

การออกแบบ และทดสอบประสิทธิภาพของฟิล์มความชื้นแบบตะแกรงดวงตะลึง



ปริญญาโท เป็นส่วนหนึ่งของ การศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2555

การออกแบบ และทดสอบประสิทธิภาพของท่อความร้อนแบบตะแกรงลวดละเอียด



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

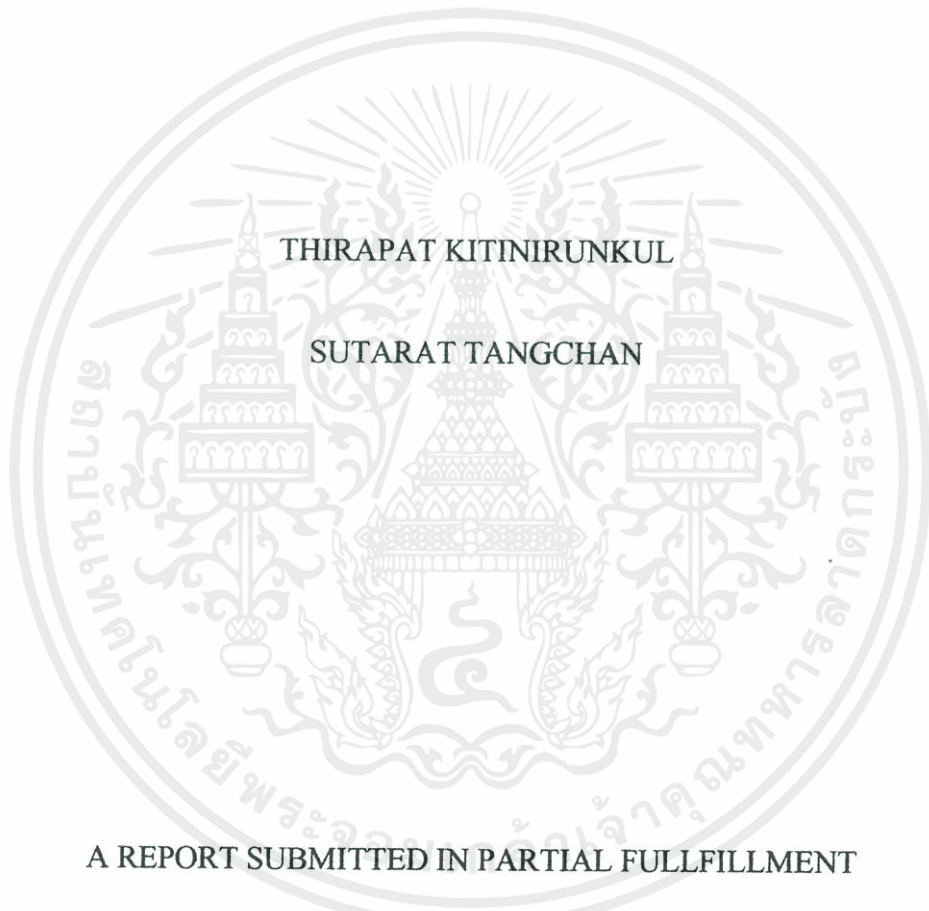
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2555

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DESIGN AND PERFORMANCE TESTING OF SCREEN MESH WICKED

HEAT PIPE



THIRAPAT KITINIRUNKUL

SUTARAT TANGCHAN

A REPORT SUBMITTED IN PARTIAL FULLFILLMENT

OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF

BACHALOR OF CHEMICAL ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUTT'S INSTUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2012

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาบัตรเรื่อง การออกแบบ และทดสอบประสิทธิภาพของท่อความร้อนแบบตะแกรง
ลวดละเอียด
โดย นายธีรภัทร์ กิตินิรันดร์กุล
นางสาวศุฑารัตน์ แดงจั่น
อาจารย์ที่ปรึกษา อ.บุญชัย โชติวิริยวานิชย์
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปริญญาบัตรนี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญาบัตร


.....ประธานกรรมการ
(อ.บุญชัย โชติวิริยวานิชย์)


.....กรรมการ
(ผศ.ดร.อกินันท์ นัมศรี)


.....กรรมการ
(ดร.ธนวรรณ พิณรัตน์)

ปริญญานิพนธ์เรื่อง การออกแบบ และทดสอบประสิทธิภาพของท่อความร้อนแบบตะแกรงลวด
ละเอียด
โดย นายธีรภัทร์ กิตินิรันครกุล
นางสาวศุขารัตน์ แต่งจั่น
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี
ปีการศึกษา 2555
อาจารย์ที่ปรึกษา อ.บุญชัย โชติวิริยวาณิช

บทคัดย่อ

โครงการนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาหลักการทํางานและปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อน 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 พบว่าอุณหภูมิที่สูงกว่า จะทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนสูงขึ้น จากการศึกษาผลของแนวการวางท่อความร้อนพบว่าเมื่อมุมของท่อความร้อนจากแนวระดับมีค่าสูงขึ้น โดยที่ด้านที่ได้รับความร้อนอยู่ด้านบน จะส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนลดลง นอกจากนี้ยังได้ศึกษารูปแบบของท่อความร้อนเพื่อแก้ปัญหาแก๊สที่ไม่ควบแน่น คือใช้ท่อความร้อนรูปแบบ Gas-Loaded ซึ่งมีส่วนที่กักเก็บแก๊สที่ไม่ควบแน่นอยู่บริเวณด้านท้ายของส่วนควบแน่น เพื่อเพิ่มพื้นที่การแลกเปลี่ยนความร้อนของไอกับสิ่งแวดล้อมภายนอก โดยพบว่าท่อความร้อนรูปแบบ Gas-Loaded นี้ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของท่อความร้อนได้ดีกว่าท่อความร้อนรูปแบบปกติ

Report Title Design and Performance Testing of Screen Mesh Wicked Heat Pipe
By Mr. Thirapat Kitinirunkul
Miss Sutarat Tangchan
Degree Bachelor of Engineering
Program Chemical Engineering
Year 2012
Advisor Mr. Boonchai Chotiviriyavanich

ABSTRACT

This project studied the principle of heat pipe and factors affecting its thermal performance. The design heat pipe is made of copper tube and water is used as working fluid. The wick structure constructed by 3 layers of stainless screen mesh. Studied factors are operating temperature at 60 °C and 80 °C of heat source; axial of heat pipe is place at -90,-45,-30,-15, 0, 5, 45, and 90 degrees from horizontal and Gas-Loaded heat pipe. The experimental results show that at high temperature heat pipe can transport higher heat than low temperature. For the angle of heat pipe, increasing angle from horizontal where heat source is placed above decreases heat transfer rate. Furthermore, gas-loaded heat pipe is used to improve in thermal performance. Because of blockage of non-condensable gas in condenser section, heat transfer rate decreases. The gas-loaded heat pipe has reservoir gas at the end of condenser section to increase in heat transfer area of heat sink and the results show that it can increase thermal performance of heat pipe.

กิตติกรรมประกาศ

ผู้จัดทำขอขอบพระคุณ รศ.ดร.ประกอบ กิจไชยา ที่ให้คำปรึกษา และให้ความอนุเคราะห์ อุปกรณ์ในการสร้างท่อความร้อน คุณพิสันต์ ผลโพธิ์ ที่ให้คำปรึกษาและแนะนำการใช้อุปกรณ์เพื่อการทดสอบประสิทธิภาพท่อความร้อน และสุดท้าย อ.บุญชัย โชติวิริยวาณิชย์ ที่ให้คำแนะนำ และความช่วยเหลือด้านต่างๆ ตลอดการทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้

ธีรภัทร์ กิตินิรันดร์กุล

ศุขารัตน์ แต่งจั่น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ฅ
สารบัญรูป	ญ
สัญลักษณ์	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
1.3 ขอบเขตของโครงการ	2
1.4 ขั้นตอนในการดำเนินงาน	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 ท่อความร้อน (Heat pipe)	3
2.2 หลักการทำงานของท่อความร้อน	4
2.3 ของไหลทำงาน (Working Fluid)	5
2.4 โครงสร้างวัสดุพรุน	7
2.5 เทคนิคควบคุมท่อความร้อน (Control Techniques)	9
2.6 การออกแบบ (Design Procedures)	13
2.7 ความร้อนสัมผัส (Sensible Heat)	27
2.8 ความดันและจุดเดือดของน้ำ	27
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับท่อความร้อน	28
2.10 การใช้งานท่อความร้อน	29
บทที่ 3 การออกแบบ สร้าง และทดสอบประสิทธิภาพ	33
3.1 การออกแบบท่อความร้อนและสร้างโปรแกรมคำนวณค่าความร้อน	33
3.2 การสร้างท่อความร้อน	35
3.3 การทดสอบประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดสอบประสิทธิภาพและวิเคราะห์ผล	41
4.1 ผลขององศาการวางท่อความร้อนที่มีต่ออัตราการถ่ายโอนความร้อน	41
4.2 ผลจากการใช้งานท่อความร้อนที่อุณหภูมิ 60 °C และ 80 °C	43
4.3 ผลจากการใช้งานท่อความร้อนในรูปแบบ Gas-Loaded	44
4.4 ผลจากการออกแบบท่อความร้อน	45
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	46
5.1 สรุปผลการทดลอง	46
5.2 ข้อเสนอแนะ	46
เอกสารอ้างอิง	48
ภาคผนวก	50



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2-1 ช่วงอุณหภูมิที่ใช้งานของของไหลบางชนิดในท่อความร้อน	6
ตารางที่ 2-2 ความเข้ากันได้ของวัสดุและของไหลทำงาน	13
ตารางที่ 2-3 ค่ารัศมีประสิทธิผลของรูพรุน (r_c) สำหรับโครงสร้างวัสดุพรุนแบบต่างๆ	20
ตารางที่ 2-4 ค่าการซึมผ่าน โครงสร้างวัสดุพรุน (K) สำหรับโครงสร้างวัสดุพรุนต่างๆ	21
ตารางที่ 2-5 ค่า F_v และ D_v สำหรับช่องทางเดินเฟสไอที่เป็นวงกลม	22
ตารางที่ 2-6 ค่าการนำความร้อนประสิทธิผล(Effective Thermal Conductivity of Wick Structures, k_w)	23
ตารางที่ 2-7 จุดเดือดของน้ำที่ความดันต่างๆ	27
ตารางที่ 3-1 ตารางสรุปผลการออกแบบท่อความร้อน	33
ตารางที่ 3-2 ผลการคำนวณค่าอัตราการถ่ายโอนความร้อนทั้ง 4 จุดจำกัดที่อุณหภูมิ 80°C	34
ตารางที่ 4-1 จุดจำกัดการถ่ายเทความร้อนสูงสุดเนื่องจากความดันแคปิลารีเปรียบเทียบกับค่าจากการทดลองที่อุณหภูมิ 80°C	45

