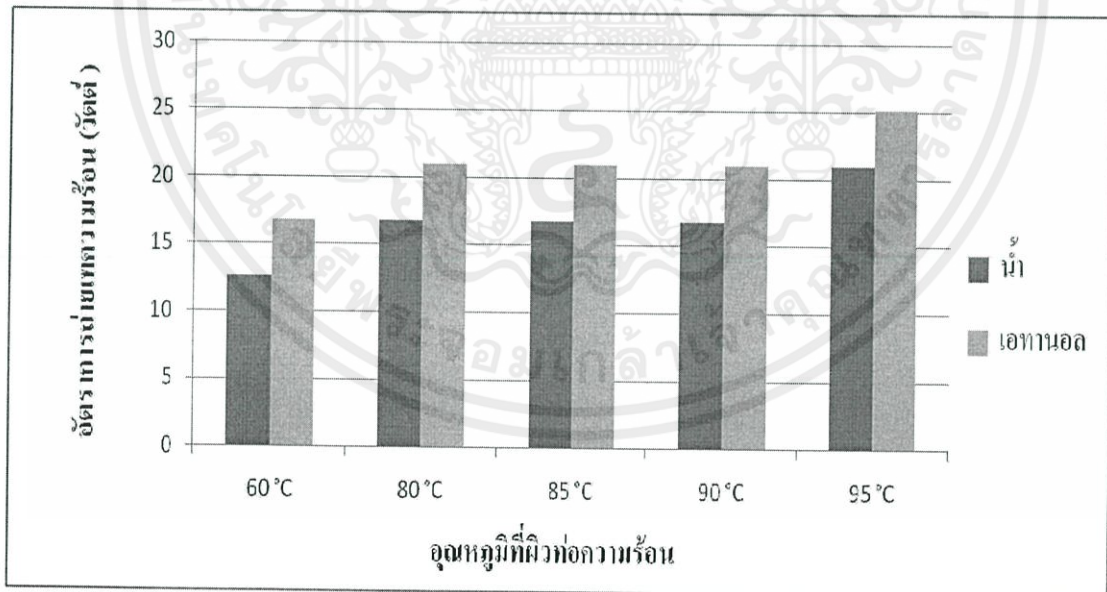


รูปที่ 4-5 ค่าอัตราการถ่ายโอนความร้อนในแต่ละอุณหภูมิที่ผิวท่อความร้อนของสารทำงานที่เป็นน้ำและเอทานอลที่แนวองศาการวางท่อเท่ากับ 0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-6 ค่าอัตราการถ่ายโอนความร้อนที่แต่ละอุณหภูมิที่ผิวท่อความร้อนของสารทำงานที่เป็นน้ำและเอทานอลที่แนวองศาการวางท่อเท่ากับ 45



รูปที่ 4-7 ค่าอัตราการถ่ายโอนความร้อนที่แต่ละอุณหภูมิที่ผิวของท่อความร้อนของสารทำงานที่เป็นน้ำและเอทานอลที่แนวองศาการวางท่อเท่ากับ 90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาด้านนี้ ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ ใช้งาน หรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

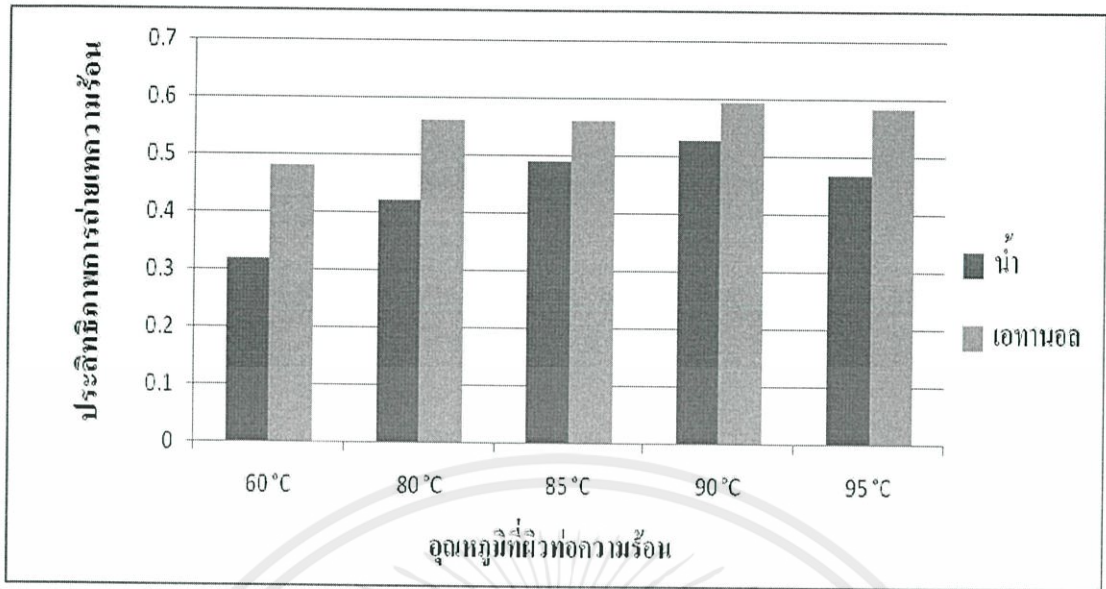
จากกราฟจะพบว่าที่ทุกๆอุณหภูมิที่ผิวท่อความร้อน ท่อความร้อนที่ใช้สารทำงานเป็นเอทานอลจะให้อัตราการถ่ายเทความร้อนที่สูงกว่าท่อความร้อนที่ใช้สารทำงานเป็นน้ำ เนื่องจากหลักการทำงานที่สำคัญของท่อความร้อนคือ ความต้องการให้สารทำงานมีการเดือดและเปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอแล้วเคลื่อนที่จากส่วนระเหยไปยังส่วนควบแน่น ดังนั้นสิ่งที่เป็ปัจจัยสำคัญที่สุดในการเปลี่ยนสถานะของสารจากของเหลวไปเป็นแก๊สก็คือจุดเดือด ค่าความดันไอ และค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ

จากที่ได้ทำการศึกษาหาข้อมูลของ สมบัติทางกายภาพของสาร ได้แก่ น้ำ และเอทานอล เพื่อนำมาทำการวิเคราะห์ผลการทดลอง พบว่าจุดเดือดและค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของน้ำมีค่าสูงกว่าเอทานอล แต่มีค่าความดันไอที่ต่ำกว่าเอทานอลมาก ดังนั้นเมื่อใช้น้ำเป็นสารทำงานจึงจำเป็นจะต้องใช้พลังงานความร้อนเพื่อใช้ในการเปลี่ยนสถานะของสารทั้ง เหน้มาทกกว่าการใช้สารทำงานเป็นเอทานอล โดยจะส่งผลทำให้ปริมาณของเฟสไอที่เกิดขึ้นมีปริมาณที่น้อยกว่า ถึงแม้ว่าน้ำจะมีค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอที่มากกว่าเอทานอลก็ตาม ที่ส่วนควบแน่นจะมีการควบแน่นของเฟสไอที่เกิดจากการระเหยของเอทานอลในปริมาณที่มากกว่าน้ำจึงมีผลทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนที่ใช้เอทานอลเป็นสารทำงานมีค่าสูงกว่าการใช้น้ำเป็นสารทำงาน

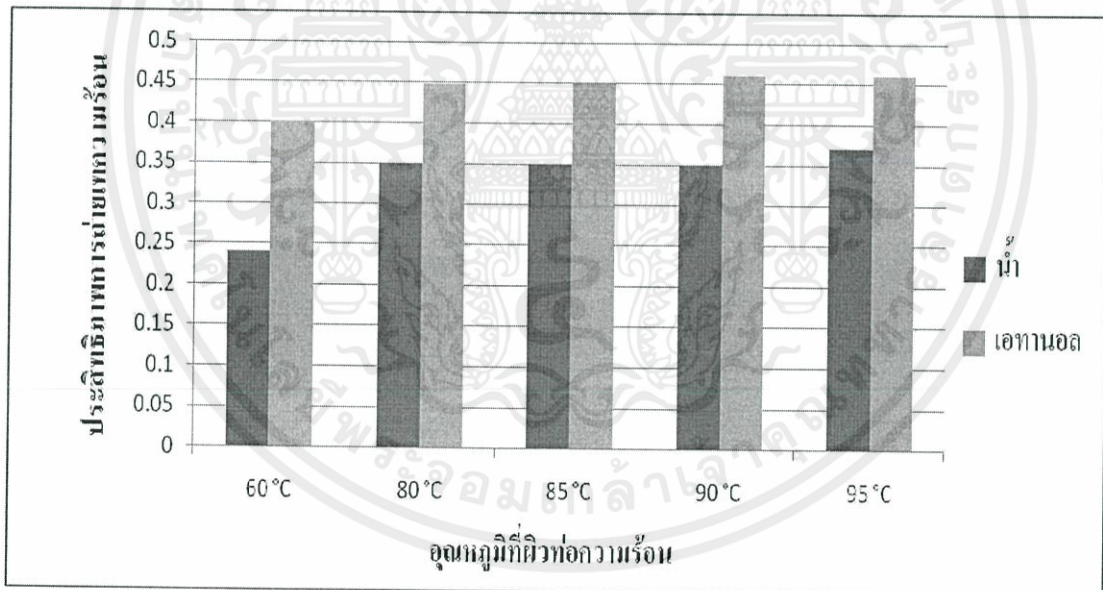
นอกจากนี้ยังได้มีการนำผลการทดลองนี้มาเสนอในรูปแบบของประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนโดยประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนเกิดจากจากสัดส่วนระหว่างการถ่ายโอนความร้อนที่ส่วนควบแน่น(วัตต์) ต่อ กำลังไฟฟ้าที่ให้แก่ส่วนระเหย (วัตต์) ดังตารางที่ 4-2 และมีการแสดงผลในลักษณะของกราฟแท่ง ที่แนบเอกสารวางทอ 0, 45, 90 ดังรูปที่ 4-8 – 4-10

ตารางที่ 4-2 ประสิทธิภาพถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนที่สภาวะต่างๆ

	อุณหภูมิที่ทำการทดสอบประสิทธิภาพของท่อความร้อน (°C)									
	60		80		85		90		95	
แนวองศาการวางทอ	น้ำ	เอทานอล	น้ำ	เอทานอล	น้ำ	เอทานอล	น้ำ	เอทานอล	น้ำ	เอทานอล
-90	0.480	0.800	0.630	0.840	0.658	0.856	0.684	0.933	0.758	0.933
-45	0.400	0.560	0.560	0.630	0.593	0.658	0.622	0.746	0.583	0.700
0	0.320	0.480	0.420	0.560	0.490	0.560	0.527	0.593	0.467	0.583
45	0.240	0.400	0.350	0.448	0.350	0.450	0.350	0.461	0.370	0.461
90	0.240	0.320	0.280	0.350	0.280	0.375	0.280	0.375	0.292	0.395

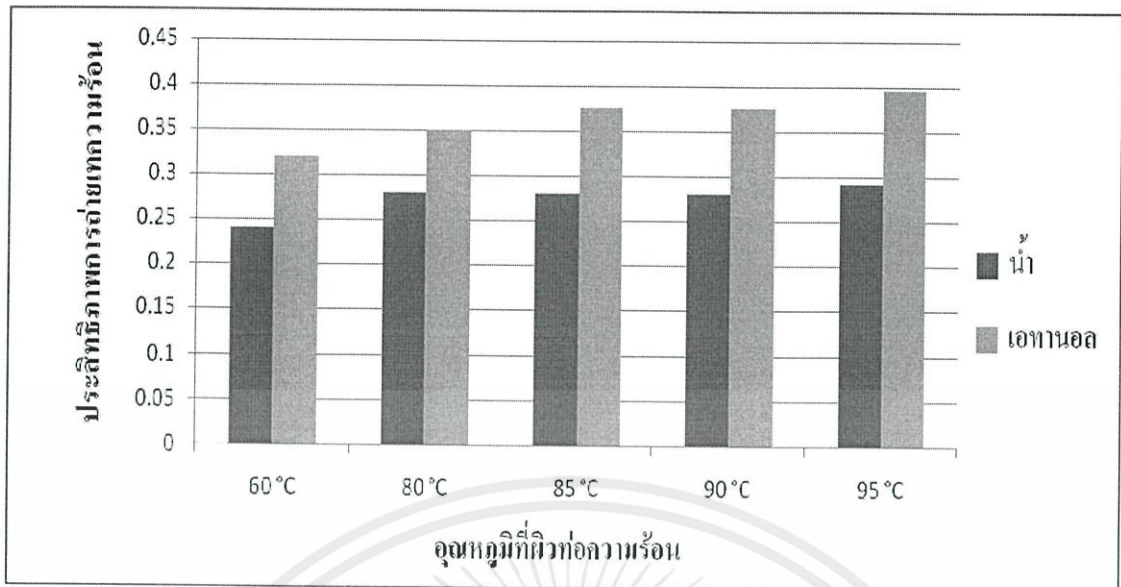


รูปที่ 4-8 ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนที่แต่ละอุณหภูมิที่ผิวต่อความร้อนของสารทำงานที่เป็นน้ำและเอทานอลที่แนวองศาการวางท่อเท่ากับ 0



รูปที่ 4-9 ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนที่แต่ละอุณหภูมิที่ผิวต่อความร้อนของสารทำงานที่เป็นน้ำและเอทานอลที่แนวองศาการวางท่อเท่ากับ 45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-10 ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนที่แต่ละอุณหภูมิที่ผิวที่อุณหภูมิของสารทำงานที่เป็นน้ำและเอทานอลที่แนวองศาการวางท่อเท่ากับ 90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

1. ผลจากการศึกษาของสสารวางท่อความร้อนพบว่าองศาการวางที่มากขึ้นจากแนวระดับทำให้ส่วนระเหยอยู่สูงกว่าส่วนควบแน่นมีผลทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนลดลง
2. อุณหภูมิของแหล่งความร้อนที่ท่อความร้อนนำไปใช้งานที่มีค่าสูงขึ้นจะทำให้เกิดการระเหยของสารทำงานมากขึ้นและเกิดการควบแน่นที่ส่วนควบแน่นมากขึ้นส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มสูงขึ้น
3. การเปลี่ยนแปลงสารทำงานจากน้ำเป็นเอทานอลทำให้อัตราการถ่ายโอนความร้อนมีค่าเพิ่มสูงขึ้น โดยปัจจัยที่มีความสำคัญคือค่าความดันไอที่มีค่าสูงกว่าน้ำมีผลมากกว่าค่าความร้อนแฝงในการเปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอที่มีค่าต่ำกว่าน้ำ
4. ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนมีค่าสูงสุดเมื่อใช้สารทำงานเป็นเอทานอล แบ่งออกเป็น 2 ช่วงในช่วงแนวองศาการวางท่อ  $-95$  ถึง  $0$  (thermosyphon) เท่ากับ  $0.933$  หรือคิดเป็น  $93.3\%$  ที่อุณหภูมิผิวท่อความร้อนเท่ากับ  $95\text{ }^{\circ}\text{C}$  ที่แนวองศาการวางท่อเท่ากับ  $-90$  และในช่วงแนวองศาการวางท่อ  $0$  ถึง  $90$  (Heat pipe) เท่ากับ  $0.583$  คิดเป็น  $58.3\%$  ที่อุณหภูมิผิวท่อความร้อนเท่ากับ  $95\text{ }^{\circ}\text{C}$  ที่แนวองศาการวางท่อเท่ากับ  $0$

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ทดลองเปลี่ยนแปลงสารทำงานที่เป็น สารละลายแอลกอฮอล์ผสม หรือนาโนฟลูอิด เนื่องจากคุณสมบัติทางกายภาพของสารที่มีค่าแรงดึงดูดผิวสูงซึ่งจะส่งผลต่อแรงแคปิลารี ทำให้สารทำงานในส่วนควบแน่นสามารถจะเคลื่อนที่สวนทางกับแรงโน้มถ่วงของโลกกลับไปยังส่วนระเหยได้ เป็นผลให้อัตราการถ่ายโอนความร้อนของท่อความร้อนมีค่าเพิ่มสูงขึ้น
2. ควรมีการปรับเปลี่ยนหม้อแปลงปรับแรงดันไฟฟ้าที่สามารถอ่านค่ากำลังไฟฟ้าได้ เนื่องจากจะทำให้เกิดความแม่นยำในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนมากยิ่งขึ้น และ ทดลองปรับระยะของส่วนระเหยเพื่อลดการเกิดความร้อนสูญเสีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับศึกษาใช้งานเพื่อการศึกษาด้านนี้ ไม่อนุญาตให้ผู้อื่นไปเผยแพร่ ใช้งาน การค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีคนนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

[1] D.A. Reay, P.A. Kew., **Heat Pipes**, 5th ed., Butterworth Heinemann, Oxford, 2006.

[2] S.W. Chi., **Heat Pipe Theory and Practice**, McGraw-Hill, New York, 1976.

[3] F.P. Dunn, D.A. Reay. **Heat pipes**. 3<sup>rd</sup> ed, Pergamon Press, Oxford, 1982

[4] BahmanZohuri, **Heat pipe Design and Technology**, CRC press, Oxford, 2011.

[5] **Latent Heats of Fusion and Vaporization**. [Online].

Available: <http://science-hamza.blogspot.com201011latent-heat.html>

[6] **Vapor pressure section 10.3 from the book Beginning Chemistry (v. 1.0)**. [Online].

Available: <http://2012books.lardbucket.org/books/beginning-chemistry/s14-03-properties-of-liquids.html>

[7] Senthilkumar, R., et al.: **Thermal Analysis of Heat Pipe Using Self Reweting Fluids** THERMAL SCIENCE, Year 2011, Vol. 15, No. 3, pp. 879-888

[8] Nicola di Francescantonio, Raffaele Savino, Yoshiyuki Abe, **New alcohol solutions for heatpipes: Marangoni effect and heattransfer enhancement**, International Journal of Heat and Mass Transfer 51 (2008) 6199–6207

[9] Pramod R. Pachghare, Ashish M. Mahalle, **THERMAL PERFORMANCE OF CLOSED LOOP PULSATING HEATPIPE USING PURE AND BINARY WORKING FLUIDS**, Frontiers in Heat Pipes (FHP), 3, 033002 (2012) DOI: 10.5098/fhp.v3.3.3002.

[10] ชีรพงศ์ บริรักษ์ และ รศ.ดร.สมบัติทิฆมทรัพย์, **การศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของท่อความร้อนโดยการปรับเปลี่ยนสารทำงาน**, วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเชีย ปีที่ 5 ฉบับที่ 1 ประจำเดือนมกราคม-มิถุนายน 2554 Vol. 5 No. 1 January-June 2011 ISSN 1905-159x, หน้า 84-89

[11] ชีรภัทร์ กิตินิรันดร์กุล และ สุพาร์ตน์ แดงจัน, **การออกแบบ และทดสอบประสิทธิภาพของท่อความร้อนแบบตะแกรงลวดละเอียด**, ปรียญานิพนธ์หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2555.

- [12] R. Kempers, D. Ewing, C.Y.Ching, **Effect of number of mesh layers and fluid loading on performance of screen mesh wick heat pipes**, Applied Thermal Engineering 26 (2006) 589-595.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก  
รูปแสดงอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะ รูปร่าง และรายละเอียดของอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในการทดลอง แสดงในตารางที่ ก-1

ตารางที่ ก-1 ลักษณะ รูปร่าง และรายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

รูปภาพ	รายละเอียดอุปกรณ์
	<p>ท่อทองแดง เป็นท่อบรรจุสารทำงาน มีขนาดยาว 30 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 6/8 นิ้ว ความหนาท่อ 2.85 มิลลิเมตร กิ่งเกลียวด้านนอกทั้งสองด้าน โดยความยาวของเกลียวเป็น 1.5 เซนติเมตร</p>
	<p>ฝาครอบท่อทองแดง เป็นเพลาทองแดงขนาด 1 3/4 นิ้ว หนาชั้นละ 2 เซนติเมตร กิ่งเกลียวด้านในระยะ 1.5 เซนติเมตร โดยฝานึ่งจะทำเกลียวทั้งสองฝั่ง เพื่อใส่ข้อต่อตัวผู้ หรือ Male Connector ขนาด 1/4 นิ้ว</p>
	<p>ตะแกรงลวดละเอียด ทำจากสแตนเลส มีขนาดรูพรุนต่อหน่วยความยาวเป็น 70 mesh ใช้เป็นโครงสร้างวัสดุพรุนภายในท่อความร้อน โดยในที่นี้ใช้ตะแกรงลวดพันเป็นวงกลมหนา 3 ชั้น สอดไว้ด้านในของท่อความร้อน</p>
	<p>ข้อต่อตัวผู้ หรือ Male Connector ขนาด 1/4 นิ้ว เป็นตัวเชื่อมระหว่างฝาครอบท่อทองแดงและท่อเติมสาร</p>
	<p>บอลวาล์ว 2ทาง ขนาด 1/4 นิ้ว เป็นวาล์วที่ใช้ปิด/เปิดท่อเติมสาร เมื่อเติมสารทำงานแล้ว</p>

ตารางที่ ก-1 ลักษณะ รูปร่าง และรายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง(ต่อ)

รูปภาพ	รายละเอียดอุปกรณ์
	<p>ท่อสแตนเลส ขนาด 1/4 นิ้ว ใช้เป็นท่อเติมสาร คั่นระหว่างท่อความร้อน และบอลวาล์ว และยัง ใช้ต่อเชื่อมระหว่างอุปกรณ์อื่นๆ ในการดึง อากาศออกและเติมสาร</p>
	<p>นัตและตาไก่ (Nut and Ferrule) เป็นตัวยึดท่อต่อ กับข้อต่อต่างๆ ตาไก่ช่วยป้องกันการรั่วซึมของ สารในช่วงข้อต่อ ซึ่งในการทดลองนี้จะใช้นัต และตาไก่ ที่ปลายท่อสแตนเลสทุกจุด</p>
	<p>ข้อต่อสามทาง ในการทดลองนี้จะใช้ข้อต่อสาม ทาง โดยทางด้านขวามือของรูปจะต่อไปยัง อุปกรณ์เติมสาร ด้านล่างจะต่อไปยังปั๊ม สุญญากาศ และด้านซ้ายมือจะต่อไปยังท่อเติม สารของท่อความร้อน โดยข้อต่อนี้มีขนาด 1/4 นิ้ว</p>
	<p>ข้อต่อตัวเมีย หรือ Female Connector ขนาด 1/4 นิ้ว ใช้เชื่อมต่อระหว่างท่อสแตนเลสและข้อต่อ สายยาง</p>
	<p>ข้อต่อสายยาง หรือ Hose Connector ขนาด 1/4 นิ้ว เป็นข้อต่อที่เชื่อมต่อระหว่างข้อต่อตัวเมียและ สายยาง โดยในภาพนี้ ข้อต่อสายยางตัวบนเป็น ตัวที่ต่อกับข้อต่อตัวเมียและเชื่อมสายยางไปยัง ภาชนะรองรับน้ำ ส่วนข้อต่อสายยางตัวล่างเป็น ตัวที่ต่อจากข้อต่อสามทางไปยังอุปกรณ์เติมสาร</p>

ตารางที่ ก-1 ลักษณะ รูปร่าง และรายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง(ต่อ)

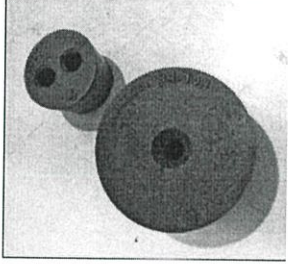
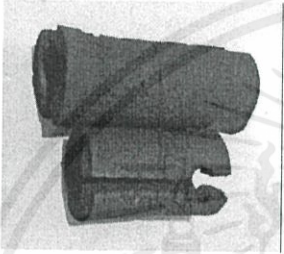
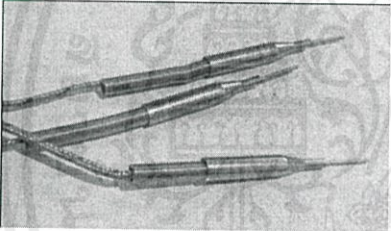


รูปภาพ	รายละเอียดอุปกรณ์
	<p>บอลวาล์ว 3 ทาง ขนาด 1/4 นิ้ว เป็นวาล์วที่ใช้ปิด/เปิดระหว่าง ข้อต่อสามทางและอุปกรณ์ดึงอากาศออก ซึ่งในความจริงแล้วสามารถใช้บอลวาล์ว 2 ทางได้ แต่ในที่นี้ได้เลือกใช้สามทางเพื่อช่วยระบายของเหลวที่ค้างอยู่ตามท่อ</p>
	<p>เกจวัดความดันสุญญากาศ เนื่องจากในการทดลองนี้จะต้องดึงอากาศออก คือทำให้ระบบเป็นสุญญากาศ จึงต้องมีเกจวัดความดัน โดยใช้ 2 ตัว โดยเกจในรูปซ้ายมือจะใช้กับอุปกรณ์ดึงอากาศออกจากท่อความร้อน ส่วนเกจทางรูปขวามือเป็นเกจที่ใช้ในตอนตรวจสอบความดันของท่อความร้อน</p>
	<p>ขวดลดความดัน หรือ Suction Flask ในที่นี้ใช้ขนาด 1 ลิตร เป็นอุปกรณ์ที่นำมาประยุกต์ใช้เป็นภาชนะรองรับน้ำ ในกรณีที่ท่อความร้อนมีน้ำอยู่ และเพื่อป้องกันของเหลวเข้าไปในปั๊มสุญญากาศ</p>
	<p>ปั๊มสุญญากาศ หรือ Vacuum Pump เป็นปั๊มที่ใช้ดึงอากาศออกจากระบบเพื่อทำให้ระบบเป็นสุญญากาศ เนื่องจากในท่อความร้อนอาจจะมีการแก๊สที่ไม่ควมแน่น อยู่ในระบบ ซึ่งแก๊สนี้จะทำให้การถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนลดลง จึงต้องกำจัดออกก่อนที่จะเดินสารทำงาน</p>
	<p>อุปกรณ์เดินสารทำงาน อุปกรณ์นี้ประกอบด้วยท่ออะคริลิก สายยาง จุกยาง วาล์วเปิด/ปิด ดังรูป โดยปลายสายยางจะไปเชื่อมต่อกับข้อต่อสายยางที่ข้อต่อสามทาง</p>

ตารางที่ ก-1 ลักษณะ รูปร่าง และรายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง(ต่อ)

รูปภาพ	รายละเอียดอุปกรณ์
	<p>สายยาง ในการทดลองนี้ใช้สายยางขนาดเล็กและใหญ่โดยใช้ในอุปกรณ์ดึงอากาศออกและเติมสารทำงาน และอุปกรณ์ทดสอบประสิทธิภาพความร้อนด้วย</p>
	<p>เข็มขัดรัดสายยาง การดึงอากาศออกจากระบบมีการใช้สายยางเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์ จึงจำเป็นต้องใช้เข็มขัดรัดสายยางเพื่อป้องกันการรั่วซึมของอากาศภายนอกเข้ามาในระบบ</p>
	<p>อ่างหมุนเวียนน้ำแบบควบคุมอุณหภูมิได้ หรือ Circulating Bath ใช้ในตอนการดึงสารทำงาน ให้ความร้อนกับท่อความร้อนเพื่อช่วยให้อากาศขยายตัว และความชื้นระเหยเป็นไอ ง่ายต่อการทำให้เป็นสูญญากาศมากขึ้น และยังเป็นเครื่องที่ใช้ควบคุมอุณหภูมิของน้ำที่เข้ามาแลกเปลี่ยนใน ส่วนระเหยในการทดสอบประสิทธิภาพด้วย</p>
	<p>เครื่องปรับแรงดันไฟฟ้า ใช้ในการปรับแรงดันไฟฟ้าที่ให้กับฮีตเตอร์</p>
	<p>เครื่องอัดอากาศ ในการทดลองนี้ใช้เครื่องอัดอากาศเพื่อทดสอบรอยรั่วของท่อความร้อน โดยนำท่อความร้อนจุ่มลงในถังที่บรรจุน้ำ และอัดอากาศเข้าไป สังเกตฟองอากาศที่ลอยขึ้นมา ซึ่งจะเป็นตัวบ่งบอกว่าจุดใดของท่อความร้อนมีรอยรั่ว</p>
	<p>ท่ออะคริลิก ใช้สวมเป็นท่อสองชั้นใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพของท่อความร้อน เเจาะรูเพื่อให้สวมจุกยางขนาดเล็กได้</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เพื่อการศึกษา การวิจัย และการบริการวิชาการเท่านั้น ห้ามเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ตารางที่ ก-1 ลักษณะ รูปร่าง และรายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง(ต่อ)

รูปภาพ	รายละเอียดอุปกรณ์
	<p>จุกยาง ในการทดลองนี้ใช้จุกยาง 2 ขนาด โดยขนาดใหญ่ใช้เพื่อปิดท่ออะคริลิก ใช้เป็นจุกยางที่คั่นระหว่างส่วนระเหยและส่วนควบแน่น และขนาดเล็กใช้เป็นข้อต่อสายยางและเทอร์โมคัปเปิล สวมเข้ากับท่ออะคริลิกในชุดทดสอบประสิทธิภาพ</p>
	<p>ฉนวนกันความร้อน ใช้หุ้มชุดทดสอบประสิทธิภาพเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนสู่สิ่งแวดล้อมภายนอก</p>
	<p>เทอร์โมคัปเปิล ในการทดสอบประสิทธิภาพนี้ใช้เทอร์โมคัปเปิล ประเภท K ทั้งหมด 4 ตัว เพื่อวัดอุณหภูมิของน้ำขาเข้า และขาออก ของทั้งส่วนระเหยและควบแน่น</p>
	<p>เครื่องอ่านอุณหภูมิจากเทอร์โมคัปเปิล ใช้อ่านอุณหภูมิจากเทอร์โมคัปเปิล</p>
	<p>ฮีตเตอร์ ใช้ในการให้ความร้อนแก่ส่วนระเหย</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทดลองจะทำการวัดอัตราการไหลของน้ำโดยใช้การจับเวลา เพื่อนำไปคำนวณค่าอัตราการถ่ายโอนความร้อนต่อไป ซึ่งอัตราการไหลของน้ำที่ใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพของท่อความร้อนมีค่าเท่ากับ 3.6 ลิตร/ชั่วโมง ในทุกการทดลอง

ซึ่งในการทดลองนี้จะทำการวัดอุณหภูมิของน้ำ ณ แนวการวางที่องศาต่างๆอย่างต่อเนื่อง โดยทำการทดลองที่ 60 °C, 80 °C, 85 °C, 90 °C และ 95 °C เพื่อนำไปคำนวณค่าอัตราการถ่ายโอนความร้อนต่อไป

โดยแนวองศาการวางท่อนั้นจะประกอบด้วย -90 °, -45 °, 0 °, 45 ° และ 90 ° ซึ่งจะกำหนดให้ มุมองศาที่บอกค่าเป็นลบคือส่วนระเหยหรือส่วนที่ได้รับความร้อนจะอยู่ต่ำกว่าส่วนควบแน่น และในการทดสอบประสิทธิภาพท่อความร้อนแบบต่อเนื่องจะใช้สารทำงาน 2 ชนิดคือน้ำ และ เอทานอล

กำหนดให้

H in คือ อุณหภูมิที่ผิวท่อ

C out คือ อุณหภูมิน้ำเขาออก

C in คือ อุณหภูมิน้ำเขาเข้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-1 ข้อมูลที่บันทึกได้ของท่อความร้อนแบบต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 60 °C และสารทำงานที่ใช้  
คือ น้ำ

องศา	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
		H in	C out	C in
90	0	60	24	24
90	2	60	25	24
90	4	60	25	24
90	6	60	25	24
90	8	60	25	24
90	10	60	25	24
90	12	60	26	24
90	14	60	26	24
90	16	60	26	24
90	18	60	26	24
90	20	60	26	24
90	22	60	26	24
90	24	60	26	24
90	26	60	26	24
90	28	60	26	24
90	30	60	26	24
90	32	60	26	24
90	34	60	26	24
45	36	60	26	24
45	38	60	26	24
45	40	60	26	24
45	42	60	26	24
45	44	60	27	24
45	46	60	27	24
45	48	60	27	24
45	50	60	27	24
45	52	60	27	24
45	54	60	27	24
45	56	60	27	24
45	58	60	27	24
45	60	60	27	24
0	62	60	28	24
0	64	60	29	24
0	66	60	29	24
0	68	60	29	24
0	70	60	29	24

องศา	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
		H in	C out	C in
0	72	60	29	24
0	74	60	29	24
0	76	60	29	24
-45	78	60	29	24
-45	80	60	29	24
-45	82	60	29	24
-45	84	60	30	24
-45	86	60	30	24
-45	88	60	30	24
-45	90	60	30	24
-45	92	60	30	24
-45	94	60	30	24
-45	96	60	30	24
-45	98	60	30	24
-45	100	60	30	24
-45	102	60	30	24
-90	104	60	30	24
-90	106	60	30	24
-90	108	60	30	24
-90	110	60	30	24
-90	112	60	31	24
-90	114	60	31	24
-90	116	60	31	24
-90	118	60	31	24
-90	120	60	31	24
-90	122	60	32	24
-90	124	60	32	24
-90	126	60	32	24
-90	128	60	32	24
-90	130	60	32	24
-90	132	60	32	24
-90	134	60	32	24
-90	136	60	32	24
-90	138	60	32	24
-90	140	60	32	24

ตารางที่ ข-2 ข้อมูลที่บันทึกได้ของท่อความร้อนแบบต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 80 °C และสารทำงานที่ใช้  
คือ น้ำ

องศา	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
		H in	C out	C in
90	0	80	24	24
90	2	80	25	24
90	4	80	26	24
90	6	80	26	24
90	8	80	26	24
90	10	80	26	24
90	12	80	26	24
90	14	80	26	24
90	16	80	26	24
90	18	80	26	24
90	20	80	26	24
90	22	80	27	24
90	24	80	27	24
90	26	80	27	24
90	28	80	27	24
90	30	80	27	24
90	32	80	27	24
90	34	80	27	24
90	36	80	27	24
90	38	80	27	24
90	40	80	27	24
90	42	80	27	24
45	44	80	27	24
45	46	80	27	24
45	48	80	27	24
45	50	80	27	24
45	52	80	28	24
45	54	80	28	24
45	56	80	28	24
45	58	80	28	24
45	60	80	28	24
45	62	80	28	24
45	64	80	28	24

องศา	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
		H in	C out	C in
0	66	80	28	24
0	68	80	28	24
0	70	80	29	24
0	72	80	29	24
0	74	80	29	24
0	76	80	30	24
0	78	80	30	24
0	80	80	30	24
0	82	80	30	24
0	84	80	30	24
0	86	80	30	24
0	88	80	30	24
-45	90	80	30	24
-45	92	80	30	24
-45	94	80	31	24
-45	96	80	31	24
-45	98	80	31	24
-45	100	80	31	24
-45	102	80	31	24
-90	104	80	31	24
-90	106	80	31	24
-90	108	80	31	24
-90	110	80	32	24
-90	112	80	32	24
-90	114	80	32	24
-90	116	80	32	24
-90	118	80	32	24
-90	120	80	32	24
-90	122	80	32	24
-90	124	80	32	24
-90	126	80	32	24
-90	128	80	32	24

ตารางที่ ข-3 ข้อมูลที่บันทึกได้ของท่อความร้อนแบบต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 85 °C และสารทำงานที่ใช้  
คือ น้ำ

องศา	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
		H in	C out	C in
90	0	85	24	24
90	2	85	25	24
90	4	85	25	24
90	6	85	26	24
90	8	85	26	24
90	10	85	26	24
90	12	85	27	24
90	14	85	27	24
90	16	85	27	24
90	18	85	27	24
90	20	85	27	24
90	22	85	27	24
90	24	85	27	24
90	26	85	27	24
45	28	85	27	24
45	30	85	27	24
45	32	85	27	24
45	34	85	27	24
45	36	85	28	24
45	38	85	28	24
45	40	85	28	24
45	42	85	28	24
45	44	85	28	24
45	46	85	28	24
45	48	85	29	24
45	50	85	29	24
45	52	85	29	24
45	54	85	29	24
45	56	85	29	24
45	58	85	29	24
45	60	85	29	24
45	62	85	29	24
45	64	85	29	24
0	66	85	29	24
0	68	85	29	24
0	70	85	29	24
0	72	85	29	24