สารบัญรูป

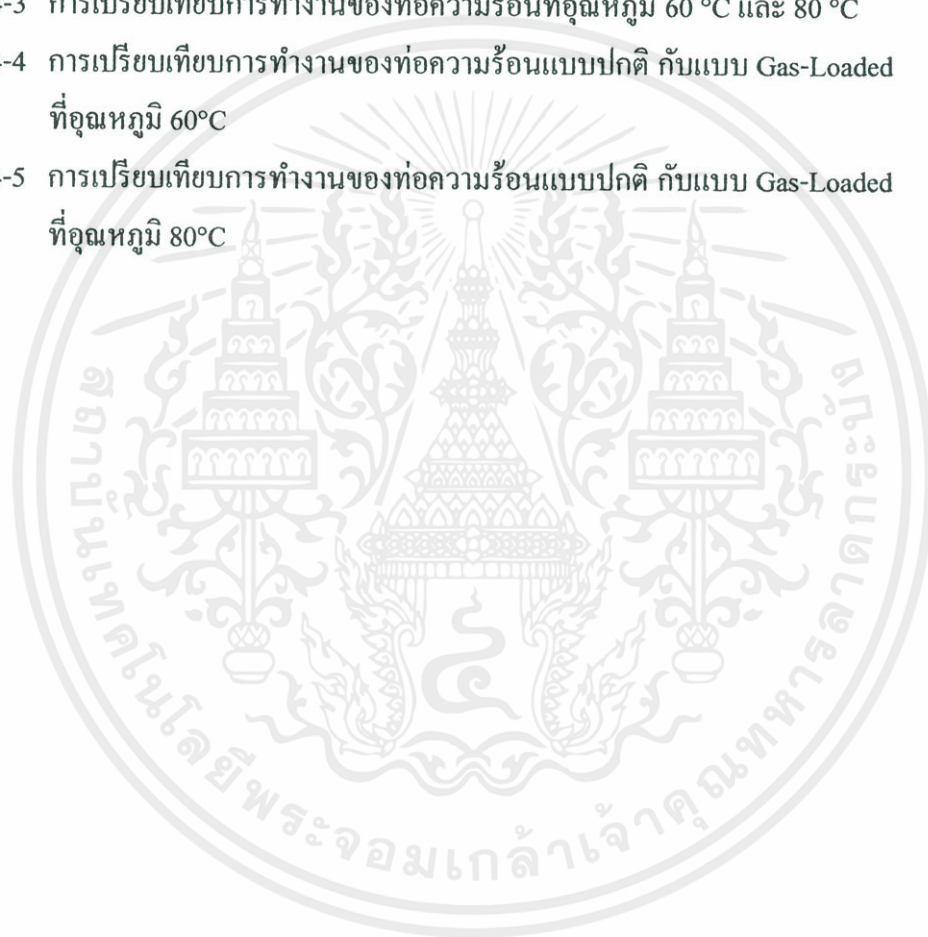
หน้า

รูปที่ 2-1	เทอร์โมไจฟอนและท่อความร้อน	3
รูปที่ 2-2	โครงสร้างและส่วนประกอบของท่อความร้อน	4
รูปที่ 2-3	ภาพตัดแนวขวางของท่อความร้อนที่มีโครงสร้างวัสดุพอร์นที่ทำจากวัสดุชนิดเดียว	7
รูปที่ 2-4	ภาพตัดขวางของท่อความร้อนที่มีโครงสร้างวัสดุพอร์นที่ประกอบด้วยวัสดุ 2 ประเภท	8
รูปที่ 2-5	ภาพจำลองแสดงรูปแบบท่อความร้อนแบบ Gas-Loaded	10
รูปที่ 2-6	ภาพจำลองรูปแบบท่อความร้อนแบบ Excess-Liquid	11
รูปที่ 2-7	ภาพจำลองแสดงรูปแบบท่อความร้อนแบบ Vapor-flow Modulated	12
รูปที่ 2-8	ภาพจำลองแสดงรูปแบบท่อความร้อนแบบ Liquid-flow Modulated	12
รูปที่ 2-9	เส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางเดินเฟสไอกับอัตราการถ่ายเทความร้อนของของไหลทำงานชนิดต่างๆ	14
รูปที่ 2-10	ความดันไอของของไหลทำงานชนิดต่างๆ	15
รูปที่ 2-11	ค่าความเค้นแรงดึงสูงสุดของวัสดุ	15
รูปที่ 2-12	อัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกต่อภายในของท่อกับความดันไอสูงสุด	16
รูปที่ 2-13	ขีดจำกัดในการถ่ายโอนความร้อนของท่อความร้อน	17
รูปที่ 2-14	ภาพจำลองแสดงการหมุนเวียนของสารทำงานในท่อความร้อน	18
รูปที่ 2-15	รัศมีของขอเหลวไว้โค้งที่รอยต่อของเฟสไอและของเหลว	19
รูปที่ 2-16	โปรไฟล์ของความดันเมื่อไหลผ่านนอซเซิล	25
รูปที่ 2-17	เมนบอร์ดคอมพิวเตอร์ที่มีท่อความร้อนในตัวของบริษัท MSI	29
รูปที่ 2-18	ภาพจำลองแสดงโครงสร้างของยานสำรวจ OAO-C ที่ใช้ท่อความร้อนเพื่อระบายความร้อนในแผงวงจรข้อมูล	30
รูปที่ 2-19	ภาพจำลองแสดงการใช้ท่อความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน	30
รูปที่ 2-20	การใช้งานท่อความร้อนกับท่อส่งน้ำมันในอลาสก้า สหรัฐอเมริกา	31
รูปที่ 3-1	ตะแกรงลวดละเอียดที่พันอยู่ในท่อทองแดงหนา 3 ชั้น	35
รูปที่ 3-2	ท่อทองแดงที่ประกอบท่อเคมิดสารและวาล์ว	35
รูปที่ 3-3	ชุดอุปกรณ์เคมิดสารทำงาน	36
รูปที่ 3-4	ชุดแลกเปลี่ยนความร้อน	38
รูปที่ 3-5	ชุดทดสอบประสิทธิภาพของท่อความร้อน	38

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4-1	ค่าอัตราการถ่ายโอนความร้อนของท่อความร้อนที่แนวองศาการวางต่างๆ ที่อุณหภูมิ 60°C	41
รูปที่ 4-2	ค่าอัตราการถ่ายโอนความร้อนของท่อความร้อนที่แนวองศาการวางต่างๆ ที่อุณหภูมิ 80°C	42
รูปที่ 4-3	การเปรียบเทียบการทำงานของท่อความร้อนที่อุณหภูมิ 60 °C และ 80 °C	43
รูปที่ 4-4	การเปรียบเทียบการทำงานของท่อความร้อนแบบปกติ กับแบบ Gas-Loaded ที่อุณหภูมิ 60°C	44
รูปที่ 4-5	การเปรียบเทียบการทำงานของท่อความร้อนแบบปกติ กับแบบ Gas-Loaded ที่อุณหภูมิ 80°C	44



สัญลักษณ์

A_v	พื้นที่หน้าตัดของช่องทางเดินเฟสไอ
A_w	พื้นที่หน้าตัดของโครงสร้างวัสดุพรุน
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
k_e	ค่าการนำความร้อนประสิทธิผล (effective thermal conductivity)
k_f	ความหนาของครีบบรรเทาความร้อนใน โครงสร้างวัสดุพรุนแบบร่องเล็ก (groove thickness)
k_l	ค่าการนำความร้อนของของเหลว (liquid thermal conductivity)
k_w	ค่าการนำความร้อนของวัสดุพรุน (thermal conductivity of wick material)
K	ค่าการซึมผ่าน โครงสร้างวัสดุพรุน (wick permeability)
L_A	ความยาวของส่วนที่ไม่มีถ่ายเทความร้อน (adiabatic length)
L_C	ความยาวของส่วนควบแน่น (condenser length)
L_E	ความยาวของส่วนระเหย (evaporator length)
L_t	ความยาวรวมของท่อความร้อน (total length of heat pipe)
L_w	ความยาวของ โครงสร้างวัสดุพรุน
m	อัตราการใช้พลังงานของน้ำ
M_v	Vapor Flow Mach number
MW	น้ำหนักโมเลกุล (molecular weight)
N	จำนวนช่องของรูพรุนต่อหน่วยความยาว (mesh number)

P_c	ความดันแคปิลลารี (Capillary Pressure)
P_{cm}	ความดันแคปิลลารีสูงสุด (Maximum Capillary Pressure)
$P_{cm,e}$	ความดันแคปิลลารีประสิทธิผลสูงสุด (Maximum Effective Capillary Pressure)
ΔP_L	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_{wick}	ปริมาตรของโครงสร้างวัสดุพรุน
w	ความกว้างของตะแกรงลวด
γ_v	อัตราส่วนความร้อนจำเพาะของเฟสไอ (vapor specific heat ratio)
ε	อัตราส่วนของปริมาตรของรูพรุนต่อปริมาตรของวัสดุทั้งหมด (wick porosity)
λ	ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

μ_l	ความหนืดของของเหลว
μ_v	ความหนืดของไอ
ρ_l	ความหนาแน่นของของเหลว
ρ_v	ความหนาแน่นของไอ
σ	สัมประสิทธิ์แรงตึงผิวของของเหลว (surface tension coefficient)
ψ	มุมของท่อความร้อนที่ทำงานโดยวัดจากแนวระดับ (heat pipe inclination measured from horizontal position)



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

ในปัจจุบันอุปกรณ์ถ่ายโอนความร้อนถูกนำมาใช้ประโยชน์ในงานหลายๆด้าน มีการพัฒนาเทคโนโลยีของอุปกรณ์ประเภทนี้อยู่อย่างต่อเนื่อง เพื่อลดต้นทุน เพิ่มประสิทธิภาพของระบบพลังงาน และเพื่อการจัดการพลังงานที่เหมาะสม โดยท่อความร้อน (Heat pipe) ก็เป็นอีกหนึ่งอุปกรณ์ที่สามารถถ่ายโอนความร้อนได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ แม้ในสภาพที่อุณหภูมิแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ซึ่งการถ่ายเทพลังงานความร้อนจะอาศัยการเปลี่ยนวัฏภาคของของไหลภายในท่อความร้อน ท่อความร้อนพัฒนามาจากอุปกรณ์ถ่ายโอนความร้อนประเภทเทอร์โมไซฟอน (Thermosyphon) ที่เป็นท่อโลหะปิดสนิทภายในเป็นสุญญากาศและมีของเหลวทำงานบรรจุอยู่ภายใน ส่วนท่อความร้อนมีโครงสร้างเพิ่มเติมเป็นโครงสร้างวัสดุพรุน (Wick Structure) หรือร่องตามแนวยาวขนาดเล็กภายในท่อ ซึ่งโครงสร้างลักษณะนี้จะใช้แยกของเหลวไม่ให้เคลื่อนที่ชนกับไอ และยังใช้เป็นทางเดินของเฟสของเหลว นอกจากนี้ โครงสร้างนี้ยังทำให้เกิดความดันแคปิลลารี (Capillary Pressure) ส่งผลให้เฟสของเหลวเคลื่อนที่ในทิศทางตรงข้ามกับแรงโน้มถ่วงได้ ซึ่งจะทำให้เกิดการไหลเวียนอย่างต่อเนื่องภายในท่อความร้อน จึงไม่มีความจำเป็นที่จะต้องใช้พลังงานอื่นหรือกลไกภายนอกใดๆเพื่อขับเคลื่อนท่อความร้อน และเนื่องจากเป็นท่อที่ปิดสนิท ไม่มีชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่ได้ ทำให้ดูแลรักษาได้ง่าย ไม่ต้องทำการซ่อมบำรุงบ่อย แค่เพียงการทำความสะอาดภายนอกก็เพียงพอ การใช้งานท่อความร้อนในปัจจุบันนั้น เริ่มเป็นที่แพร่หลายมากขึ้น เนื่องจากมีการศึกษาวิจัยอย่างกว้างขวางในด้านการพัฒนาประสิทธิภาพ และการพัฒนาประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์อื่นๆ โดยส่วนใหญ่ที่พบในปัจจุบันมักใช้เป็นอุปกรณ์เสริมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบความร้อน ระบบทำความเย็นต่างๆ หรือใช้เป็นอุปกรณ์เสริม เพื่อช่วยยืดอายุการใช้งานของอุปกรณ์หลักที่ต้องทำงานในสภาวะที่มีอุณหภูมิสูง ไม่ให้ชิ้นส่วนในอุปกรณ์นั้นๆ เกิดความเสียหายจากการได้รับความร้อนเป็นระยะเวลานาน ยกตัวอย่างเช่น อุปกรณ์ที่ประกอบด้วยวงจรถอนอิเล็กทรอนิกส์ หรือเครื่องมือที่มีต้นทุนสูง อย่างอุปกรณ์ด้านเทคโนโลยีอวกาศ เป็นต้น

เนื่องจากท่อความร้อนเริ่มเป็นที่สนใจ ได้รับการพัฒนาและประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวาง โครงการนี้จึงเป็นการศึกษาหลักการการทำงานของท่อความร้อน ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง การออกแบบวิธีการสร้าง และทดลองสร้างท่อความร้อนนี้ขึ้นจริง เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อน

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษาหลักการทำงาน และปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของท่อความร้อน
2. เพื่อออกแบบ สร้างท่อความร้อนและทดสอบประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อน
3. เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของท่อความร้อนเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแนวองศาในการวาง และอุณหภูมิที่ใช้งาน
4. เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของท่อความร้อนแบบปกติ และแบบ Gas-Loaded

1.3 ขอบเขตของโครงการ

1. ศึกษาหลักการทำงาน คำนวณ และออกแบบท่อความร้อน
2. ประกอบอุปกรณ์ท่อความร้อน โดยมีโครงสร้างวัสดุพูนเป็นตะแกรงละเอียด (mesh wick heat pipe) และมีน้ำเป็นของไหลทำงาน
3. ทดสอบประสิทธิภาพของการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแนวองศาในการวาง และอุณหภูมิที่ใช้งาน
4. ทดสอบประสิทธิภาพของการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบปกติ และแบบ Gas-Loaded

1.4 ขั้นตอนในการดำเนินงาน

1. ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับท่อความร้อน
2. ออกแบบลักษณะ โครงสร้างของท่อความร้อน และสร้างโปรแกรมการคำนวณค่าการถ่ายโอนความร้อนจากทฤษฎีที่ศึกษา
3. เตรียมวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการประกอบท่อความร้อน และสร้างอุปกรณ์ท่อความร้อน
4. ทดสอบการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแนวองศาในการวาง และอุณหภูมิที่ใช้งาน
5. ทดสอบการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบปกติ และแบบ Gas-Loaded
6. สรุปผลการดำเนินงานและเขียนรายงาน

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เข้าใจหลักการทำงาน วิธีการคำนวณออกแบบและการนำท่อความร้อนไปใช้งาน
2. สร้างโปรแกรมคำนวณค่าการถ่ายโอนความร้อนของท่อความร้อน
3. ออกแบบลักษณะ โครงสร้างของท่อความร้อนเพื่อนำไปใช้งานได้อย่างเหมาะสม
4. สามารถสร้างท่อความร้อนที่ใช้งานได้จริง

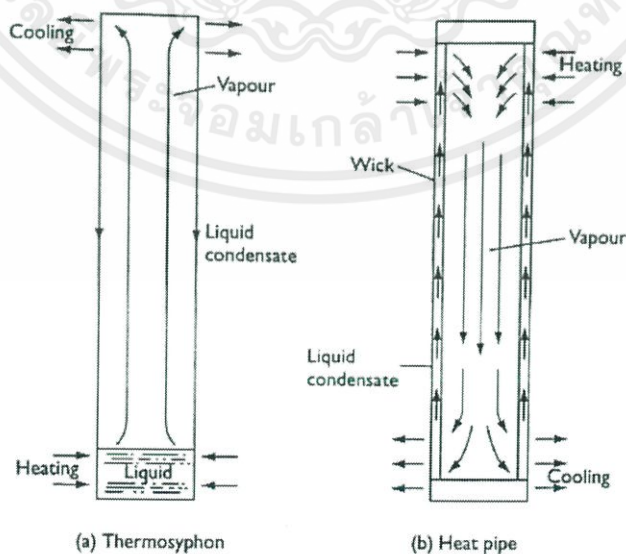
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

2.1 ท่อความร้อน (Heat pipe) [1]

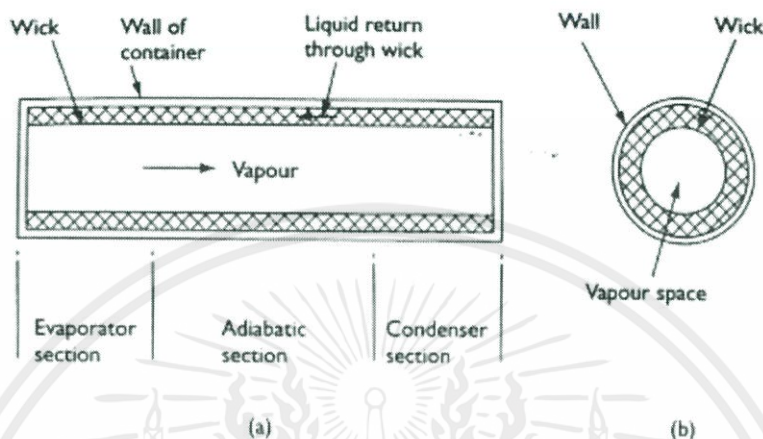
ท่อความร้อน เป็นอุปกรณ์ถ่ายเทความร้อนประเภทหนึ่งที่สามารถถ่ายโอนความร้อนได้อย่างรวดเร็ว และมีประสิทธิภาพ โดยอาศัยหลักการเปลี่ยนเฟสของของไหลทำงานภายในท่อความร้อนเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น หรือลดต่ำลง ท่อความร้อนพัฒนามาจากอุปกรณ์ความร้อนประเภทเทอร์โมไซฟอนแสดงดังรูปที่ 2-1a ซึ่งเป็นท่อโลหะที่บรรจุสารทำงานภายใน เมื่อเทอร์โมไซฟอนได้รับความร้อนจากแหล่งความร้อนด้านล่าง ของไหลทำงานที่บรรจุอยู่ภายในจะระเหยเป็นไอ เคลื่อนตัวขึ้นไปยังด้านบนที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า และควบแน่นเป็นของเหลวไหลตกกลับลงมาด้านล่างพร้อมทั้งคายความร้อนสู่สิ่งแวดล้อมภายนอก ข้อจำกัดของเทอร์โมไซฟอนนี้คือ ใช้งานได้เฉพาะสถานะที่มีแหล่งความร้อนอยู่ด้านล่างเพียงอย่างเดียว เนื่องจากกลไกที่ใช้ในการหมุนเวียนของไหลทำงานของเทอร์โมไซฟอนคือ แรงโน้มถ่วง จากนั้นมีผู้พัฒนาโดยเพิ่มโครงสร้างวัสดุพรุนเพื่อใช้เป็นโครงสร้างทางขนส่งสำหรับเฟสของเหลวจากส่วนควบแน่นไปยังส่วนระเหย ทำให้ท่อความร้อนสามารถใช้งานกับสถานะที่แหล่งความร้อนอยู่ด้านบนดังรูป 2-1b เนื่องจากโครงสร้างวัสดุพรุนนี้จะเกิดแรงดันแคปิลารี ที่ช่วยในการเคลื่อนที่ของของเหลวสวนทางกับแรงโน้มถ่วงของโลก นอกจากนี้ ยังสามารถใช้งานโดยวางตัวในแนวอื่นๆ ได้ด้วย และโครงสร้างวัสดุพรุนนี้เองที่สร้างความแตกต่างระหว่างเทอร์โมไซฟอน กับท่อความร้อน



รูปที่ 2-1 เทอร์โมไซฟอนและท่อความร้อน [1]

2.2 หลักการทำงานของท่อความร้อน [2, 3]

ลักษณะโดยทั่วไปของท่อความร้อน แสดงดังรูปที่ 2-2 ซึ่งประกอบด้วยท่อโลหะทรงกระบอก (Container) ผนังด้านในเป็นโครงสร้างวัสดุพรุนที่มีรูพรุน (Wick structure) ภายในบรรจุด้วยของไหลทำงาน (Working fluid)



รูปที่ 2-2 โครงสร้างและส่วนประกอบของท่อความร้อน [1]

ท่อความร้อนจะประกอบไปด้วย 3 ส่วนหลักดังรูปที่ 2-2 คือ

1. ส่วนระเหย (Evaporator section) เป็นส่วนที่ได้รับความร้อนจากแหล่งความร้อนภายนอก (Heat source) และความร้อนนี้ทำให้ของเหลวบางส่วนในโครงสร้างวัสดุพรุนระเหยเป็นไอ
2. ส่วนที่ไม่มีการถ่ายเทความร้อน (Adiabatic section) ส่วนนี้จะอยู่ระหว่างส่วนระเหยและส่วนควบแน่น เป็นบริเวณทางเดินของเฟสไอและเฟสของเหลว
3. ส่วนควบแน่น (Condenser section) เป็นส่วนที่มีการถ่ายเทความร้อนสู่แหล่งรับความร้อน (Heat sink) เป็นบริเวณที่เฟสไอควบแน่นเป็นของเหลว และเข้าสู่โครงสร้างวัสดุพรุน

หลักการทำงานของท่อความร้อน เมื่อส่วนระเหยของท่อความร้อนได้รับความร้อนจากแหล่งความร้อน ของเหลวที่อยู่ในโครงสร้างวัสดุพรุนบางส่วน จะดูดซับความร้อนเป็นปริมาณเท่ากับความร้อนแฝงการกลายเป็นไอ มีความดันสูงขึ้น ทำให้ไอร้อนนี้เคลื่อนตัวจากส่วนระเหยไปยังส่วนควบแน่นที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า จากนั้นไอจะคายความร้อนแฝงสู่แหล่งรับความร้อนด้านนอก ควบแน่นเป็นของเหลว การลดลงของของเหลวจากการระเหย ที่ผิวรอยต่อของเฟสของเหลวและเฟสไอ ในบริเวณผิวหน้าของโครงสร้างวัสดุพรุน ทำให้เกิดความดันแคปิลลารี (Capillary Pressure) และความดันนี้เองที่จะเป็นตัวขับเคลื่อนของเหลวที่ควบแน่นกลับมายังส่วนระเหย ดังนั้นท่อความร้อนจึงสามารถถ่ายโอนความร้อนแฝงการกลายเป็นไอจากส่วนระเหยไปยังส่วนควบแน่นได้

อย่างต่อเนื่องโดยไม่ทำให้ส่วนระเหยแห้ง กระบวนการเช่นนี้จะดำเนินไปอย่างต่อเนื่อง ถ้าเฟสของเหลวไม่ถูกขัดขวาง และความดันแคปิลารียังคงถูกรักษาไว้อย่างเพียงพอ

ปริมาณของความร้อนที่ถ่ายโอนในรูปของความร้อนแฝงการกลายเป็นไอ จะมากกว่าปริมาณความร้อนที่ถ่ายโอนด้วยการพาความร้อนโดยทั่วไป ดังนั้นต่อความร้อนจึงสามารถถ่ายโอนความร้อนได้ในปริมาณมาก แม้จะมีขนาดเล็ก

2.3 ของไหลทำงาน (Working Fluid) [2, 4]

ภายในต่อความร้อน โครงสร้างวัสดุพรุนจะอิมมิดีด้วยของไหลทำงานในเฟสของเหลว ซึ่งของไหลทำงานนี้สามารถแบ่งตามช่วงอุณหภูมิใช้งานของต่อความร้อนเป็น 3 ชนิดคือ

1. ของไหลเย็นยิ่งยวด (Cryogenics liquid) ใช้ในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า -150°C (122 K) ที่ความดันบรรยากาศ ของไหลประเภทนี้จะอยู่ในสถานะแก๊ส ยกตัวอย่างเช่น ไฮโดรเจน นีออน ไนโตรเจน ออกซิเจน มีเทน เป็นต้น
2. ของไหลทั่วไป (Common liquid) ใช้ในช่วงอุณหภูมิ -150 - 355°C (122 - 628 K) ที่ความดันบรรยากาศจะอยู่ในสถานะของเหลว ยกตัวอย่างเช่น สารทำความเย็น เมทานอล แอมโมเนีย น้ำ เป็นต้น
3. โลหะเหลว (Liquid metal) ใช้ในช่วงอุณหภูมิ 355°C (628 K) ขึ้นไป ยกตัวอย่างเช่น โปรท ซีเซียม โซเดียม โพแทสเซียม ลิเทียม เงิน เป็นต้น

เหตุผลประการแรกที่ใช้พิจารณาเลือกของไหลทำงานที่เหมาะสม คือ ช่วงอุณหภูมิไอที่จะนำต่อความร้อนไปใช้ ซึ่งแสดงตัวอย่างดังตารางที่ 2-1

นอกจากช่วงอุณหภูมิที่จะนำต่อความร้อนไปใช้งานแล้ว ยังต้องคำนึงถึงคุณสมบัติอื่นด้วย ตัวอย่างเช่น

- ความเข้ากันได้กับวัสดุที่ใช้ทำท่อ และ โครงสร้างวัสดุพรุน นับเป็นปัจจัยที่สำคัญในการเลือกของไหลทำงานเพื่อใช้งานในต่อความร้อน เพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาเคมี และการกัดกร่อนของท่อบรรจุ หรือ โครงสร้างวัสดุพรุน ในการเกิดปฏิกิริยาเคมีภายในต่อความร้อนนั้นทำให้เกิดแก๊สที่ไม่ควบแน่น (Non-Condensable Gas, NCG) เช่น ไฮโดรเจน ไนโตรเจน หรือออกซิเจน เป็นต้น ตัวอย่างเช่นการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของน้ำ ซึ่งทำให้เกิดแก๊สไฮโดรเจน ในต่อความร้อนอลูมิเนียมที่มีน้ำเป็นของไหลทำงาน โดยทั่วไปแล้วเมื่อต่อความร้อนทำงาน แก๊สที่ไม่ควบแน่นนี้จะไปอยู่ในบริเวณท้ายของส่วนควบแน่น ทำให้พื้นที่ผิวในการแลกเปลี่ยนความร้อนที่ส่วนควบแน่นลดลง การกัดกร่อนของท่อบรรจุและ โครงสร้างวัสดุพรุนทำให้เกิดอนุภาคของแข็งขนาดเล็ก ไหลปนไปกับของเหลวไปยังส่วนระเหย ซึ่งจะทำให้เกิดการอุดตันรูพรุนของโครงสร้างวัสดุ

พอรุนเป็นผลให้เกิดความต้านทานการไหลของของเหลวและลดความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อน

ตารางที่ 2-1 ช่วงอุณหภูมิที่ใช้งานของของไหลบางชนิดในท่อความร้อน [1]

Medium	Melting point (°C)	Boiling point at atmos. press. (°C)	Useful range (°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 ¹	-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 ¹	-70	160	0 to 225
Thermex ²	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

- ในการออกแบบท่อความร้อน เราต้องการให้มีค่าแรงตึงผิวที่สูง ทำให้ของเหลวมีความดันแคปิลารีสูงขึ้น เพื่อให้ท่อความร้อนสามารถใช้งาน ด้านทานแรงโน้มถ่วงได้ นอกจากนี้แรงตึงผิวที่สูง จะทำให้ของเหลวเกิดความเปียกต่อผนังด้านในท่อและโครงสร้างวัสดุพอรุน นั่นคือมีมุมสัมผัสเป็นศูนย์หรือน้อยมาก ทำให้ของเหลวกระจายออกไปเป็นบริเวณกว้าง ได้รับความร้อนจากผนังท่อและโครงสร้างวัสดุพอรุนดีขึ้น
- ความดันไอนี้ไม่ควรสูงหรือต่ำกว่าช่วงอุณหภูมิที่ใช้งาน เพื่อป้องกันไม่ให้ความเร็วไอสูงเกินไป ซึ่งจะส่งผลให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิในช่วงกว้าง ทำให้การไหลเป็นไปได้ไม่ต่อเนื่อง
- ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอสูง ค่าความร้อนแฝงที่สูงจะทำให้ของเหลวสามารถถ่ายเทความร้อนได้มากแม้ในปริมาณน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- นอกจากนี้ยังต้องนำความร้อนได้ดีเพื่อลดการเดือดเป็นฟองที่โครงสร้างวัสดุพรุน และของไหลทำงานควรมีความหนืดต่ำทั้งในเฟสไอและเฟสของเหลว เพื่อลดความต้านทานการไหล

2.4 โครงสร้างวัสดุพรุน (Wick structure) [2]

หน้าที่หลักของโครงสร้างวัสดุพรุน คือ

1. ใช้เป็นทางเดินของเฟสของเหลวจากส่วนควบแน่นกลับไปยังส่วนระเหย
2. มีรูพรุนที่พื้นผิวของเฟสของเหลว-ไอ ทำให้เกิดความดันแคปิลารี
3. เป็นทางผ่านของความร้อนระหว่างผนังด้านในของตัวท่อและรอยต่อของเฟสของเหลว-ไอ

โดยโครงสร้างวัสดุพรุนมักจะใช้ตะแกรงลวดตาละเอียด (Screen mesh) ไฟเบอร์กลาส (Fiberglass) ผงโลหะที่ผ่านความร้อน (Sintered porous metal) หรือการเซาะผนังด้านในให้เป็นร่องขนาดเล็ก (Groove) โดยโครงสร้างวัสดุพรุนที่มีประสิทธิภาพ จะต้องมีพื้นที่ผิวรูพรุนที่เล็ก เพื่อเพิ่มความดันแคปิลารี มีรูพรุนภายในขนาดใหญ่ เพื่อลดความต้านทานการไหลของเฟสของเหลว และมีค่าการนำความร้อนสูง เพื่อลดความต้านการถ่ายเทความร้อนสู่ของไหลทำงาน ดังนั้น โครงสร้างของวัสดุพรุนจึงถูกพัฒนาอย่างกว้างขวาง

สามารถแบ่งประเภทของวัสดุพรุนได้เป็น 2 ประเภทหลักๆ คือ โครงสร้างวัสดุพรุนที่เป็นเนื้อเดียว (Homogenous wicks) และแบบประกอบ (Composite wicks)

โครงสร้างวัสดุพรุนที่เป็นเนื้อเดียว เป็นโครงสร้างวัสดุพรุนที่ทำจากวัสดุชนิดเดียว ลักษณะของโครงสร้างวัสดุพรุนที่เป็นเนื้อเดียวบางชนิด แสดงตัวอย่างไว้ดังรูปที่ 2-3



a. Wrapped Screen

b. Sintered Metal

c. Axial Groove

รูปที่ 2-3 ภาพตัดแนวขวางของท่อความร้อนที่มีโครงสร้างวัสดุพรุนที่ทำจากวัสดุชนิดเดียว [2]

โครงสร้างแบบผงโลหะที่ผ่านความร้อน (Sintered porous metal) ดังรูป 2-3b ผงโลหะที่ผ่านความร้อนนี้จะให้อุณหภูมิติดคร่อมระหว่างวัสดุพรุนต่ำ ทำให้เกิดความต่อเนื่องของการไหลของความร้อนที่ผ่านชั้นวัสดุพรุน รูพรุนของโครงสร้างวัสดุพรุนประเภทนี้มีขนาดเล็ก ทำให้ความ