องศา	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
		H in	C out	C in
0	74	85	29	24
0	76	85	29	24
0	78	85	30	24
0	80	85	30	24
0	82	85	30	24
0	84	85	30	24
0	86	85	30	24
0	88	85	30	24
0	90	85	30	24
0	92	85	30	24
-45	94	85	30	24
-45	96	85	31	24
-45	98	85	31	24
-45	100	85	31	24
-45	102	85	31	24
-45	104	85	31	24
-45	106	85	31	24
-45	108	85	32	24
-45	110	85	32	24
-45	112	85	32	24
-45	114	85	32	24
-45	116	85	32	24
-45	118	85	32	24
-45	120	85	32	24
-45	122	85	32	24
-90	124	85	32	24
-90	126	85	33	24
-90	128	85	33	24
-90	130	85	33	24
-90	132	85	33	24
-90	134	85	33	24
-90	136	85	34	24
-90	138	85	34	24
-90	140	85	34	24
-90	142	85	34	24
-90	144	85	34	24
-90	146	85	34	24

ตารางที่ ข-4 ข้อมูลที่บันทึกได้ของท่อความร้อนแบบต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 90 °C และสารทำงานที่ใช้  
คือ น้ำ

องศา	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)		
		H in	C out	C in
90	0	90	25	24
90	2	90	26	24
90	4	90	27	24
90	6	90	27	24
90	8	90	27	24
90	10	90	27	24
90	12	90	27	24
90	14	90	27	24
90	16	90	27	24
90	18	90	27	24
45	20	90	27	24
45	22	90	27	24
45	24	90	28	24
45	26	90	28	24
45	28	90	28	24
45	30	90	29	24
45	32	90	29	24
45	34	90	29	24
45	36	90	29	24
45	38	90	29	24
45	40	90	29	24
45	42	90	29	24
45	44	90	29	24
45	46	90	29	24
45	48	90	29	24
0	50	90	29	24
0	52	90	29	24
0	54	90	30	24
0	56	90	30	24
0	58	90	30	24
0	60	90	31	24
0	62	90	31	24
0	64	90	31	24
0	66	90	31	24
0	68	90	32	24
0	70	90	32	24
0	72	90	32	24
0	74	90	32	24
0	76	90	32	24
0	78	90	32	24
0	80	90	32	24
0	82	90	32	24
0	84	90	32	24
0	86	90	32	24
0	88	90	32	24
-45	90	90	32	24
-45	92	90	32	24
-45	94	90	32	24
-45	96	90	32	24
-45	98	90	33	24
-45	100	90	33	24
-45	102	90	33	24
-45	104	90	33	24
-45	106	90	33	24
-45	108	90	33	24
-45	110	90	33	24
-90	112	90	33	24
-90	114	90	33	24
-90	116	90	34	24
-90	118	90	34	24
-90	120	90	34	24
-90	122	90	34	24
-90	124	90	34	24
-90	126	90	35	24
-90	128	90	35	24
-90	130	90	35	24
-90	132	90	35	24
-90	134	90	36	24
-90	136	90	36	24
-90	138	90	36	24
-90	140	90	36	24
-90	142	90	36	24
-90	144	90	36	24
-90	146	90	36	24
-90	148	90	36	24
-90	150	90	36	24

ตารางที่ ข-5 ข้อมูลที่บันทึกได้ของท่อความร้อนแบบต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 95 °C และสารทำงานที่ใช้  
คือ น้ำ

องศา	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
		H in	C out	C in
90	0	95	25	24
90	2	95	26	24
90	4	95	27	24
90	6	95	27	24
90	8	95	28	24
90	10	95	28	24
90	12	95	29	24
90	14	95	29	24
90	16	95	29	24
90	18	95	29	24
90	20	95	29	24
90	22	95	29	24
90	24	95	29	24
90	26	95	29	24
45	28	95	29	24
45	30	95	29	24
45	32	95	29	24
45	34	95	30	24
45	36	95	30	24
45	38	95	30	24
45	40	95	30	24
45	42	95	30	24
45	44	95	30	24
45	46	95	30	24
45	48	95	30	24
0	50	95	30	24
0	52	95	30	24
0	54	95	31	24
0	56	95	31	24
0	58	95	31	24
0	60	95	31	24
0	62	95	32	24
0	64	95	32	24
0	66	95	32	24
0	68	95	32	24
0	70	95	32	24
0	72	95	33	24
0	74	95	33	24
0	76	95	33	24
0	78	95	33	24
0	80	95	33	24

องศา	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
		H in	C out	C in
0	82	95	33	24
0	84	95	33	24
0	86	95	33	24
0	88	95	33	24
0	90	95	33	24
0	92	95	33	24
0	94	95	33	24
-45	96	95	33	24
-45	98	95	33	24
-45	100	95	34	24
-45	102	95	34	24
-45	104	95	34	24
-45	106	95	34	24
-45	108	95	34	24
-45	110	95	34	24
-45	112	95	34	24
-90	114	95	34	24
-90	116	95	34	24
-90	118	95	34	24
-90	120	95	35	24
-90	122	95	35	24
-90	124	95	35	24
-90	126	95	35	24
-90	128	95	36	24
-90	130	95	36	24
-90	132	95	37	24
-90	134	95	37	24
-90	136	95	38	24
-90	138	95	38	24
-90	140	95	38	24
-90	142	95	39	24
-90	144	95	39	24
-90	146	95	39	24
-90	148	95	39	24
-90	150	95	39	24
-90	152	95	39	24
-90	154	95	39	24
-90	156	95	39	24
-90	158	95	39	24
-90	160	95	39	24

ตารางที่ ข-6 ข้อมูลที่บันทึกได้ของท่อความร้อนแบบต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 60 °C และสารทำงานที่ใช้คือ เอทานอล

องศา	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
		H in	C out	C in
90	0	60	24	24
90	2	60	24	24
90	4	60	25	24
90	6	60	25	24
90	8	60	25	24
90	10	60	26	24
90	12	60	26	24
90	14	60	27	24
90	16	60	27	24
90	18	60	27	24
90	20	60	27	24
90	22	60	27	24
90	24	60	27	24
90	26	60	27	24
90	28	60	27	24
45	30	60	28	24
45	32	60	28	24
45	34	60	28	24
45	36	60	29	24
45	38	60	29	24
45	40	60	29	24
45	42	60	29	24
45	44	60	29	24
45	46	60	29	24
45	48	60	29	24
45	50	60	29	24
0	52	60	30	24
0	54	60	30	24
0	56	60	30	24
0	58	60	31	24
0	60	60	31	24
0	62	60	31	24
0	64	60	31	24
0	66	60	31	24
0	68	60	31	24

องศา	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
		H in	C out	C in
-45	70	60	32	24
-45	72	60	32	24
-45	74	60	32	24
-45	76	60	32	24
-45	78	60	32	24
-45	80	60	33	24
-45	82	60	33	24
-45	84	60	33	24
-45	86	60	33	24
-45	88	60	33	24
-45	90	60	33	24
-45	92	60	34	24
-45	94	60	34	24
-45	96	60	35	24
-45	98	60	35	24
-45	100	60	35	24
-45	102	60	35	24
-45	104	60	35	24
-45	106	60	35	24
-45	108	60	35	24
-45	110	60	35	24
-45	112	60	35	24
-90	114	60	35	24
-90	116	60	35	24
-90	118	60	35	24
-90	120	60	36	24
-90	122	60	36	24
-90	124	60	36	24
-90	126	60	36	24
-90	128	60	36	24
-90	130	60	36	24
-90	132	60	36	24
-90	134	60	36	24
-90	136	60	36	24
-90	138	60	36	24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นไว้สำหรับใช้ประกอบการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้เพื่อการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อนึ่งห้ามนำข้อมูลไปเผยแพร่และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำข้อมูลไปใช้

ตารางที่ ข-7 ข้อมูลที่บันทึกได้ของท่อความร้อนแบบต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 80 °C และสารทำงานที่ใช้คือ เอทานอล

องศา	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
		H in	C out	C in
90	0	80	24	24
90	2	80	25	24
90	4	80	25	24
90	6	80	26	24
90	8	80	27	24
90	10	80	28	24
90	12	80	28	24
90	14	80	29	24
90	16	80	29	24
90	18	80	29	24
90	20	80	29	24
90	22	80	29	24
90	24	80	29	24
90	26	80	29	24
45	28	80	29	24
45	30	80	29	24
45	32	80	29	24
45	34	80	29	24
45	36	80	29	24
45	38	80	29	24
45	40	80	29	24
0	42	80	29	24
0	44	80	30	24
0	46	80	31	24
0	48	80	31	24
0	50	80	31	24
0	52	80	31	24
0	54	80	31	24
0	56	80	31	24
0	58	80	31	24
0	60	80	31	24
0	62	80	31	24
-45	64	80	31	24
-45	66	80	32	24
-45	68	80	32	24
-45	70	80	32	24
-45	72	80	33	24
-45	74	80	33	24

องศา	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
		H in	C out	C in
-45	76	80	33	24
-45	78	80	33	24
-45	80	80	33	24
-45	82	80	34	24
-45	84	80	34	24
-15	86	80	34	24
-45	88	80	34	24
-45	90	80	34	24
-45	92	80	34	24
-45	94	80	34	24
-45	96	80	34	24
-45	98	80	34	24
-45	100	80	34	24
-45	102	80	34	24
-45	104	80	34	24
-90	106	80	34	24
-90	108	80	35	24
-90	110	80	35	24
-90	112	80	35	24
-90	114	80	35	24
-90	116	80	35	24
-90	118	80	36	24
-90	120	80	36	24
-90	122	80	36	24
-90	124	80	36	24
-90	126	80	37	24
-90	128	80	37	24
-90	130	80	37	24
-90	132	80	38	24
-90	134	80	38	24
-90	136	80	38	24
-90	138	80	38	24
-90	140	80	38	24
-90	142	80	38	24
-90	144	80	38	24
-90	146	80	38	24
-90	148	80	38	24



ตารางที่ ข-9 ข้อมูลที่บันทึกได้ของท่อความร้อนแบบต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 90 °C และสารทำงานที่ใช้คือ เอทานอล

องศา	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)		
		H in	C out	C in
90	0	90	24	24
90	2	90	25	24
90	4	90	26	24
90	6	90	26	24
90	8	90	26	24
90	10	90	27	24
90	12	90	28	24
90	14	90	29	24
90	16	90	29	24
90	18	90	29	24
90	20	90	29	24
90	22	90	29	24
90	24	90	29	24
90	26	90	29	24
90	28	90	29	24
90	30	90	29	24
90	32	90	29	24
45	34	90	29	24
45	36	90	30	24
45	38	90	30	24
45	40	90	31	24
45	42	90	31	24
45	44	90	31	24
45	46	90	31	24
45	48	90	32	24
45	50	90	32	24
45	52	90	32	24
45	54	90	32	24
45	56	90	32	24
45	58	90	32	24
45	60	90	32	24
45	62	90	32	24
45	64	90	32	24
0	66	90	32	24
0	68	90	33	24
0	70	90	34	24
0	72	90	34	24
0	74	90	35	24
0	76	90	35	24
0	78	90	35	24
0	80	90	35	24

องศา	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)		
		H in	C out	C in
0	82	90	35	24
0	84	90	35	24
0	86	90	35	24
0	88	90	35	24
0	90	90	35	24
0	92	90	35	24
-45	94	90	36	24
-45	96	90	36	24
-45	98	90	36	24
-45	100	90	37	24
-45	102	90	37	24
-45	104	90	37	24
-45	106	90	37	24
-45	108	90	37	24
-45	110	90	37	24
-45	112	90	37	24
-45	114	90	37	24
-45	116	90	37	24
-45	118	90	37	24
-45	120	90	37	24
-90	122	90	37	24
-90	124	90	37	24
-90	126	90	38	24
-90	128	90	38	24
-90	130	90	38	24
-90	132	90	38	24
-90	134	90	38	24
-90	136	90	38	24
-90	138	90	38	24
-90	140	90	39	24
-90	142	90	39	24
-90	144	90	39	24
-90	146	90	39	24
-90	148	90	39	24
-90	150	90	39	24
-90	152	90	39	24
-90	154	90	39	24
-90	156	90	39	24
-90	158	90	39	24
-90	160	90	39	24
-90	162	90	39	24

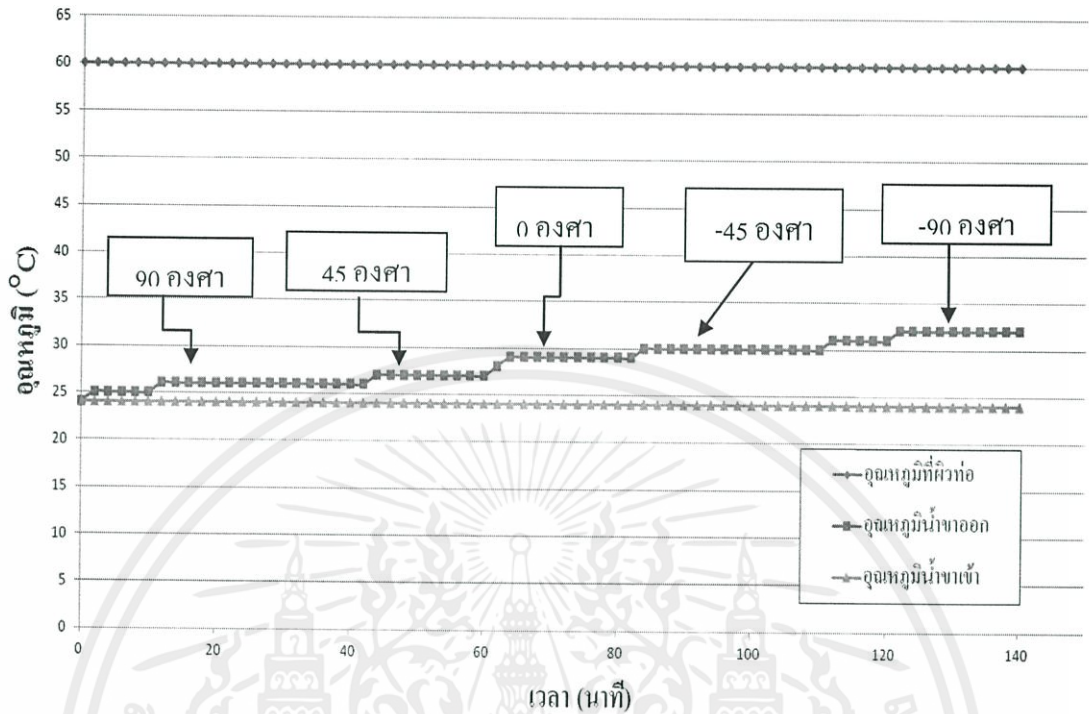
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่าทางใดก็ตาม หากมีข้อสงสัยหรือต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่อฝ่ายเอกสารทุกครั้ง

ตารางที่ ข-10 ข้อมูลที่บันทึกได้ของท่อความร้อนแบบต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 95 °C และสารทำงานที่ใช้ คือ เอทานอล

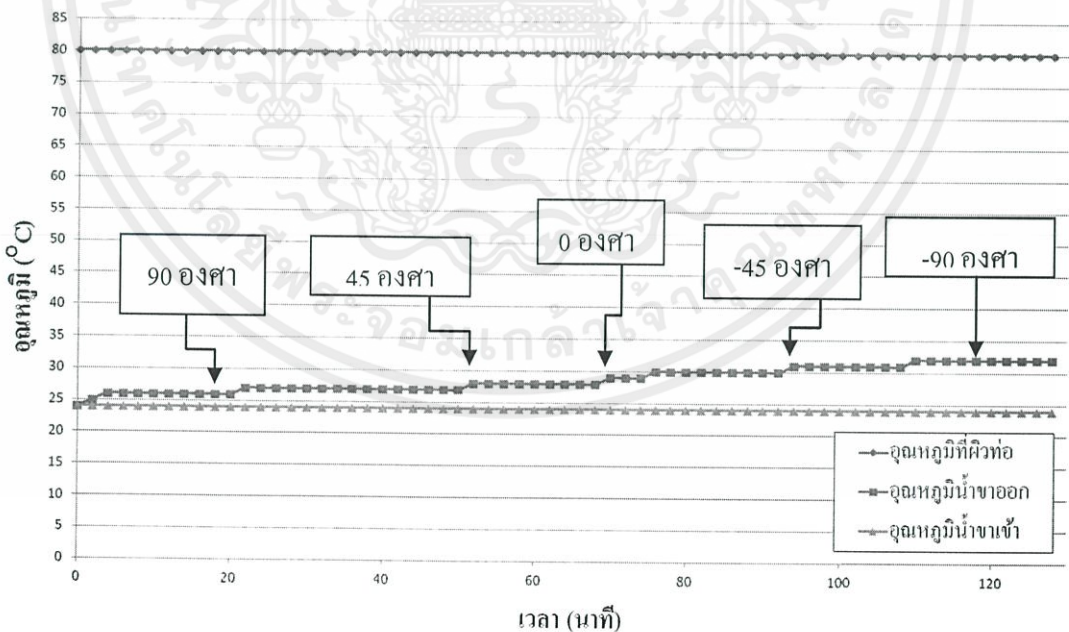
องศา	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)		
		H in	C out	C in
90	0	95	24	24
90	2	95	25	24
90	4	95	25	24
90	6	95	26	24
90	8	95	27	24
90	10	95	28	24
90	12	95	28	24
90	14	95	29	24
90	16	95	29	24
90	18	95	29	24
90	20	95	29	24
90	22	95	29	24
90	24	95	29	24
90	26	95	29	24
90	28	95	29	24
90	30	95	29	24
45	32	95	29	24
45	34	95	29	24
45	36	95	29	24
45	38	95	30	24
45	40	95	30	24
45	42	95	30	24
45	44	95	30	24
45	46	95	30	24
45	48	95	30	24
45	50	95	30	24
45	52	95	30	24
0	54	95	31	24
0	56	95	31	24
0	58	95	31	24
0	60	95	32	24
0	62	95	32	24
0	64	95	32	24
0	66	95	32	24
0	68	95	33	24
0	70	95	33	24
0	72	95	33	24
0	74	95	34	24
0	76	95	34	24
0	78	95	34	24
0	80	95	34	24
0	82	95	34	24

องศา	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)		
		H in	C out	C in
0	84	95	34	24
0	86	95	34	24
0	88	95	34	24
-45	90	95	34	24
-45	92	95	35	24
-45	94	95	35	24
-45	96	95	35	24
-45	98	95	35	24
-45	100	95	35	24
-45	102	95	35	24
-45	104	95	35	24
-90	106	95	35	24
-90	108	95	36	24
-90	110	95	36	24
-90	112	95	37	24
-90	114	95	37	24
-90	116	95	37	24
-90	118	95	37	24
-90	120	95	38	24
-90	122	95	38	24
-90	124	95	38	24
-90	126	95	38	24
-90	128	95	39	24
-90	130	95	39	24
-90	132	95	39	24
-90	134	95	39	24
-90	136	95	39	24
-90	138	95	39	24
-90	140	95	39	24
-90	142	95	40	24
-90	144	95	40	24
-90	146	95	40	24
-90	148	95	40	24
-90	150	95	40	24
-90	152	95	40	24
-90	154	95	40	24
-90	156	95	40	24
-90	158	95	40	24
-90	160	95	40	24
-90	162	95	40	24
-90	164	95	40	24

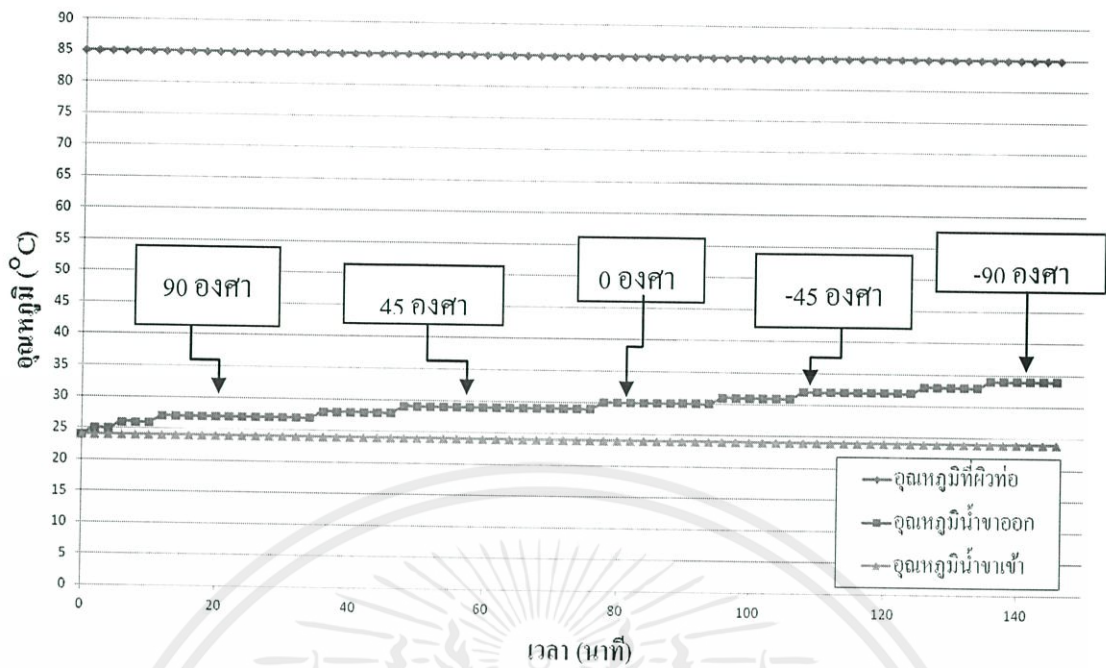
จากข้อมูลในตารางที่ ข-1 ถึงตารางที่ ข-10 สามารถนำมาพลอตกราฟผลการบันทึก อุณหภูมิน้ำและอุณหภูมิที่ผิวของท่อที่เวลาต่างๆ ได้ดังรูปที่ ข-1 ถึง รูปที่ ข-4 ตามลำดับ



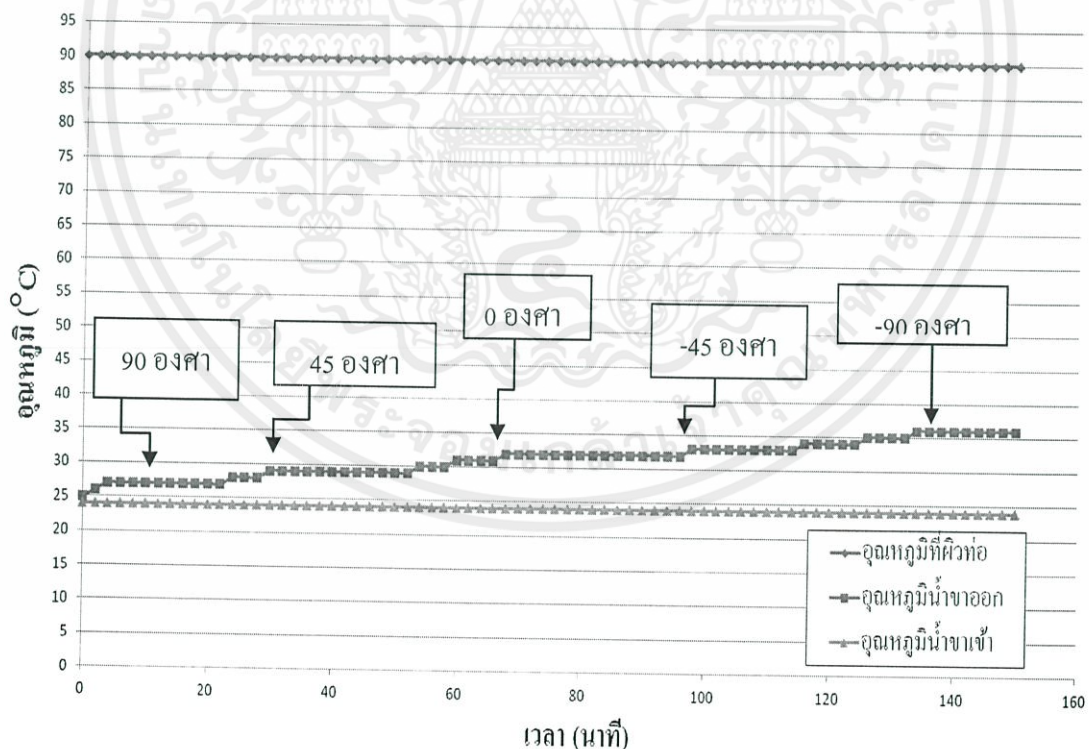
รูปที่ ข-1 ค่าอุณหภูมิของน้ำขาเข้า-ขาออกเทียบกับเวลาของการทดลองต่อความร้อนแบบต่อเนื่อง โดยใช้สารทำงานเป็นน้ำ ที่อุณหภูมิผิวท่อความร้อนเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส



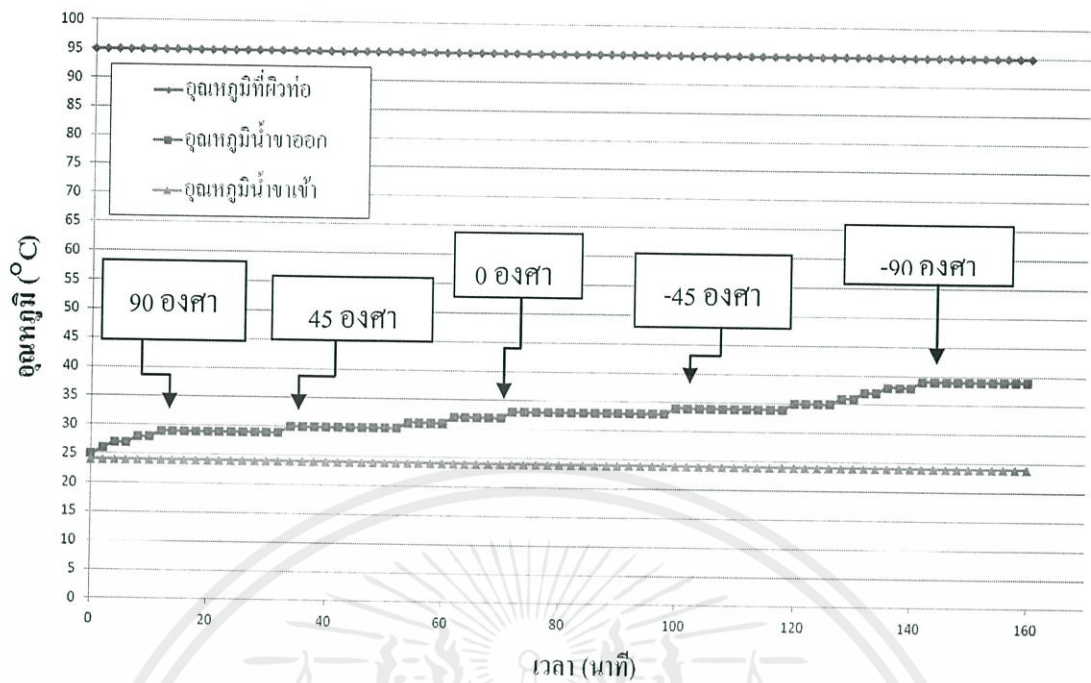
รูปที่ ข-2 ค่าอุณหภูมิของน้ำขาเข้า-ขาออกเทียบกับเวลาของการทดลองต่อความร้อนแบบต่อเนื่อง โดยใช้สารทำงานเป็นน้ำ ที่อุณหภูมิผิวท่อความร้อนเท่ากับ 80 องศาเซลเซียส



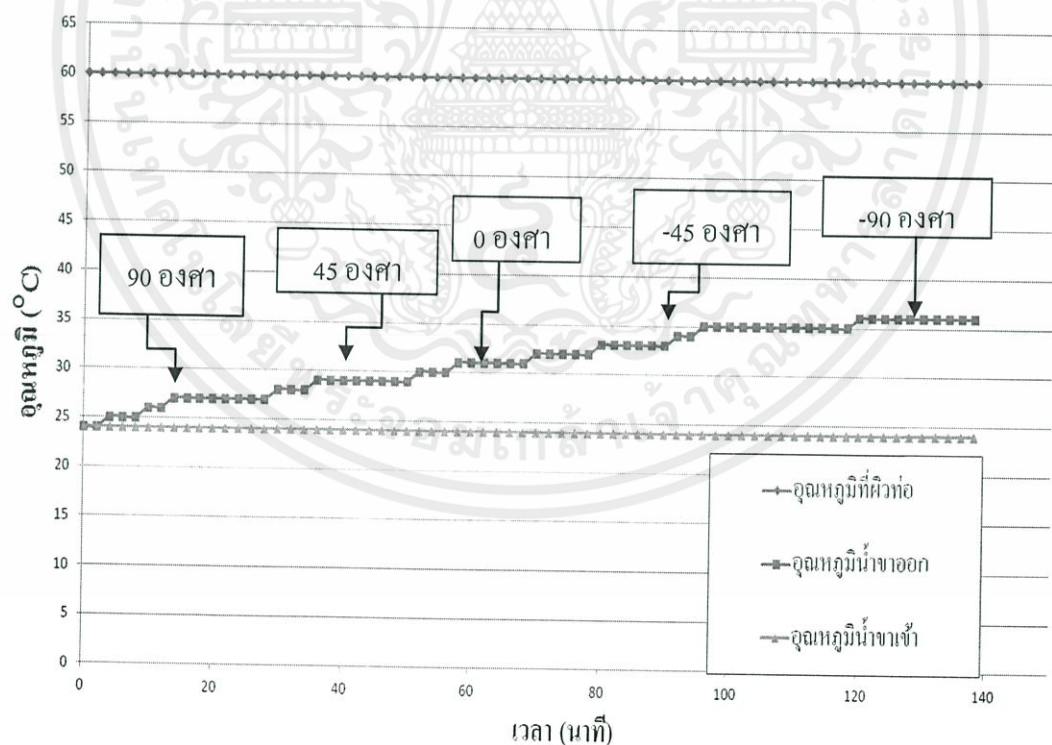
รูปที่ ข-3 ค่าอุณหภูมิของน้ำขาเข้า-ขาออกเทียบกับเวลาของการทดลองต่อความร้อนแบบต่อเนื่อง โดยใช้สารทำงานเป็นน้ำ ที่อุณหภูมิผิวท่อความร้อนเท่ากับ 85 องศาเซลเซียส



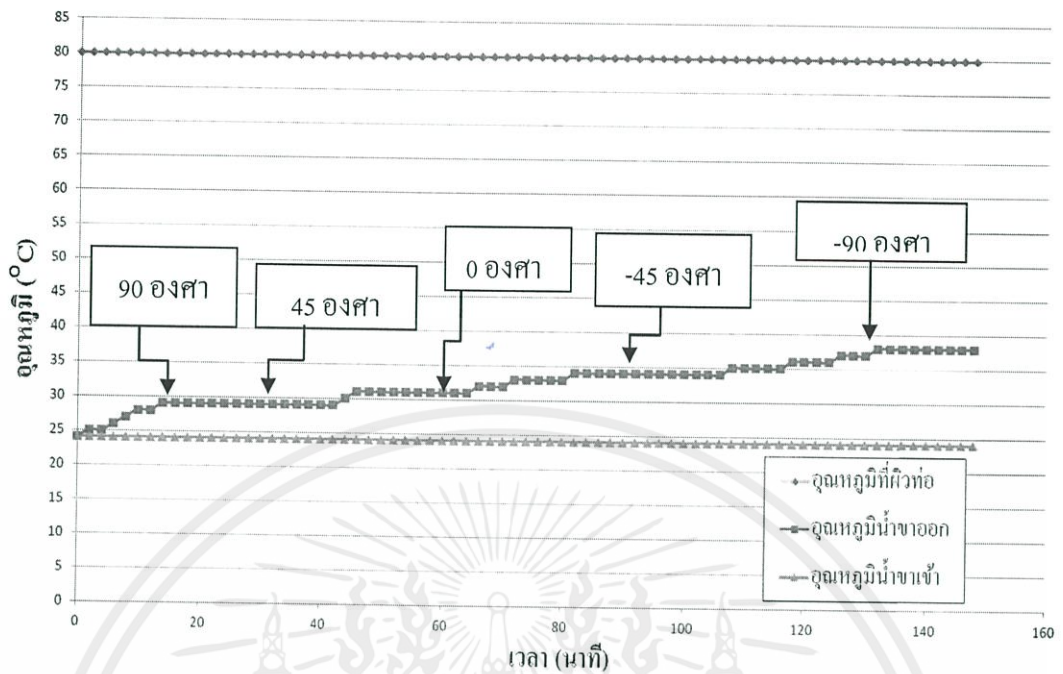
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ ข-4 ค่าอุณหภูมิของน้ำขาเข้า-ขาออกเทียบกับเวลาของการทดลองต่อความร้อนแบบต่อเนื่อง โดยใช้สารทำงานเป็นน้ำ ที่อุณหภูมิผิวท่อความร้อนเท่ากับ 90 องศาเซลเซียส



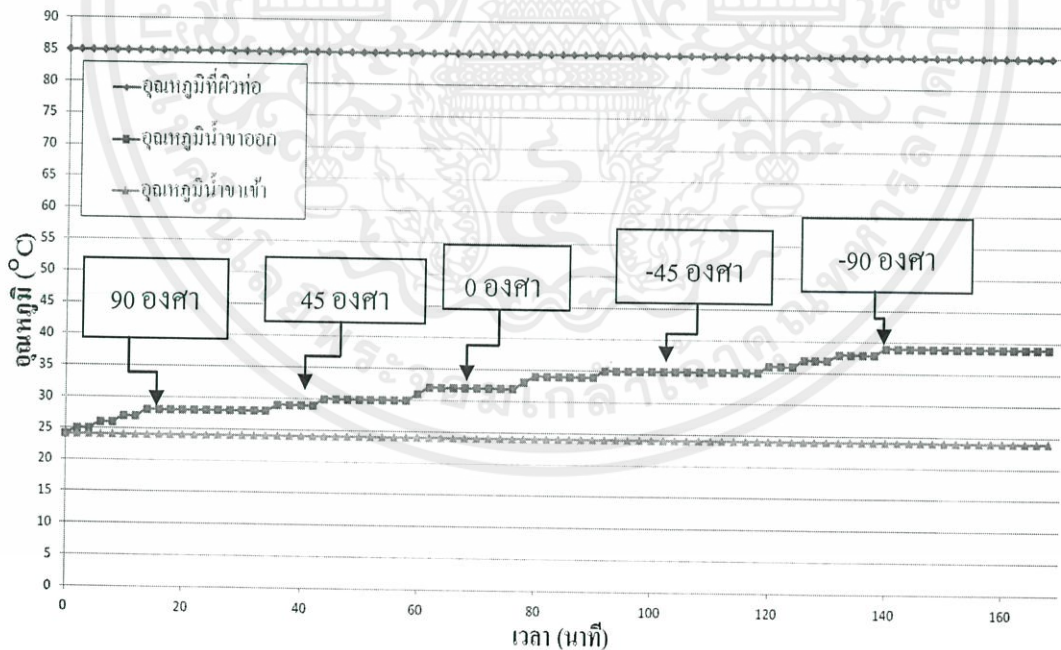
รูปที่ ข-5 ค่าอุณหภูมิของน้ำขาเข้า-ขาออกเทียบกับเวลาของการทดลองที่ความร้อนแบบต่อเนื่อง โดยใช้สารทำงานเป็นน้ำ ที่อุณหภูมิผิวท่อความร้อนเท่ากับ 95 องศาเซลเซียส