ค้นแคปปีลารีที่ผิวหน้าของเหลว-ไอสูง แต่รูพรุนภายในวัสดุพรุนที่มีขนาดเล็กเช่นกันจะทำให้เกิด ความดันตกคร่อมในทางเดินของเฟสของเหลว

โครงสร้างวัสดุพรุนที่นิยมชนิดหนึ่งคือการเจาะร่องตามแนวยาวของตัวท่อ (Axial Groove) ดังรูป 2-3c โครงสร้างวัสดุพรุนประเภทนี้เหมาะสำหรับท่อความร้อนที่ใช้งานทั้งในช่วง อุณหภูมิต่ำ ปานกลาง และอุณหภูมิสูง ครีบลโลหะที่เกิดจากการเจาะร่องของผนังด้านในของท่อ โลหะนั้นนำความร้อนได้ดี ทำให้ความต้านทานการไหลของความร้อนผ่านโครงสร้างวัสดุพรุน ต่ำลง แต่ขั้นตอนในการสร้างร่องเล็ก และควบคุมขนาดของพื้นที่ผิวรูพรุนนั้นค่อนข้างทำได้ยาก

โครงสร้างวัสดุพรุนแบบประกอบ เป็นโครงสร้างวัสดุพรุนที่ประกอบด้วยวัสดุ 2 ประเภท หรือมากกว่า ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อแบ่งหน้าที่ของโครงสร้างวัสดุพรุนที่ใช้เพิ่มความดันแคปปีลารีและ โครงสร้างวัสดุพรุนที่ใช้เป็นเส้นทางไหลของของเหลวออกจากกัน หรือแยกเส้นทางไหล ของความร้อนออกจากเส้นทางไหลของของเหลว ลักษณะโครงสร้างวัสดุพรุนแบบประกอบ บางชนิด แสดงไว้ดังรูปที่ 2-4



รูปที่ 2-4 ภาพตัดขวางของท่อความร้อนที่มีโครงสร้างวัสดุพรุนที่ประกอบด้วยวัสดุ 2 ประเภท [2]

ดังรูปที่ 2-4a ได้แสดงรูปแบบโครงสร้างวัสดุพรุนที่เป็นตะแกรงแบบผสม (Composite screen wick) ประกอบด้วยมีตะแกรงลวดแบบละเอียดอยู่ที่รอยต่อระหว่างเฟสของเหลว-ไอ เพื่อเพิ่มความดันแคปปีลารี ส่วนด้านในเป็นตะแกรงแบบหยาบเพื่อลดความต้านทานการไหลของเฟส ของเหลว วัสดุพรุนประเภทนี้มีความ สามารถในการถ่ายโอนความร้อนได้สูง แต่อย่างไรก็ตามอาจ เกิดอุณหภูมิตกคร่อมในปริมาณมากหากของไหลทำงานที่ใช้มีค่าการนำความร้อนที่ต่ำ

โครงสร้างแบบตะแกรงลวดคลุมทับร่องโลหะ (Screen-covered groove wick) ดังรูปที่ 2-4b ตะแกรงลวดละเอียดด้านนอกนี้จะช่วยเพิ่มความสามารถของวัสดุพรุนในการสร้างความดัน แคปปีลารี ส่วนร่องโลหะที่เจาะผนังท่อด้านใน จะช่วยลดความต้านทานการไหลของเฟสของเหลว และยังลดความต้านทานการไหลของความร้อนผ่านครีบลโลหะอีกด้วย

2.5 เทคนิคควบคุมต่อความร้อน (Control Techniques) [2,4]

ลักษณะและรูปแบบทั่วไปของต่อความร้อนได้กล่าวไปในหัวข้อข้างต้นแล้ว ซึ่งหากว่าต่อความร้อนมีสารทำงานอยู่อย่างเพียงพอไม่มากจนเกินไป จะทำให้ต่อความร้อนสามารถทำงานได้โดยปราศจากปัญหาอุณหภูมิตกคร่อมระหว่างทาง ต่อความร้อนไม่ได้ถูกออกแบบมาให้ทำงานที่อุณหภูมิเฉพาะอุณหภูมิใดอุณหภูมิหนึ่ง แต่สามารถปรับใช้งานได้กับช่วงอุณหภูมิที่ต้องการตามสถานะของแหล่งให้ความร้อน (Heat Source) และแหล่งรับความร้อน (Heat Sink) ในหลายกรณีเราต้องการให้ต่อความร้อน สามารถทำงานได้ที่แหล่งความร้อนและแหล่งรับความร้อนที่หลากหลาย หรืออาจเรียกว่า Variable Conductance Heat Pipe

ซึ่งจะแบ่งเทคนิคการควบคุมนี้ออกเป็น 4 ประเภทใหญ่ๆคือ

1. Gas-Loaded Heat Pipe
2. Excess-Liquid Heat Pipe
3. Vapor-flow Modulated Heat Pipe
4. Liquid-flow Modulated Heat Pipe

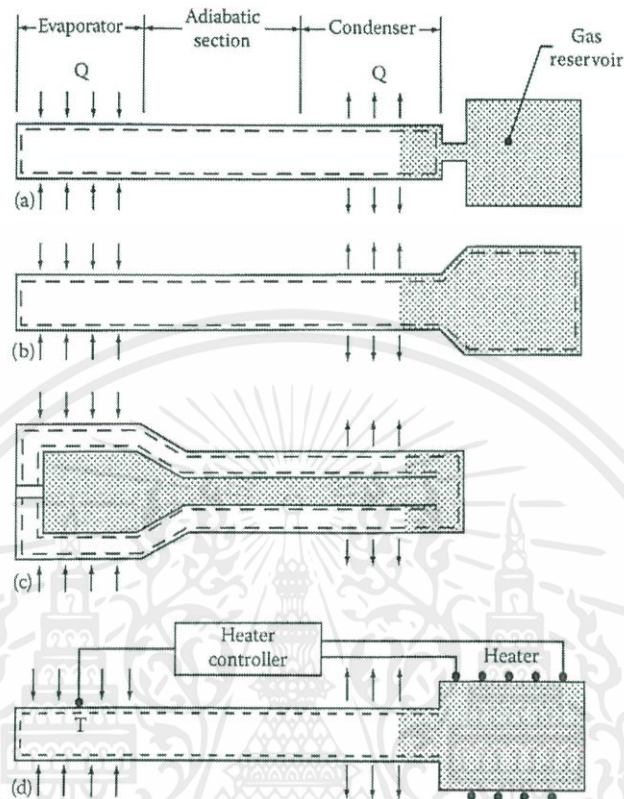
- Gas-Loaded Heat Pipe

ในระหว่างที่ต่อความร้อนกำลังทำงาน ไอจะไหลจากส่วนระเหย ไปยังส่วนควบแน่น และถ้าหากว่าในต่อความร้อนมีแก๊สที่ไม่ควบแน่นสะสมอยู่กับเฟสไอ ยกตัวอย่างเช่น แก๊สออกซิเจน แก๊สไฮโดรเจน แก๊สไนโตรเจน เป็นต้น แก๊สที่ไม่ควบแน่นเหล่านี้จะไปสะสมอยู่ในส่วนควบแน่น ซึ่งเย็นกว่า ขัดขวางพื้นที่ในการควบแน่นของไอเป็นของเหลว ซึ่งปริมาตรของแก๊สที่ไม่ควบแน่นในต่อความร้อนนี้สามารถจัดเป็น ระบบควบคุมที่ปรับเองได้ (Self-controlled) โดยเป็นการควบคุมด้วยความดันไอของของไหลทำงาน และระบบควบคุมแบบย้อนกลับ (Feedback controlled) เช่น การควบคุมด้วยระบบจากภายนอก

ในรูปที่ 2-5a ถึง รูปที่ 2-5c แสดงตัวอย่างของต่อความร้อนระบบควบคุมที่ปรับเองได้ โดยอุณหภูมิของแก๊สที่ไม่ควบแน่นสามารถรักษาให้ใกล้เคียงกับอุณหภูมิบรรยากาศภายนอก แหล่งรับความร้อน หรืออุณหภูมิไอ ซึ่งขึ้นอยู่กับรูปแบบที่แสดงดังรูป เมื่อต่อความร้อนได้รับความร้อน ความดันไอจะมากขึ้นขยายตัวไปอัดแก๊สที่ไม่ควบแน่น เพิ่มพื้นที่การควบแน่น ในทำนองเดียวกัน ถ้าหากว่าแหล่งความร้อนหรือแหล่งรับความร้อนมีอุณหภูมิต่ำลง ทำให้อุณหภูมิจและความดันของไอต่ำลง ซึ่งทำให้แก๊สที่ไม่ควบแน่นขยายตัวมากขึ้น ทำให้ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของต่อความร้อนลดลง การที่โครงสร้างของต่อความร้อนมีบริเวณ ว่างรองรับแก๊สที่ไม่ควบแน่นเมื่อต่อได้รับความร้อนและดันแก๊สที่ไม่ควบแน่นนี้ไปยังแหล่งรองรับ (Reservoir Gas) จะทำให้พื้นที่การถ่ายเทความร้อนในส่วนควบแน่นไม่ถูกแทนที่ด้วยแก๊สที่ไม่ควบแน่น

ในรูปที่ 2-5d แสดงต่อความร้อนที่มีการควบคุมย้อนกลับจากแหล่งควบคุมภายนอก โดยในระบบนี้จะมีเซนเซอร์ ยกตัวอย่างเช่น เทอร์โมคัปเปิล วัดอุณหภูมิที่จุดอ้างอิง และส่งข้อมูล

กลับไปยังตัวควบคุมซึ่งจะเปรียบเทียบค่าที่วัดได้กับค่าที่ตั้งไว้ (Set point) และส่งสัญญาณไปยังตัวอุปกรณ์อื่น เช่น ตัวให้ความร้อน (Heater) เพื่อให้ความร้อนหรือทำให้แก๊สที่ไม่ควบแน่นนี้เย็นลง



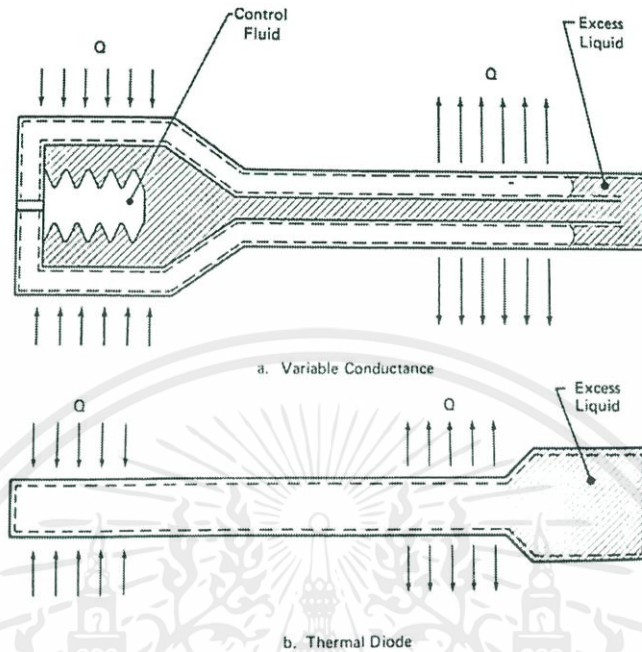
รูปที่ 2-5 ภาพจำลองแสดงรูปแบบท่อความร้อนแบบ Gas-Loaded [4]

- Excess-Liquid Heat Pipe

รูปแบบของท่อความร้อนประเภทนี้คล้ายกับแบบ Gas-loaded ในระหว่างที่ใช้งานท่อความร้อน ของไหลทำงานที่เหลือมากเกินไปจะถูกไอพาไปยังส่วนควบแน่น ซึ่งจะไปขัดขวางการถ่ายเทความร้อนในส่วนควบแน่น ดังรูปที่ 2-6a ซึ่งได้อธิบายถึงระบบ ที่การลดลงของอุณหภูมิไอ ผลักดันให้ของเหลวในระบบที่อยู่ภายในท่อความร้อนขยายตัวออกไปปิดกั้นส่วนควบแน่น การลดลงของความร้อนที่ได้รับทำให้การถ่ายเทความร้อนต่ำลง ในทำนองเดียวกันหากความร้อนเพิ่มขึ้น การถ่ายเทความร้อนจะสูงขึ้น

รูปที่ 2-6b อธิบายลักษณะของ Thermal diode ซึ่งประกอบด้วยแหล่งรองรับของเหลว (Liquid Reservoir) ที่ด้านท้ายของส่วนควบแน่น เมื่อความร้อนถ่ายเทจากส่วนระเหยไปยังส่วนควบแน่น ของเหลวส่วนเกินจะถูกพาไปยังแหล่งรองรับของเหลว และหากว่าการกระจายของอุณหภูมิกลับกัน ของเหลวส่วนเกินจะไหลย้อนกลับไปสู่ส่วนควบแน่น ปิดกั้นพื้นที่การถ่ายเท

ความร้อน อย่างไรก็ตามหากว่าด้านที่มีแหล่งรองรับของเหลวส่วนเกินนี้อยู่ที่แหล่งรับความร้อน ท่อความร้อนจะประพฤติตัวเป็นฉนวน



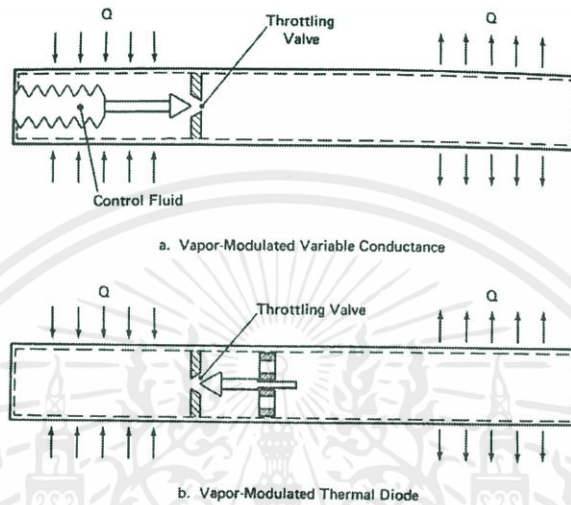
รูปที่ 2-6 ภาพจำลองรูปแบบท่อความร้อนแบบ Excess-Liquid [2]

Vapor-flow Modulated Heat Pipe

โครงสร้างท่อความร้อนประเภทนี้จะประกอบด้วยวาล์วปรับอัตราการไหล (Throttle valve) ที่อยู่ระหว่างส่วนระเหยและส่วนควบแน่น ซึ่งจะสร้างความแตกต่างของความดันระหว่างสองส่วนนี้ และส่งผลให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิ ซึ่งทำให้ท่อความร้อนสามารถใช้ได้กับช่วงอุณหภูมิที่หลากหลาย ดังแสดงในรูป 2-7a การได้รับความร้อนเพิ่มขึ้นหรือการที่แหล่งความร้อนมีอุณหภูมิสูงขึ้น จะทำให้อุณหภูมิไอในส่วนระเหยสูงขึ้น ทำให้ของเหลวในส่วนระเหยดันให้วาล์วปิด การไหลผ่านของไอผ่านทรอตติ่งวาล์ว ทำให้เกิดความดันและอุณหภูมิตกคร่อม ซึ่งการเพิ่มขึ้นของความร้อนที่ส่วนระเหยจะเกิดสมดุลโดยการลดลงของอุณหภูมิไอที่ไหลไปยังส่วนควบแน่น ซึ่งทำให้อุณหภูมิแหล่งรับความร้อนเปลี่ยนน้อยมาก โดยท่อความร้อนประเภทนี้จะดีกว่าประเภท Gas-loaded และ Excess-Liquid ตรงที่ไม่มีการขัดขวางปิดกั้นส่วนควบแน่นที่จะไปลดการถ่ายเทความร้อน แต่อย่างไรก็ตามท่อความร้อนประเภทนี้ต้องการแรงดันแคปิลารีที่สูงมากขึ้นเพื่อชดเชยความดันไอที่หายไป

ถ้าหากว่าเส้นทางการไหลของไอถูกปิดกั้นด้วยทรอตติ่งวาล์ว ไอในส่วนระเหยจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆและจะไหลไปตามโครงสร้างวัสดุพรุน ซึ่งลักษณะนี้ทำให้เกิดอุปสรรคต่อของเหลวที่จะไหลกลับไปยังส่วนระเหย เนื่องจากไอไหลเข้ามาในโครงสร้างวัสดุพรุน ซึ่งลักษณะรูปแบบนี้ก็ถูกนำไปใช้งานเป็นสวิตช์ความร้อน (Thermal Switch) เช่นกัน

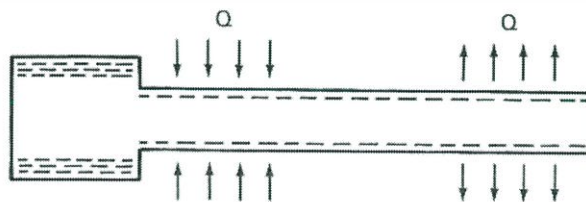
หากว่าทรอดตั้งว่าส่วถูกเปลี่ยนด้านดังแสดงในรูป 2-7b จะทำให้การไหลของไอจากส่วนระเหยไม่ถูกจำกัด แต่หากมีการไหลของไอในทิศทางที่กลับกันจะทำให้วาล์วปิด นั้นหมายความว่า หากเกิดเกรเดียนท์ของอุณหภูมิที่กลับด้าน ท่อความร้อนจะไม่ทำงาน ซึ่งท่อความร้อนประเภทนี้จะถูกใช้งานเป็นอุปกรณ์ถ่ายโอนความร้อนในทิศทางเดียว และเป็นฉนวนหากมีการเปลี่ยนทิศทางของแหล่งความร้อน เรียกว่า Thermal Diode



รูป 2-7 ภาพจำลองแสดงรูปแบบท่อความร้อนแบบ Vapor-flow Modulated [2]

- Liquid-flow Modulated Heat Pipe

ท่อความร้อนที่มีโครงสร้างดังรูปที่ 2-8 ประกอบด้วยโครงสร้างที่ดักจับของเหลว ที่เป็นโครงสร้างวัสดุพรุนที่ด้านท้ายของส่วนระเหย โครงสร้างวัสดุพรุนที่ส่วนดักจับนี้จะแยกออกต่างหากจากโครงสร้างวัสดุพรุนในท่อความร้อน ในการใช้งานทั่วไปของท่อความร้อน โครงสร้างวัสดุพรุนที่ส่วนดักจับของเหลวนี้จะแห้ง และเมื่อมีการควบแน่นของของเหลว ของเหลวบางส่วนจะไหลตกไปยังส่วนดักจับของเหลว จะเกิดการสะสมของของเหลวที่บริเวณนี้ และทำให้โครงสร้างวัสดุพรุนของท่อความร้อนมีของเหลวลดลงจนแห้งสนิท และที่จุดนี้เองท่อความร้อนจะหยุดการประพุดิตัวเป็นอุปกรณ์ถ่ายโอนความร้อน แต่จะเป็นฉนวนแทน



รูปที่ 2-8 ภาพจำลองแสดงรูปแบบท่อความร้อนแบบ Liquid-flow Modulated [2]

2.6 การออกแบบ (Design Procedures) [2]

การออกแบบท่อความร้อนเพื่อใช้งานจะต้องพิจารณาถึงปัจจัยต่างๆต่อไปนี้

2.6.1 การเลือกของไหลทำงาน (Selection of working fluid)

ในการพิจารณาเลือกของไหลทำงานที่เหมาะสมเพื่อใช้ในท่อความร้อน สิ่งแรกที่ต้องคำนึงถึงคือ ช่วงอุณหภูมิไอที่จะนำท่อความร้อนไปใช้งาน ดังที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2-1 นอกจากนี้ช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมของของไหลทำงานควรอยู่ระหว่างจุดวิกฤต (Critical Point) และจุดเยือกแข็ง (Freezing Point) และควรเป็นสารที่ไม่มีอันตราย เช่น ไม่มีฤทธิ์กัดกร่อน ไม่เป็นอันตราย หรือก่อให้เกิดความระคายเคือง เป็นต้น

2.6.2 การเลือกโครงสร้างวัสดุพอรุน (Selection of wick structure)

หน้าที่ของโครงสร้างวัสดุพอรุนคือสร้างความดันแคปิลารี เพื่อใช้ขนส่งของไหลทำงานเฟสของเหลวจากส่วนควบแน่นไปยังส่วนระเหย วัสดุพอรุนจะต้องช่วยกระจายเฟสของเหลวให้ทั่วส่วนระเหย เพื่อจะได้ดูดซับความร้อนได้อย่างต่อเนื่อง และยังคงพิจารณาสภาพแวดล้อมที่จะนำท่อความร้อนไปใช้งานด้วย ซึ่งรูปแบบต่างๆของโครงสร้างวัสดุพอรุนแสดงไว้ในหัวข้อ 2.4

2.6.3 การเลือกวัสดุสำหรับท่อความร้อน (Selection of the container)

ข้อสำคัญในการเลือกวัสดุสำหรับท่อความร้อน คือ ความเข้ากันได้ (Compatibility) ระหว่างวัสดุและของไหลทำงานที่เลือกใช้ เพื่อป้องกันปัญหาการกัดกร่อน หรือการเกิดปฏิกิริยาเคมี ภายในท่อความร้อน ดังแสดงในตารางที่ 2-2

นอกจากนี้วัสดุที่ใช้ควรนำความร้อนได้ดี เพื่อลดอุณหภูมิตกคร่อมระหว่างตัวท่อ และไม่ควรเป็นวัสดุที่มีรูพอรุนเพื่อป้องกันการแพร่ของอากาศภายนอกเข้าสู่ท่อความร้อนด้วย

ตารางที่ 2-2 ความเข้ากันได้ของวัสดุและของไหลทำงาน [4]

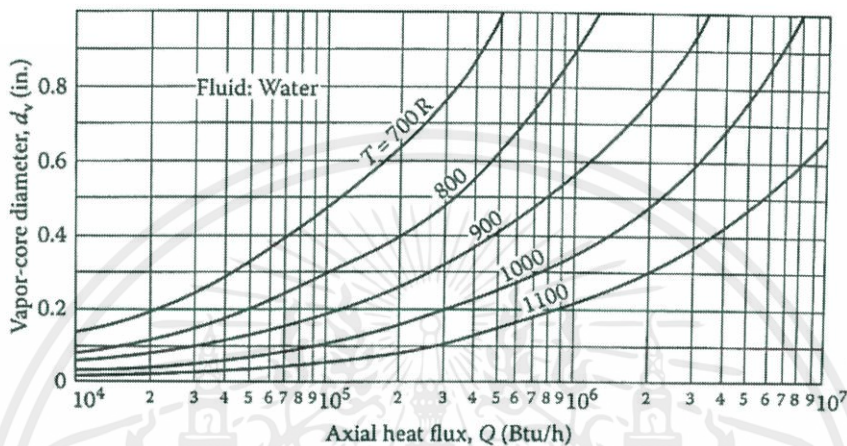
Fluids	Solids					
	Al	Cu	Fe	Ni	SS 304	Ti
Nitrogen	C	C	C	C	C	
Methane	C	C			C	
Ammonia	C		C	C	C	
Methanol	I	C	C	C	C	
Water	I	C		C	C ^a	C
Potassium				C		I
Sodium				C	C	I

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

^a Possible hydrogen generation.

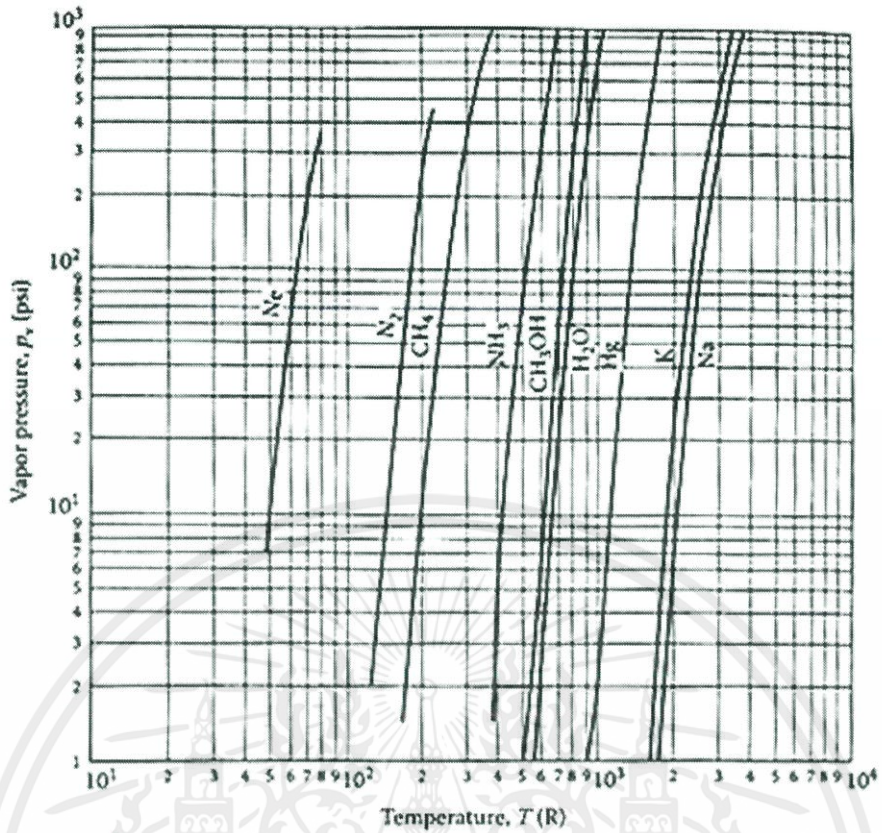
2.6.3 ขนาดของท่อความร้อน

ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อมีความสำคัญต่อการออกแบบ โดยดูได้จากรูปที่ 2-9 ซึ่งแสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางเดินเฟสไอ (Vapor core diameter) เนื่องจากยิ่งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางช่องทางเดินเฟสไอมิมากขึ้น ค่าอัตราการถ่ายโอนความร้อนก็จะยิ่งสูงขึ้น ดังนั้นจึงต้องเลือกให้เหมาะสมกับค่าการถ่ายโอนความร้อนที่ต้องการ

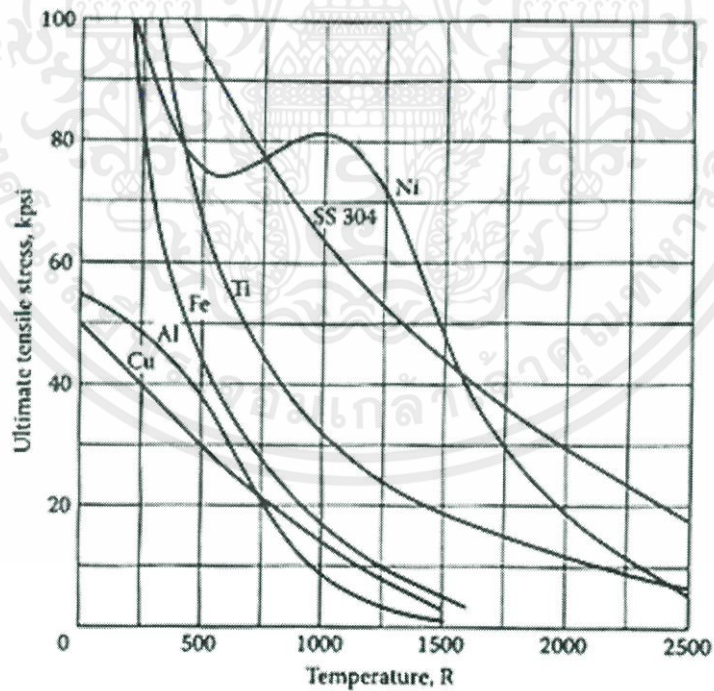


รูปที่ 2-9 กราฟแสดงเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางเดินเฟสไอกับอัตราการถ่ายเทความร้อนของไหลทำงานชนิดต่างๆ [4]