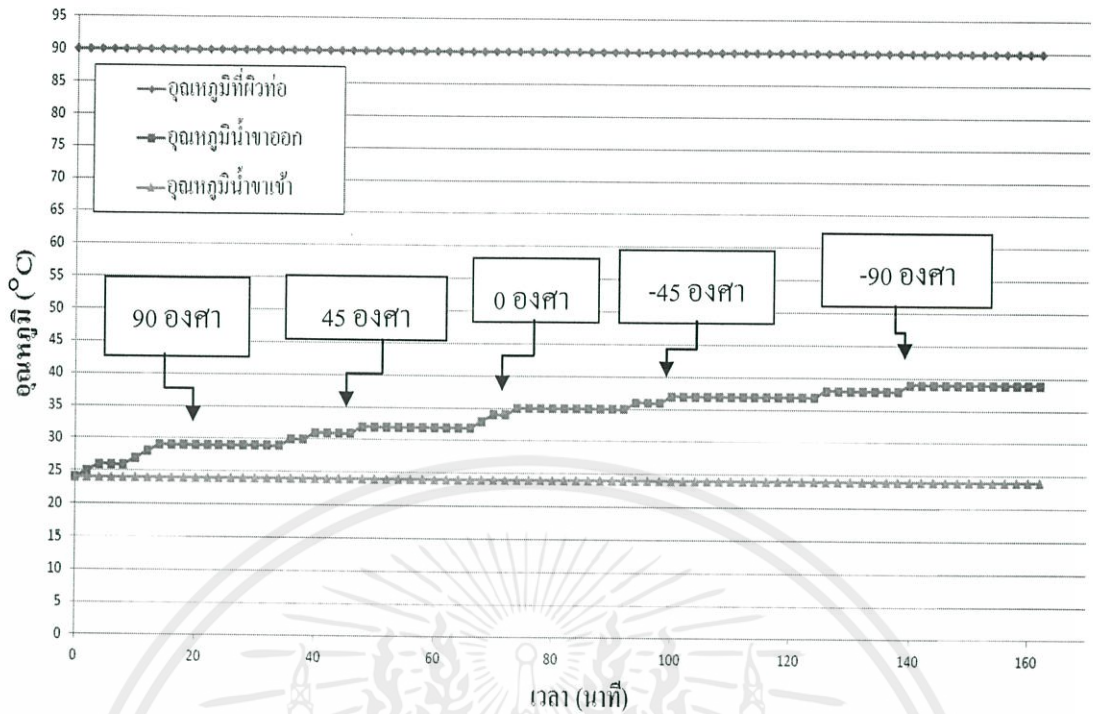
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ ข-6 ค่าอุณหภูมิของน้ำขาเข้า-ขาออกเทียบกับเวลาของการทดลองที่ความร้อนแบบต่อเนื่อง โดยใช้  
โดยใช้สารทำงานเป็นเอทานอล ที่อุณหภูมิผิวท่อความร้อนเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส



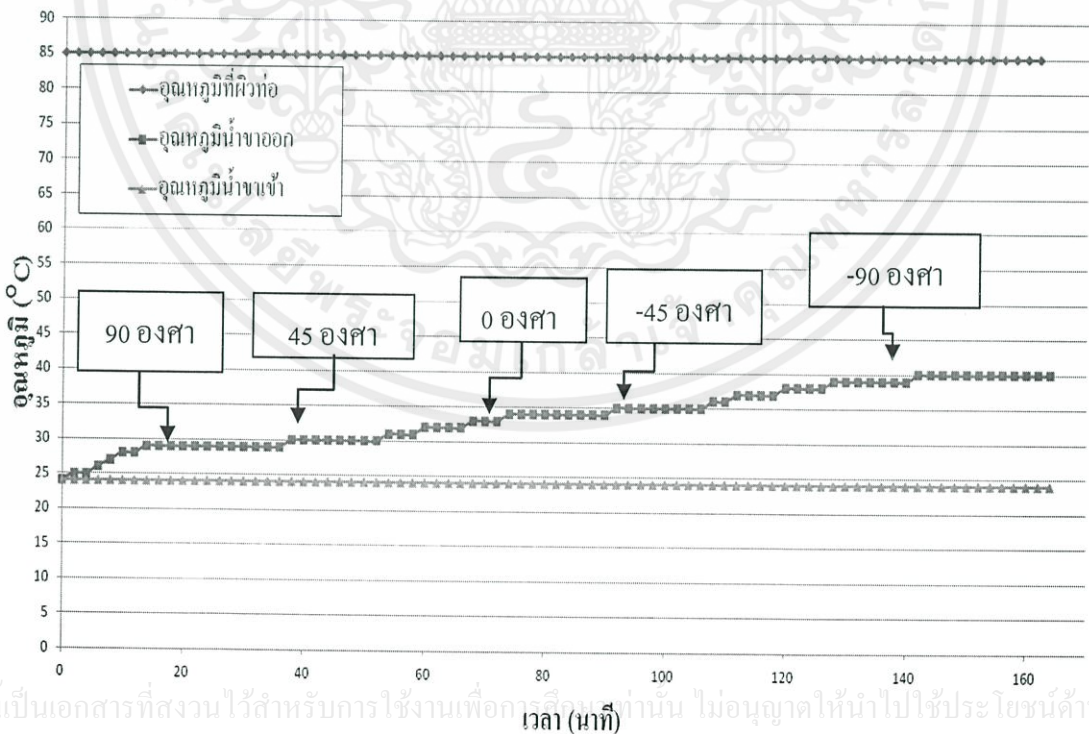
รูปที่ ข-7 ค่าอุณหภูมิของน้ำขาเข้า-ขาออกเทียบกับเวลาของการทดลองต่อความร้อนแบบต่อเนื่อง โดยใช้สารทำงานเป็นเอทานอล ที่อุณหภูมิผิวท่อความร้อนเท่ากับ 80 องศาเซลเซียส



รูปที่ ข-8 ค่าอุณหภูมิของน้ำขาเข้า-ขาออกเทียบกับเวลาของการทดลองต่อความร้อนแบบต่อเนื่อง โดยใช้สารทำงานเป็นเอทานอล ที่อุณหภูมิผิวท่อความร้อนเท่ากับ 85 องศาเซลเซียส



รูปที่ ข-9 ค่าอุณหภูมิของน้ำขาเข้า-ขาออกเทียบกับเวลาของการทดลองที่อุณหภูมิแบบต่อเนื่อง โดยใช้สารทำงานเป็นเอทานอล ที่อุณหภูมิผิวท่อความร้อนเท่ากับ 90 องศาเซลเซียส



รูปที่ ข-10 ค่าอุณหภูมิของน้ำขาเข้า-ขาออกเทียบกับเวลาของการทดลองที่อุณหภูมิแบบต่อเนื่อง โดยใช้สารทำงานเป็นเอทานอล ที่อุณหภูมิผิวท่อความร้อนเท่ากับ 95 องศาเซลเซียส

ในการทดลองนี้จะทำการวัดอุณหภูมิของน้ำ ทีละแนวองศาการวางของท่อ (ไม่ต่อเนื่อง) โดยทำการทดลองที่  $60^{\circ}\text{C}$ ,  $80^{\circ}\text{C}$ ,  $85^{\circ}\text{C}$ ,  $90^{\circ}\text{C}$  และ  $95^{\circ}\text{C}$  เพื่อนำไปคำนวณค่าอัตราการถ่ายโอนความร้อนต่อไป และในการทดลองนี้จะทำการทดสอบท่อทองแดงเปล่าที่  $80^{\circ}\text{C}$  เพื่อดูความแตกต่างระหว่างท่อทองแดงเปล่ากับท่อความร้อน

โดยแนวองศาการวางท่อนั้นจะประกอบด้วย  $-90^{\circ}$ ,  $-45^{\circ}$ ,  $0^{\circ}$ ,  $45^{\circ}$  และ  $90^{\circ}$  ซึ่งกำหนดให้ มุมองศาที่บอกค่าเป็นลบคือส่วนระเหยหรือส่วนที่ได้รับความร้อนจะอยู่ต่ำกว่าส่วนควบแน่น และในการทดสอบประสิทธิภาพท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องนี้จะใช้สารทำงาน 2 ชนิด คือ น้ำ และ เอทานอล

กำหนดให้  $H_{in}$  คือ อุณหภูมิที่ผิวท่อ  
 $C_{out}$  คือ อุณหภูมิน้ำเขาออก  
 $C_{in}$  คือ อุณหภูมิน้ำเขาเข้า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-11 ข้อมูลที่บันทึกได้ของท่อทองแดงเปล่า ที่อุณหภูมิ 60 °C

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
0	60	24	24
2	60	24	24
4	60	24	24
6	60	24	24
8	60	24	24
10	60	25	24
12	60	25	24
14	60	25	24
16	60	25	24
18	60	25	24

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
20	60	25	24
22	60	26	24
24	60	26	24
26	60	26	24
28	60	26	24
30	60	26	24
32	60	26	24
34	60	26	24
36	60	26	24

ตารางที่ ข-12 ข้อมูลที่บันทึกได้ของท่อทองแดงเปล่า ที่อุณหภูมิ 80 °C

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
0	80	24	24
2	80	24	24
4	80	24	24
6	80	25	24
8	80	25	24
10	80	25	24
12	80	26	24
14	80	26	24
16	80	26	24
18	80	26	24
20	80	27	24

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
22	80	27	24
24	80	27	24
26	80	27	24
28	80	28	24
30	80	28	24
32	80	28	24
34	80	28	24
36	80	28	24
38	80	28	24
40	80	28	24

ตารางที่ ข-13 ข้อมูลที่บันทึกได้ของท่อทองแดงเปล่า ที่อุณหภูมิ 85 °C

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
0	85	24	24
2	85	24	24
4	85	24	24
6	85	25	24
8	85	25	24
10	85	26	24
12	85	26	24
14	85	26	24
16	85	26	24

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
18	85	27	24
20	85	27	24
22	85	27	24
24	85	28	24
26	85	28	24
28	85	28	24
30	85	28	24
32	85	28	24

ตารางที่ ข-14 ข้อมูลที่บันทึกได้ของท่อทองแดงเปล่า ที่อุณหภูมิ 90 °C

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
0	90	24	24
2	90	24	24
4	90	25	24
6	90	25	24
8	90	26	24
10	90	26	24
12	90	26	24
14	90	27	24
16	90	27	24

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
18	90	27	24
20	90	28	24
22	90	28	24
24	90	29	24
26	90	29	24
28	90	29	24
30	90	29	24
32	90	29	24

ตารางที่ ข-15 ข้อมูลที่บันทึกได้ของท่อทองแดงเปล่า ที่อุณหภูมิ 95 °C

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
0	95	24	24
2	95	24	24
4	95	25	24
6	95	25	24
8	95	26	24
10	95	26	24
12	95	27	24
14	95	27	24
16	95	27	24

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
18	95	28	24
20	95	28	24
22	95	29	24
24	95	29	24
26	95	29	24
28	95	30	24
30	95	30	24
32	95	30	24
34	95	30	24

ตารางที่ ข-16 ข้อมูลที่บันทึกได้ของท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 60 °C โดยสารทำงานที่ใช้ คือ น้ำ และแนวองศาการวางท่อเท่ากับ -90°

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
0	60	23	23
2	60	24	23
4	60	24	23
6	60	24	23
8	60	25	23
10	60	25	23
12	60	26	23
14	60	26	23

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
16	60	27	23
18	60	28	23
20	60	28	23
22	60	29	23
24	60	29	23
26	60	29	23
28	60	29	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ 60 ฉบับไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-17 ข้อมูลที่บันทึกได้ของท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 60 °C โดยสารทำงานที่ใช้ คือ น้ำ และแนวองศาการวางท่อเท่ากับ -45°

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
0	60	23	23
2	60	24	23
4	60	24	23
6	60	24	23
8	60	25	23
10	60	25	23
12	60	25	23
14	60	26	23
16	60	26	23

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
18	60	27	23
20	60	27	23
22	60	28	23
24	60	28	23
26	60	28	23
28	60	28	23
30	60	28	23
32	60	28	23

ตารางที่ ข-18 ข้อมูลที่บันทึกได้ของท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 60 °C โดยสารทำงานที่ใช้ คือ น้ำ และแนวองศาการวางท่อเท่ากับ 0°

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
0	60	23	23
2	60	23	23
4	60	24	23
6	60	24	23
8	60	24	23
10	60	25	23
12	60	25	23
14	60	25	23
16	60	26	23
18	60	26	23

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
20	60	26	23
22	60	26	23
24	60	27	23
26	60	27	23
28	60	27	23
30	60	27	23
32	60	27	23
34	60	27	23
36	60	27	23
38	60	27	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ 60 น 16 ค 25 รับการรับรองเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-19 ข้อมูลที่บันทึกได้ของท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 60 °C โดยสารทำงานที่ใช้ คือ น้ำ และแนวองศาการวางท่อเท่ากับ 45°

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
0	60	23	23
2	60	23	23
4	60	23	23
6	60	24	23
8	60	24	23
10	60	25	23
12	60	25	23
14	60	25	23
16	60	25	23

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
18	60	25	23
20	60	26	23
22	60	26	23
24	60	26	23
26	60	26	23
28	60	26	23
30	60	26	23
32	60	26	23

ตารางที่ ข-20 ข้อมูลที่บันทึกได้ของท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 60 °C โดยสารทำงานที่ใช้ คือ น้ำ และแนวองศาการวางท่อเท่ากับ 90°

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
0	60	24	24
2	60	24	24
4	60	25	24
6	60	25	24
8	60	25	24
10	60	25	24
12	60	25	24
14	60	26	24
16	60	26	24
18	60	26	24

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
20	60	26	24
22	60	26	24
24	60	26	24
26	60	27	24
28	60	27	24
30	60	27	24
32	60	27	24
34	60	27	24
36	60	27	24

ตารางที่ ข-21 ข้อมูลที่บันทึกได้ของท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 80 °C โดยสารทำงานที่ใช้ คือ น้ำ และแวนวงศาการวางท่อเท่ากับ -90°

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
0	80	25	25
2	80	26	25
4	80	27	25
6	80	28	25
8	80	29	25
10	80	29	25
12	80	29	25
14	80	30	25
16	80	30	25
18	80	31	25
20	80	31	25

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
22	80	32	25
24	80	32	25
26	80	33	25
28	80	33	25
30	80	33	25
32	80	34	25
34	80	34	25
36	80	34	25
38	80	34	25
40	80	34	25

ตารางที่ ข-22 ข้อมูลที่บันทึกได้ของท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 80 °C โดยสารทำงานที่ใช้ คือ น้ำ และแวนวงศาการวางท่อเท่ากับ -45°

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
0	80	25	25
2	80	26	25
4	80	27	25
6	80	28	25
8	80	29	25
10	80	29	25
12	80	29	25
14	80	30	25

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
16	80	30	25
18	80	31	25
20	80	31	25
22	80	32	25
24	80	32	25
26	80	33	25
28	80	33	25
30	80	33	25

ตารางที่ ข-23 ข้อมูลที่บันทึกได้ของท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 80 °C โดยสารทำงานที่ใช้ คือ น้ำ และแนวองศาการวางท่อเท่ากับ 0°

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
0	80	25	25
2	80	26	25
4	80	27	25
6	80	28	25
8	80	29	25
10	80	29	25
12	80	29	25
14	80	29	25

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
16	80	30	25
18	80	30	25
20	80	30	25
22	80	31	25
24	80	31	25
26	80	31	25
28	80	31	25
30	80	31	25

ตารางที่ ข-24 ข้อมูลที่บันทึกได้ของท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 80 °C โดยสารทำงานที่ใช้ คือ น้ำ และแนวองศาการวางท่อเท่ากับ 45°

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
0	80	25	25
2	80	26	25
4	80	27	25
6	80	28	25
8	80	29	25
10	80	29	25
12	80	29	25
14	80	29	25

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
16	80	30	25
18	80	30	25
20	80	30	25
22	80	30	25
24	80	30	25
26	80	30	25
28	80	30	25
30	80	30	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-25 ข้อมูลที่บันทึกได้ของท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 80 °C โดยสารทำงานที่ใช้ คือ น้ำ และแนวองศาการวางท่อเท่ากับ 90°

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
0	80	25	25
2	80	26	25
4	80	26	25
6	80	26	25
8	80	27	25
10	80	27	25
12	80	27	25
14	80	27	25

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
16	80	28	25
18	80	28	25
20	80	29	25
22	80	29	25
24	80	29	25
26	80	29	25
28	80	29	25
30	80	29	25

ตารางที่ ข-26 ข้อมูลที่บันทึกได้ของท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 85 °C โดยสารทำงานที่ใช้ คือ น้ำ และแนวองศาการวางท่อเท่ากับ 90°

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
0	85	24	24
2	85	26	24
4	85	27	24
6	85	28	24
8	85	29	24
10	85	30	24
12	85	31	24
14	85	31	24
16	85	32	24
18	85	32	24

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
20	85	32	24
22	85	33	24
24	85	33	24
26	85	34	24
28	85	34	24
30	85	34	24
32	85	34	24
34	85	34	24
36	85	34	24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่บันทึกไว้สำหรับงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-27 ข้อมูลที่บันทึกได้ของท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 85 °C โดยสารทำงานที่ใช้ คือ น้ำ และแนวองศาการวางท่อเท่ากับ -45°

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
0	85	24	24
2	85	25	24
4	85	26	24
6	85	27	24
8	85	28	24
10	85	29	24
12	85	29	24
14	85	30	24
16	85	30	24
18	85	30	24
20	85	31	24

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
22	85	31	24
24	85	31	24
26	85	32	24
28	85	32	24
30	85	32	24
32	85	33	24
34	85	33	24
36	85	33	24
38	85	33	24
40	85	33	24

ตารางที่ ข-28 ข้อมูลที่บันทึกได้ของท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 85 °C โดยสารทำงานที่ใช้ คือ น้ำ และแนวองศาการวางท่อเท่ากับ 0°

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
0	85	24	24
2	85	25	24
4	85	26	24
6	85	27	24
8	85	27	24
10	85	28	24
12	85	28	24
14	85	29	24

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
16	85	29	24
18	85	30	24
20	85	30	24
22	85	30	24
24	85	31	24
26	85	31	24
28	85	31	24
30	85	31	24

เอกสารนี้เป็นสารที่ 85 วานไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุยอคใให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ก็ตาม อี อั้งห้ามมิให้คัดแปลงเพื่อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-29 ข้อมูลที่บันทึกได้ของท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 85 °C โดยสารทำงานที่ใช้ คือ น้ำ และแนวองศาการวางท่อเท่ากับ 45°

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
0	85	24	24
2	85	25	24
4	85	25	24
6	85	26	24
8	85	26	24
10	85	27	24
12	85	27	24
14	85	27	24

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
16	85	28	24
18	85	28	24
20	85	28	24
22	85	29	24
24	85	29	24
26	85	29	24
28	85	29	24
30	85	29	24

ตารางที่ ข-30 ข้อมูลที่บันทึกได้ของท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 85 °C โดยสารทำงานที่ใช้ คือ น้ำ และแนวองศาการวางท่อเท่ากับ 90°

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
0	85	24	24
2	85	25	24
4	85	25	24
6	85	26	24
8	85	26	24
10	85	27	24
12	85	27	24
14	85	27	24

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
16	85	27	24
18	85	28	24
20	85	28	24
22	85	28	24
24	85	28	24
26	85	28	24
28	85	28	24
30	85	28	24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-31 ข้อมูลที่บันทึกได้ของท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 90 °C โดยสารทำงานที่ใช้ คือ น้ำ และเนวองศาการวางท่อเท่ากับ -90°

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
0	90	24	24
2	90	26	24
4	90	27	24
6	90	28	24
8	90	29	24
10	90	30	24
12	90	31	24
14	90	32	24
16	90	32	24
18	90	33	24

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
20	90	33	24
22	90	34	24
24	90	34	24
26	90	34	24
28	90	35	24
30	90	35	24
32	90	35	24
34	90	35	24
36	90	35	24

ตารางที่ ข-32 ข้อมูลที่บันทึกได้ของท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 90 °C โดยสารทำงานที่ใช้ คือ น้ำ และเนวองศาการวางท่อเท่ากับ -45°

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
0	90	24	24
2	90	25	24
4	90	26	24
6	90	27	24
8	90	28	24
10	90	29	24
12	90	30	24
14	90	31	24
16	90	31	24
18	90	32	24

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
20	90	32	24
22	90	33	24
24	90	33	24
26	90	33	24
28	90	34	24
30	90	34	24
32	90	34	24
34	90	34	24
36	90	34	24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-33 ข้อมูลที่บันทึกได้ของท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 90 °C โดยสารทำงานที่ใช้ คือ น้ำ และแนวองศาการวางท่อเท่ากับ 0°

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
0	90	24	24
2	90	25	24
4	90	26	24
6	90	27	24
8	90	28	24
10	90	28	24
12	90	29	24
14	90	29	24
16	90	30	24
18	90	30	24

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
20	90	30	24
22	90	31	24
24	90	31	24
26	90	31	24
28	90	32	24
30	90	32	24
32	90	32	24
34	90	32	24
36	90	32	24
38	90	32	24

ตารางที่ ข-34 ข้อมูลที่บันทึกได้ของท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 90 °C โดยสารทำงานที่ใช้ คือ น้ำ และแนวองศาการวางท่อเท่ากับ 45°

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
0	90	24	24
2	90	25	24
4	90	25	24
6	90	26	24
8	90	26	24
10	90	27	24
12	90	27	24
14	90	27	24

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
16	90	28	24
18	90	28	24
20	90	28	24
22	90	29	24
24	90	29	24
26	90	29	24
28	90	29	24
30	90	29	24

เอกสารนี้เป็นสารที่ 90 น 14 27 รับการจ้างงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างถึงที่มาของเอกสารทุกครั้งที่มีโอกาสไปใช้

ตารางที่ ข-35 ข้อมูลที่บันทึกได้ของท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 90 °C โดยสารทำงานที่ใช้ คือ น้ำ และแวนวงศาการวางท่อเท่ากับ 90°

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
0	90	24	24
2	90	24	24
4	90	25	24
6	90	25	24
8	90	25	24
10	90	26	24
12	90	26	24
14	90	26	24

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
16	90	27	24
18	90	27	24
20	90	27	24
22	90	28	24
24	90	28	24
26	90	28	24
28	90	28	24
30	90	28	24

ตารางที่ ข-36 ข้อมูลที่บันทึกได้ของท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 95 °C โดยสารทำงานที่ใช้ คือ น้ำ และแวนวงศาการวางท่อเท่ากับ 90°

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
0	95	25	25
2	95	27	25
4	95	28	25
6	95	29	25
8	95	30	25
10	95	32	25
12	95	33	25
14	95	34	25
16	95	35	25
18	95	36	25

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
20	95	36	25
22	95	37	25
24	95	37	25
26	95	37	25
28	95	38	25
30	95	38	25
32	95	38	25
34	95	38	25
36	95	38	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นไว้สำหรับใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-37 ข้อมูลที่บันทึกได้ของท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 95 °C โดยสารทำงานที่ใช้ คือ น้ำ และแนวองศาการวางท่อเท่ากับ -45°

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
0	95	25	25
2	95	27	25
4	95	28	25
6	95	29	25
8	95	30	25
10	95	31	25
12	95	32	25
14	95	33	25
16	95	33	25

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
18	95	34	25
20	95	34	25
22	95	34	25
24	95	35	25
26	95	35	25
28	95	35	25
30	95	35	25
32	95	35	25
34	95	35	25

ตารางที่ ข-38 ข้อมูลที่บันทึกได้ของท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 95 °C โดยสารทำงานที่ใช้ คือ น้ำ และแนวองศาการวางท่อเท่ากับ 0°

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
0	95	25	25
2	95	26	25
4	95	27	25
6	95	28	25
8	95	29	25
10	95	30	25
12	95	30	25
14	95	31	25

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
16	95	32	25
18	95	32	25
20	95	32	25
22	95	33	25
24	95	33	25
26	95	33	25
28	95	33	25
30	95	33	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-39 ข้อมูลที่บันทึกได้ของท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 95 °C โดยสารทำงานที่ใช้ คือ น้ำ และแนวองศาการวางท่อเท่ากับ 45°

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
0	95	25	25
2	95	26	25
4	95	26	25
6	95	27	25
8	95	28	25
10	95	28	25
12	95	29	25
14	95	29	25

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
16	95	30	25
18	95	30	25
20	95	30	25
22	95	31	25
24	95	31	25
26	95	31	25
28	95	31	25
30	95	31	25

ตารางที่ ข-40 ข้อมูลที่บันทึกได้ของท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 95 °C โดยสารทำงานที่ใช้ คือ น้ำ และแนวองศาการวางท่อเท่ากับ 90°

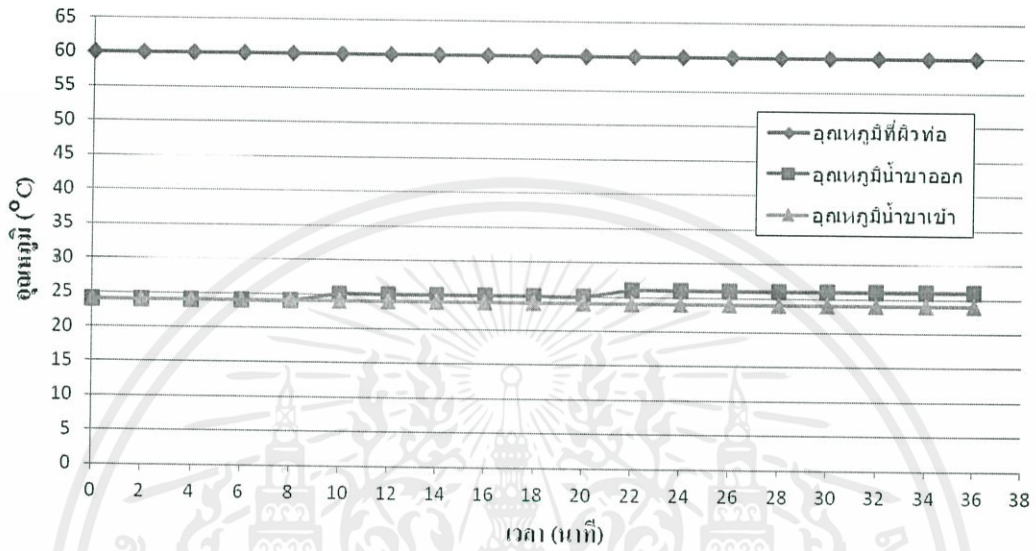
เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
0	95	25	25
2	95	25	25
4	95	26	25
6	95	26	25
8	95	27	25
10	95	27	25
12	95	28	25
14	95	28	25
16	95	28	25

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
18	95	29	25
20	95	29	25
22	95	29	25
24	95	30	25
26	95	30	25
28	95	30	25
30	95	30	25
32	95	30	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ 95 ว น 1 28 รั บ ก 25 ้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

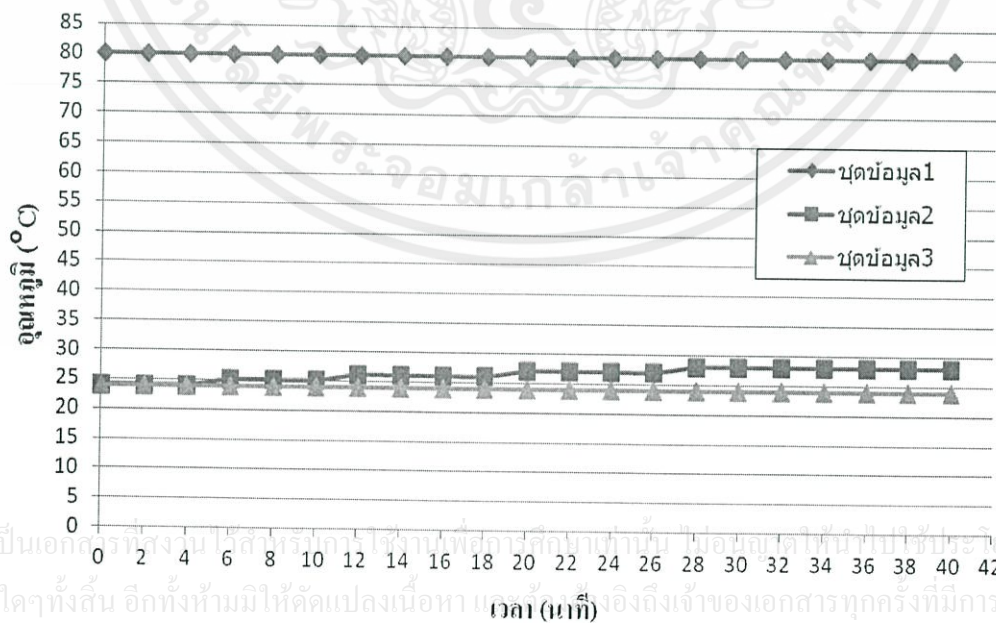
จากข้อมูลในตารางที่ ข-11 ถึงตารางที่ ข-40 สามารถนำมาพลอตกราฟผลการบันทึก อุณหภูมิน้ำและอุณหภูมิที่ผิวของท่อที่เวลาต่างๆ ได้ดังรูปที่ ข-11 ถึง รูปที่ ข-40 ตามลำดับ

- ท่อทองแดงเปล่าที่อุณหภูมิ 60 °C



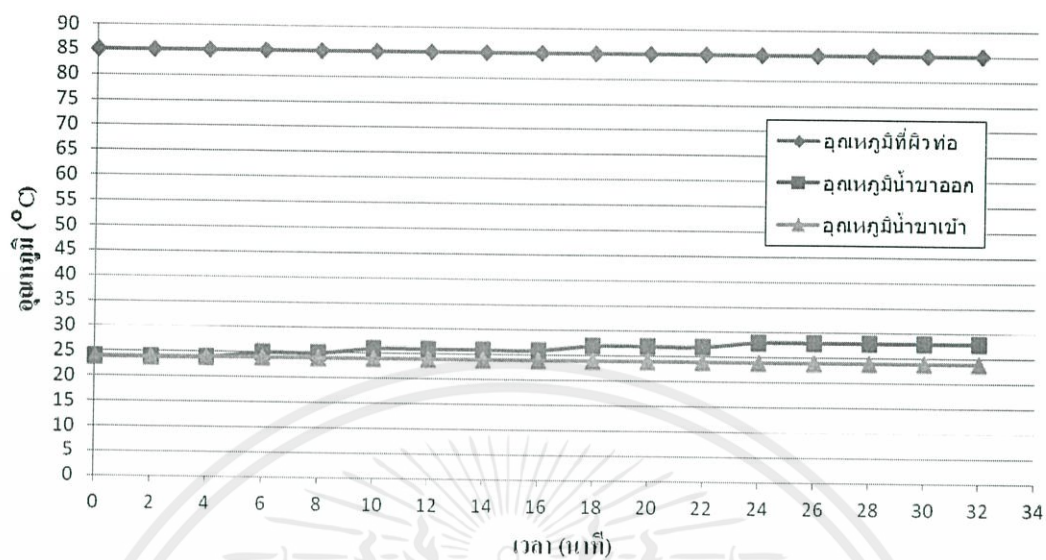
รูปที่ ข-11 ผลการบันทึกข้อมูลของท่อทองแดงเปล่าที่อุณหภูมิ 60 °C

- ท่อทองแดงเปล่าที่อุณหภูมิ 80 °C



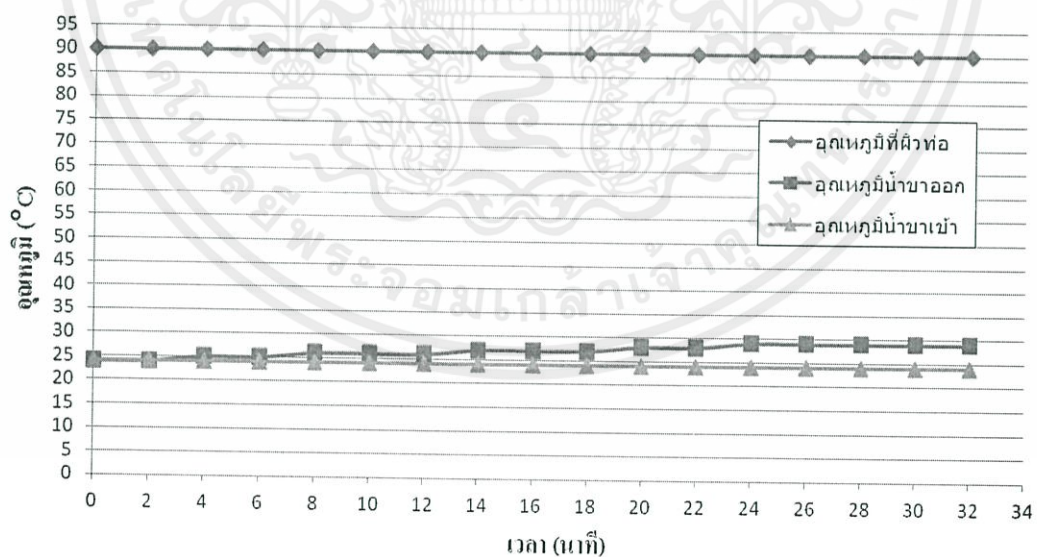
รูปที่ ข-12 ผลการบันทึกข้อมูลของท่อทองแดงเปล่าที่อุณหภูมิ 80 °C

- ท่อทองแดงเปล่าที่อุณหภูมิ 85 °C



รูปที่ ข-13 ผลการบันทึกข้อมูลของท่อทองแดงเปล่าที่อุณหภูมิ 85 °C

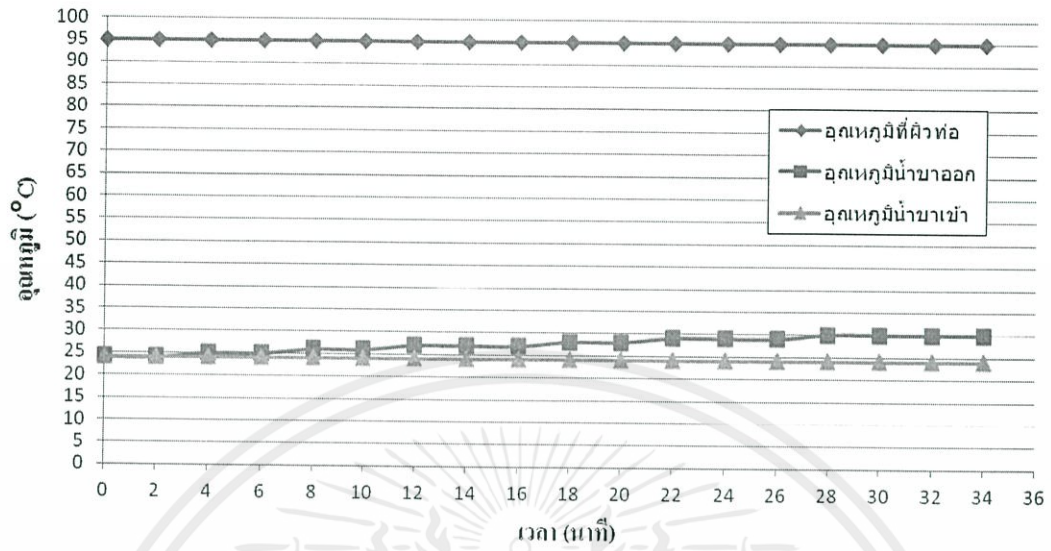
- ท่อทองแดงเปล่าที่อุณหภูมิ 90 °C



รูปที่ ข-14 ผลการบันทึกข้อมูลของท่อทองแดงเปล่าที่อุณหภูมิ 90 °C

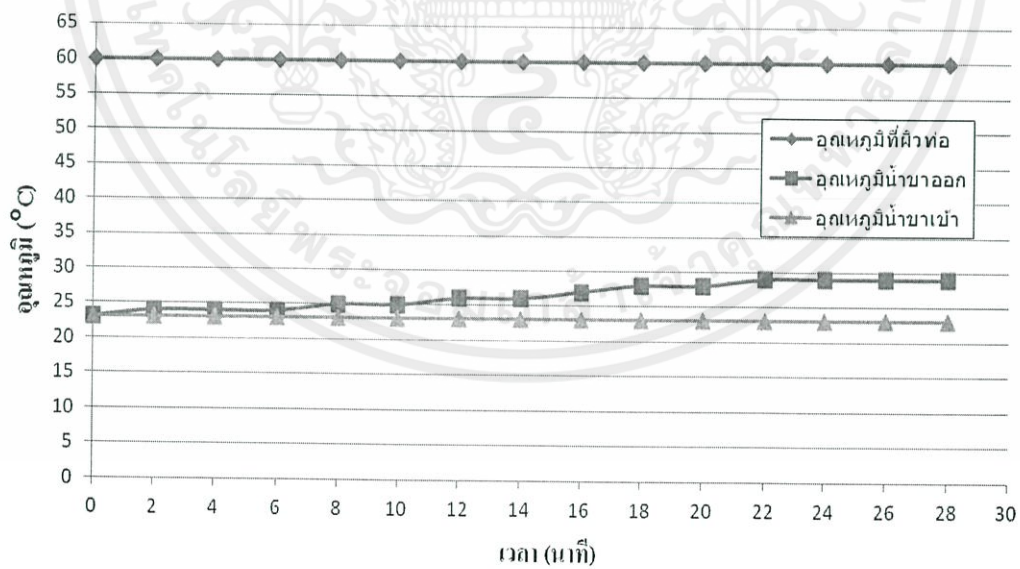
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ท่อทองแดงเปล่าที่อุณหภูมิ 95 °C

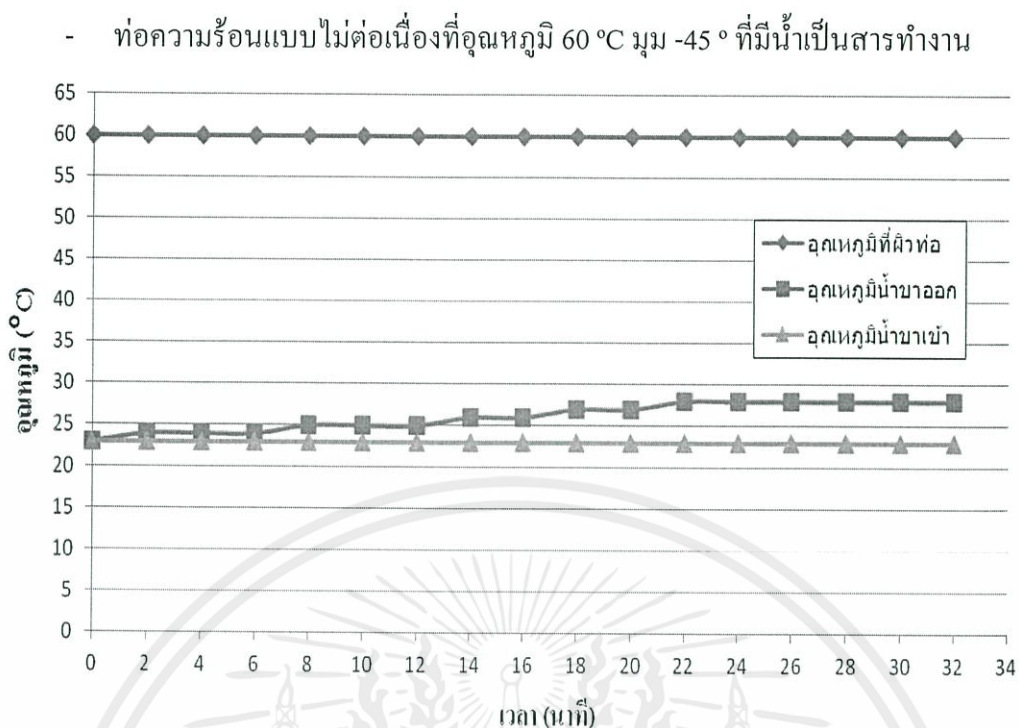


รูปที่ ข-15 ผลการบันทึกข้อมูลของท่อทองแดงเปล่าที่อุณหภูมิ 90 °C

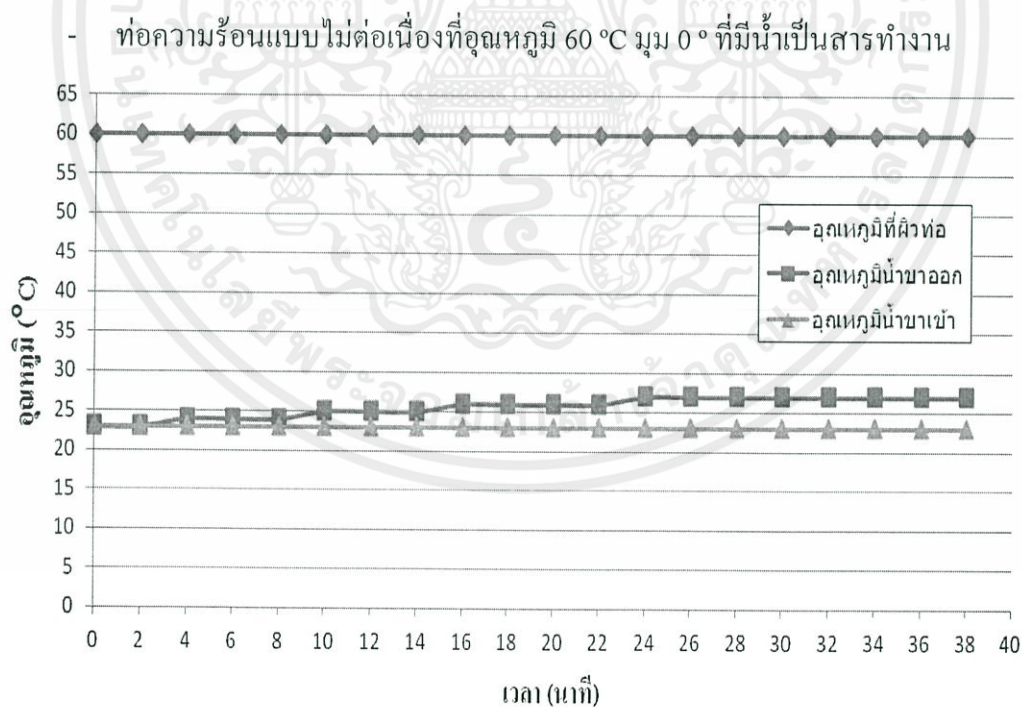
- ท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 60 °C มุม -90° ที่มีน้ำเป็นสารทำงาน



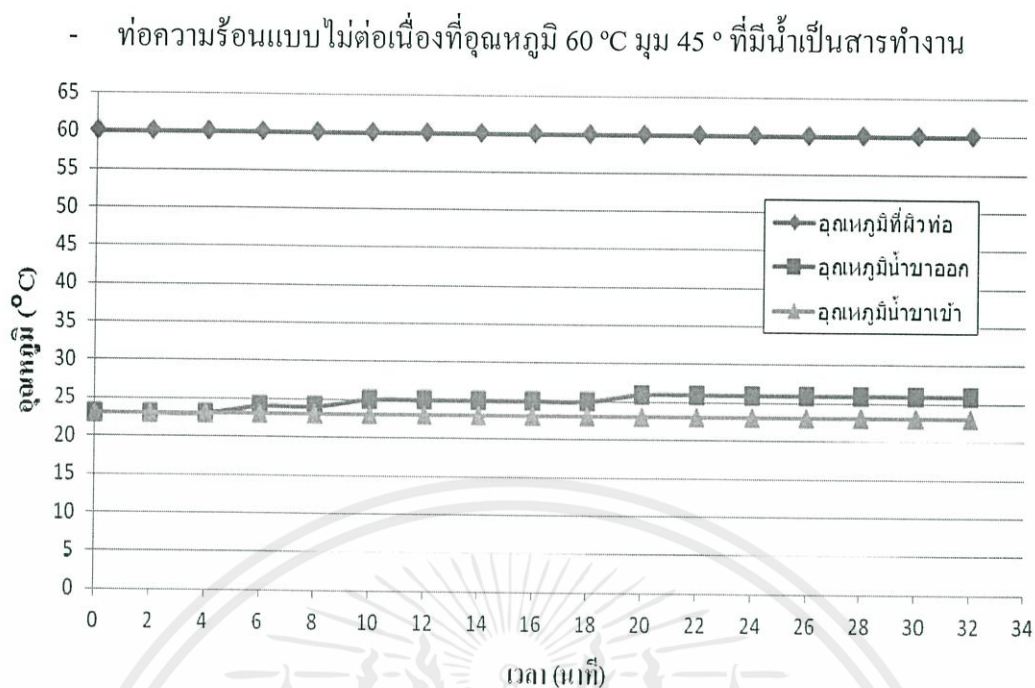
รูปที่ ข-16 ค่าอุณหภูมิของน้ำขาเข้า-ขาออกเทียบกับเวลาของการทดลองท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่อง โดยใช้สารทำงานเป็นน้ำ ที่แนวองศาการวางเท่ากับ -90 องศา อุณหภูมิที่ผิวท่อความร้อนเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส



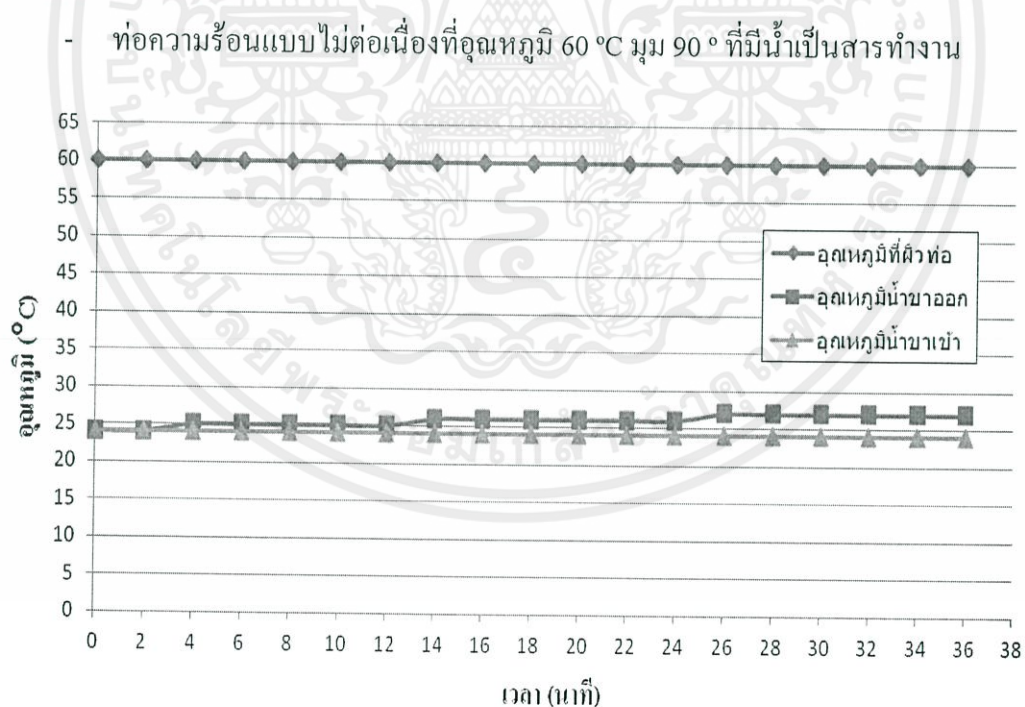
รูปที่ ข-17 ค่าอุณหภูมิของน้ำขาเข้า-ขาออกเทียบกับเวลาของการทดลองท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องโดยใช้สารทำงานเป็นน้ำ ที่แนวองศาการวางเท่ากับ -45 องศา อุณหภูมิที่ผิวท่อความร้อนเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส



รูปที่ ข-18 ค่าอุณหภูมิของน้ำขาเข้า-ขาออกเทียบกับเวลาของการทดลองท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องโดยใช้สารทำงานเป็นน้ำ ที่แนวองศาการวางเท่ากับ 0 องศา อุณหภูมิที่ผิวท่อความร้อนเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส

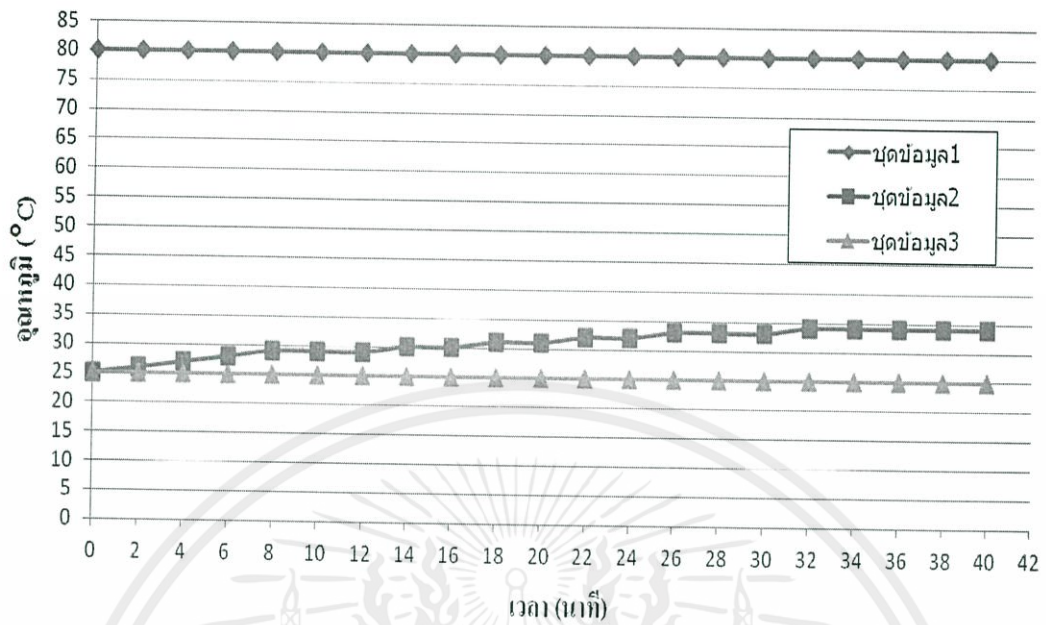


**รูปที่ ข-19** ค่าอุณหภูมิของน้ำขาเข้า-ขาออกเทียบกับเวลาของการทดลองท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องโดยใช้สารทำงานเป็นน้ำ ที่แนวองศาการวางเท่ากับ 45 องศา อุณหภูมิที่ผิวท่อความร้อนเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส



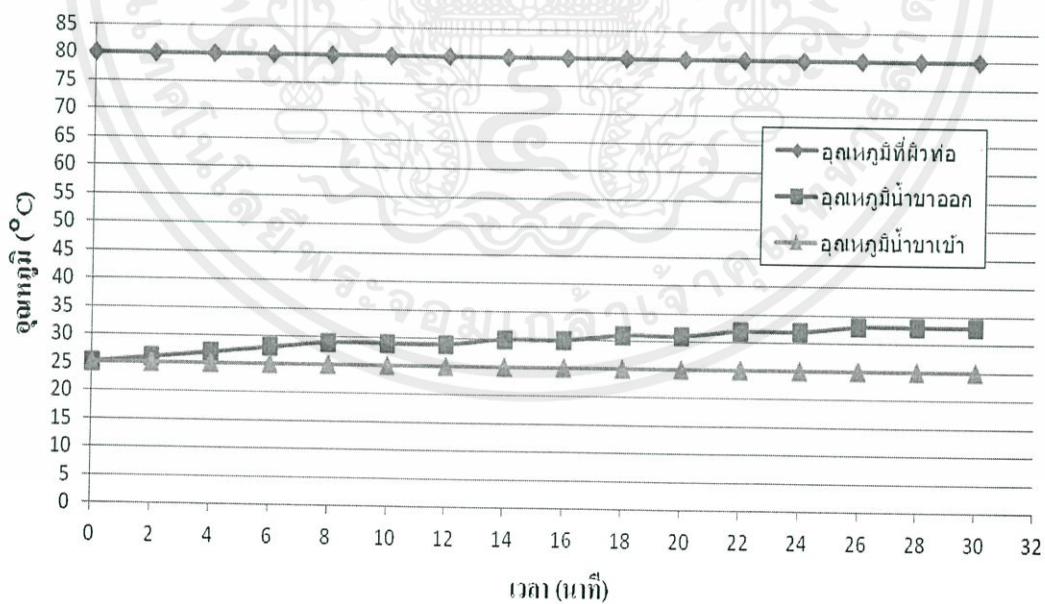
**รูปที่ ข-20** ผลค่าอุณหภูมิของน้ำขาเข้า-ขาออกเทียบกับเวลาของการทดลองท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องโดยใช้สารทำงานเป็นน้ำ ที่แนวองศาการวางเท่ากับ 90 องศา อุณหภูมิที่ผิวท่อความร้อนเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส

- ท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 80 °C มุม -90 ° ที่มีน้ำเป็นสารทำงาน



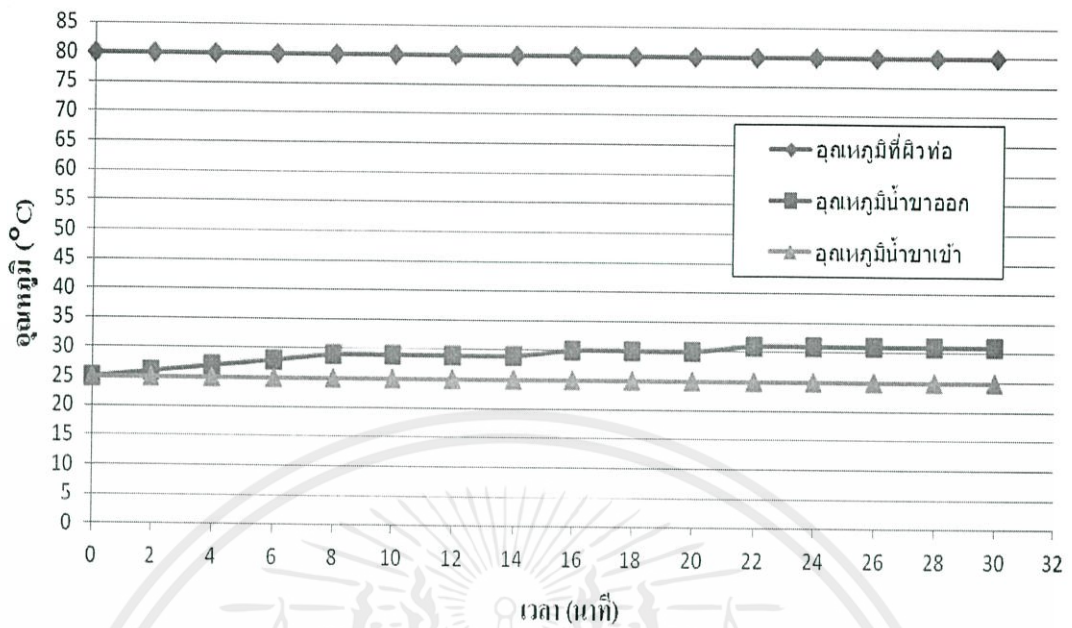
**รูปที่ ข-21** ค่าอุณหภูมิของน้ำขาเข้า-ขาออกเทียบกับเวลาของการทดลองท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องโดยใช้สารทำงานเป็นน้ำ ที่แนวองศาการวางเท่ากับ -90 องศา อุณหภูมิที่ผิวท่อความร้อนเท่ากับ 80 องศาเซลเซียส

- ท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 80 °C มุม -45 ° ที่มีน้ำเป็นสารทำงาน



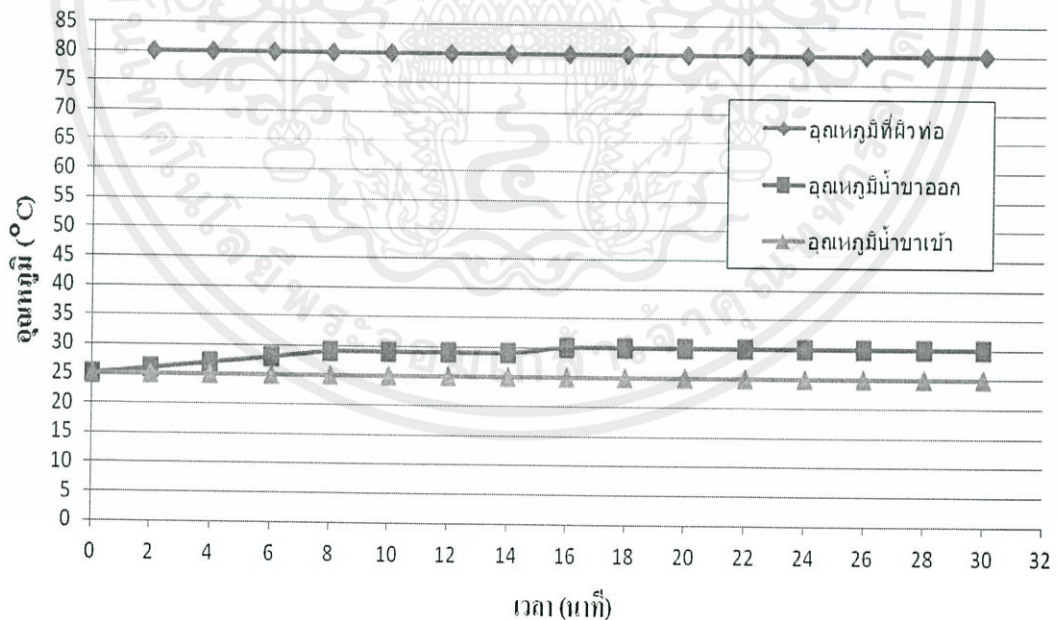
**รูปที่ ข-22** ค่าอุณหภูมิของน้ำขาเข้า-ขาออกเทียบกับเวลาของการทดลองท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องโดยใช้สารทำงานเป็นน้ำ ที่แนวองศาการวางเท่ากับ -45 องศา อุณหภูมิที่ผิวท่อความร้อนเท่ากับ 80 องศาเซลเซียส

- ท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 80 °C มุม 0 ° ที่มีน้ำเป็นสารทำงาน



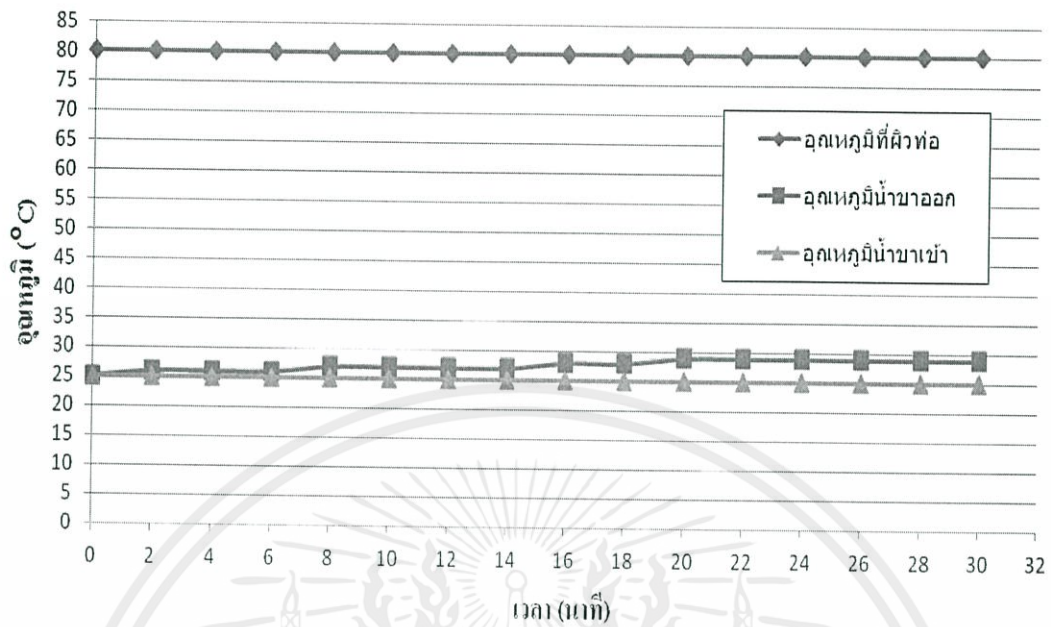
รูปที่ ข-23 ค่าอุณหภูมิของน้ำขาเข้า-ขาออกเทียบกับเวลาของการทดลองท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องโดยใช้สารทำงานเป็นน้ำ ที่แนวองศาการวางเท่ากับ 0 องศา อุณหภูมิที่ผิวท่อความร้อนเท่ากับ 80 องศาเซลเซียส

- ท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 80 °C มุม 45 ° ที่มีน้ำเป็นสารทำงาน



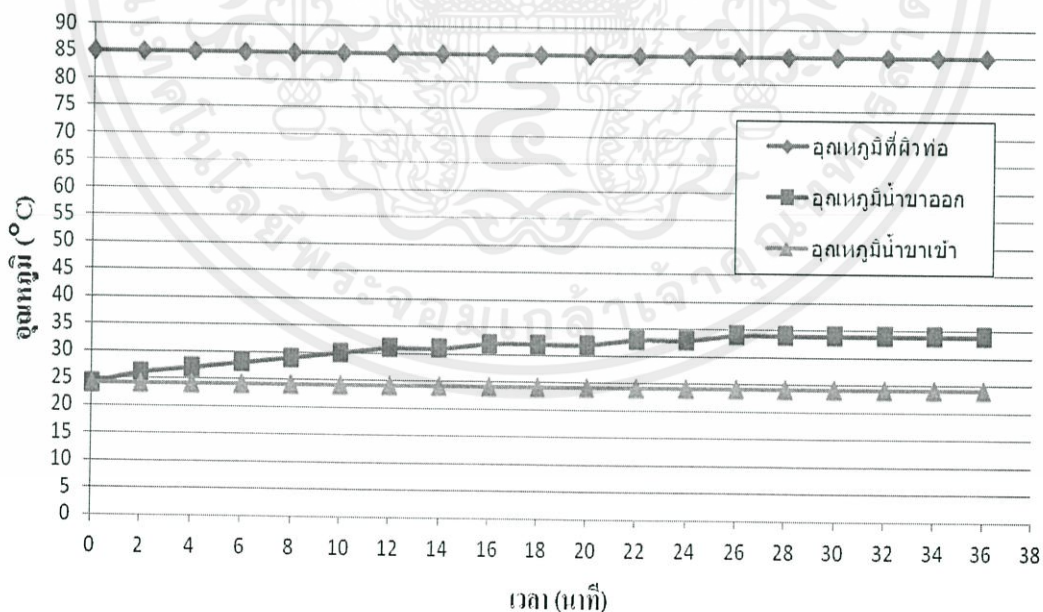
รูปที่ ข-24 ค่าอุณหภูมิของน้ำขาเข้า-ขาออกเทียบกับเวลาของการทดลองท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องโดยใช้สารทำงานเป็นน้ำ ที่แนวองศาการวางเท่ากับ 45 องศา อุณหภูมิที่ผิวท่อความร้อนเท่ากับ 80 องศาเซลเซียส

- ท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 80 °C มุม 90 ° ที่มีน้ำเป็นสารทำงาน



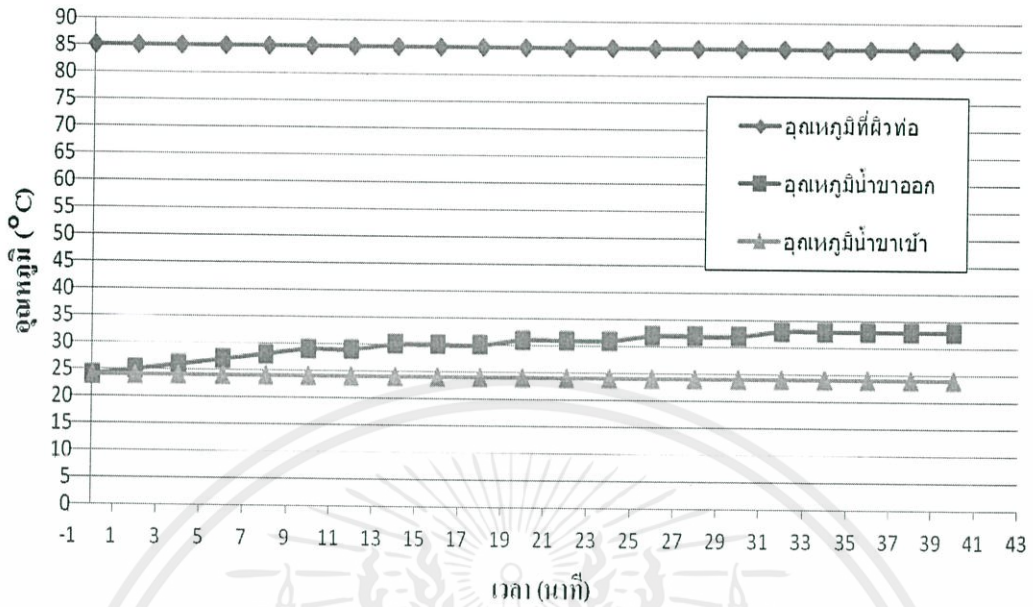
**รูปที่ ข-25** ค่าอุณหภูมิของน้ำขาเข้า-ขาออกเทียบกับเวลาของการทดลองท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องโดยใช้สารทำงานเป็นน้ำ ที่แนวองศาการวางเท่ากับ 90 องศา อุณหภูมิที่ผิวท่อความร้อนเท่ากับ 80 องศาเซลเซียส

- ท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 85 °C มุม -90 ° ที่มีน้ำเป็นสารทำงาน



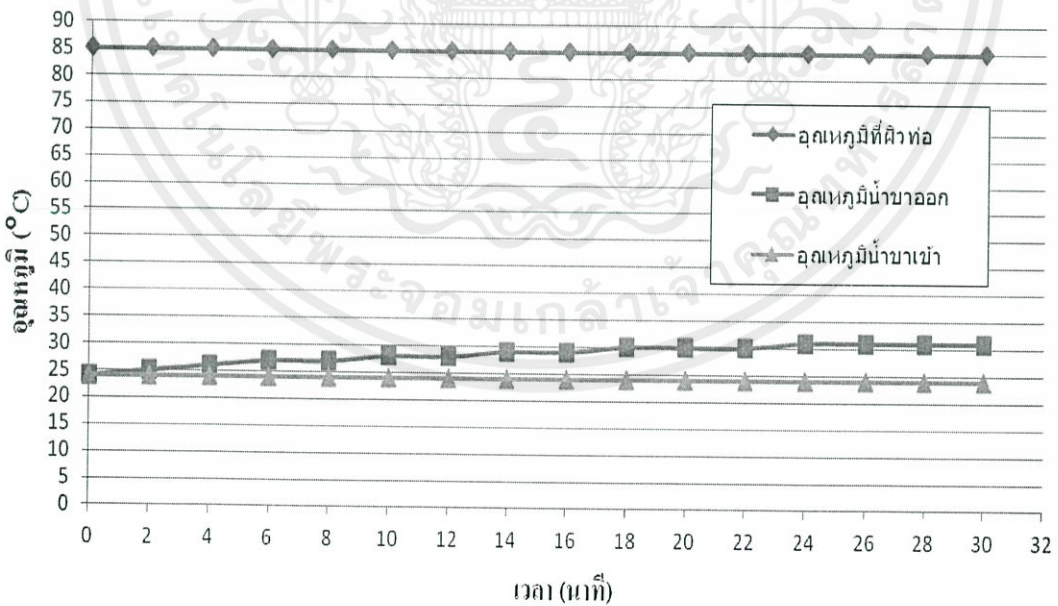
**รูปที่ ข-26** ค่าอุณหภูมิของน้ำขาเข้า-ขาออกเทียบกับเวลาของการทดลองท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องโดยใช้สารทำงานเป็นน้ำ ที่แนวองศาการวางเท่ากับ -90 องศา อุณหภูมิที่ผิวท่อความร้อนเท่ากับ 85 องศาเซลเซียส

- ท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 85 °C มุม -45 ° ที่มีน้ำเป็นสารทำงาน



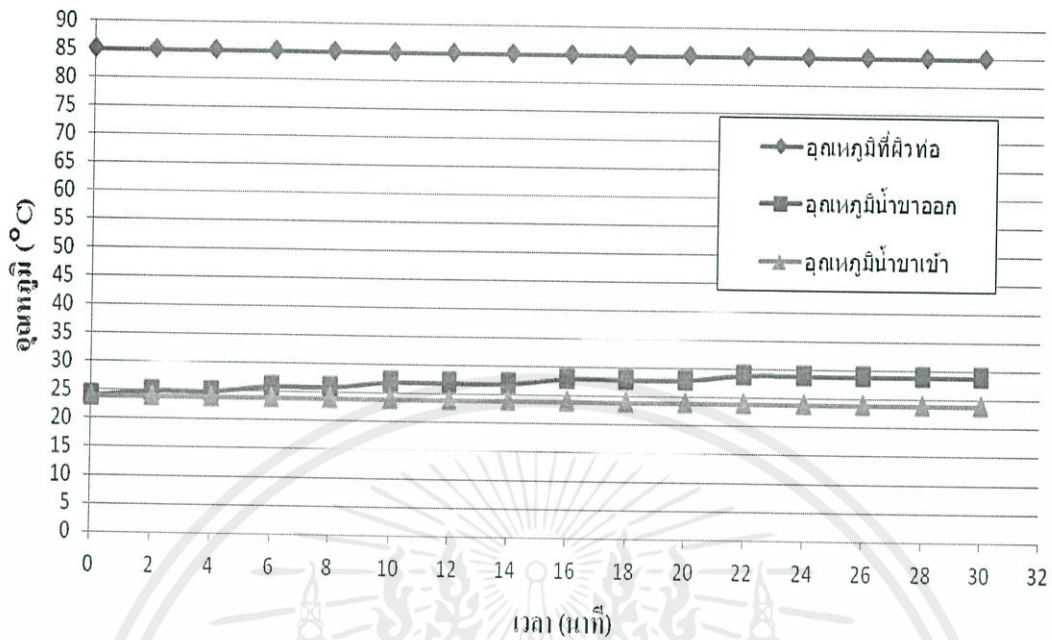
รูปที่ ข-27 ค่าอุณหภูมิของน้ำขาเข้า-ขาออกเทียบกับเวลาของการทดลองท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องโดยใช้สารทำงานเป็นน้ำ ที่แนวองศาการวางเท่ากับ -45 องศา อุณหภูมิที่ผิวท่อความร้อนเท่ากับ 85 องศาเซลเซียส

- ท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 85 °C มุม 0 ° ที่มีน้ำเป็นสารทำงาน



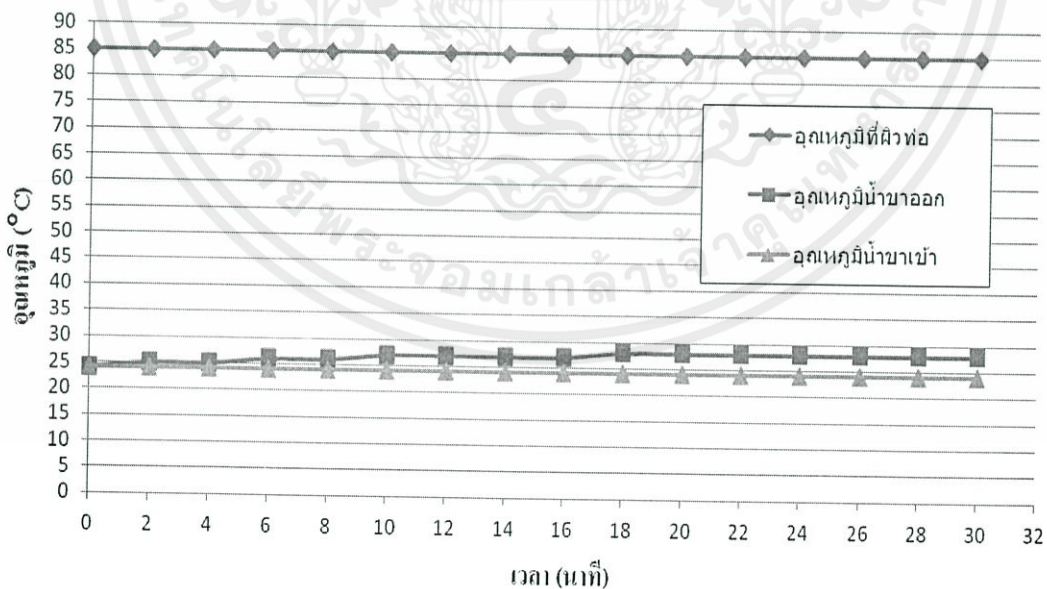
รูปที่ ข-28 ค่าอุณหภูมิของน้ำขาเข้า-ขาออกเทียบกับเวลาของการทดลองท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องโดยใช้สารทำงานเป็นน้ำ ที่แนวองศาการวางเท่ากับ 0 องศา อุณหภูมิที่ผิวท่อความร้อนเท่ากับ 85 องศาเซลเซียส

- ท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 85 °C มุม 45 ° ที่มีน้ำเป็นสารทำงาน