เนื่องจากท่อความร้อนปฏิบัติงานกับเฟสไอ จึงทำให้มีความดันไอกระทำที่ผนังของท่อ ดังนั้นเราจึงต้องพิจารณาถึงความแข็งแรงของท่อด้วย โดยความดันไอของของไหลทำงานจะต้องไม่เกินความดันสูงสุดที่ท่อบรรจุสามารถทนได้ ดังแสดงในรูปที่ 2-12 ซึ่งแสดงอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางภายในนอกต่อภายในของท่อกับความดันไอ เพื่อใช้เลือกขนาดความหนาของท่อที่เหมาะสมต่อการใช้งานท่อความร้อน โดยใช้ค่าจากรูปที่ 2-10 และ 2-11 ประกอบ

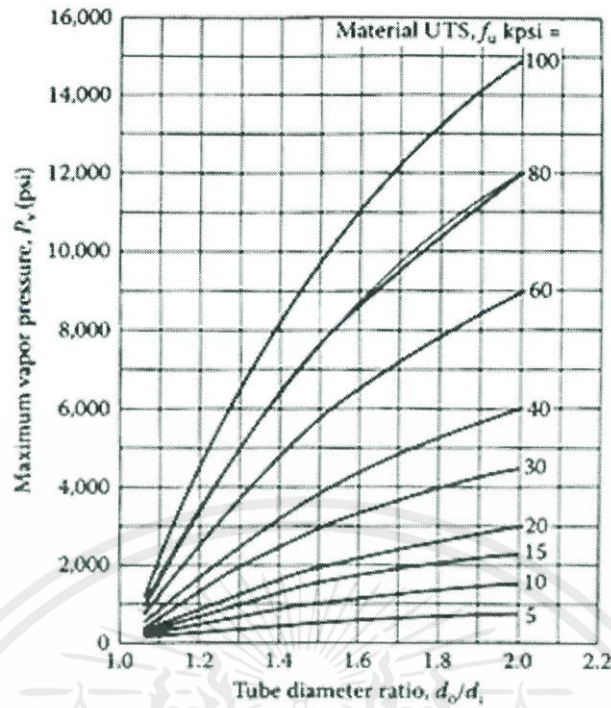


รูปที่ 2-10 กราฟแสดงความดันไอของของไหลทำงานชนิดต่างๆ [4]



รูปที่ 2-11 กราฟแสดงค่าความเค้นแรงดึงสูงสุดของวัสดุ [4]

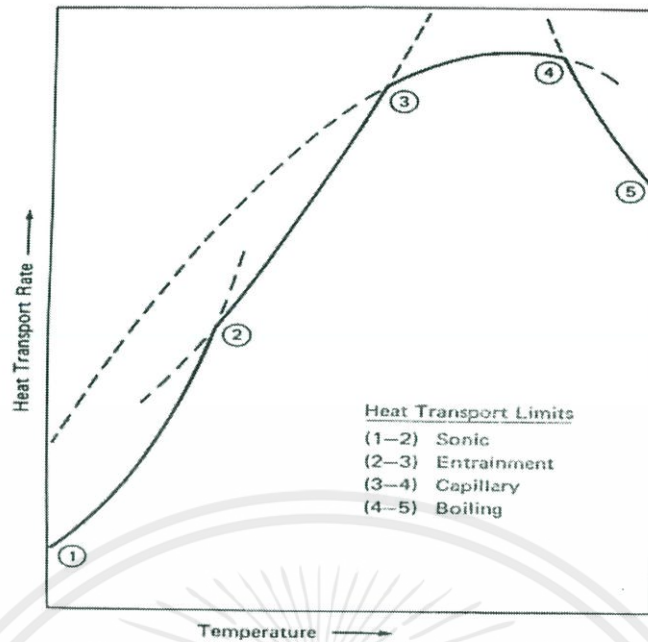
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2-12 แสดงอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกต่อภายในของท่อกับความดันไอสูงสุด [4]

2.6.4 ขีดจำกัดในการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อน [2, 4]

ท่อความร้อนทุกรูปแบบ ประสิทธิภาพและการใช้งานท่อความร้อนจะถูกจำกัดด้วยปัจจัยหลายประเภท แสดงดังรูปที่ 2-13 ปัจจัยทางกายภาพที่จำกัดการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อน ได้แก่ ความดันแคปพิลารี การไหลของไอ แรงเฉือนที่ผิวหน้าของเหลว และการเคี้ยวอย่างรุนแรง ขีดจำกัดของการถ่ายเทความร้อนขึ้นกับขนาดและรูปร่างของท่อความร้อน ของไหลทำงาน ลักษณะของโครงสร้างวัสดุพอรุน และช่วงอุณหภูมิที่ใช้งาน ขีดจำกัดที่มีค่าน้อยที่สุดในขีดจำกัดทั้งหมดจะบอกถึงค่าการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนสูงสุด ที่ท่อความร้อนสามารถทำได้ในช่วงอุณหภูมินั้นๆ



รูปที่ 2-13 กราฟแสดงขีดจำกัดในการถ่ายโอนความร้อนของท่อความร้อน [2]

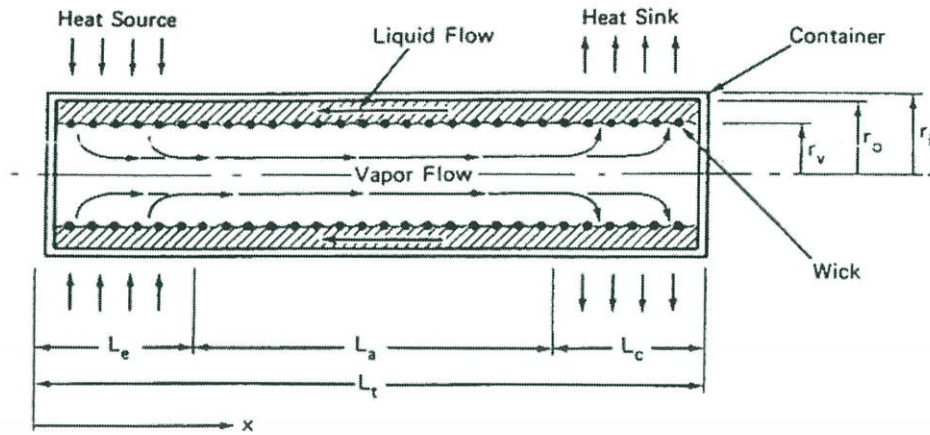
2.6.4.1 ขีดจำกัดการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากความดันแคปิลลารี (Capillary Limitation)

ท่อความร้อนจะสามารถทำงานได้ก็ต่อเมื่อของไหลทำงานที่ส่วนควบแน่นเคลื่อนที่กลับมา ยังส่วนระเหย ซึ่งจะเกิดปรากฏการณ์เช่นนี้ได้ ความดันของสารทำงานภายในท่อความร้อนจะต้อง สมดุลกัน

- สมดุลความดัน (Pressure Balance)

ในระหว่างที่ท่อความร้อนกำลังทำงานดังรูปที่ 2-14 ของไหลทำงานในสถานะไอจะไหล อย่างต่อเนื่องจากส่วนระเหยไปยังส่วนควบแน่น และไหลกลับมายังส่วนระเหยอีกครั้งหนึ่งใน สถานะของเหลว ลักษณะนี้ทำให้เกิดเกรเดียนต์ของความดันไอตลอดทางไหลของไอ และ เช่นเดียวกันเกิดเกรเดียนต์ความดันในฝั่งของเหลว ความแตกต่างของความดันที่ฝัวยุทธต่อระหว่าง เฟสนี้ เราเรียกว่าความดันแคปิลลารี ซึ่งสามารถแสดงในรูปสมการได้ดังนี้

$$[P_v(x_{ref}) - P_v(x)] + [P_v(x) - P_l(x)] + [P_l(x) - P_l(x_{ref})] + [P_l(x_{ref}) - P_v(x_{ref})] = 0$$



รูปที่ 2-14 ภาพจำลองแสดงการหมุนเวียนของสารทำงานในท่อความร้อน

โดยความดันแคปิลารี คือ ความดันที่ฝั่งไอของรอยต่อระหว่างเฟสไอและของเหลว
ด้วยความดันที่ฝั่งของเหลว แสดงดังสมการ

$$P_c(x) = P_c(x_{ref}) + \Delta P_v(x - x_{ref}) + \Delta P_l(x_{ref} - x) \quad (2-1)$$

เมื่อ $P_c(x)$ = ความดันแคปิลารีที่ตำแหน่ง x

$$= P_v(x) - P_l(x)$$

$P_c(x_{ref})$ = ความดันแคปิลารีที่ตำแหน่งอ้างอิง, x_{ref}

$$= P_v(x_{ref}) - P_l(x_{ref})$$

$\Delta P_v(x - x_{ref})$ = ความดันไอตกคร่อมจากการไหลจากจุด x ไปยัง จุดอ้างอิง

$$= P_v(x) - P_v(x_{ref})$$

$\Delta P_l(x - x_{ref})$ = ความดันตกคร่อมของของเหลวจากการไหลจากจุด จุดอ้างอิงไปยัง x

$$= P_l(x_{ref}) - P_l(x)$$

ถ้าที่จุดอ้างอิง (x_{ref}) กำหนดให้เป็น x_{min} ที่ซึ่งความดันแคปิลารีต่ำมากจนเข้าใกล้ศูนย์
สมการ 2-1 จะลดรูปเป็น

$$P_c(x) = \Delta P_v(x - x_{min}) + \Delta P_l(x_{min} - x) \quad (2-2)$$

เพื่อให้ท่อความร้อนสามารถทำงานในโหมดท่อความร้อนได้อย่างปกติ ค่าความดัน
แคปิลารีจะต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับผลรวมความดันตกคร่อมทั้งหมดภายในของท่อความร้อน
หรืออาจเรียกรวมๆว่า เกรเดียนต์ความดัน ซึ่งถ้ามันไม่สามารถเป็นไปได้ จะทำให้ของไหลทำงาน
ไม่ถูกบีบด้วยแรงแคปิลารีไปยังส่วนระเหยได้ทันเพื่อไปชดเชยของเหลวที่ระเหยออกไป ทำให้
เกิดการเดือดจนแห้งในส่วนระเหย

โดยทั่วไปแล้วความดันตกคร่อมในเทอมของ ΔP_v และ ΔP_l ด้านขวามือของสมการ 2-2
จะเพิ่มขึ้นเมื่อได้รับความร้อน ดังนั้นความดันแคปิลารีจะเพิ่มขึ้นเมื่อความร้อนเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม

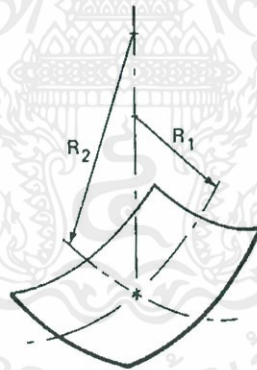
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามเราสามารถเพิ่มความดันแคปิลลารีด้วยโครงสร้างวัสดุพอร์ที่มีความพรุนสูง หากว่าท่อความร้อนสามารถใช้งานได้อย่างต่อเนื่องโดยของเหลวในท่อไม่เดือดจนแห้ง (Dry out) ความดันแคปิลลารีของระบบจะไม่สูงเกินกว่าความดันแคปิลลารีสูงสุด ที่ท่อความร้อนจะมีได้ และ ความดันแคปิลลารีสูงสุดนี้เองที่จะเป็นตัวจำกัดการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อน โดยสามารถอธิบายได้ว่าขีดจำกัดการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากความดันแคปิลลารี เกิดจากอัตราการระเหยของของเหลวในโครงสร้างวัสดุพอร์ เร็วกว่าอัตราการไหลของของเหลวจากส่วนควบแน่นไปยังส่วนระเหยซึ่งต้องอาศัยแรงดันแคปิลลารีในการขับเคลื่อนของเหลว เนื่องจากท่อความร้อนได้รับความร้อนมากทำให้วัสดุพอร์แห้ง การไหลของของไหลไม่สามารถทำได้อย่างต่อเนื่อง สาเหตุเกิดจากความร้อนที่ให้แก่ท่อความร้อนนั้นทำให้ความดันรวมในท่อสูงกว่าความดันแคปิลลารีของท่อความร้อน ขีดจำกัดนี้สามารถลดได้โดยการเลือกใช้วัสดุพอร์ที่มีความละเอียดของรูพอร์มากๆ เพื่อเพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อน

- ความดันแคปิลลารีสูงสุด (Maximum Capillary Pressure)

การเว้าโค้งของของเหลวที่รอยต่อของเฟสไอและของเหลว ดังแสดงในรูป 2-15 ซึ่งสามารถคำนวณความดันแคปิลลารีได้ด้วยสมการของ Laplace และ Young

$$P_c = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (2-3)$$



รูปที่ 2-15 ภาพแสดงรัศมีของของเหลวเว้าโค้งที่รอยต่อของเฟสไอและของเหลว

โดยเราสนใจที่ความดันแคปิลลารีสูงสุด (Maximum Capillary Pressure, P_{cm}) คือในกรณีที่มีรัศมีของของเหลวเว้าโค้ง ทั้งสองมีค่าเท่ากัน ซึ่งจะเขียนเป็นสมการใหม่ได้

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

ค่ารัศมีแคปิลลารี (Effective Capillary Radius, r_c) จะให้ค่าต่างกันสำหรับโครงสร้างวัสดุพอร์ที่ต่างกัน แสดงดังตารางที่ 2-3 โดยที่ค่า r_c ของโครงสร้างวัสดุพอร์ที่เป็นตะแกรงละเอียด ซ้อนทับกันหลายชั้น สามารถคำนวณได้จากสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

ตารางที่ 2-3 รัศมีประสิทธิผลของรูพรุน (r_c) สำหรับโครงสร้างวัสดุพรุนต่างๆ [2]

Wick structures	r_c Expressions
Circular cylinder	$r_c = r$
Rectangular groove	$r_c = w$ $w = \text{groove width}$
Triangular groove	$r_c = \frac{w}{\cos \beta}$ $w = \text{groove width}$ $\beta = \text{half included angle}$
Parallel wires	$r_c = w$ $w = \text{wire spacing}$
Wire screens	$r_c = \frac{w+d}{2}$ $w = \text{wire spacing}$ $d = \text{wire diameter}$
Packed spheres	$r_c = 0.41r_s$ $r_s = \text{sphere radius}$

- ความดันตกคร่อมในเฟสของเหลว (Liquid Pressure Drop)

ความดันตกคร่อมของของเหลวในโครงสร้างวัสดุพรุนสามารถหาจากการอินทิเกรตค่า

เกรเดียนต์ความดันของของเหลว ดังสมการ

$$\begin{aligned} \Delta P_l(x_{min} - x) &= P_l(x_{min}) - P_l(x) \\ &= - \int_{x_{min}}^x x \frac{dP_l}{dx} dx \end{aligned} \quad (2-6)$$

ถ้าความเร็วของของเหลวในโครงสร้างวัสดุพรุนนั้นช้ามาก ค่าแรงดันเคลื่อนที่ (Dynamic Pressure) เราสามารถละทิ้งได้ ดังนั้นที่สถานะคงตัว ค่าการเปลี่ยนแปลงความดันของของเหลว จะขึ้นกับแรงเสียดทานการเคลื่อนที่และแรงโน้มถ่วงโลกดังสมการ

$$\frac{dP_l}{dx} = -F_l Q + \rho_l g \sin \psi \quad (2-7)$$

โดย F_l คือค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานการเคลื่อนที่ของของเหลว ซึ่งหาได้จาก

$$F_l = \frac{\mu_l}{KA_w \lambda \rho_l} \quad (2-8)$$

ค่า K ที่ปรากฏในสมการข้างต้นคือค่าการซึมผ่านโครงสร้างวัสดุพรุน ซึ่งจะให้ค่าที่แตกต่างกันไปสำหรับโครงสร้างวัสดุพรุนรูปแบบต่างๆ

ตารางที่ 2-4 ค่าการซึมผ่านโครงสร้างวัสดุพรุน (K) สำหรับโครงสร้างวัสดุพรุนต่างๆ [2]

Wick structures	K Expressions
Circular artery	$K = \frac{r^2}{8}$
	$\epsilon = \text{porosity} = \frac{w}{s}$ $s = \text{groove pitch}$
Open rectangular grooves	$K = \frac{2\epsilon r_{h,l}^2}{(f_l \text{Re}_l)}$ $r_{h,l} = \frac{2w\delta}{w + 2\delta}$
	$w = \text{groove width}$ $\delta = \text{groove depth}$ $(f_l \text{Re}_l)$ from Fig. 2-4
Circular annular wick	$K = \frac{2r_{h,l}^2}{(f_l \text{Re}_l)}$ $r_{h,l} = r_1 - r_2$
	$(f_l \text{Re}_l)$ from Fig. 2-5 $d = \text{wire diameter}$
Wrapped screen wick	$K = \frac{d^2 \epsilon^3}{122(1 - \epsilon)^2}$ $\epsilon = 1 - \frac{1.05\pi Nd}{4}$
	$N = \text{mesh number}$ $r_s = \text{sphere radius}$
Packed sphere	$K = \frac{r_s^2 \epsilon^3}{37.5(1 - \epsilon)^2}$ $\epsilon = \text{porosity (value depends on packing mode)}$

- ความดันตกคร่อมในเฟสไอ (Vapor Pressure Drop)

ความดันตกคร่อมของไอในท่อความร้อนสามารถหาจากการรวมค่าของการเปลี่ยนแปลงความดันของไอ

$$\begin{aligned} \Delta P_v(x - x_{min}) &= \Delta P_v(x) - \Delta P_v(x_{min}) \\ &= - \int_{x_{min}}^x \frac{dP_v}{dx} dx \end{aligned} \quad (2-9)$$

โดยที่ $\frac{dP_v}{dx}$ คือ เกรเดียนต์ของความดันไอในทิศทางการไหลของไอ ในสภาวะคงตัว อัตราการไหลเชิงมวลของไอจะเท่ากับของเหลวในตำแหน่งเดียวกัน อย่างไรก็ตาม เนื่องจากไอมีความหนาแน่นต่ำกว่าของเหลวมาก ดังนั้นความเร็วของไอจึงมีค่ามากกว่าความเร็วของของเหลว ในกรณีนี้ เกรเดียนต์ของความดันไอไม่ได้มีผลจากแรงต้านการเคลื่อนที่ (Fictional Drag) เพียงอย่างเดียว แต่ยังรวมถึงผลจากการเคลื่อนที่ และลักษณะการไหลของไอ ที่เป็นไปได้ทั้งแบบราบเรียบ (Laminar Flow) และปั่นป่วน (Turbulent Flow) ซึ่งค่าการเปลี่ยนแปลงความดันของไอ หาได้จากสมการ

$$\frac{dP_v}{dx} = -F_v Q + D_v \frac{dQ^2}{dx} \quad (2-10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของการเคลื่อนที่ของไอ (F_v) และสัมประสิทธิ์แรงดันเคลื่อนที่ (D_v) จะขึ้นอยู่กับค่า Vapor Reynolds Number (Re_v) และค่า Mach number (M_v)

$$Re_v = \frac{2r_{h,v}Q}{A_v\mu_v\lambda} \quad (2-11)$$

$$M_v = \frac{Q}{A_v\rho_v\sqrt{\gamma_v R_v T_v}} \quad (2-12)$$

ค่ารัศมีไฮดรอลิก (Hydraulic Radius, $r_{h,v}$) ของโครงสร้างวัสดุพรุนที่เป็นตะแกรงลวดละเอียดเป็น $\frac{d_v}{2}$

ตารางที่ 2-5 ค่า F_v และ D_v สำหรับช่องทางเดินเฟสไอที่เป็นวงกลม [2]

Flow conditions	F_v^a	D_v^a
$Re_v \leq 2300$ $M_v \leq 0.2$	$\frac{8\mu_v}{r_{h,v}^2 A_v \rho_v \lambda}$	$\frac{1.33}{A_v^2 \rho_v \lambda^2}$
$Re_v \leq 2300$ $M_v > 0.2$	$\left(\frac{8\mu_v}{r_{h,v}^2 A_v \rho_v \lambda}\right) \left(1 + \frac{\gamma_v - 1}{2} M_v^2\right)^{-1/2}$	$\frac{1.33}{A_v^2 \rho_v \lambda^2}$
$Re_v > 2300$ $M_v \leq 0.2$	$\left(\frac{0.019\mu_v}{A_v r_{h,v}^2 \rho_v \lambda}\right) \left(\frac{2r_{h,v}Q}{A_v \lambda \mu_v}\right)^{3/4}$	$\frac{1}{A_v^2 \rho_v \lambda^2}$
$Re_v > 2300$ $M_v > 0.2$	$\left(\frac{0.019\mu_v}{A_v r_{h,v}^2 \rho_v \lambda}\right) \left(\frac{2r_{h,v}Q}{A_v \lambda \mu_v}\right)^{3/4} \left(1 + \frac{\gamma_v - 1}{2} M_v^2\right)^{-3/4}$	$\frac{1}{A_v^2 \rho_v \lambda^2}$

^aFor circular vapor core cross section.

- สภาพการนำความร้อนประสิทธิผลของโครงสร้างวัสดุพรุน (Effective Thermal Conductivity of Wick Structures)

กลไกการถ่ายโอนความร้อนของท่อความร้อน คือ

- 1). การนำความร้อนผ่านผนังวัสดุของท่อความร้อน และของเหลวในโครงสร้างวัสดุพรุนที่ส่วนระเหย
- 2). การพาความร้อนของความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอจากส่วนระเหยไปยังส่วนควบแน่น
- 3). การนำความร้อนจากของเหลวในโครงสร้างวัสดุพรุน และผนังวัสดุของท่อความร้อนที่ส่วนควบแน่น

ค่าการนำความร้อนของโครงสร้างวัสดุพรุนแต่ละประเภทนั้นแตกต่างกัน โดยค่าการนำความร้อนประสิทธิผล (Effective Thermal Conductivity) จะคำนวณในกรณีที่โครงสร้างวัสดุพรุนอิ่มตัวไปด้วยของไหลทำงาน แสดงดังตารางที่ 2-6

ตารางที่ 2-6 ค่าการนำความร้อนประสิทธิผล (Effective Thermal Conductivity of wick Structures, k_e) [2]

Wick structures	k_e Expressions ^a
Wick and liquid in series	$k_e = \frac{k_l k_w}{\epsilon k_w + k_l (1 - \epsilon)}$
Wick and liquid in parallel	$k_e = \epsilon k_l + (1 - \epsilon) k_w$
Wrapped screen	$k_e = \frac{k_l [(k_l + k_w) - (1 - \epsilon)(k_l - k_w)]}{[(k_l + k_w) + (1 - \epsilon)(k_l - k_w)]}$
Packed spheres	$k_e = \frac{k_l [(2k_l + k_w) - 2(1 - \epsilon)(k_l - k_w)]}{[2k_l + k_w + (1 - \epsilon)(k_l - k_w)]}$
Rectangular grooves	$k_e = \frac{(w_f k_l k_w \delta) + w k_l (0.185 w_f k_w + \delta k_l)}{(w + w_f)(0.185 w_f k_f + \delta k_l)}$

- ขีดจำกัดการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากความดันแคปิลลารี (Capillary Limitation on Heat Transport Capability)

จากหัวข้อสมดุลความดัน เมื่อแทนค่าสมการที่ 2-6 และ 2-9 ใน 2-2 จะได้

$$P_c(x) = \int_{x_{min}}^x \left(\frac{dP_v}{dx} - \frac{dP_l}{dx} \right) dx \quad (2-13)$$

ตามสมการที่ 2-4 แสดงค่าความดันแคปิลลารีสูงสุดที่สามารถเป็นไปได้ นอกจากนี้ท่อความร้อนยังทำงานอยู่ภายใต้สนามแรงโน้มถ่วงและการไหลเวียนของของเหลว ดังนั้นค่าความดันแคปิลลารีประสิทธิผลสูงสุด (Maximum Effective Capillary Pressure, $P_{cm,e}$) จะน้อยกว่าค่าจากสมการ 2-4 เนื่องจากผลของแรงโน้มถ่วงและทิศทางการวางตั้งฉากของท่อความร้อน ดังสมการ

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

ค่า ΔP_{\perp} หรือ Normal Hydrostatic Pressure มีผลมาจากค่าแรงโน้มถ่วงของโลก และสำหรับท่อความร้อนที่วางทำมุม ψ จากแนวระดับ ดังนั้นเทอม ΔP_{\perp} จะมีค่าเป็น $\rho_l g d_v \cos \psi$

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

อย่างไรก็ตาม จากสมการ 2-13 เมื่อเพิ่มความร้อนขึ้นไปเรื่อยๆ โครงสร้างวัสดุพรุนจะเริ่มเดือดจนแห้ง นั่นคือค่าสูงสุดที่ได้จากสมการ m ที่ $x = x_{min}$ ผลรวมของสมการ 2-13, 2-14 คือ

$$\frac{2\sigma}{r_c} - \Delta P_{\perp} = \int_{x_{min}}^x \left(\frac{dP_v}{dx} - \frac{dP_l}{dx} \right) dx \quad (2-16)$$

แทนสมการที่ 2-12 และ 2-7 ใน 2-16 กำหนดให้ความดันแคปิลลารีต่ำสุดอยู่ที่จุดสุดท้ายของส่วนควบแน่น ($x=0$) และความดันแคปิลลารีสูงสุดอยู่ที่จุดสุดท้ายของส่วนระเหย ($x=L_l$) จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{2\sigma}{r_c} - \Delta P_{\perp} = \int_0^{L_t} (-F_v Q + D_v \frac{dQ^2}{dx} + F_l Q + \rho_l g \sin\psi) dx \quad (2-17)$$

เทอมของแรงต้านทานการไหล ในสมการ 2-7 และ 2-10 เป็นลบ เนื่องจากไอไหลสวนทางกับของเหลว ดังนั้นค่า Q ที่ปลายของท่อความร้อนทั้งสองข้างจึงเท่ากับ 0

$$\int_0^{L_t} D_v \frac{dQ^2}{dx} = 0 \quad (2-18)$$

ทำให้เขียนสมการใหม่ได้ว่า

$$\frac{2\sigma}{r_c} - \Delta P_{\perp} - F_l Q + \rho_l g L_t \sin\psi = \int_0^{L_t} (F_l + F_v) Q dx \quad (2-19)$$

โดยในเทอม $\rho_l g L_t \sin\psi$ จะเป็นค่าความดันของของเหลวตามแนวยาวท่อ หรือ Axial Hydrostatic Pressure ซึ่งจะเรียกผลรวมของเทอม ΔP_{\perp} และ $\rho_l g L_t \sin\psi$ ว่าเป็น Hydrostatic Pressure ดังนั้นจัดรูปใหม่จะได้ สมการแสดงแฟกเตอร์ขีดจำกัดการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากแรงดันแคปิลลารี (Capillary Limitation on the Heat Transport Factor, $Q_{c,max}$) ดังนี้

$$\begin{aligned} (QL_{c,max}) &= \int_0^{L_t} Q dx \\ &= \frac{\frac{2\sigma}{r_c} - \Delta P_{\perp} - \rho_l g L_t \sin\psi}{F_l + F_v} \end{aligned} \quad (2-20)$$

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

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

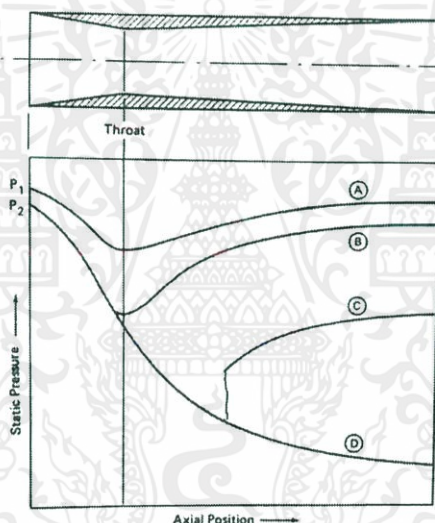
โดยเทอมเศษของสมการ 2-20 จะเรียกได้ว่าเป็น Maximum Effective Pumping Pressure จากสมการแฟกเตอร์ต้านบนสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการอัตราการถ่ายเทความร้อนของขีดจำกัดแคปิลลารี (Capillary Limitation on the Heat Transport Rate, $Q_{c,max}$) ดังนี้