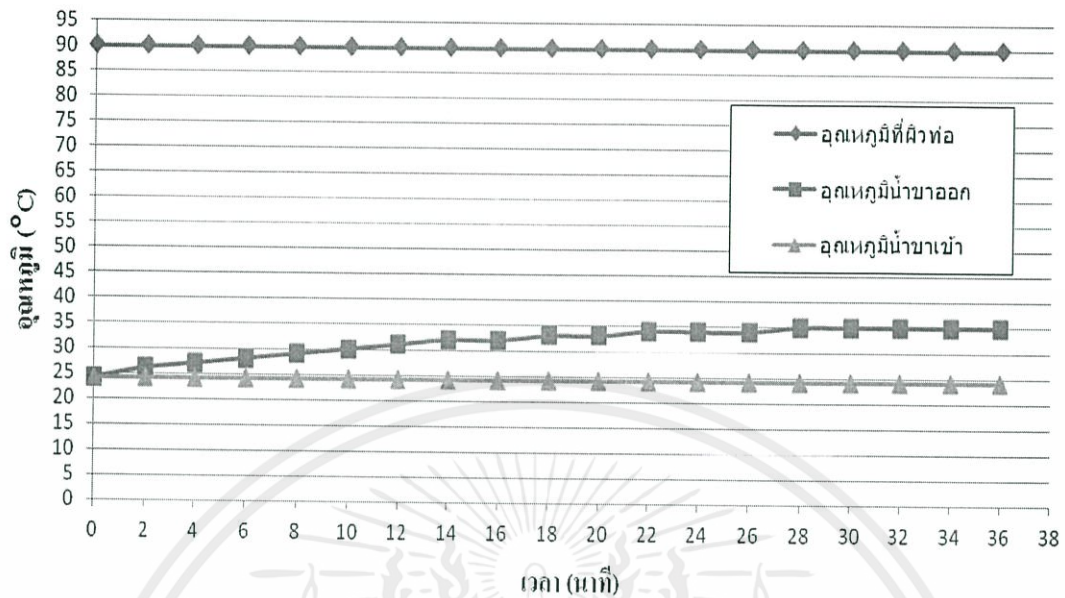
รูปที่ ข-29 ค่าอุณหภูมิของน้ำขาเข้า-ขาออกเทียบกับเวลาของการทดลองท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องโดยใช้สารทำงานเป็นน้ำ ที่แนวองศาการวางเท่ากับ 45 องศา อุณหภูมิที่ผิวท่อความร้อนเท่ากับ 85 องศาเซลเซียส

- ท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 85 °C มุม 90 ° ที่มีน้ำเป็นสารทำงาน



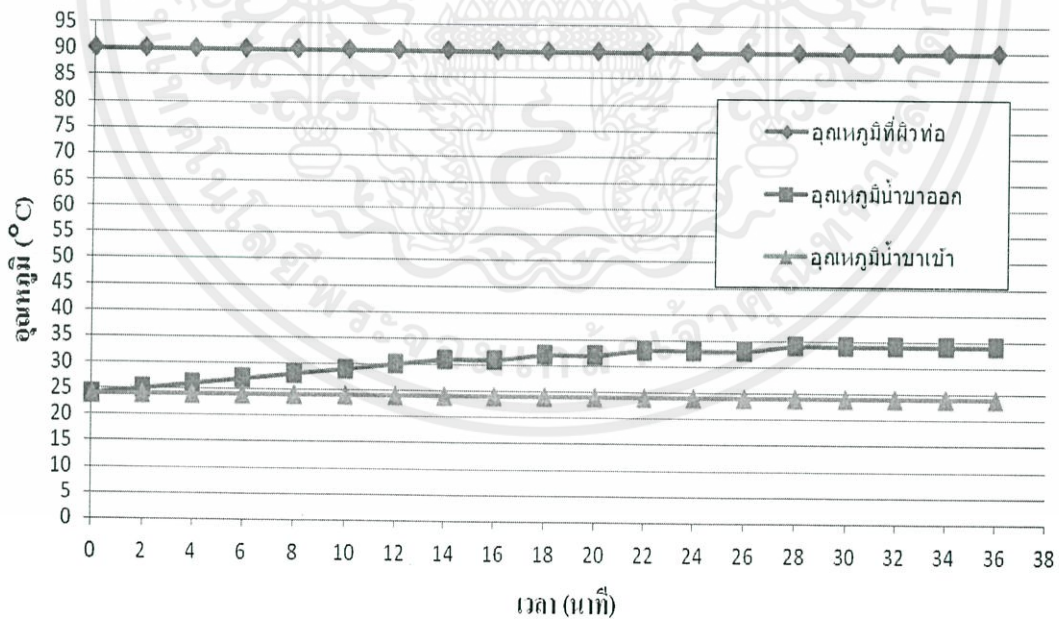
รูปที่ ข-30 ค่าอุณหภูมิของน้ำขาเข้า-ขาออกเทียบกับเวลาของการทดลองท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องโดยใช้สารทำงานเป็นน้ำ ที่แนวองศาการวางเท่ากับ 90 องศา อุณหภูมิที่ผิวท่อความร้อนเท่ากับ 85 องศาเซลเซียส

- ท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 90 °C มุม -90 ° ที่มีน้ำเป็นสารทำงาน



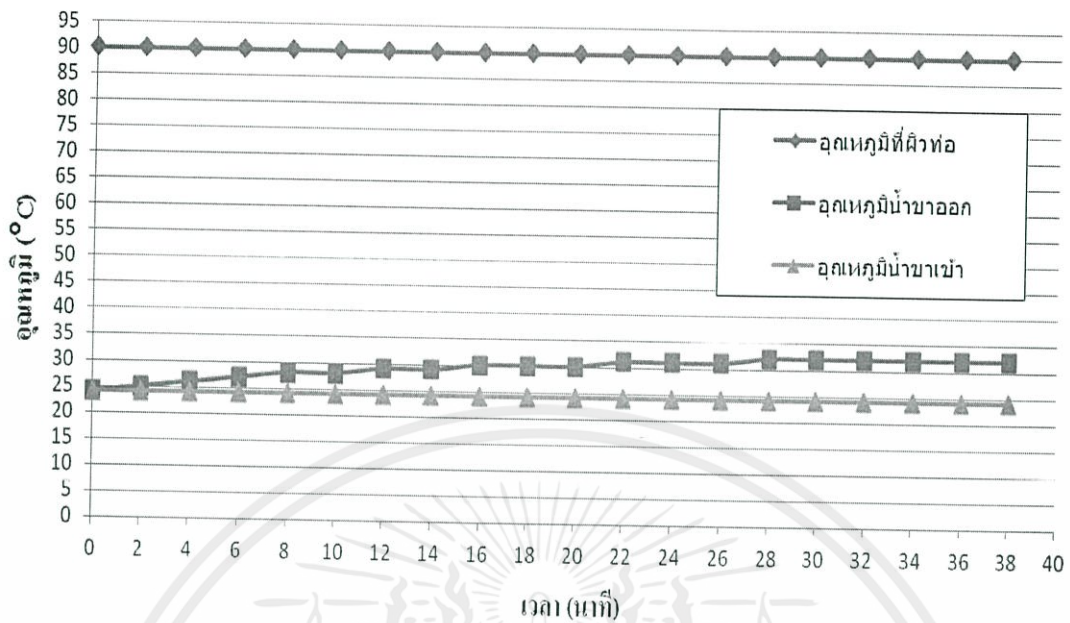
รูปที่ ข-31 ค่าอุณหภูมิของน้ำขาเข้า-ขาออกเทียบกับเวลาของการทดลองท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องโดยใช้สารทำงานเป็นน้ำ ที่แนวองศาการวางเท่ากับ -90 องศา อุณหภูมิที่ผิวท่อความร้อนเท่ากับ 90 องศาเซลเซียส

- ท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 90 °C มุม -45 ° ที่มีน้ำเป็นสารทำงาน



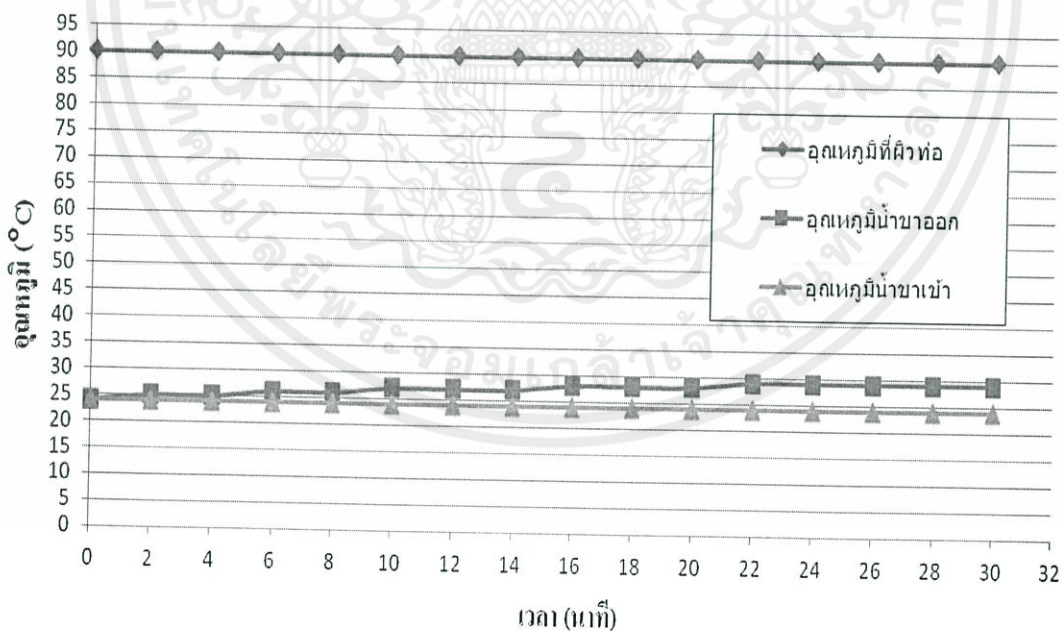
รูปที่ ข-32 ค่าอุณหภูมิของน้ำขาเข้า-ขาออกเทียบกับเวลาของการทดลองท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องโดยใช้สารทำงานเป็นน้ำ ที่แนวองศาการวางเท่ากับ -45 องศา อุณหภูมิที่ผิวท่อความร้อนเท่ากับ 90 องศาเซลเซียส

- ท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 90 °C มุม 0 ° ที่มีน้ำเป็นสารทำงาน



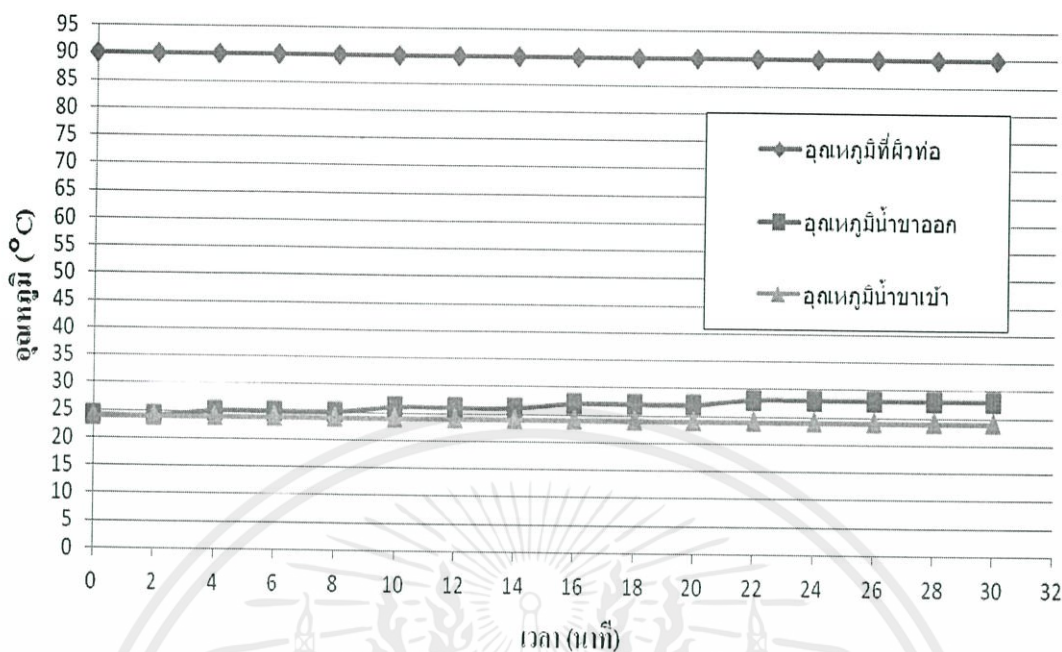
**รูปที่ ข-33** ค่าอุณหภูมิของน้ำขาเข้า-ขาออกเทียบกับเวลาของการทดลองท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องโดยใช้สารทำงานเป็นน้ำ ที่แนวองศาการวางเท่ากับ 0 องศา อุณหภูมิที่ผิวท่อความร้อนเท่ากับ 90 องศาเซลเซียส

- ท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 90 °C มุม 45 ° ที่มีน้ำเป็นสารทำงาน



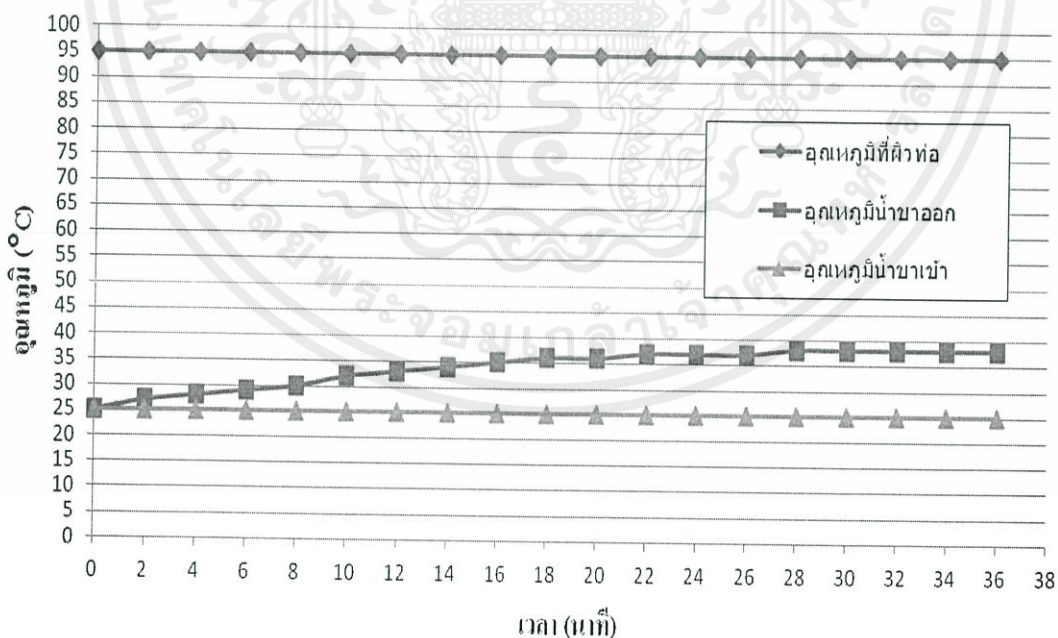
**รูปที่ ข-34** ค่าอุณหภูมิของน้ำขาเข้า-ขาออกเทียบกับเวลาของการทดลองท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องโดยใช้สารทำงานเป็นน้ำ ที่แนวองศาการวางเท่ากับ 45 องศา อุณหภูมิที่ผิวท่อความร้อนเท่ากับ 90 องศาเซลเซียส

- ท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 90 °C มุม 90 ° ที่มีน้ำเป็นสารทำงาน



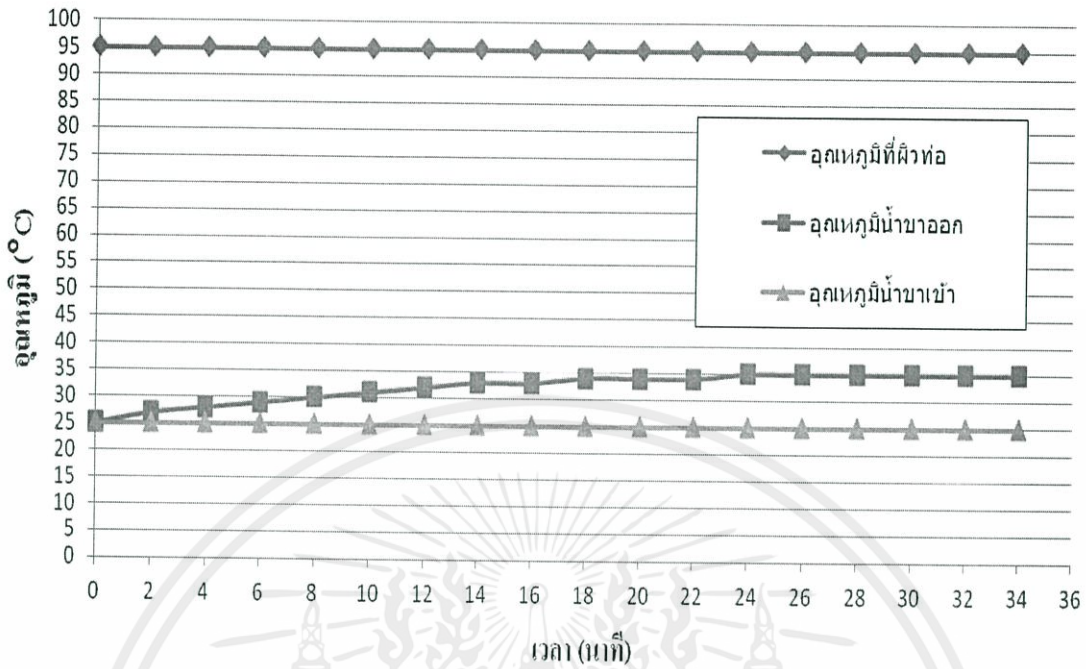
รูปที่ ข-35 ค่าอุณหภูมิของน้ำขาเข้า-ขาออกเทียบกับเวลาของการทดลองท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องโดยใช้สารทำงานเป็นน้ำ ที่แนวองศาการวางเท่ากับ 90 องศา อุณหภูมิที่ผิวท่อความร้อนเท่ากับ 90 องศาเซลเซียส

- ท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 95 °C มุม 90 ° ที่มีน้ำเป็นสารทำงาน



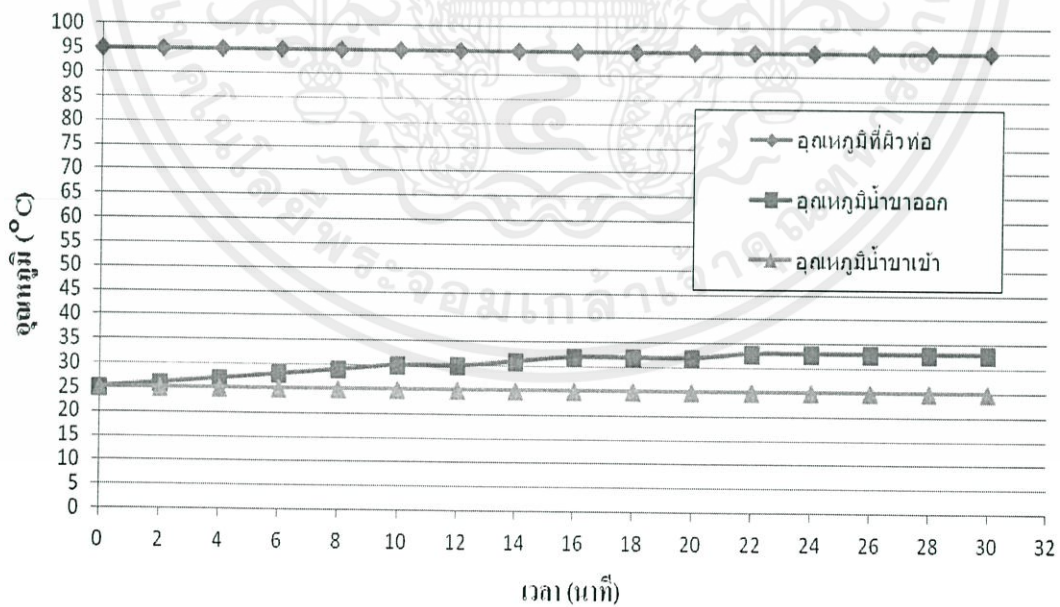
รูปที่ ข-36 ค่าอุณหภูมิของน้ำขาเข้า-ขาออกเทียบกับเวลาของการทดลองท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องโดยใช้สารทำงานเป็นน้ำ ที่แนวองศาการวางเท่ากับ 90 องศา อุณหภูมิที่ผิวท่อความร้อนเท่ากับ 95 องศาเซลเซียส

- ท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 95 °C มุม --45 ° ที่มีน้ำเป็นสารทำงาน



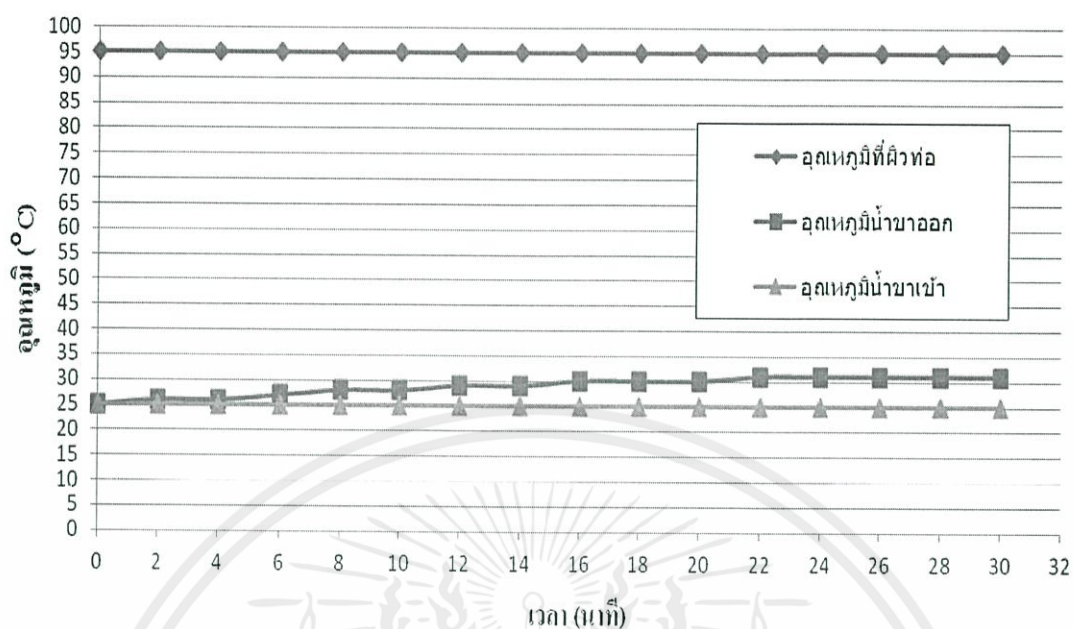
รูปที่ ข-37 ค่าอุณหภูมิของน้ำขาเข้า-ขาออกเทียบกับเวลาของการทดลองท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องโดยใช้สารทำงานเป็นน้ำ ที่แนวองศาการวางเท่ากับ -45 องศา อุณหภูมิที่ผิวท่อความร้อนเท่ากับ 95 องศาเซลเซียส

- ท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 95 °C มุม 0 ° ที่มีน้ำเป็นสารทำงาน



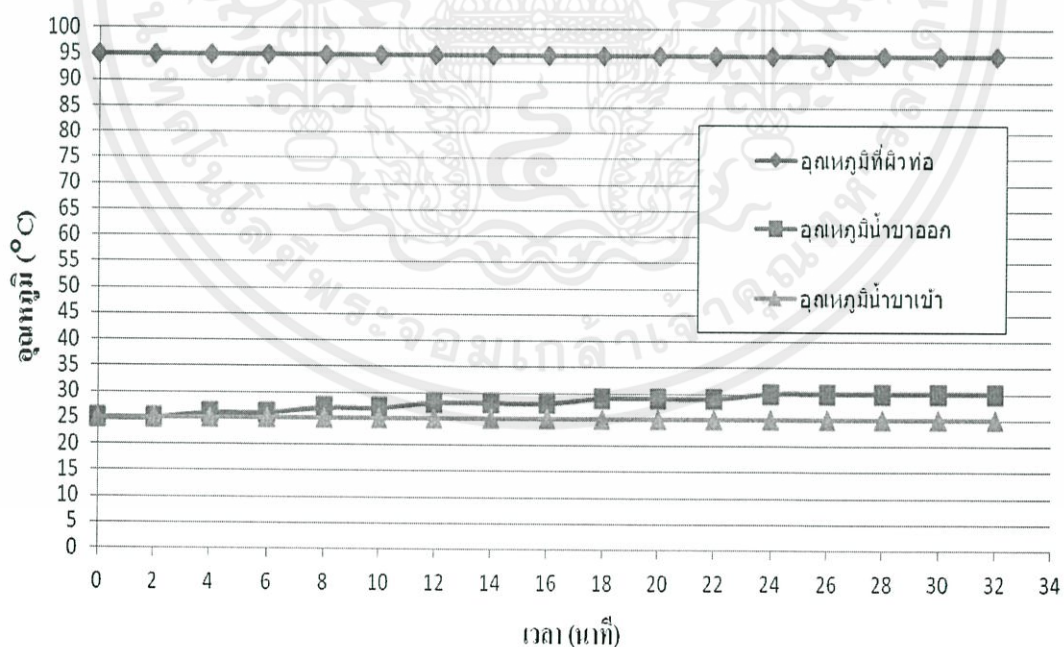
รูปที่ ข-38 ค่าอุณหภูมิของน้ำขาเข้า-ขาออกเทียบกับเวลาของการทดลองท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องโดยใช้สารทำงานเป็นน้ำ ที่แนวองศาการวางเท่ากับ 0 องศา อุณหภูมิที่ผิวท่อความร้อนเท่ากับ 95 องศาเซลเซียส

- ท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 95 °C มุม 45 ° ที่มีน้ำเป็นสารทำงาน



**รูปที่ ข-39** ค่าอุณหภูมิของน้ำขาเข้า-ขาออกเทียบกับเวลาของการทดลองท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องโดยใช้สารทำงานเป็นน้ำ ที่แนวองศาการวางเท่ากับ 45 องศา อุณหภูมิที่ผิวท่อความร้อนเท่ากับ 95 องศาเซลเซียส

- ท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 95 °C มุม 90 ° ที่มีน้ำเป็นสารทำงาน



**รูปที่ ข-40** ค่าอุณหภูมิของน้ำขาเข้า-ขาออกเทียบกับเวลาของการทดลองท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องโดยใช้สารทำงานเป็นน้ำ ที่แนวองศาการวางเท่ากับ 90 องศา อุณหภูมิที่ผิวท่อความร้อนเท่ากับ 95 องศาเซลเซียส

ตารางที่ ข-41 ข้อมูลที่บันทึกได้ของท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 60 °C โดยสารทำงานที่ใช้ คือ เอทานอล และแวนวงศาการวางท่อเท่ากับ -90°

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
0	60	27	24
2	60	28	24
4	60	29	24
6	60	30	24
8	60	31	24
10	60	32	24
12	60	32	24
14	60	32	24
16	60	33	24

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
18	60	33	24
20	60	33	24
22	60	34	24
24	60	34	24
26	60	34	24
28	60	34	24
30	60	34	24
32	60	34	24

ตารางที่ ข-42 ข้อมูลที่บันทึกได้ของท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 60 °C โดยสารทำงานที่ใช้ คือ เอทานอล และแวนวงศาการวางท่อเท่ากับ -45°

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
0	60	24	24
2	60	24	24
4	60	25	24
6	60	26	24
8	60	27	24
10	60	27	24
12	60	28	24
14	60	28	24
16	60	28	24
18	60	29	24
20	60	29	24

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
22	60	29	24
24	60	30	24
26	60	30	24
28	60	30	24
30	60	30	24
32	60	31	24
34	60	31	24
36	60	31	24
38	60	31	24
40	60	31	24
42	60	31	24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบันทึกใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ลิขสิทธิ์เป็นของคณะผู้จัดทำ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารฉบับนี้ทุกครั้งไป

ตารางที่ ข-43 ข้อมูลที่บันทึกได้ของท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 60 °C โดยสารทำงานที่ใช้ คือ เอทานอล และแนวองศาการวางท่อเท่ากับ 0°

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
0	60	24	24
2	60	25	24
4	60	26	24
6	60	27	24
8	60	27	24
10	60	28	24
12	60	28	24
14	60	28	24
16	60	29	24
18	60	29	24
20	60	29	24

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
22	60	29	24
24	60	30	24
26	60	30	24
28	60	30	24
30	60	30	24
32	60	30	24
34	60	30	24
36	60	30	24
38	60	30	24
40	60	30	24
42	60	30	24

ตารางที่ ข-44 ข้อมูลที่บันทึกได้ของท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 60 °C โดยสารทำงานที่ใช้ คือ เอทานอล และแนวองศาการวางท่อเท่ากับ 45°

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
0	60	24	24
2	60	24	24
4	60	25	24
6	60	25	24
8	60	25	24
10	60	26	24
12	60	26	24
14	60	26	24
16	60	27	24
18	60	27	24
20	60	28	24

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
22	60	28	24
24	60	28	24
26	60	28	24
28	60	29	24
30	60	29	24
32	60	29	24
34	60	29	24
36	60	29	24
38	60	29	24
40	60	29	24
42	60	29	24

ตารางที่ ข-45 ข้อมูลที่บันทึกได้ของท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 60 °C โดยสารทำงานที่ใช้ คือ เอทานอล และแนวองศาการวางท่อเท่ากับ 90°

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
0	60	24	24
2	60	25	24
4	60	25	24
6	60	26	24
8	60	26	24
10	60	26	24
12	60	27	24
14	60	27	24
16	60	27	24
18	60	27	24
20	60	28	24

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
22	60	28	24
24	60	28	24
26	60	28	24
28	60	28	24
30	60	28	24
32	60	28	24
34	60	28	24
36	60	28	24
38	60	28	24
40	60	28	24
42	60	28	24

ตารางที่ ข-46 ข้อมูลที่บันทึกได้ของท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 80 °C โดยสารทำงานที่ใช้ คือ เอทานอล และแนวองศาการวางท่อเท่ากับ -90°

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
0	80	24	24
2	80	25	24
4	80	26	24
6	80	27	24
8	80	28	24
10	80	28	24
12	80	29	24
14	80	30	24
16	80	30	24
18	80	31	24
20	80	32	24
22	80	33	24

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
24	80	33	24
26	80	33	24
28	80	34	24
30	80	34	24
32	80	35	24
34	80	35	24
36	80	35	24
38	80	36	24
40	80	36	24
42	80	36	24
44	80	36	24
46	80	36	24

ตารางที่ ข-47 ข้อมูลที่บันทึกได้ของท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 80 °C โดยสารทำงานที่ใช้ คือ เอทานอล และแนวองศาการวางท่อเท่ากับ -45°

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
0	80	24	24
2	80	25	24
4	80	25	24
6	80	26	24
8	80	26	24
10	80	27	24
12	80	27	24
14	80	27	24
16	80	28	24
18	80	29	24
20	80	29	24
22	80	30	24

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
24	80	30	24
26	80	30	24
28	80	31	24
30	80	31	24
32	80	32	24
34	80	33	24
36	80	33	24
38	80	33	24
40	80	33	24
42	80	33	24
44	80	33	24
46	80	33	24

ตารางที่ ข-48 ข้อมูลที่บันทึกได้ของท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 80 °C โดยสารทำงานที่ใช้ คือ เอทานอล และแนวองศาการวางท่อเท่ากับ 0°

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
0	80	24	24
2	80	25	24
4	80	25	24
6	80	26	24
8	80	26	24
10	80	27	24
12	80	27	24
14	80	28	24
16	80	28	24
18	80	29	24

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
20	80	29	24
22	80	30	24
24	80	30	24
26	80	31	24
28	80	31	24
30	80	31	24
32	80	32	24
34	80	32	24
36	80	32	24
38	80	32	24

ตารางที่ ข-49 ข้อมูลที่บันทึกได้ของท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 80 °C โดยสารทำงานที่ใช้ คือ เอทานอล และแนวองศาการวางท่อเท่ากับ 45°

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
0	80	24	24
2	80	25	24
4	80	25	24
6	80	26	24
8	80	26	24
10	80	27	24
12	80	27	24
14	80	27	24
16	80	28	24
18	80	28	24

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
20	80	28	24
22	80	29	24
24	80	29	24
26	80	29	24
28	80	29	24
30	80	30	24
32	80	30	24
34	80	30	24
36	80	30	24
38	80	30	24

ตารางที่ ข-50 ข้อมูลที่บันทึกได้ของท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 80 °C โดยสารทำงานที่ใช้ คือ เอทานอล และแนวองศาการวางท่อเท่ากับ 90°

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
0	80	24	24
2	80	25	24
4	80	25	24
6	80	26	24
8	80	26	24
10	80	27	24
12	80	27	24
14	80	28	24
16	80	28	24

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
18	80	28	24
20	80	28	24
22	80	29	24
24	80	29	24
26	80	29	24
28	80	29	24
30	80	29	24
32	80	29	24

ตารางที่ ข-51 ข้อมูลที่บันทึกได้ของท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 85 °C โดยสารทำงานที่ใช้ คือ เอทานอล และเนวองศาการวางท่อเท่ากับ -90°

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
0	85	24	24
2	85	26	24
4	85	27	24
6	85	29	24
8	85	30	24
10	85	32	24
12	85	32	24
14	85	33	24
16	85	34	24

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
18	85	35	24
20	85	35	24
22	85	36	24
24	85	36	24
26	85	37	24
28	85	37	24
30	85	37	24
32	85	37	24
34	85	37	24

ตารางที่ ข-52 ข้อมูลที่บันทึกได้ของท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 85 °C โดยสารทำงานที่ใช้ คือ เอทานอล และเนวองศาการวางท่อเท่ากับ -45°

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
0	85	24	24
2	85	26	24
4	85	28	24
6	85	28	24
8	85	30	24
10	85	31	24
12	85	32	24
14	85	32	24

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
16	85	33	24
18	85	33	24
20	85	33	24
22	85	34	24
24	85	34	24
26	85	34	24
28	85	34	24
30	85	34	24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สถานวิจัยการรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คิดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งหากมีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-53 ข้อมูลที่บันทึกได้ของท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 85 °C โดยสารทำงานที่ใช้ คือ เอทานอล และเนวองศาการวางท่อเท่ากับ 0 °

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
0	85	24	24
2	85	25	24
4	85	26	24
6	85	28	24
8	85	28	24
10	85	29	24
12	85	30	24
14	85	30	24

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
16	85	31	24
18	85	31	24
20	85	31	24
22	85	32	24
24	85	32	24
26	85	32	24
28	85	32	24
30	85	32	24

ตารางที่ ข-54 ข้อมูลที่บันทึกได้ของท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 85 °C โดยสารทำงานที่ใช้ คือ เอทานอล และเนวองศาการวางท่อเท่ากับ 45 °

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
0	85	24	24
2	85	25	24
4	85	26	24
6	85	26	24
8	85	27	24
10	85	28	24
12	85	28	24
14	85	29	24

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
16	85	29	24
18	85	29	24
20	85	30	24
22	85	30	24
24	85	30	24
26	85	30	24
28	85	30	24
30	85	30	24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-55 ข้อมูลที่บันทึกได้ของท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 85 °C โดยสารทำงานที่ใช้ คือ เอทานอล และแนวองศาการวางท่อเท่ากับ 90 °

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
0	85	24	24
2	85	25	24
4	85	25	24
6	85	26	24
8	85	27	24
10	85	27	24
12	85	28	24
14	85	28	24

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
16	85	28	24
18	85	28	24
20	85	29	24
22	85	29	24
24	85	29	24
26	85	29	24
28	85	29	24
30	85	29	24

ตารางที่ ข-56 ข้อมูลที่บันทึกได้ของท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 90 °C โดยสารทำงานที่ใช้ คือ เอทานอล และแนวองศาการวางท่อเท่ากับ -90 °

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
0	90	24	24
2	90	26	24
4	90	28	24
6	90	29	24
8	90	29	24
10	90	31	24
12	90	32	24
14	90	33	24
16	90	34	24
18	90	35	24
20	90	36	24

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
22	90	36	24
24	90	37	24
26	90	38	24
28	90	38	24
30	90	39	24
32	90	39	24
34	90	39	24
36	90	39	24
38	90	39	24
40	90	39	24

ตารางที่ ข-57 ข้อมูลที่บันทึกได้ของท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 90 °C โดยสารทำงานที่ใช้ คือ เอทานอล และแนวองศาการวางท่อเท่ากับ -45 °

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
0	90	24	24
2	90	26	24
4	90	27	24
6	90	29	24
8	90	29	24
10	90	30	24
12	90	32	24
14	90	32	24
16	90	33	24
18	90	34	24

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
20	90	35	24
22	90	35	24
24	90	35	24
26	90	36	24
28	90	36	24
30	90	36	24
32	90	36	24
34	90	36	24
36	90	36	24

ตารางที่ ข-58 ข้อมูลที่บันทึกได้ของท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 90 °C โดยสารทำงานที่ใช้ คือ เอทานอล และแนวองศาการวางท่อเท่ากับ 0 °

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
0	90	24	24
2	90	25	24
4	90	26	24
6	90	27	24
8	90	28	24
10	90	28	24
12	90	29	24
14	90	29	24
16	90	30	24
18	90	31	24

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
20	90	31	24
22	90	32	24
24	90	32	24
26	90	33	24
28	90	33	24
30	90	33	24
32	90	33	24
34	90	33	24
36	90	33	24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สนับสนุนไว้สำหรับภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลเพื่อการศึกษาเท่านั้น ห้ามมิให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใดโดยไม่ได้รับอนุญาตจากภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

ตารางที่ ข-59 ข้อมูลที่บันทึกได้ของท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 90 °C โดยสารทำงานที่ใช้ คือ เอทานอล และแนวองศาการวางท่อเท่ากับ 45 °

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
0	90	24	24
2	90	25	24
4	90	26	24
6	90	26	24
8	90	27	24
10	90	27	24
12	90	28	24
14	90	29	24
16	90	29	24

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
18	90	30	24
20	90	30	24
22	90	30	24
24	90	31	24
26	90	31	24
28	90	31	24
30	90	31	24
32	90	31	24
34	90	31	24

ตารางที่ ข-60 ข้อมูลที่บันทึกได้ของท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 90 °C โดยสารทำงานที่ใช้ คือ เอทานอล และแนวองศาการวางท่อเท่ากับ 90 °

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
0	90	24	24
2	90	25	24
4	90	26	24
6	90	26	24
8	90	27	24
10	90	27	24
12	90	27	24
14	90	28	24

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
16	90	28	24
18	90	28	24
20	90	29	24
22	90	29	24
24	90	29	24
26	90	29	24
28	90	29	24
30	90	29	24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-61 ข้อมูลที่บันทึกได้ของท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 95 °C โดยสารทำงานที่ใช้ คือ เอทานอล และแนวองศาการวางท่อเท่ากับ -90 °

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
0	95	24	24
2	95	26	24
4	95	27	24
6	95	29	24
8	95	30	24
10	95	32	24
12	95	33	24
14	95	34	24
16	95	36	24
18	95	37	24

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
20	95	38	24
22	95	38	24
24	95	39	24
26	95	39	24
28	95	39	24
30	95	40	24
32	95	40	24
34	95	40	24
36	95	40	24
38	95	40	24

ตารางที่ ข-62 ข้อมูลที่บันทึกได้ของท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 95 °C โดยสารทำงานที่ใช้ คือ เอทานอล และแนวองศาการวางท่อเท่ากับ -45 °

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
0	95	24	24
2	95	25	24
4	95	27	24
6	95	28	24
8	95	29	24
10	95	31	24
12	95	32	24
14	95	33	24
16	95	34	24

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
18	95	35	24
20	95	35	24
22	95	35	24
24	95	36	24
26	95	36	24
28	95	36	24
30	95	36	24
32	95	36	24

เอกสารนี้เป็นสารที่ 95 วนไว้ 32 รับการจ้างงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีคุณนำไปใช้

ตารางที่ ข-63 ข้อมูลที่บันทึกได้ของท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 95 °C โดยสารทำงานที่ใช้ คือ เอทานอล และแนวองศาการวางท่อเท่ากับ 0°

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
0	95	24	24
2	95	25	24
4	95	26	24
6	95	28	24
8	95	29	24
10	95	30	24
12	95	31	24
14	95	31	24

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
16	95	33	24
18	95	33	24
20	95	33	24
22	95	34	24
24	95	34	24
26	95	34	24
28	95	34	24
30	95	34	24

ตารางที่ ข-64 ข้อมูลที่บันทึกได้ของท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 95 °C โดยสารทำงานที่ใช้ คือ เอทานอล และแนวองศาการวางท่อเท่ากับ 45°

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
0	95	24	24
2	95	25	24
4	95	26	24
6	95	27	24
8	95	28	24
10	95	28	24
12	95	29	24
14	95	29	24

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
16	95	30	24
18	95	30	24
20	95	30	24
22	95	31	24
24	95	31	24
26	95	31	24
28	95	31	24
30	95	31	24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-65 ข้อมูลที่บันทึกได้ของท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 95 °C โดยสารทำงานที่ใช้ คือ เอทานอล และแนวองศาการวางท่อเท่ากับ 90°

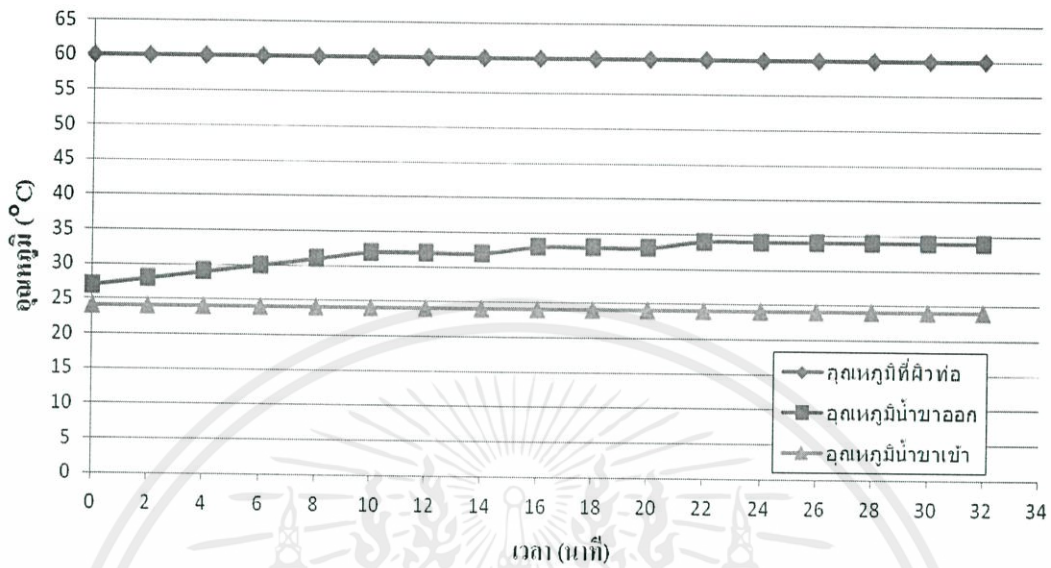
เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
0	95	24	24
2	95	25	24
4	95	26	24
6	95	26	24
8	95	27	24
10	95	28	24
12	95	28	24
14	95	29	24

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (° C)		
	H in	C out	C in
16	95	29	24
18	95	29	24
20	95	30	24
22	95	30	24
24	95	30	24
26	95	30	24
28	95	30	24
30	95	30	24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

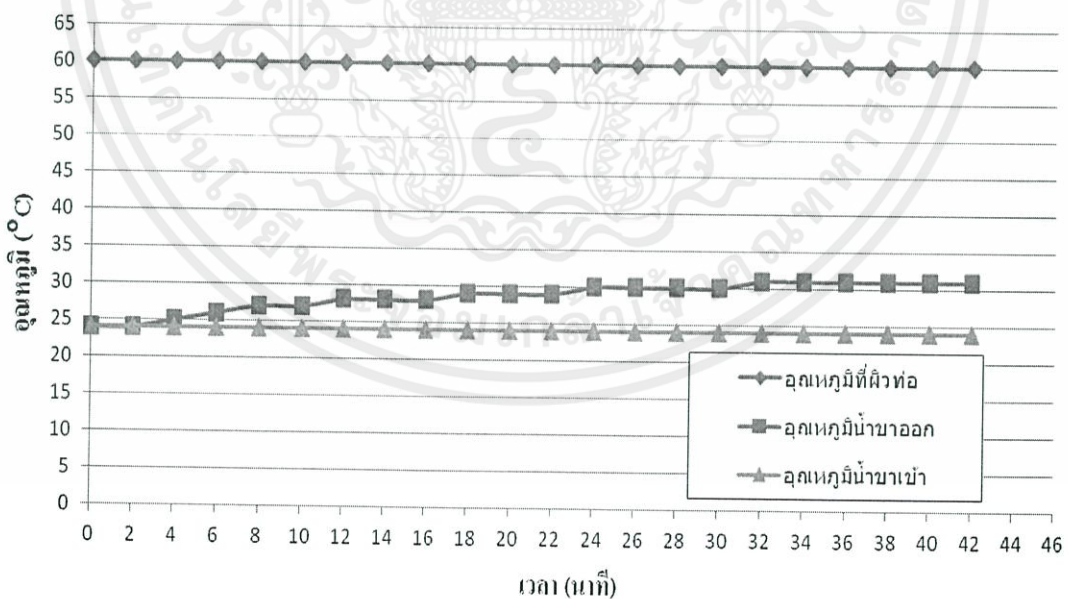
จากข้อมูลในตารางที่ ข-41 ถึงตารางที่ ข-65 สามารถนำมาพลอตกราฟผลการบันทึกอุณหภูมิและอุณหภูมิที่ผิวของท่อที่เวลาต่างๆ ได้ดังรูปที่ ข-41 ถึง รูปที่ ข-65 ตามลำดับ

- ท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 60 °C มุม -90 ° ที่มีเอทานอลเป็นสารทำงาน

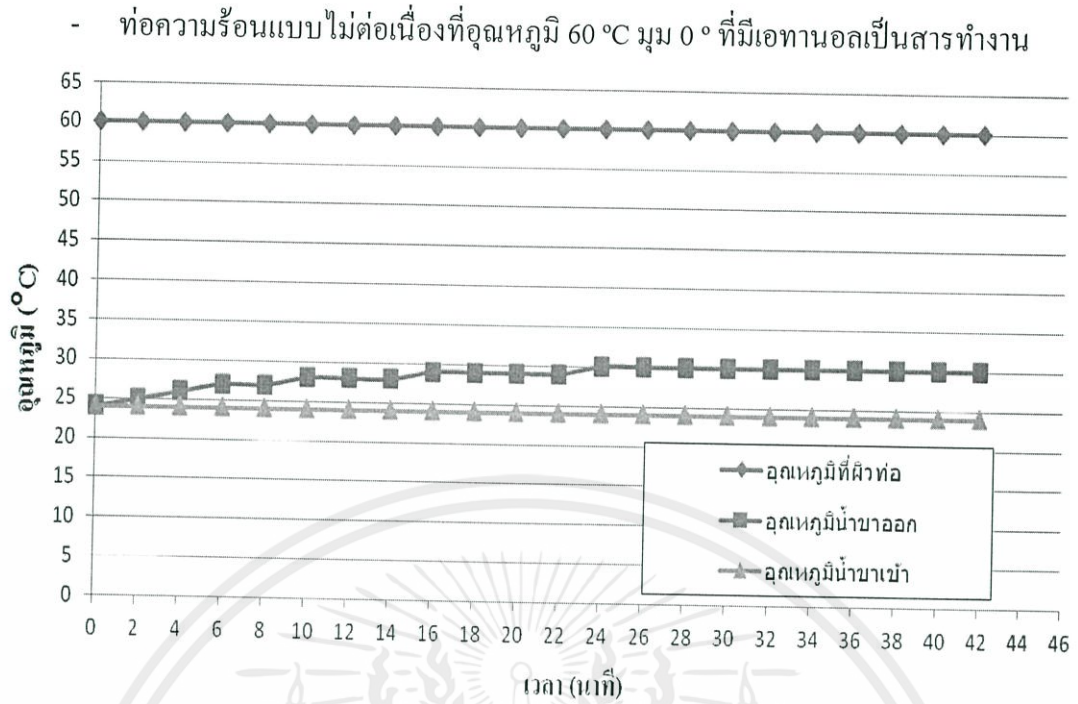


**รูปที่ ข-41** ค่าอุณหภูมิของน้ำขาเข้า-ขาออกเทียบกับเวลาของการทดลองท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องโดยใช้สารทำงานเป็นเอทานอล ที่แนวองศาการวางเท่ากับ -90 องศา อุณหภูมิที่ผิวท่อความร้อนเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส

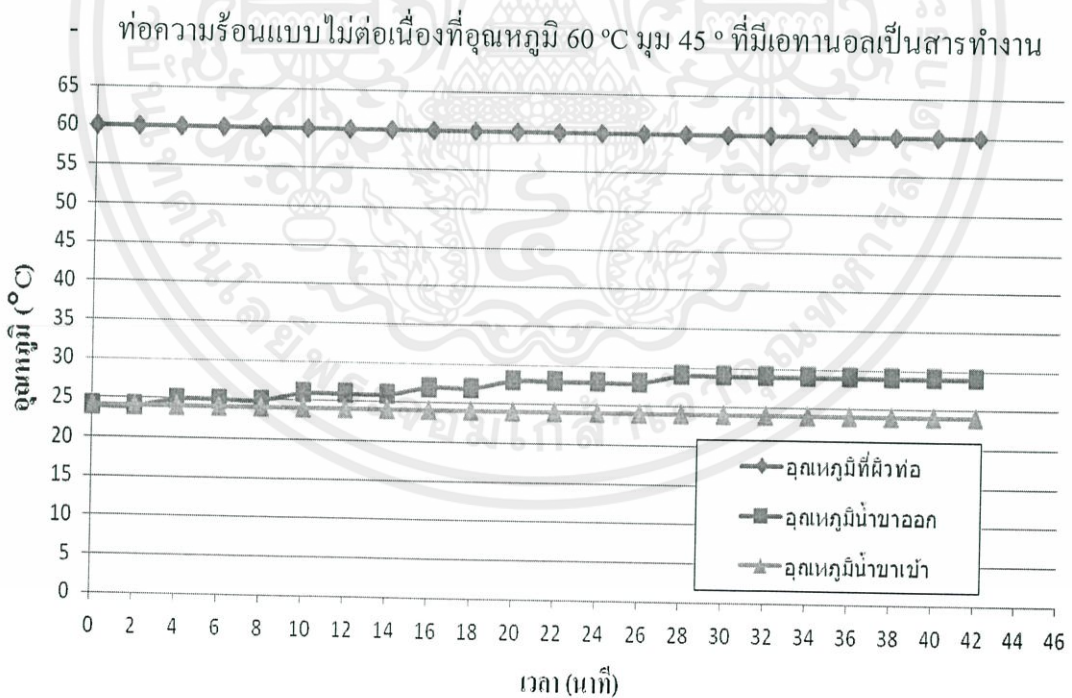
- ท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 60 °C มุม -45 ° ที่มีเอทานอลเป็นสารทำงาน



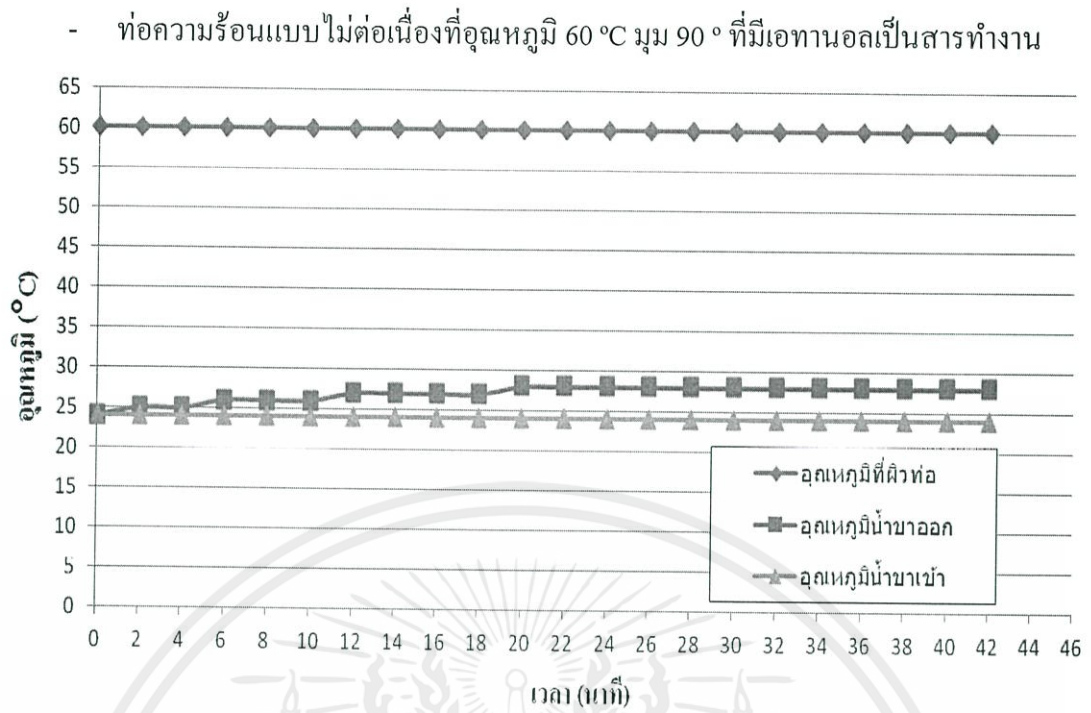
**รูปที่ ข-42** ค่าอุณหภูมิของน้ำขาเข้า-ขาออกเทียบกับเวลาของการทดลองท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องโดยใช้สารทำงานเป็นเอทานอล ที่แนวองศาการวางเท่ากับ -45 องศา อุณหภูมิที่ผิวท่อความร้อนเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส



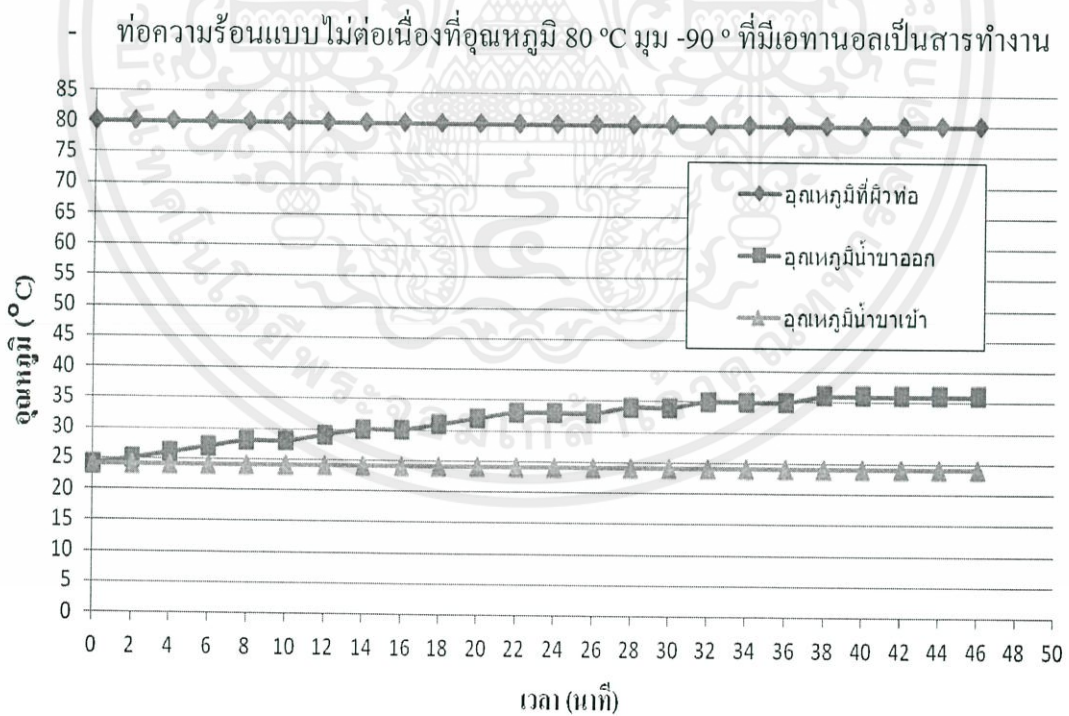
**รูปที่ ข-43** ค่าอุณหภูมิของน้ำขาเข้า-ขาออกเทียบกับเวลาของการทดลองท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องโดยใช้สารทำงานเป็นเอทานอล ที่แนวองศาการวางเท่ากับ 0 องศา อุณหภูมิที่ผิวท่อความร้อนเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส



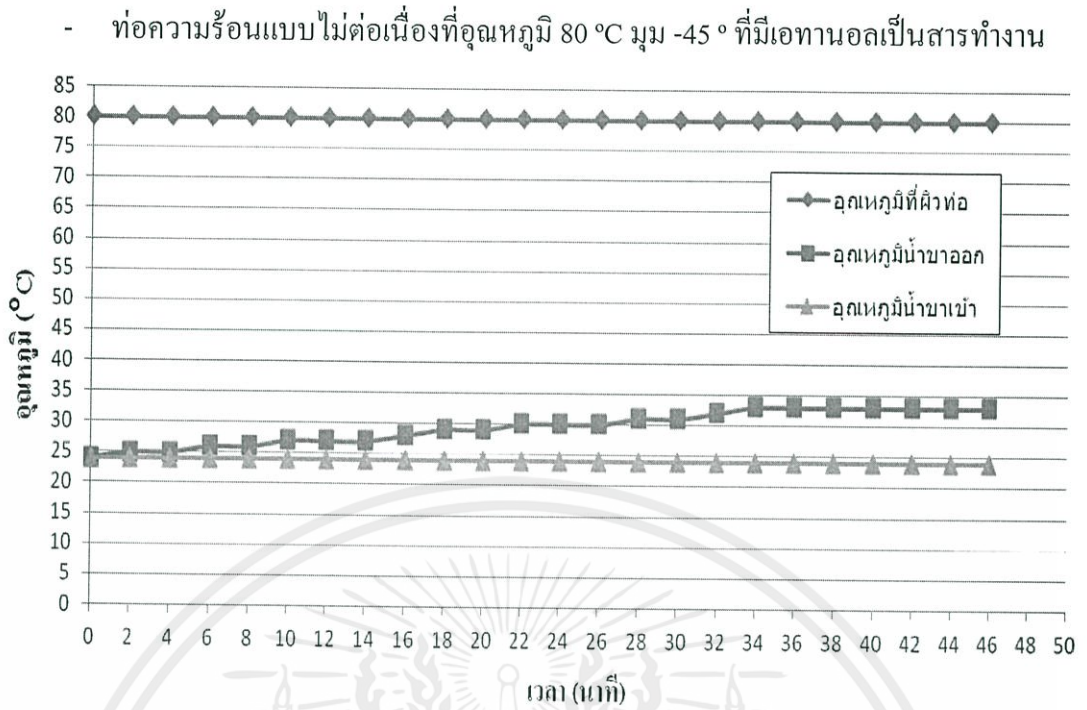
**รูปที่ ข-44** ค่าอุณหภูมิของน้ำขาเข้า-ขาออกเทียบกับเวลาของการทดลองท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องโดยใช้สารทำงานเป็นเอทานอล ที่แนวองศาการวางเท่ากับ 45 องศา อุณหภูมิที่ผิวท่อความร้อนเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส



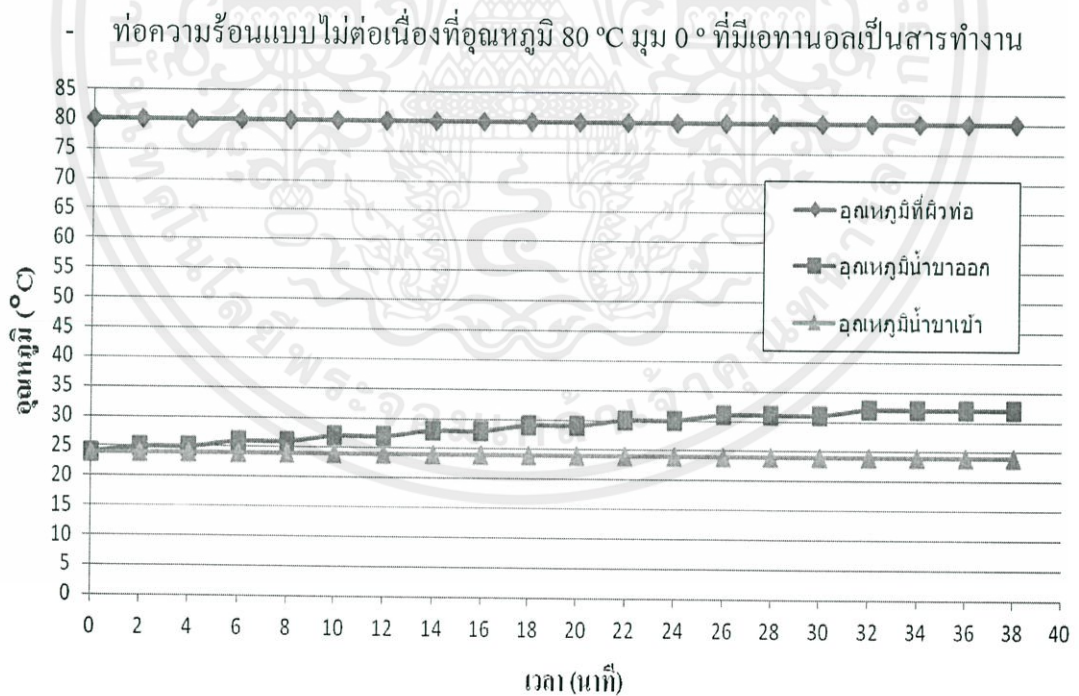
รูปที่ ข-45 ค่าอุณหภูมิของน้ำขาเข้า-ขาออกเทียบกับเวลาของการทดลองท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องโดยใช้สารทำงานเป็นเอทานอล ที่แนวองศาการวางเท่ากับ 90 องศา อุณหภูมิที่ผิวท่อความร้อนเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส



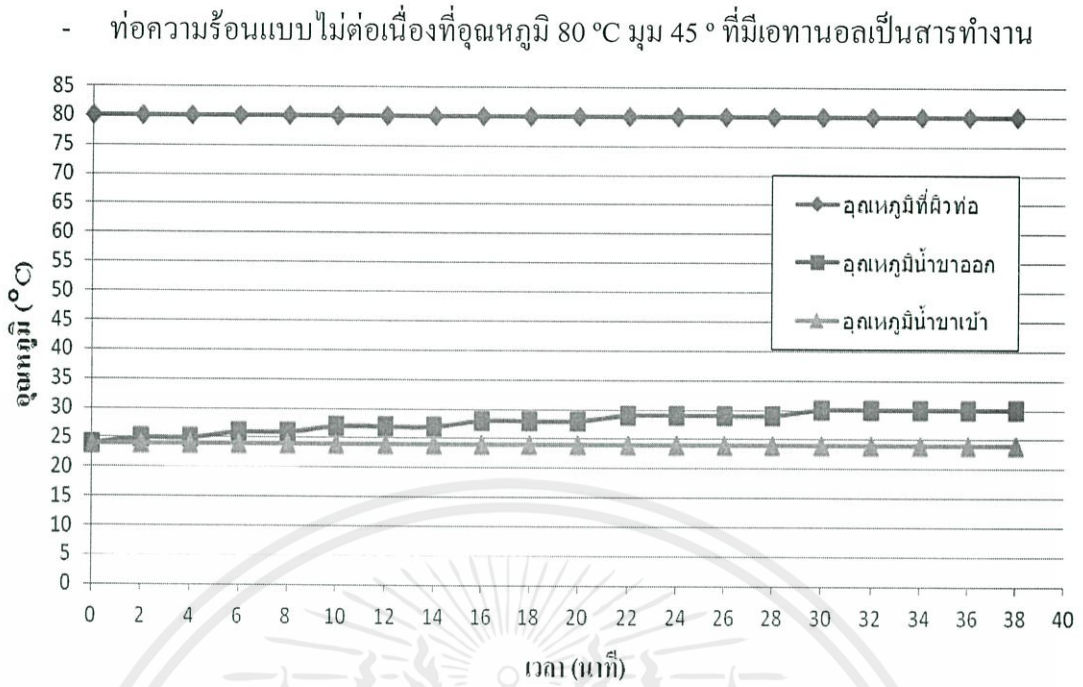
รูปที่ ข-46 ค่าอุณหภูมิของน้ำขาเข้า-ขาออกเทียบกับเวลาของการทดลองท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องโดยใช้สารทำงานเป็นเอทานอล ที่แนวองศาการวางเท่ากับ 90 องศา อุณหภูมิที่ผิวท่อความร้อนเท่ากับ 80 องศาเซลเซียส



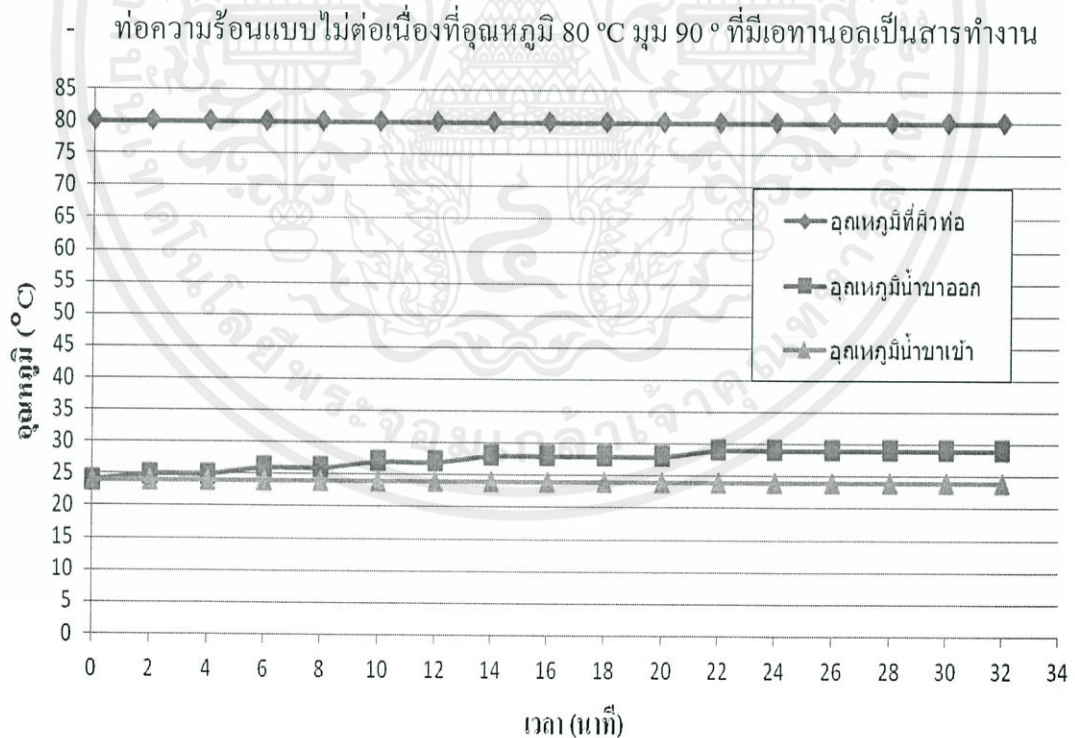
รูปที่ ข-47 ค่าอุณหภูมิของน้ำขาเข้า-ขาออกเทียบกับเวลาของการทดลองท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องโดยใช้สารทำงานเป็นเอทานอล ที่แนวองศาการวางเท่ากับ -45 องศา อุณหภูมิที่ผิวท่อความร้อนเท่ากับ 80 องศาเซลเซียส



รูปที่ ข-48 ค่าอุณหภูมิของน้ำขาเข้า-ขาออกเทียบกับเวลาของการทดลองท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องโดยใช้สารทำงานเป็นเอทานอล ที่แนวองศาการวางเท่ากับ 0 องศา อุณหภูมิที่ผิวท่อความร้อนเท่ากับ 80 องศาเซลเซียส

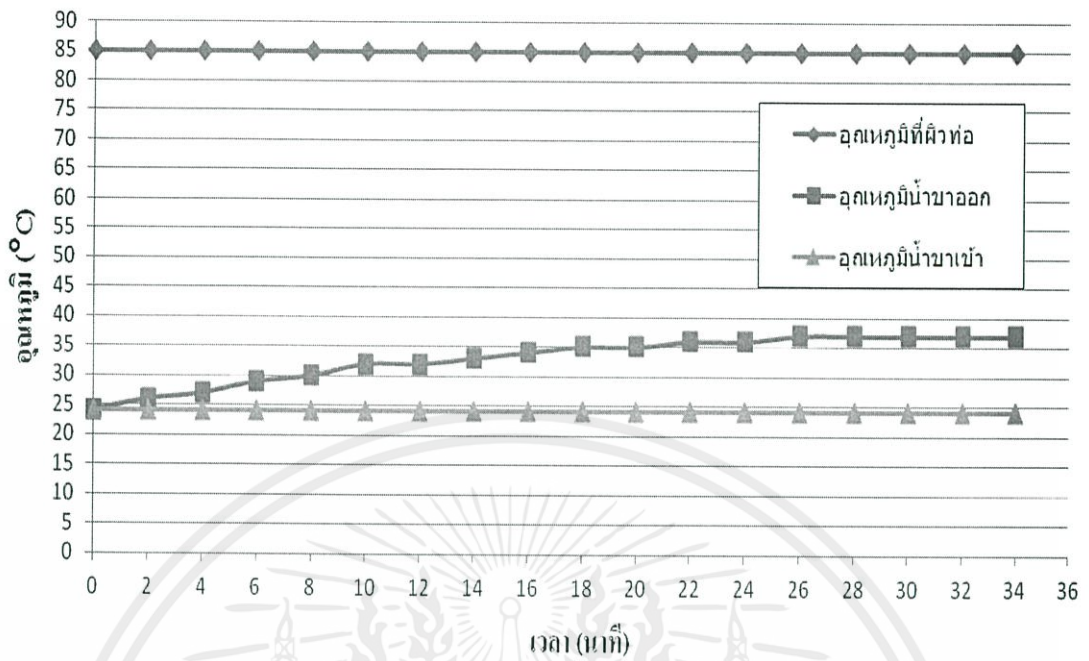


รูปที่ ข-49 ค่าอุณหภูมิของน้ำขาเข้า-ขาออกเทียบกับเวลาของการทดลองท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องโดยใช้สารทำงานเป็นเอทานอล ที่แนวองศาการวางเท่ากับ 45 องศา อุณหภูมิที่ผิวท่อความร้อนเท่ากับ 80 องศาเซลเซียส



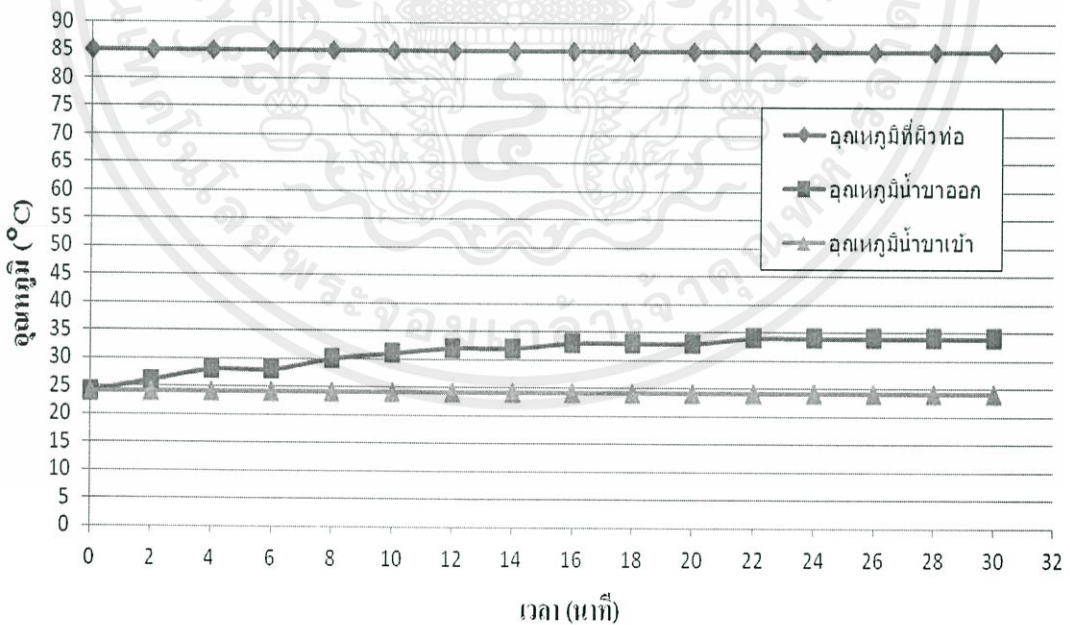
รูปที่ ข-50 ค่าอุณหภูมิของน้ำขาเข้า-ขาออกเทียบกับเวลาของการทดลองท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องโดยใช้สารทำงานเป็นเอทานอล ที่แนวองศาการวางเท่ากับ 90 องศา อุณหภูมิที่ผิวท่อความร้อนเท่ากับ 80 องศาเซลเซียส

- ท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 85 °C มุม -90 ° ที่มีเอทานอลเป็นสารทำงาน

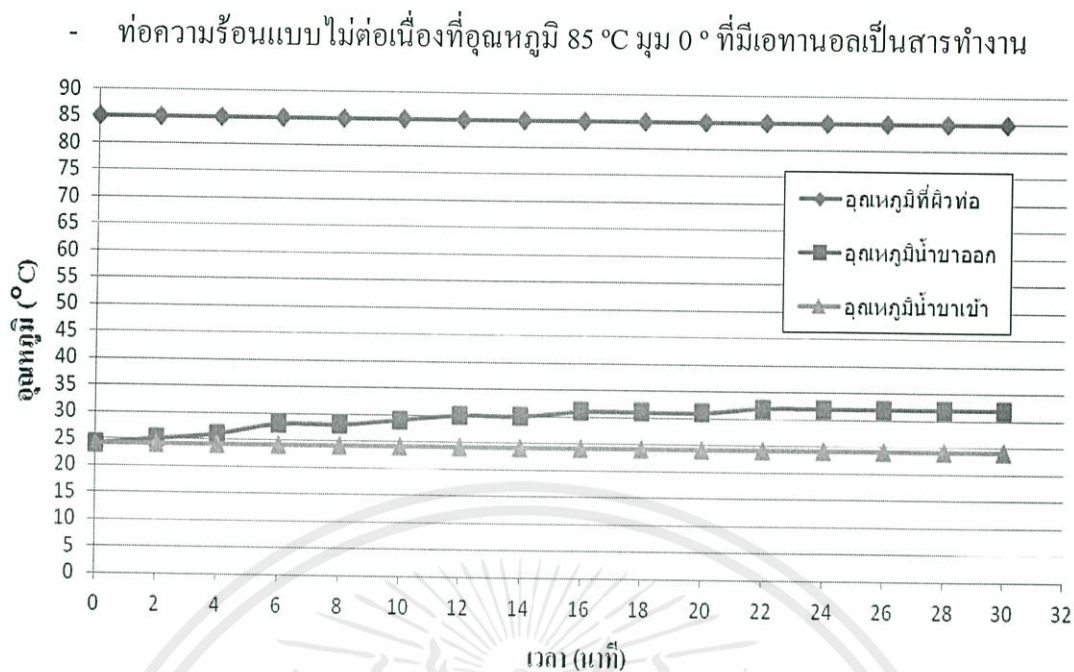


รูปที่ ข-51 ค่าอุณหภูมิของน้ำขาเข้า-ขาออกเทียบกับเวลาของการทดลองท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องโดยใช้สารทำงานเป็นเอทานอล ที่แนวองศาการวางเท่ากับ -90 องศา อุณหภูมิที่ผิวท่อความร้อนเท่ากับ 85 องศาเซลเซียส

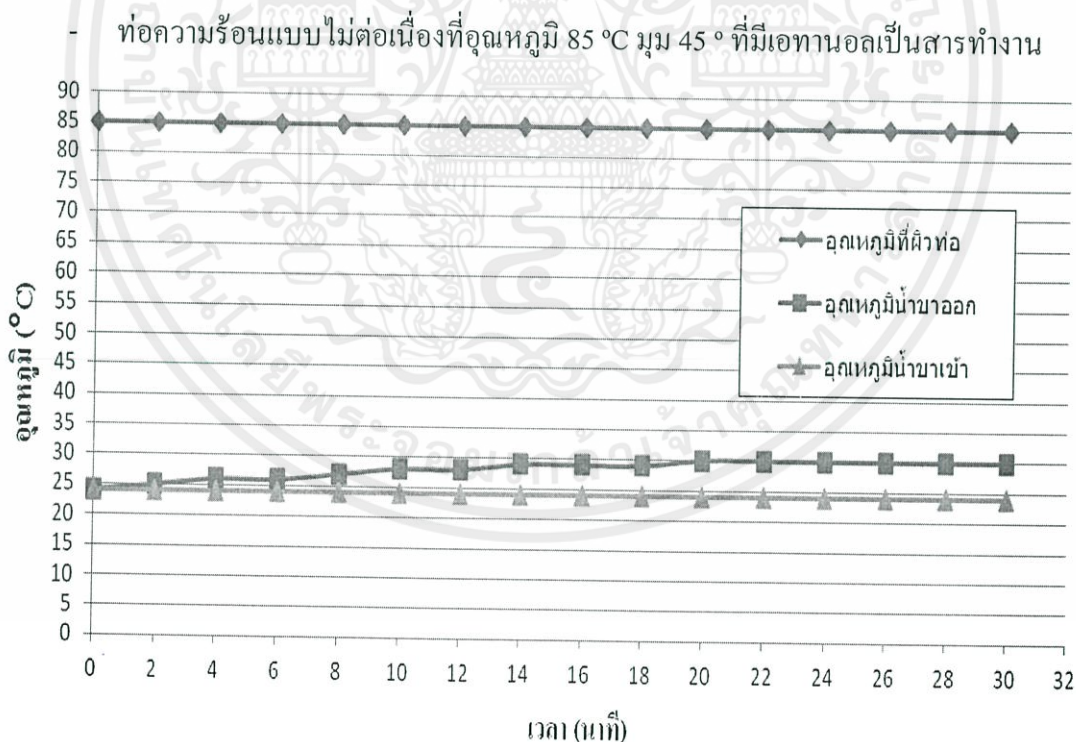
- ท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 85 °C มุม -45 ° ที่มีเอทานอลเป็นสารทำงาน



รูปที่ ข-52 ค่าอุณหภูมิของน้ำขาเข้า-ขาออกเทียบกับเวลาของการทดลองท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องโดยใช้สารทำงานเป็นเอทานอล ที่แนวองศาการวางเท่ากับ -45 องศา อุณหภูมิที่ผิวท่อความร้อนเท่ากับ 85 องศาเซลเซียส

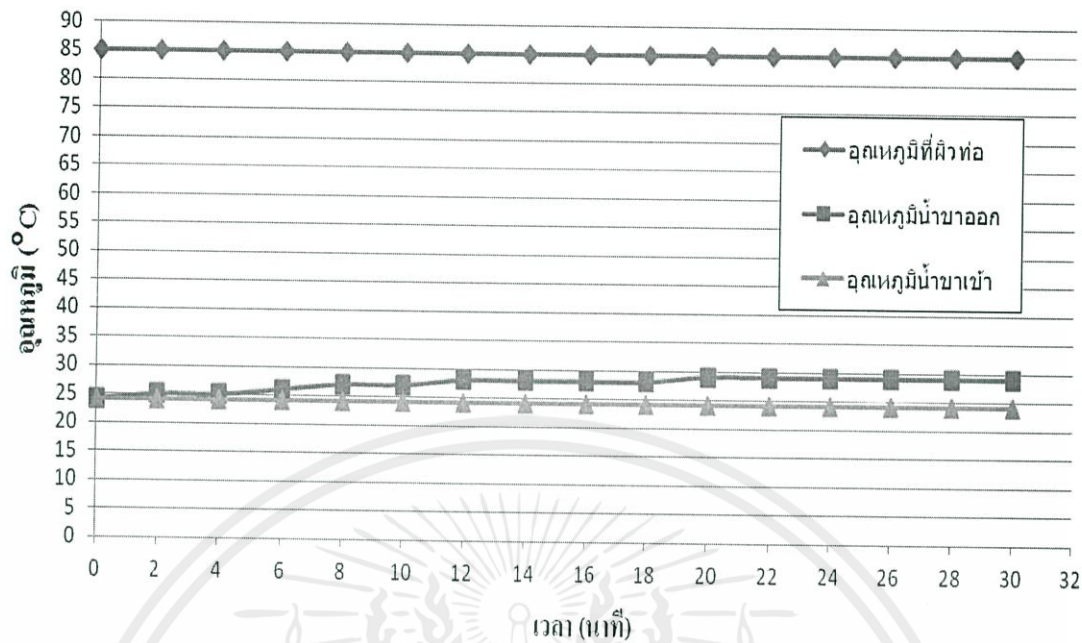


รูปที่ ข-53 ค่าอุณหภูมิของน้ำขาเข้า-ขาออกเทียบกับเวลาของการทดลองท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องโดยใช้สารทำงานเป็นเอทานอล ที่แนวองศาการวางเท่ากับ 0 องศา อุณหภูมิที่ผิวท่อความร้อนเท่ากับ 85 องศาเซลเซียส



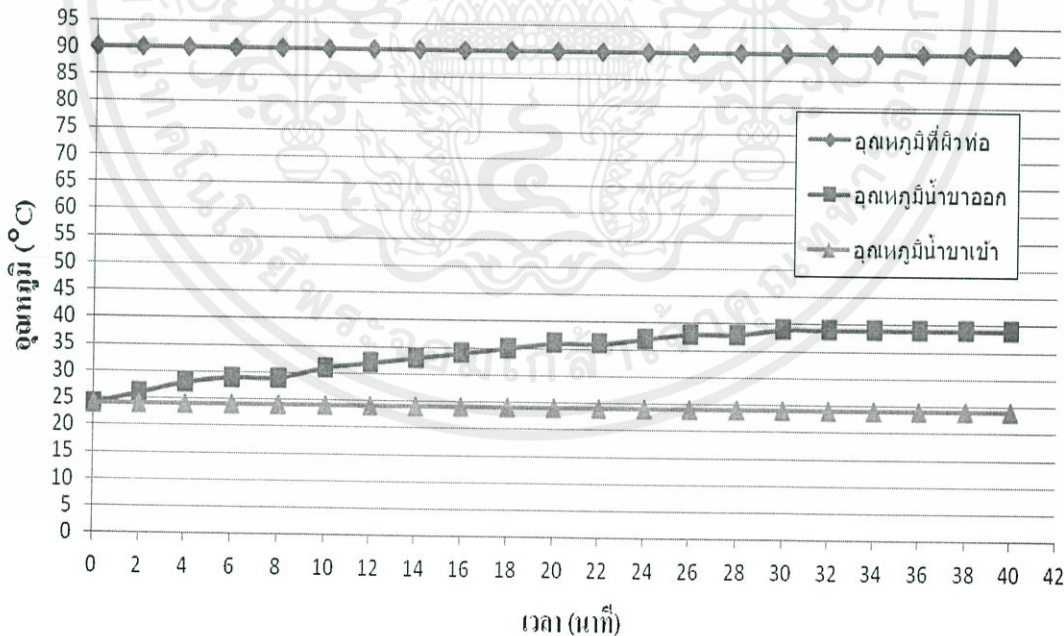
รูปที่ ข-54 ค่าอุณหภูมิของน้ำขาเข้า-ขาออกเทียบกับเวลาของการทดลองท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องโดยใช้สารทำงานเป็นเอทานอล ที่แนวองศาการวางเท่ากับ 45 องศา อุณหภูมิที่ผิวท่อความร้อนเท่ากับ 85 องศาเซลเซียส

- ท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 85 °C มุม 90 ° ที่มีเอทานอลเป็นสารทำงาน

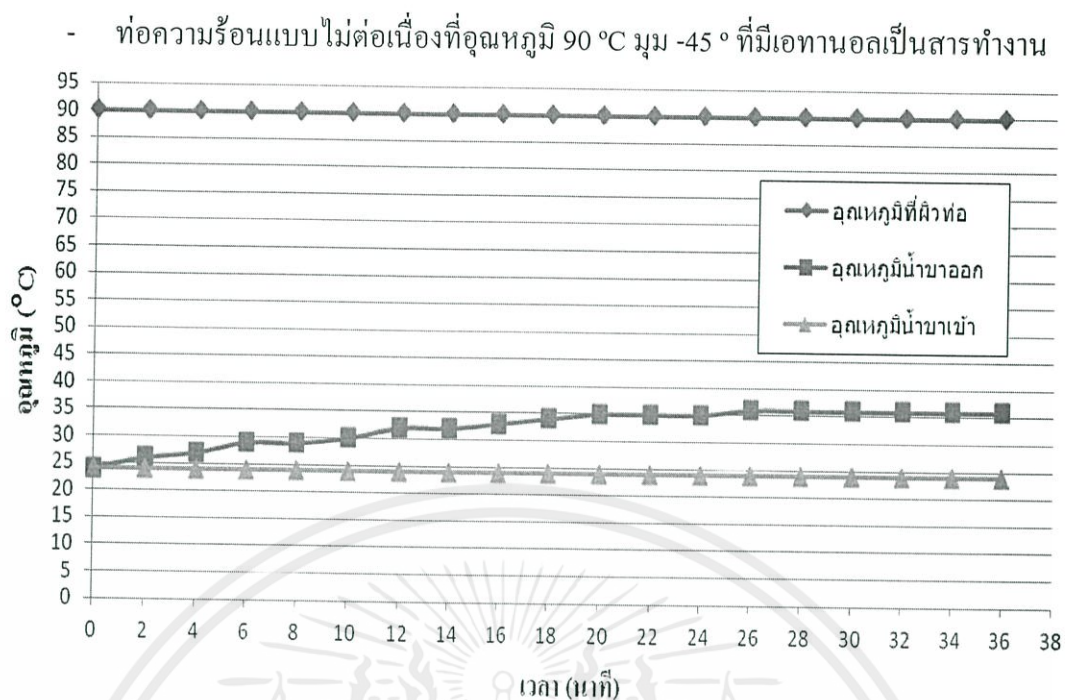


รูปที่ ข-55 ค่าอุณหภูมิของน้ำขาเข้า-ขาออกเทียบกับเวลาของการทดลองท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องโดยใช้สารทำงานเป็นเอทานอล ที่แนวองศาการวางเท่ากับ 90 องศา อุณหภูมิที่ผิวท่อความร้อนเท่ากับ 85 องศาเซลเซียส

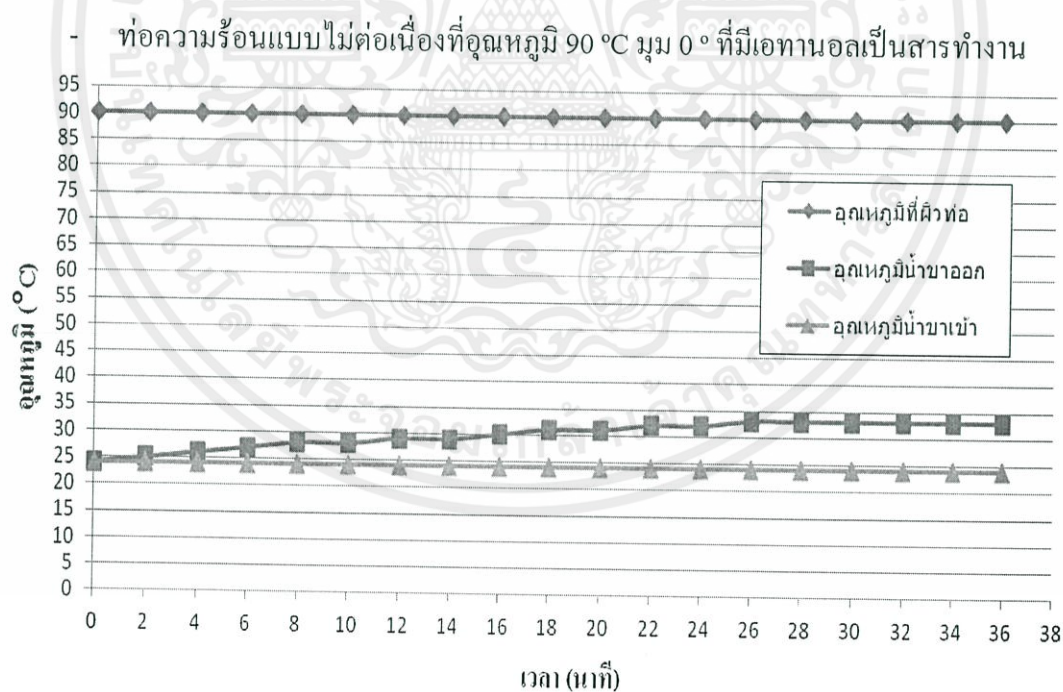
- ท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 90 °C มุม -90 ° ที่มีเอทานอลเป็นสารทำงาน



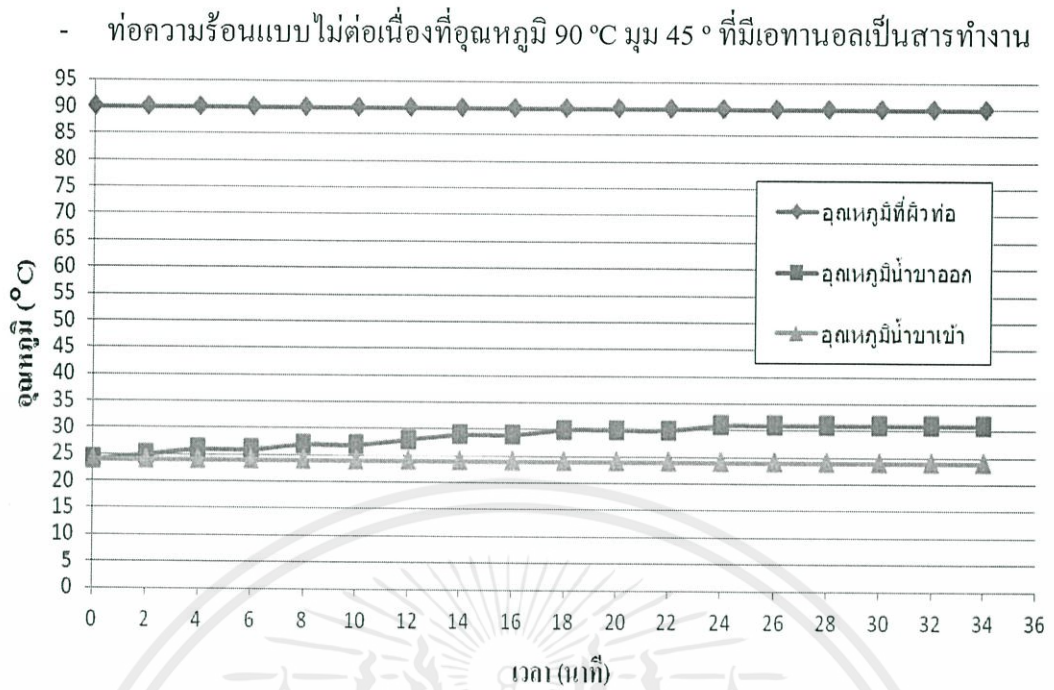
รูปที่ ข-56 ค่าอุณหภูมิของน้ำขาเข้า-ขาออกเทียบกับเวลาของการทดลองท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องโดยใช้สารทำงานเป็นเอทานอล ที่แนวองศาการวางเท่ากับ -90 องศา อุณหภูมิที่ผิวท่อความร้อนเท่ากับ 90 องศาเซลเซียส



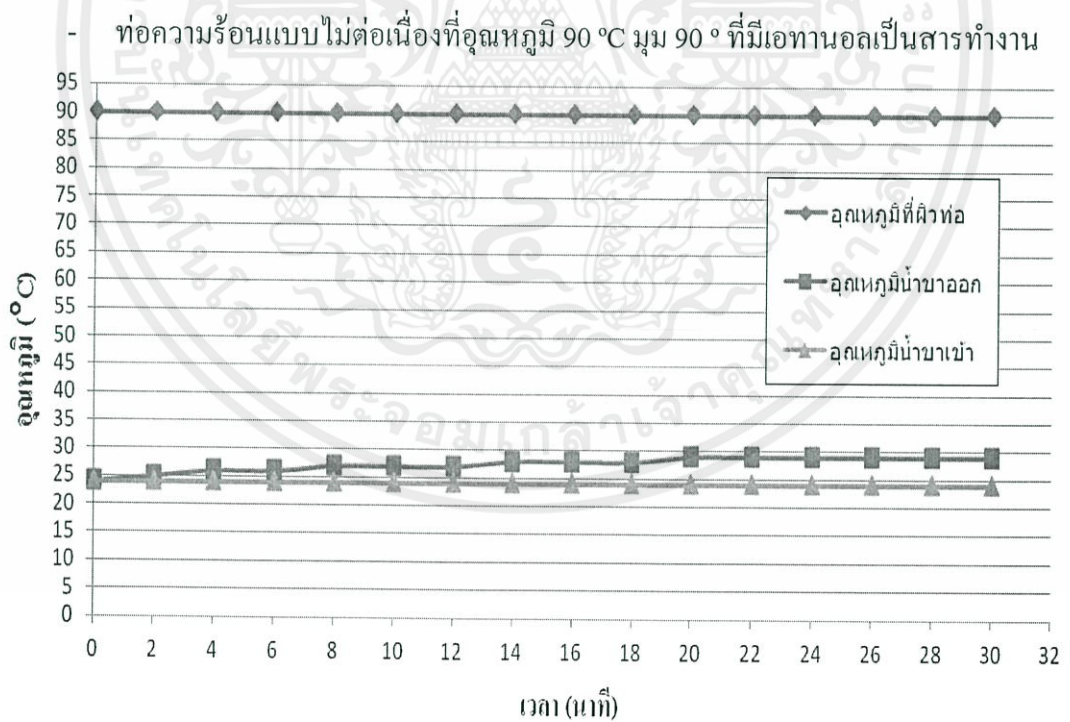
รูปที่ ข-57 ค่าอุณหภูมิของน้ำขาเข้า-ขาออกเทียบกับเวลาของการทดลองท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องโดยใช้สารทำงานเป็นเอทานอล ที่แนวองศาการวางเท่ากับ -45 องศา อุณหภูมิที่ผิวท่อความร้อนเท่ากับ 90 องศาเซลเซียส



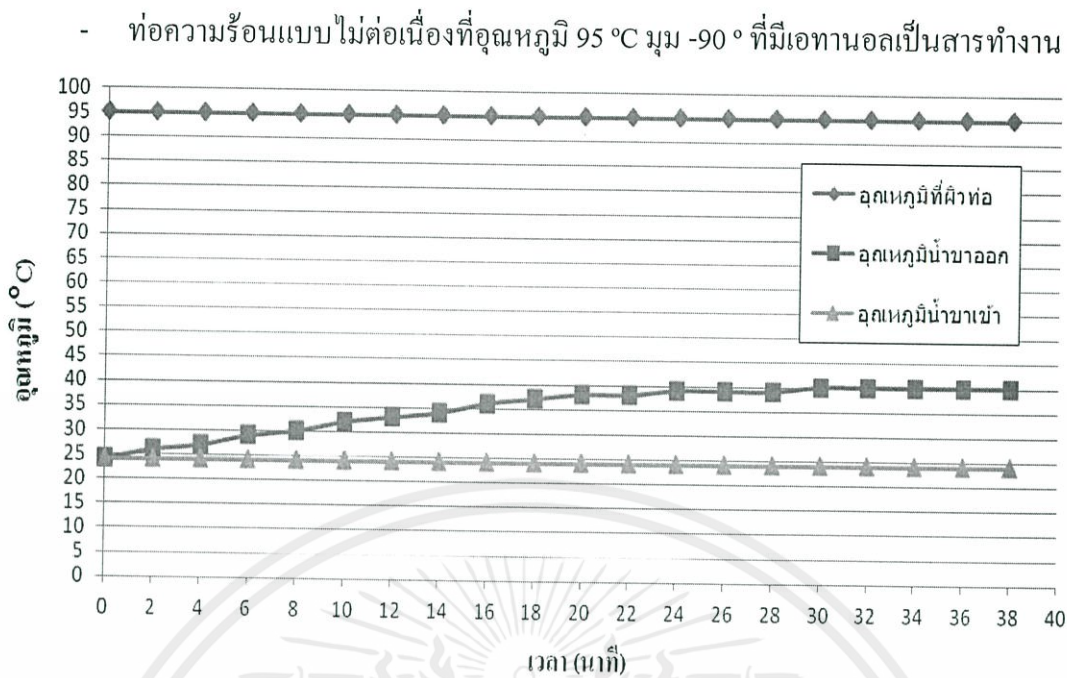
รูปที่ ข-58 ค่าอุณหภูมิของน้ำขาเข้า-ขาออกเทียบกับเวลาของการทดลองท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องโดยใช้สารทำงานเป็นเอทานอล ที่แนวองศาการวางเท่ากับ 0 องศา อุณหภูมิที่ผิวท่อความร้อนเท่ากับ 90 องศาเซลเซียส



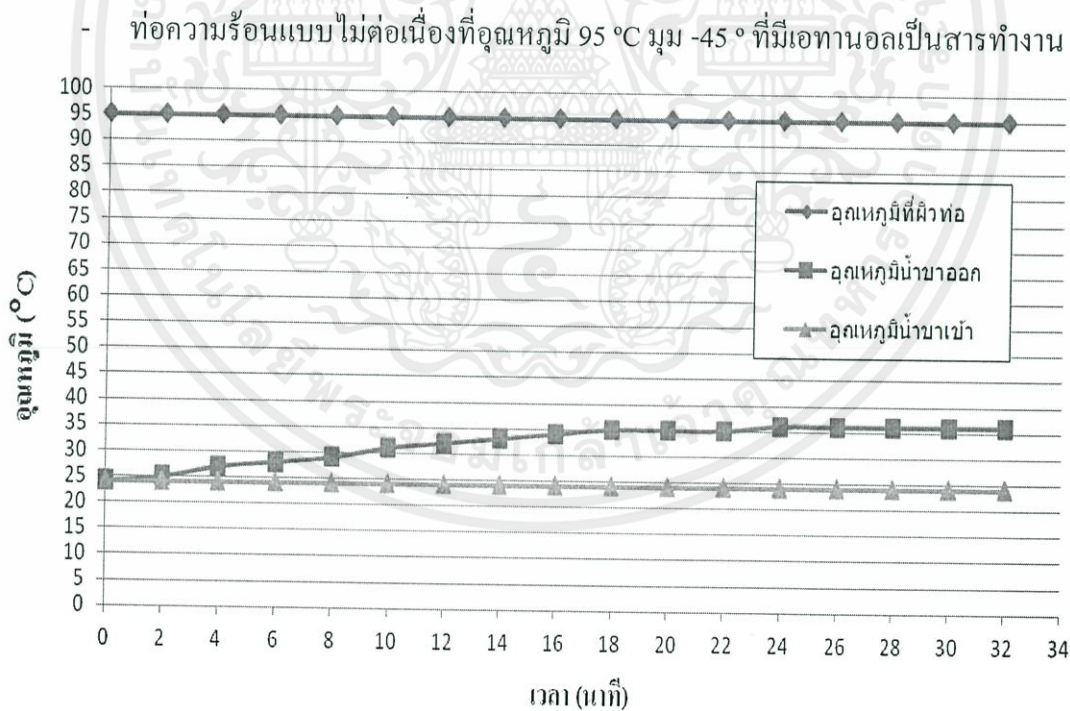
รูปที่ ข-59 ค่าอุณหภูมิของน้ำขาเข้า-ขาออกเทียบกับเวลาของการทดลองท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องโดยใช้สารทำงานเป็นเอทานอล ที่แนวองศาการวางเท่ากับ 45 องศา อุณหภูมิที่ผิวท่อความร้อนเท่ากับ 90 องศาเซลเซียส



รูปที่ ข-60 ค่าอุณหภูมิของน้ำขาเข้า-ขาออกเทียบกับเวลาของการทดลองท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องโดยใช้สารทำงานเป็นเอทานอล ที่แนวองศาการวางเท่ากับ 90 องศา อุณหภูมิที่ผิวท่อความร้อนเท่ากับ 90 องศาเซลเซียส

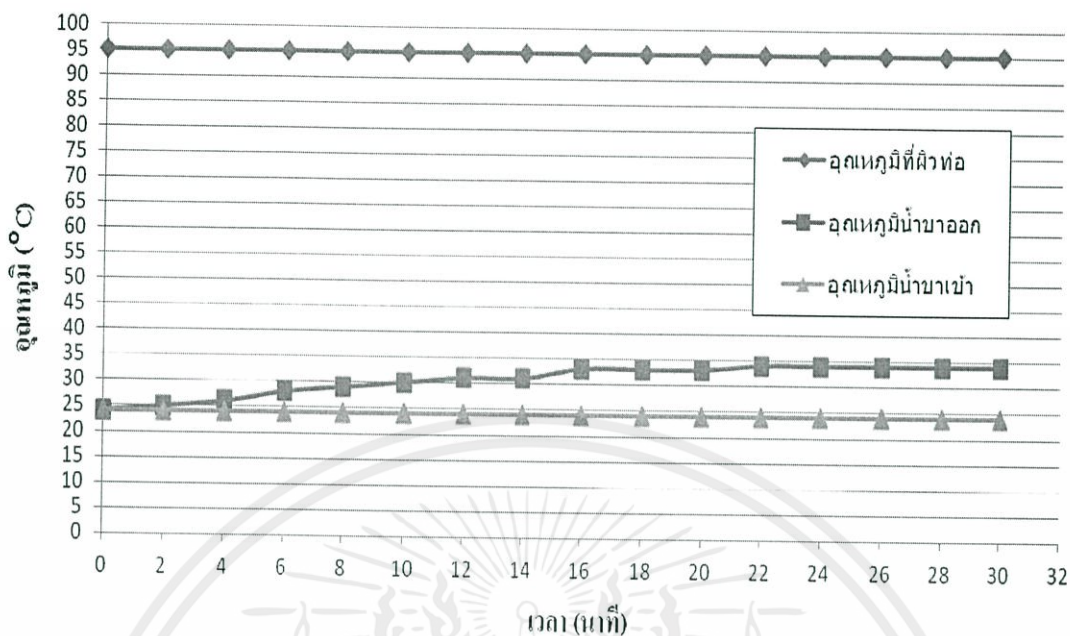


รูปที่ ข-61 ค่าอุณหภูมิของน้ำขาเข้า-ขาออกเทียบกับเวลาของการทดลองท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องโดยใช้สารทำงานเป็นเอทานอล ที่แนวองศาการวางเท่ากับ -90 องศา อุณหภูมิที่ผิวท่อความร้อนเท่ากับ 95 องศาเซลเซียส



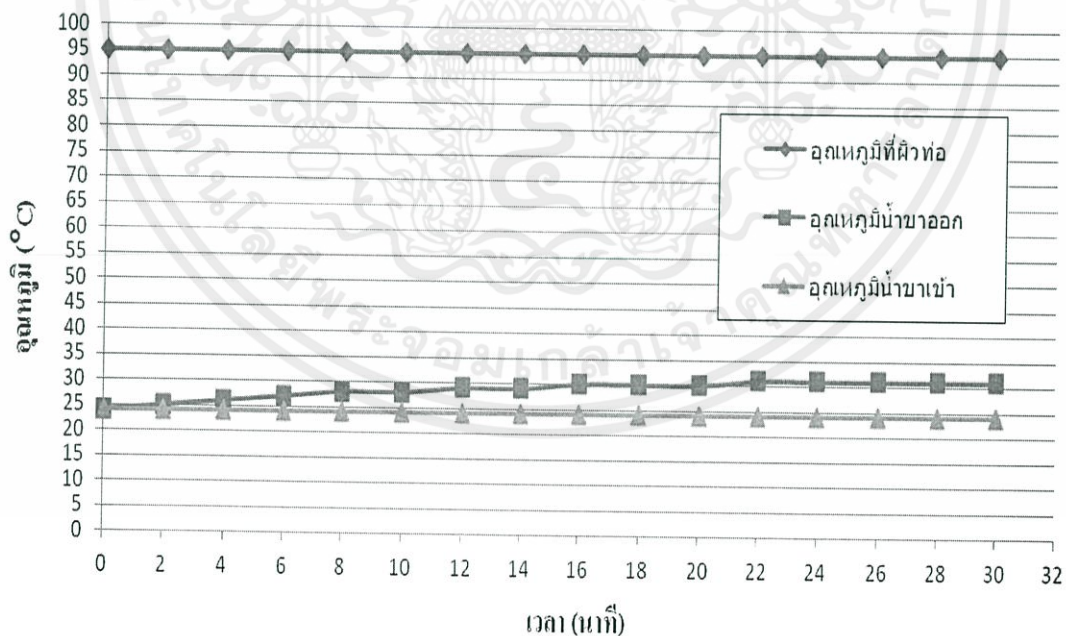
รูปที่ ข-62 ผลค่าอุณหภูมิของน้ำขาเข้า-ขาออกเทียบกับเวลาของการทดลองท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องโดยใช้สารทำงานเป็นเอทานอล ที่แนวองศาการวางเท่ากับ -45 องศา อุณหภูมิที่ผิวท่อความร้อนเท่ากับ 95 องศาเซลเซียส

- ท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 95 °C มุม 0 ° ที่มีเอทานอลเป็นสารทำงาน



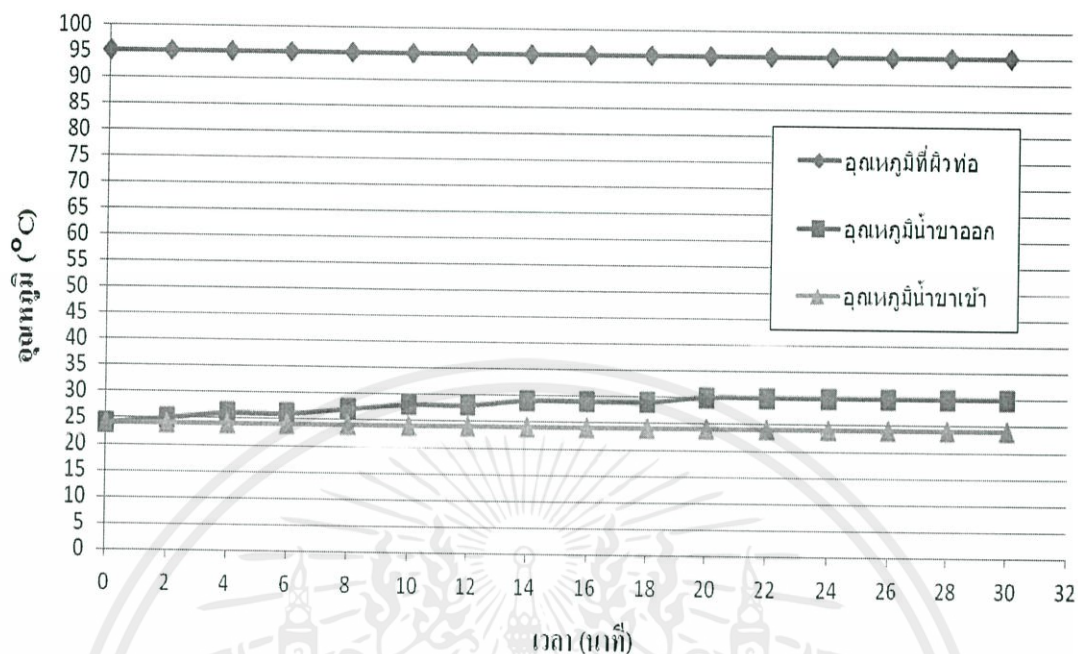
**รูปที่ ข-63** ค่าอุณหภูมิของน้ำขาเข้า-ขาออกเทียบกับเวลาของการทดลองท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องโดยใช้สารทำงานเป็นเอทานอล ที่แนวองศาการวางเท่ากับ 0 องศา อุณหภูมิที่ผิวท่อความร้อนเท่ากับ 95 องศาเซลเซียส

- ท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 95 °C มุม 45 ° ที่มีเอทานอลเป็นสารทำงาน



**รูปที่ ข-64** ค่าอุณหภูมิของน้ำขาเข้า-ขาออกเทียบกับเวลาของการทดลองท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องโดยใช้สารทำงานเป็นเอทานอล ที่แนวองศาการวางเท่ากับ 45 องศา อุณหภูมิที่ผิวท่อความร้อนเท่ากับ 95 องศาเซลเซียส

- ท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 95 °C มุม 90 ° ที่มีเอทานอลเป็นสารทำงาน



รูปที่ ข-65 ค่าอุณหภูมิของน้ำขาเข้า-ขาออกเทียบกับเวลาของการทดลองท่อความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องโดยใช้สารทำงานเป็นเอทานอล ที่แนวองศาการวางเท่ากับ 90 องศา อุณหภูมิที่ผิวท่อความร้อนเท่ากับ 95 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ก-1. การคำนวณปริมาตรของไหลทำงาน [11]

ปริมาตรของของไหลทำงานที่ใส่ในท่อความร้อน จะคำนวณจากปริมาตรช่องว่างของโครงสร้างวัสดุพรุน จากงานวิจัยของ R. Kempers และคณะ[12] กล่าวว่าปริมาตรของไหลทำงานที่ส่งผลดีต่อประสิทธิภาพการถ่ายโอนความร้อนควรอยู่ในช่วง 100-120% ของปริมาตรรูพรุนในวัสดุพรุน ดังนั้นในที่นี้จึงกำหนดให้ปริมาตรของไหลเป็น 120% ของปริมาตรช่องว่างในโครงสร้างวัสดุพรุน คำนวณได้ดังนี้

ปริมาตรของไหลทำงาน 100 % เท่ากับปริมาตรรูพรุนในโครงสร้างวัสดุพรุน

$$V_{100\%} = \varepsilon \times V_{wick} \quad (\text{ก-1})$$

อัตราส่วนรูพรุนของตะแกรงลวด ( $\varepsilon$ ) จากตารางที่ 4

$$\varepsilon = 1 - \frac{1.05\pi Nd}{4} \quad (\text{ก-2})$$

เมื่อ  $N$  คือ จำนวนรูพรุนของโครงสร้างวัสดุพรุนต่อหน่วยความยาว (2,755.9 เมตร)

$d$  คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นลวด (0.000104 เมตร)

$$\text{ดังนั้น } \varepsilon = 1 - \frac{(1.05)\pi(2,755.9)(0.000104)}{4} = 0.7638$$

$$V_{wick} = \frac{\pi L_w (d_i^2 - d_v^2)}{4} \quad (\text{ก-3})$$

เมื่อ  $L_w$  คือ ความยาวของตะแกรงลวดสเตนเลส (0.3 เมตร)

$d_i$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อความร้อน (0.01625 เมตร)

$d_v$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางทางเดินเฟสไอ (0.015 เมตร)

$$\text{ดังนั้น } V_{wick} = \frac{\pi 0.3 (0.01625^2 - 0.015^2)}{4} = 9.2038 \times 10^{-6} \text{ เมตร}^3$$

$$\text{จะได้ว่า } V_{100\%} = 0.7638 \times 9.2038 \times 10^{-6} = 7.0298 \times 10^{-6} \text{ เมตร}^3$$

$$\text{ดังนั้น } V_{120\%} = 7.0298 \times 10^{-6} \times 1.2 = 8.4357 \times 10^{-6} \text{ เมตร}^3$$

เนื่องจากส่วนที่ต่อกับท่อความร้อน มีท่อสเตนเลสเต็มสารซึ่งของไหลทำงานในเฟสของเหลวอาจจะไปอยู่ในบริเวณนั้น จึงเพิ่มปริมาตรของไหลทำงานเข้าไปอีกเป็นจำนวนเท่ากับปริมาตรของท่อสเตนเลส จากหัวท่อความร้อนจนถึงบอลวาล์วสองทาง (1.5 ml) จึงสรุปได้ว่าของไหลทำงาน หรือน้ำที่เติมลงไปมีปริมาตรรวม  $8.4357 \text{ ml} + 1.5 \text{ ml} = 9.9357 \text{ ml}$  หรือประมาณ 10 ml

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ค-2. การคำนวณออกแบบท่อความร้อน [11]

การออกแบบท่อความร้อนในที่นี้กำหนดให้

- อัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อเป็น 1,500 Btu/h หรือ 456 W
- ท่อวางในแนวระดับ ใช้งานที่อุณหภูมิ 80 °C
- ท่อมีความยาว 0.3 เมตร และมีอัตราส่วนความยาวของ

ส่วนระเหย : ส่วนที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ: ส่วนควบแน่น= 4.5 : 1 : 4.5

ซึ่งจะสามารถคำนวณออกแบบท่อความร้อนได้ตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

### ค-2.1 การเลือกสารทำงาน

เมื่อพิจารณาจากช่วงอุณหภูมิที่ใช้งาน โดยใช้ตารางที่ 2-1 จะได้ว่า ที่อุณหภูมิ 80 °C ของไหลทำงานที่เหมาะสมคือ น้ำ เนื่องจาก มีค่า liquid transport และ ค่า conductance properties ที่ดีกว่าสารอื่นๆ และจากงานวิจัยเปรียบเทียบของ Per Wallin [14] ได้แสดงให้เห็นว่าเมื่อเปรียบเทียบสารทำงานอย่าง เมทานอล น้ำ และอะซิโตนที่ขีดจำกัดการถ่ายเทความร้อนประเภทต่างๆ พบว่า น้ำจะให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงสุด

### ค-2.2 การเลือกวัสดุ

เมื่อพิจารณาความเข้ากันได้ของวัสดุและของไหลทำงาน โดยใช้ตารางที่ 2-2 จะได้ว่าเลือกใช้ ทองแดง เพราะมีความเข้ากันได้กับน้ำ และมีค่าการนำความร้อนที่ดีกว่าวัสดุอื่น

### ค-2.3 การเลือกขนาดของท่อ

ในการใช้งานท่อความร้อน จะเกิดความดันไอของสารทำงานที่อยู่ภายในท่อ จึงต้องคำนวณหาความหนาอย่างน้อยที่สุดของท่อ ที่จะทนแรงดันไอของสารทำงานได้

จากช่วงอุณหภูมิที่ใช้งาน สามารถหาความดันไอได้ โดยใช้รูปที่ 2-10 จะได้ว่า ที่อุณหภูมิ 80 °C ความดันไอกภายในท่อจะมีค่าเท่ากับ 10 psi

จากนั้นหาค่าความเค้นแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Stress, UTS) ของช่วงอุณหภูมิที่ใช้งาน โดยใช้รูปที่ 2-11 จะได้ว่า ที่อุณหภูมิ 80°C ค่า UTS เท่ากับ 25 kpsi

จากข้อมูลความดันไอและค่าความเค้นแรงดึงสูงสุด จะนำไปหาอัตราส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกต่อเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อได้จากรูปที่ 2-12 จะได้ว่า ที่ค่า UTS เท่ากับ 25 kpsi และความดันไอกภายในท่อ 10 psi จะได้ค่า  $d_o/d_i$  ประมาณ 1.1

ท่อที่เลือกใช้มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก  $\frac{3}{4}$  นิ้ว (0.01905 เมตร) ดังนั้นเส้นผ่านศูนย์กลางภายในจะต้องมีขนาดเท่ากับ  $0.75/1.1 = 0.682$  นิ้ว ซึ่งจะได้ความหนาของท่ออย่างน้อยเท่ากับ  $0.068$  นิ้ว (0.001727 เมตร) แต่ท่อที่ใช้มีความหนา 0.00285 เมตร (เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.0162 เมตร)

ซึ่งหนากว่าความหนาขั้นต่ำจึงมั่นใจได้ว่าท่อที่ใช้จะทนแรงดันไอของสารทำงานได้

## ก-2.4 การออกแบบโครงสร้างวัสดุพูน

เลือกโครงสร้างวัสดุพูนเป็นแบบ ตะแกรงลวดละเอียด  
สมมติให้ เส้นผ่านศูนย์กลางของทางเดินเฟสไอ = 0.6 นิ้ว

ความดันที่มีผลมาจากการเคลื่อนที่ของของเหลว คือ Hydrostatic Pressure ซึ่งเป็นผลรวมของค่าความดันของของเหลวที่มีผลมาจากแรงโน้มถ่วง (Normal Hydrostatic Pressure) และค่าความดันของของเหลวในแนวเดียวกับท่อ (Axial Hydrostatic Pressure) ที่มุม 0 องศาจากแนวระดับ

$$\text{จะได้ Hydrostatic Pressure} = \rho_l g d_v \cos \psi + \rho_l g L_s \sin \psi = 143.7$$

ค่า Maximum Effective Pumping Pressure อย่างน้อยควรมีค่า เป็น 2 เท่าของ Hydrostatic Pressure ซึ่งจะได้ 287.4

หากเลือกใช้ตะแกรงลวดละเอียด 70 mesh จะคำนวณหาค่า Maximum Capillary Pressure ของตะแกรงลวดละเอียดได้จากสมการ 2-4 ได้ 547.2 ซึ่งเพียงพอสำหรับความดันจากการเคลื่อนที่ของของเหลว

หา  $QL_{c,max}$  จากสมการ 2-20 โดยใช้ค่า Maximum Capillary Pressure เป็น 547.2

$$\text{โดย } F_l = \frac{\mu_l}{KA_w \rho_l \lambda} = 7.22$$

$$\text{และ } F_v = \frac{(f_v Re_v) \mu_v}{2r_{h,v}^2 A_v \rho_v \lambda} = 0.0379$$

แทนค่าจะได้  $QL_{c,max} = 75.35 \text{ Wm}$

หา QL ที่ทำให้ได้  $Q = 456 \text{ W}$  เป็นค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนที่กำหนดไว้

$$\text{จาก } (Q_c) = \frac{(QL_c)}{0.5L_c + L_a + 0.5L_e}$$

$$\text{ดังนั้น } QL = (456) \left[ (0.5)(0.3) \left( \frac{4.5}{10} \right) + (0.3) \left( \frac{1}{10} \right) + (0.5)(0.3) \left( \frac{4.5}{10} \right) \right]$$

$$= 75.24 \text{ Wm}$$

ซึ่งจะเห็นว่า  $QL < QL_{c,max}$  จึงถือว่าค่าที่ใช้่นั้นเหมาะสม และการสมมติให้ เส้นผ่านศูนย์กลางของทางเดินเฟสไอ เป็น 0.6 นิ้ว ถือว่าเป็นไปได้

- ตรวจสอบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ

พิจารณาจากรูปที่ 2-9 โดยต้องการให้มีค่าอัตราการถ่ายโอนความร้อนเป็น 1,500 Btu/h หรือ 456 W สำหรับท่อที่เลือกใช้มีเส้นผ่านศูนย์กลางของทางเดินเฟสไอ เป็น 0.6 นิ้ว ซึ่งจากรูปที่ 2-9 จะได้อัตราการถ่ายโอนความร้อนประมาณ 100,000 Btu/h ซึ่งมากกว่า ค่าที่ตั้งไว้ที่ 1,500 Btu/h

- ความหนาของชั้น โครงสร้างวัสดุพอรุน

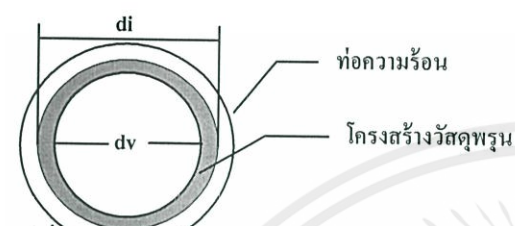
ความหนาของชั้น โครงสร้างวัสดุพอรุนดังแสดงในรูป ค-1 สามารถหาได้จาก

$$(d_i - d_v)/2 = 6.24 \times 10^{-4} \text{ เมตร}$$

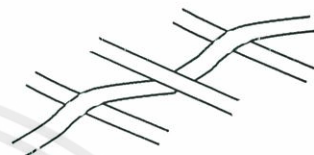
ความหนาเส้นลวดของตะแกรงละเอียด =  $1.04 \times 10^{-4}$  เมตร

เนื่องจากตะแกรงลวด 1 ชั้น มีเส้นลวดทับกัน 2 เส้น ดังรูปที่ ค-2

ดังนั้น ตะแกรงลวด 1 ชั้น มีความหนา =  $1.04 \times 10^{-4} \times 2 = 2.08 \times 10^{-4}$  เมตร



รูปที่ ค-1 ภาพตัดขวางของท่อความร้อน



รูปที่ ค-2 ลักษณะของตะแกรงลวด

ดังนั้นจำนวนชั้น =  $6.24 \times 10^{-4} / 2.08 \times 10^{-4} = 3$  ชั้น

หลังจากได้ลักษณะ โครงสร้างของท่อความร้อนจากการออกแบบแล้ว จึงนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาขีดจำกัดความร้อนแต่ละประเภทเพื่อประมาณค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนต่อไป

### ค-3. ตัวอย่างการคำนวณค่าขีดจำกัดความร้อนประเภทต่างๆ [11]

สมมติฐาน : ให้การกระจายตัวของการถ่ายเทความร้อนมีความสม่ำเสมอตลอดแนวยาวท่อ

กำหนดอุณหภูมิที่ใช้งานเป็น  $80^\circ\text{C}$  หรือ  $333.15 \text{ K}$  และองศาการวางเป็น 0 องศา

#### ค-3.1. การคำนวณหาอัตราการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากขีดจำกัดความดันแคปิลลารี

ความดันแคปิลลารีสูงสุด (Maximum Capillary Pressure,  $P_{cm}$ )

$$P_{cm} = \frac{2\sigma}{r_c} \quad (2-4)$$

เมื่อ  $r_c$  คือ รัศมีแคปิลลารี คำนวณได้จากสมการ 5

$$r_c = \frac{d+w}{2} = \frac{l}{2N} \quad (2-5)$$

$$r_c = \frac{1}{2(2755.9)} = 1.8142 \times 10^{-4} \text{ เมตร}^{-1}$$

$\sigma$  คือ สัมประสิทธิ์แรงตึงผิว ( $0.0627$  นิวตัน/เมตร)

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ลีดทั้งหมดนี้ให้คิดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{ดังนั้น } P_{cm} = \frac{2(6.2673 \times 10^{-4})}{1.8142 \times 10^{-4}} = 690.8834 \text{ นิวตัน/เมตร}^2$$

ค่าความดันแคปิลลารีประสิทธิผลสูงสุด(Maximum Effective Capillary Pressure,  $P_{cm,e}$ )

$$P_{cm,e} = \frac{2\sigma}{r_c} - \Delta P_{\perp} \quad (2-14)$$

เมื่อ  $\Delta P_{\perp}$  มีผลมาจากแรงโน้มถ่วงของโลก และสามารถคำนวณหาได้จากสมการ 15

$$P_{cm,e} = \frac{2\sigma}{r_c} - \rho_l g d_v \cos \psi \quad (2-15)$$

เมื่อ  $\rho_l$  คือ ความหนาแน่นของของเหลว (977.4096 กิโลกรัม/เมตร<sup>3</sup>)

$g$  คือ แรงโน้มถ่วงของโลก (9.81 เมตร/วินาที<sup>2</sup>)

$d_v$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางทางเดินเฟสไอ (0.015 เมตร)

$\psi$  คือ มุมการวางท่อความร้อนจากแนวระดับ (0 องศา)

ดังนั้น  $\Delta P_{\perp} = \rho_l g d_v \cos \psi = 987.1141 \times 9.81 \times 0.015 \times \cos 0 = 143.6983$

ดังนั้น  $P_{cm,e} = 547.1850$  นิวตัน/เมตร<sup>2</sup>

แพ็คเกจรีซิดจังก์ชันการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากแรงดันแคปิลลารี (Capillary Limitation on the Heat Transport Factor,  $Q_{c,max}$ )

$$(Q_{Lc,max}) = \frac{\frac{2\sigma}{r_c} - \Delta P_{\perp} - \rho_l g L_i \sin \psi}{F_l + F_v} \quad (2-20)$$

เมื่อ  $L_i$  คือ ความยาวรวมของท่อความร้อน (0.3 เมตร)

$F_l$  คือ สัมประสิทธิ์แรงต้านทานการไหลในเฟสของเหลว

$$F_l = \frac{\mu_l}{KA_w \rho_l \lambda} \quad (2-20.1)$$

เมื่อ  $\mu_l$  คือ ความหนืดของของเหลว ( $3.62 \times 10^{-4}$  ปาสคาล·วินาที)

$K$  คือ ค่าการซึมผ่านโครงสร้างวัสดุพอร์น ตามตารางที่ 4

$$K = \frac{d^2 \varepsilon^3}{122(1-\varepsilon)^2} = \frac{0.000104^2 \times 0.7638^3}{122(1-0.7638)^2} = 7.0772 \times 10^{-10}$$

$A_w$  คือ พื้นที่หน้าตัดของโครงสร้างวัสดุพอร์น ( $3.0632 \times 10^{-5}$  เมตร<sup>2</sup>)

$\lambda$  คือ ความร้อนแฝงการกลายเป็นไอ (2,366.11 กิโลจูล/กิโลกรัม)

ดังนั้น  $F_l = \frac{3.62 \times 10^{-4}}{7.0772 \times 10^{-10} \times 3.0632 \times 10^{-5} \times 987.1141 \times 2,366,110} = 7.22$

$F_v$  คือ สัมประสิทธิ์แรงต้านทานการไหลในเฟสไอ

$$F_v = \frac{(f_v Re_v) \mu_v}{2r_{h,v}^2 A_v \rho_v \lambda} \quad (2-20.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์  
ไม่ว่ากรณีใดๆ

เมื่อ  $(f_v Re_v)$  คือ สัมประสิทธิ์แรงต้านทาน ที่การไหลแบบลามินาร์มีค่าเท่ากับ 16

$\mu_v$  คือ ความหนืดของไอ ( $1.0937 \times 10^{-5}$  ปาสคาล·วินาที)

$r_{h,v}$  คือ ค่ารัศมีไฮดรอลิก สำหรับ โครงสร้างวัสดุพรุนที่เป็นตะแกรงลวดละเอียด  
เป็น

$$\frac{d_v}{2} = \frac{0.015}{2} = 0.0075$$

$A_v$  คือ พื้นที่หน้าตัดทางเดินเฟสไอ ( $1.7676 \times 10^{-4}$  เมตร<sup>2</sup>)

$\rho_v$  คือ ความหนาแน่นของไอ ( $0.1106$  กิโลกรัม/เมตร<sup>3</sup>)

ดังนั้น 
$$F_v = \frac{(16)1.16 \times 10^{-5}}{2(0.0075)^2(1.7676 \times 10^{-4})(0.10421)(2,366,110)} = 0.038$$

ดังนั้น 
$$(QL_{c,max}) = \frac{690.8835 - 143.6984 - 0}{7.22 + 0.0379} = 75.35$$

อัตราการถ่ายเทความร้อนของขีดจำกัดแคปิลารี (Capillary Limitation on the Heat

Transport Rate,  $Q_{c,max}$ )

$$(Q_{c,max}) = \frac{(QL_{c,max})}{0.5L_c + L_a + 0.5L_e} \quad (2-21)$$

เมื่อ  $L_c$  คือ ความยาวของส่วนควบแน่น ( $0.135$  เมตร)

$L_a$  คือ ความยาวของส่วนที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ( $0.03$  เมตร)

$L_e$  คือ ความยาวของส่วนระเหย ( $0.135$  เมตร)

ดังนั้น 
$$(Q_{c,max}) = \frac{75.35}{0.5(0.135) + (0.03) + 0.5(0.135)} = 456.69 \text{ วัตต์}$$

### ค-3.2. การคำนวณหาอัตราการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากขีดจำกัดความเร็วเสียง

$$Q_{S,max} = A_v \rho_v \lambda \left[ \frac{\gamma_v R T_v}{2(\gamma_v + 1)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2-22)$$

เมื่อ  $\gamma_v$  คือ อัตราส่วนความร้อนจำเพาะของไอ ( $1.3280$ )

$R_v$  คือ ค่าคงที่ของไอ 
$$\frac{R}{mw} = \frac{8,314}{18} = 461.89$$

$T_v$  คือ อุณหภูมิที่ใช้งาน ( $353.15$  K)

ดังนั้น 
$$Q_{S,max} = (1.7676 \times 10^{-4})(0.10421)(2,366,110) \left[ \frac{(1.3280)(461.89)(353.15)}{2(1.3280 + 1)} \right]^{\frac{1}{2}} = 9,401 \text{ วัตต์}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ค-3.3. การคำนวณหาอัตราการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากขีดจำกัดของเหลวหลุดลอยตามไอ

$$Q_{E,max} = A_v \rho \left[ \frac{\sigma \rho_v}{2r_{h,s}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2-23)$$

ดังนั้น  $Q_{E,max} = (1.7676 \times 10^{-4})(2,366,110) \left[ \frac{(0.0627)(0.10421)}{2(0.00013)} \right]^{\frac{1}{2}} = 2,100.82$  วัตต์

### ค-3.4. การคำนวณหาอัตราการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากขีดจำกัดการเดือด

$$Q_{B,max} = \frac{2\pi L_e k_e T_v}{\lambda \rho_v \ln(r_i / r_v)} \left( \frac{2\sigma}{r_n} - P_{cm} \right) \quad (2-24)$$

เมื่อ  $k_e$  คือ ค่าการนำความร้อนประสิทธิผล จากตารางที่ 6

$\frac{2\sigma}{r_n}$  คือ ความดันวิกฤตสำหรับการเดือดเป็นฟอง ซึ่ง  $r_n$  มีค่าเท่ากับ  $2.54 \times 10^{-7}$

ดังนั้น  $Q_{B,max} = \frac{2\pi(0.135)(0.971)(353.15)}{(2,366,110)(0.10421)\ln(1.0831)} (493,488.19 - 690.88) = 7,274.25$  วัตต์

ตามทฤษฎีในบทที่ 2 หัวข้อ 2.6.4 ขีดจำกัดการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากขีดจำกัดประเภทต่างๆ ได้กล่าวไว้ว่า อัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนที่สภาวะหนึ่งๆ จะมีค่าเท่ากับขีดจำกัดที่มีค่าน้อยที่สุดในบรรดาขีดจำกัดทั้ง 4 ซึ่งค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนสำหรับขีดจำกัดที่น้อยที่สุด ที่อุณหภูมิใช้งาน  $60^\circ\text{C}$  และ  $80^\circ\text{C}$  ของแนวองศาการวางท่อความร้อนต่างๆ แสดงไว้ดังตารางที่ ง-1 ดังนี้

ตารางที่ ค-1 ตารางแสดงอัตราการถ่ายเทความร้อนจากการคำนวณ

แนวองศาการวาง ท่อความร้อน(องศา)	อุณหภูมิ $80^\circ\text{C}$	
	ประเภทขีดจำกัด	อัตราการถ่ายเทความร้อน(วัตต์)
-90	$Q_E$	2,100.83
-45	$Q_E$	2,100.83
0	$Q_C$	456.69
45	$Q_C$	-1,264.06
90	$Q_C$	-1,821.71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### ก-4 ตัวอย่างการคำนวณหาอัตราการไหลของน้ำ

ในการทดสอบประสิทธิภาพต่อความร้อนจะต้องทำการวัดอัตราการไหลของน้ำก่อน โดยสามารถวัดได้จาก การวัดปริมาตรของน้ำเทียบกับเวลาแล้วคำนวณหาอัตราการไหลได้ดังตัวอย่างต่อไปนี้

วัดปริมาตรของน้ำ 10 วินาที ได้ปริมาตรน้ำเท่ากับ 10 ลูกบาศก์เซนติเมตร

1 ลิตร เท่ากับ 1000 ลูกบาศก์เซนติเมตร

1 ชั่วโมง เท่ากับ 3600 วินาที

$$\text{เพราะฉะนั้นอัตราการไหลของน้ำเท่ากับ } \frac{10\text{cm}^3}{10\text{S}} \times \frac{1\text{Litre}}{1000\text{cm}^3} \times \frac{3600\text{S}}{1\text{hr}} = 3.6\text{L / hr}$$

#### ก-5 ตัวอย่างการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้า

ในการทดลองจะต้องมีการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าที่ให้แก่เครื่องกำเนิดความร้อนซึ่งสามารถหาได้จากสมการ

$$P = IV \quad (2-5)$$

เมื่อ  $P$  = กำลังไฟฟ้า (วัตต์)  
 $I$  = กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)  
 $V$  = แรงดันไฟฟ้าตกคร่อม (โวลต์)

ตัวอย่างการทดลองที่ 60 °C

$$I = 0.4 \text{ แอมแปร์ และ } V = 65 \text{ โวลต์}$$

ดังนั้นจะได้ กำลังไฟฟ้าเท่ากับ  $65 \times 0.4 = 26$  วัตต์

เมื่อได้กำลังไฟฟ้าแล้วจะสามารถนำไปหาประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนได้จาก สัดส่วนระหว่างการถ่ายโอนความร้อนที่สวนควบแน่น(วัตต์) ต่อ กำลังไฟฟ้าที่ให้แก่ส่วนระเหย (วัตต์)

### ค-6 ตัวอย่างการคำนวณค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนในชุดทดสอบประสิทธิภาพ

ในการทดสอบประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนจะใช้น้ำที่อุณหภูมิห้อง แลกเปลี่ยนกับส่วนควบแน่นและให้ความร้อนด้วยฮีตเตอร์ที่อุณหภูมิ 60 °C, 80 °C, 85 °C, 90 °C และ 95°C กับส่วนระเหย ซึ่งสามารถคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนได้โดยใช้สมการ

$$Q = mc\Delta T \quad (2-6)$$

เมื่อ  $Q$  คือ อัตราการถ่ายเทความร้อน (วัตต์)

$m$  คือ อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำ (ลิตรต่อชั่วโมง)

$c$  คือ ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ (จูล/กิโลโมล เคลวิน) ซึ่งเท่ากับ 4.2 kJ/kg K

โดย อุณหภูมิที่ใช้เป็นอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำขาเข้าและน้ำขาออก

$\Delta T$  คือ ผลต่างของอุณหภูมิของน้ำขาเข้าและน้ำขาออก (เคลวิน)

กำหนดให้ อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำเป็น 3.6 ลิตรต่อชั่วโมง

อุณหภูมิของน้ำขาเข้าเป็น 24 °C

อุณหภูมิของน้ำขาออกเป็น 30 °C

ดังนั้น ผลต่างอุณหภูมิจะเป็น 30-24= 6 °C

ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำ 36 °C เป็น 4.2 kJ/kg K

ดังนั้น  $Q = \frac{3.6 \times 4.2 \times 6 \times 1,000}{3,600} = 25.2$  วัตต์

### ค-7 ตัวอย่างการคำนวณประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน

ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนสามารถหาได้จากสัดส่วนระหว่างการถ่ายเทความร้อนที่ส่วนควบแน่น(วัตต์) ต่อ กำลังไฟฟ้าที่ให้แก่ส่วนระเหย (วัตต์) ซึ่งค่าการถ่ายเทความร้อนที่ส่วนควบแน่นสามารถหาได้ดังหัวข้อ ค-6 และกำลังไฟฟ้าก็สามารถหาได้ดังหัวข้อ ค-5

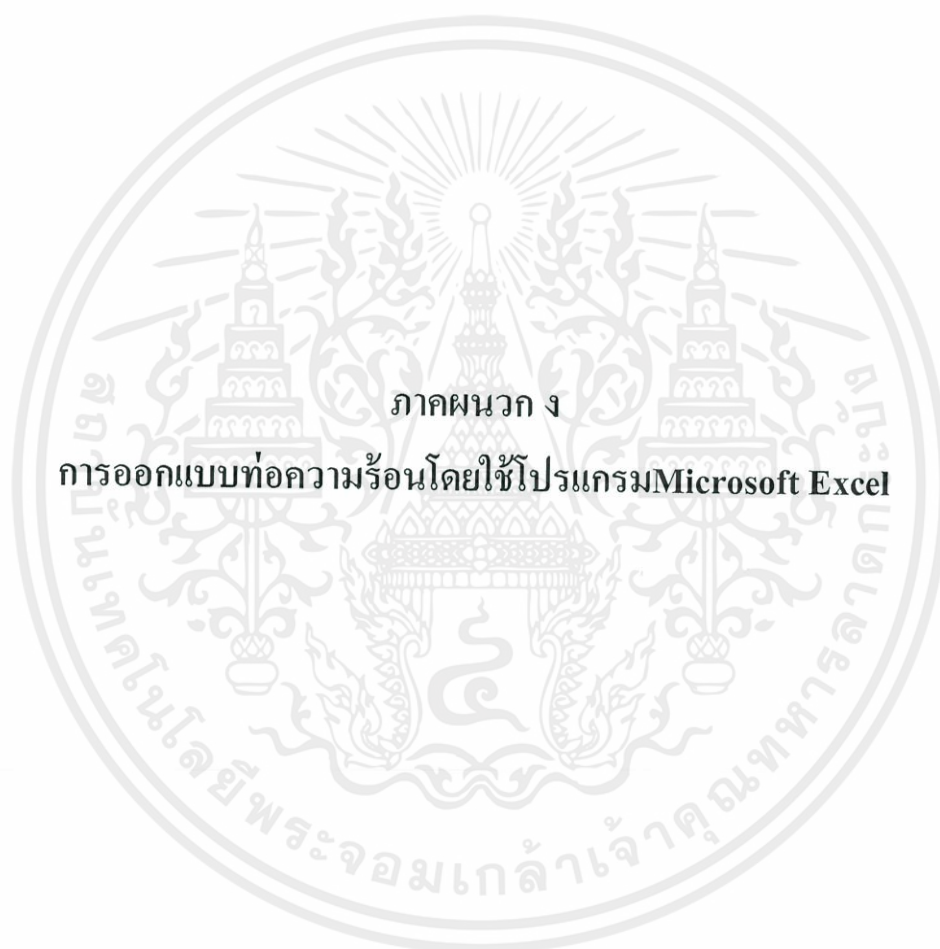
ตัวอย่างการคำนวณ

การทดลองที่เนวองศาการวางท่อเท่ากับ -45° อุณหภูมิ 90 °C และสารทำงานที่ใช้คือน้ำ สามารถคำนวณหาประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนได้ดังต่อไปนี้

ค่าการถ่ายเทความร้อน เท่ากับ 42 วัตต์

กำลังไฟฟ้า เท่ากับ 95 x 0.9 = 85.5 วัตต์

เพราะฉะนั้นจะได้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนเท่ากับ 0.49 หรือ 49% ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ง  
การออกแบบท่อความร้อนโดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการคำนวณหาขีดจำกัดการถ่ายเทความร้อนแต่ละประเภทตามทฤษฎีหัวข้อ 2.6.4 จะใช้โปรแกรม Microsoft Excel ในการคำนวณ เพื่อความสะดวกในการหาอัตราการถ่ายเทความร้อน

pipe characteristics					
container material	Copper				
outer diameter	Do	0.0191	m	3/4	in
inner diameter	Di	0.01625	m		
thickness	tp	0.00285	m		
Length	L	0.3	m		
conductivity of pipe (Cu)	kp	379	W/mK		
angle from horizontal	$\psi$	0	degree		
wick structure	Stainless steel				
number of mesh	N	70	mesh	2755.9	m <sup>-1</sup>
wire diameter	d	0.000104	m		
viod fraction	$\varepsilon$	0.7637583		ratio of length	
wick thickness	tw	0.000624	m	evap	adia
vapor core diameter	dv	0.015002	m	13.5	3
conductivity of wick (ss)	kw	16	W/mK	cond	13.5
evaporator section	Le	0.135	m	D0/Di	1.175385
condenser section	Lc	0.135	m	end cap	1.5 cm
adiabatic section	La	0.03	m	mesh layers	3

working fluid properties					
volume		10	ml		
vapor temperature	tv	353.15	K	T ©	80
temp of condenser section		room T	K		
vapor pressure	P	16932.0878	Pa	5	in Hg
density of liquid	$\rho_L$	987.1141			
viscosity of liquid	$\mu_L$	4.67E-04			
thermal conductivity	kL	0.65284	W/mK		
surface tension coefficient	$\sigma$	0.06624	N/m		
latent heat of vapor	$\lambda$	2,366,110			
density of vapor	$\rho_V$	0.1106			
viscosity of vapor	$\mu_V$	1.09E-05			
molecular weight	mw	18			
vapor specific heat ratio	$\gamma_V$	1.3303			
gas constant	R	8314	J/kmol K		
critical nucleation radius	rn	2.54E-07			
hydraulic radius	rh,s	1.29E-04			

Q c,max	383.07
Q s,max	9,693.58
Q e,max	2,224.88
Q b,max	7,152.98

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกร... อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอก... ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการคำนวณออกแบบท่อความร้อน จะต้องใช้สมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของของไหลทำงาน ซึ่งในการทดลองนี้คือ น้ำ เพื่อคำนวณหาขีดจำกัดการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อน โดยสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของน้ำในแต่ละสภาวะ แสดงดังรูป

6/2/2556		เส้นนำอิมตัว : Spirax Sarco Thailand	
<b>Inputs</b>		Pressure	
<b>Output</b>		<input checked="" type="radio"/> Single Value <input type="radio"/> Table	
Pressure	0.01693	MPa absolute	
Saturation Temperature	56.5141	°C	
Specific Enthalpy of Water ( $h_f$ )	236.606	kJ/kg	
Density of Water	984.916	kg/m <sup>3</sup>	
Specific Volume of Water ( $v$ )	1.01531E-03	m <sup>3</sup> /kg	
Specific Entropy of Water ( $s_f$ )	0.787251	kJ/kg K	
Specific Heat of Water ( $c_p$ )	4.18212	kJ/kg K	
Dynamic Viscosity of Water	4.92231E-04	Pa s	

รูปที่ จ-1 คุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของน้ำอิมตัวที่ความดัน 0.01693 MPa (5 mmHg) [11]

6/2/2556		ขอบเขตไอรอนฝั่งขาด : Spirax Sarco Thailand	
<b>Inputs</b>		Pressure and Superheat Temperature	
<b>Output</b>		<input checked="" type="radio"/> Single Value <input type="radio"/> Table	
Pressure	0.01693	MPa absolute	
Superheat Temperature	60	°C	
Saturation Temperature	56.5141	°C	
Degrees Superheat	3.48593	°C	
Specific Enthalpy of Water ( $h_f$ )	236.606	kJ/kg	
Specific Enthalpy of Evaporation ( $h_{fg}$ )	2366.11	kJ/kg	
Specific Enthalpy of Superheated Steam ( $h$ )	2609.44	kJ/kg	
Density of Steam	0.110591	kg/m <sup>3</sup>	
Specific Volume of Steam ( $v$ )	9.04230	m <sup>3</sup> /kg	
Specific Entropy of Water ( $s_f$ )	0.787251	kJ/kg K	
Specific Entropy of Evaporation ( $s_{fg}$ )	7.17734	kJ/kg K	
Specific Entropy of Superheated Steam ( $s$ )	7.98489	kJ/kg K	
Specific Heat of Steam ( $c_v$ )	1.44901	kJ/kg K	
Specific Heat of Steam ( $c_p$ )	1.92759	kJ/kg K	
Speed of Sound	450.278	m/s	
Dynamic Viscosity of Steam	1.09376E-05	Pa s	
Isentropic Coefficient ( $k$ )	1.32438		
Compressibility Factor of Steam	0.995644		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับเอกรงานเพื่อใช้ในการดำเนินงานเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่า

รูปที่ จ-2 คุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของไอร้อนยิ่งยวดที่ที่ความดัน 0.01693 MPa

อุณหภูมิ 60°C [11]

6/2/2556

ขอบเขตไลรอนบึงยาว : Spirax Sarco Thailand

Inputs  
Output

Pressure and Superheat Temperature

 Single Value  Table

Pressure

0.01693 MPa absolute

Superheat Temperature

80 °C

Saturation Temperature

56.5141 °C

Degrees Superheat

23.4859 °C

Specific Enthalpy of Water ( $h_f$ )

236.606 kJ/kg

Specific Enthalpy of Evaporation ( $h_{fg}$ )

2366.11 kJ/kg

Specific Enthalpy of Superheated Steam (h)

2647.87 kJ/kg

Density of Steam

0.104211 kg/m<sup>3</sup>

Specific Volume of Steam (v)

9.59587 m<sup>3</sup>/kgSpecific Entropy of Water ( $s_f$ )

0.787251 kJ/kg K

Specific Entropy of Evaporation ( $s_{fg}$ )

7.17734 kJ/kg K

Specific Entropy of Superheated Steam (s)

8.09690 kJ/kg K

Specific Heat of Steam ( $c_w$ )

1.44337 kJ/ka K

รูปที่ จ-3 คุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของไอร้อนยิ่งยวดที่ความดัน 0.01693 MPa อุณหภูมิ 80°C [11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้