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

2.6.4.2 ขีดจำกัดการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากความเร็วเสียง (Sonic Limitation)

ในท่อความร้อนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางเดินเฟสไอที่คงที่ การระเหยกลายเป็นไอที่ส่วนระเหย และการลดลงของไอที่ส่วนควบแน่น ทำให้การไหลของไอเกิดความเร่งและความหน่วงขึ้น อัตราเร็วในการเคลื่อนที่ของไอมักมีความแตกต่างกันเมื่อไหลผ่านนอซเซิล ซึ่งประกอบด้วยส่วนคอคอดและส่วนที่ขยายออก (Converging-Diverging Nozzle) เป็นผลมาจากอัตรา

การไหลเชิงมวลที่คงที่ผ่านจุดต่างๆในท่อความร้อน แสดงดังรูปที่ 2-16 ในช่วงคอคอดของนอซเซิล ความดันจะลดต่ำลง และทำให้ความเร็วการไหลเพิ่มขึ้น และในส่วนของขยายออก ความเร็วจะยิ่งเพิ่มขึ้นไปอีก จนเข้าสู่สภาวะความเร็วเหนือเสียง (Supersonic) หรือไม่ อาจเกิดการอัดตัวของไอกลับอีกครั้ง เมื่อความดันเพิ่มขึ้นและส่งผลให้ความเร็วลดน้อยลง เส้นกราฟ A แสดงลักษณะการไหลแบบ Subsonic ซึ่งความดันที่คืนตัวเท่ากับ P_0 เกิดความดันลดที่ส่วนคอคอดของนอซเซิล ความเร็วเพิ่มขึ้นจนถึงจนถึงส่วนคอคอด ในส่วนที่ขยายออก ความดันคืนตัวกลับสู่ค่าเดิม ความเร็วไหลต่ำลง ถ้าความดันที่คืนตัวมีค่าต่ำลงเป็น P_c ความเร็วจะเข้าใกล้ความเร็วเสียงที่คอคอด และมีอัตราการไหลเชิงมวลสูงสุด และจุดนี้เองที่เป็นสภาวะวิกฤต หรือเกิดการไหลแบบ Choked ซึ่งหลังจากการไหลออกจากคอคอดแล้ว ความดันคืนตัวมีค่าต่ำลงเป็น P_c ความเร็วในส่วนขยายเข้าใกล้ความเร็วเหนือเสียง ส่วนที่ ความดัน P_0 เกิดจากการเร่งของไอที่ต่อเนื่องตลอดแนวการไหลของส่วนขยาย ทำให้ค่าความดันคืนตัวลดต่ำลง



รูปที่ 2-15 โพรไฟล์ของความดันเมื่อไหลผ่านนอซเซิล [2]

การไหลของไอในท่อความร้อนค่อนข้างใกล้เคียงกับลักษณะการไหลในท่อนอซเซิล Levy, Kemme Deverall ได้อธิบายและแสดงให้เห็นถึงการเกิดขีดจำกัดเนื่องจากความเร็วเสียง ซึ่งที่อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดในท่อความร้อนจะขึ้นกับการไหลแบบ Choked และอุณหภูมิที่รวมที่ส่วนระเหยมีค่าคงที่ หากเพิ่มอัตราการดึงความร้อนออกจากส่วนควบแน่นให้ต่ำกว่าอุณหภูมิในส่วนควบแน่น จะทำให้ไอเกิดการไหลด้วยความเร็วเหนือเสียงทำให้เกิดความต่างของอุณหภูมิในช่วงกว้างตลอดแนวความยาวของท่อความร้อน แต่ไม่เพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อน ซึ่งส่วนใหญ่เป็นผลมาจากการใช้งานท่อความร้อนที่ความหนาแน่นไอล่าและความเร็วไอสูงโดยค่าอัตราการถ่ายโอนความร้อนสูงสุดของขีดจำกัดของเสียง (Sonic Limitation) หาได้จากสมการ(2-22)

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

เนื่องจากขีดจำกัดประเภทนี้ มักเกิดจากท่อความร้อนได้รับพลังงานความร้อนสูงที่รวดเร็วเกินไป หรือมีการดึงเอาความร้อนที่ส่วนควบแน่นออกเร็วเกินไป ทำให้มีความต่างของอุณหภูมิในท่อความร้อนมาก ขีดจำกัดประเภทนี้ไม่ค่อยขึ้นกับโครงสร้างวัสดุพอรุนเท่าไรนัก แต่จะขึ้นกับชนิดของสาร และขนาดของช่องทางเดินเฟสไอ (Vapor Core Site) คือ ยังมีเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางเดินเฟสไอมาก ค่าการถ่ายโอนความร้อนก็จะยิ่งสูงขึ้น

2.6.4.3 ขีดจำกัดการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากของเหลวหลุดลอยตามไอ (Entrainment Limitation)

ในท่อความร้อน ไอจะไหลจากส่วนระเหยไปยังส่วนควบแน่น ส่วนของเหลวจะไหลกลับมาที่ส่วนระเหยโดยผ่านโครงสร้างวัสดุพอรุน ซึ่งไอและของเหลวมีทิศทางการไหลสวนทางกัน และหากความเร็วไอ มีมากกว่าความเร็วของของเหลว จะทำให้เกิดแรงเฉือนขึ้นที่ผิวสัมผัสร่วมของทั้ง 2 เฟส ขีดจำกัดประเภทนี้จะเกิดขึ้นเมื่อของเหลวที่แยกตัวออกจากพื้นผิวของ โครงสร้างวัสดุพอรุนและหลุดลอยไปตามไอ ในขณะที่กลไกการหมุนเวียนของเหลวจากส่วนควบแน่นไปยังส่วนระเหยยังคงดำเนินต่อไป ในที่สุด จะเกิดการเดือดจนแห้งในบริเวณ โครงสร้างวัสดุพอรุนในส่วนระเหยจากนั้นของเหลวที่หมุนเวียน ขีดจำกัดนี้สามารถลดได้โดยการเพิ่มช่องทางเดินเฟสไอ โดยค่าการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากของเหลวหลุดลอยตามไอคำนวณได้จากสมการ (2-23)

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

2.6.4.4 ขีดจำกัดการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการเดือด (Boiling Limitation)

กลไกขั้นพื้นฐานในการถ่ายเทความร้อนในส่วนระเหยและส่วนควบแน่นของท่อความร้อน คือ การระเหย และการควบแน่น ในส่วนระเหย อุณหภูมิของของเหลวที่รอยต่อของผนังท่อและโครงสร้างวัสดุพอรุน จะมากกว่าอุณหภูมิของเหลวที่รอยต่อโครงสร้างวัสดุพอรุนและไอ โดยปริมาณอุณหภูมิจะไม่ขึ้นอยู่กับของเหลว และลักษณะของโครงสร้างวัสดุพอรุนเพียงอย่างเดียว แต่จะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของฟลักซ์ความร้อนอีกด้วย

ความดันของของเหลวที่ส่วนระเหยจะเท่ากับความดันอิมิตัวที่อุณหภูมิรอยต่อระหว่างเฟส สลกับความดันแคปิลารีที่อุณหภูมิรอยต่อระหว่างเฟสเช่นเดียวกัน เป็นผลให้ความดันไออิมิตัวที่รอยต่อของผนังท่อและ โครงสร้างวัสดุพอรุน มีค่ามากกว่าความดันของของเหลวที่จุดเดียวกัน ดังนั้น เมื่อความต่างความดันเพิ่มขึ้น และฟลักซ์ความร้อนในแนวรัศมีของส่วนระเหยเพิ่มขึ้น จะทำให้เกิด

ฟองไอที่โครงสร้างวัสดุพูน ซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการให้เกิดในท่อความร้อนอย่างยิ่ง เนื่องจากจะไปขัดขวางเส้นทางการไหลของของเหลว ไม่สามารถเคลื่อนที่หมุนเวียนได้ตลอดทั้งท่อ ทำให้โครงสร้างวัสดุพูนแข็งและเกิดความต้านทานความร้อนมากขึ้น

ดังนั้นการลดขีดจำกัดนี้ ทำได้โดยเลือกใช้โครงสร้างวัสดุพูนที่มีค่าความจุความร้อนสูง เพื่อช่วยลดอัตราการระเหยของไอที่ส่วนระเหย โดยค่าอัตราการถ่ายโอนความร้อนสูงสุดของขีดจำกัดเนื่องจากการเดือด หาได้จากสมการ(2-24)

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

2.7 ความร้อนสัมผัส (Sensible Heat)

ความร้อนสัมผัสหรือ Sensible Heat เป็นความร้อนที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของวัตถุ หรือระบบนั้นๆ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ (2-25)

$$Q = mc\Delta T \quad (2-25)$$

โดยในการทดสอบความร้อนที่ท่อความร้อนสามารถถ่ายเทได้ จะคำนวณจากอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงของน้ำ ที่นำมาใช้แลกเปลี่ยนความร้อนกับท่อความร้อน

2.8 ความดันและจุดเดือดของน้ำ

เมื่อน้ำได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิหนึ่งๆ ที่ซึ่งความดันไอมีค่าเท่ากับความดันบรรยากาศ จะทำให้น้ำเริ่มเดือดเป็นฟอง โดยจุดเดือดของน้ำจะขึ้นอยู่กับความดัน ดังแสดงตามตารางที่ 2-7

ตารางที่ 2-7 จุดเดือดของน้ำที่ความดันต่างๆ [5]

Pressure		Boiling Point	
psi	bar	deg F	deg C
0.5	0.03	79.6	26.4
1	0.07	102	38.7
2	0.14	126	52.2
3	0.21	141	60.8
4	0.28	153	67.2
5	0.34	162	72.3
6	0.41	170	76.7
7	0.48	177	80.4
8	0.55	183	83.8
9	0.62	188	86.8
10	0.69	193	89.6
11	0.76	198	92.1
12	0.83	202	94.4
13	0.90	206	96.6
14	0.97	210	98.7
14.69	1.0	212	100
15	1.0	213	101
16	1.1	216	102

Pressure		Boiling Point	
psi	bar	deg F	deg C
17	1.2	219	104
18	1.2	222	106
19	1.3	225	107
20	1.4	228	109
22	1.5	233	112
24	1.7	238	114
26	1.8	242	117
28	1.9	246	119
30	2.1	250	121
32	2.2	254	123
34	2.3	258	125
36	2.5	261	127
38	2.6	264	129
40	2.8	267	131
42	2.9	270	132
44	3.0	273	134
46	3.2	276	135
48	3.3	279	137

engineeringtoolbox.com

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับท่อความร้อน

R. Kempers และคณะ [6] ได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนทองแดงที่มีน้ำเป็นของไหลทำงาน และมีโครงสร้างวัสดุพูนเป็นตะแกรงลวดละเอียด ที่มีจำนวนชั้นของตะแกรงลวดที่แตกต่างกันคือ 1-6 ชั้น พบว่าจำนวนชั้นของลวดตะแกรงที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความต้านทานความร้อนสูงขึ้น แต่จะสามารถใช้งานกับช่วงความร้อนสูงกว่าได้นอกจากนี้ยังได้ทดสอบประสิทธิภาพของท่อความร้อนที่มีปริมาณของไหลทำงานแตกต่างกันด้วย โดยพบว่าปริมาณของไหลที่เท่ากับหรือมากกว่าปริมาตรพูนในวัสดุพูนจะสามารถถ่ายเทความร้อนได้อย่างต่อเนื่อง แต่ปริมาณของไหลที่น้อยกว่าปริมาตรพูนในวัสดุพูนจะทำให้เกิดการเดือดจนแห้ง ส่งผลประสิทธิภาพลดลง

Shwin-Chung Wong [7] ก็ได้ศึกษาผลของปริมาณของไหลที่มีต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนทองแดงที่มีน้ำเป็นของไหลทำงาน และพบว่าปริมาณของไหลที่ต่ำกว่าปริมาตรพูนของวัสดุพูนจะทำให้เกิดการเดือดจนแห้ง ส่งผลให้อุณหภูมิบริเวณส่วนระเหยสูงขึ้น ในขณะที่ปริมาณที่เกินปริมาตรพูนของวัสดุพูนจะสามารถดูดซับความร้อนได้มากกว่าปกติ นอกจากนี้ยังได้ศึกษาเปรียบเทียบผลของลักษณะของตะแกรงลวด โดยพบว่าตะแกรงที่ละเอียดสามารถดูดซับความร้อนได้มากกว่า และหากเทียบระหว่างการใช้ตะแกรงลวด 2 ชั้นที่ความละเอียด mesh 100 และ mesh 100+200 โดยมีปริมาณของไหลเท่ากับปริมาตรพูนของตะแกรงลวดแต่ละประเภท พบว่าแบบผสม mesh 100+200 จะทำให้อุณหภูมิที่ส่วนระเหยต่ำกว่าที่ทุกย่านความร้อน

Jianlin Yu และคณะ [8] ได้ศึกษาผลของปริมาณของไหลทำงานที่ให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนในท่อความร้อนทองแดงที่มีน้ำเป็นของไหลทำงาน ที่มีโครงสร้างวัสดุพูนเป็นตะแกรงลวดละเอียดสูงนั่นคือ 70-76% ของปริมาตรพูนของวัสดุพูน

M.G. Mousa [9] ได้ศึกษาพฤติกรรมของของไหลนาโน โดยอนุภาคนาโนนั้นอาจเป็นโลหะ หรือสารประกอบออกไซด์ในน้ำ เพื่อใช้เป็นของไหลทำงานในท่อความร้อนทองแดงที่มีน้ำเป็นของไหลทำงาน และมีโครงสร้างวัสดุพูนเป็นตะแกรงลวดละเอียด พบว่าอนุภาคโลหะขนาดเล็กจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายโอนความร้อนได้มากยิ่งขึ้น ส่วนอนุภาคที่ไม่ใช่โลหะ เช่นอลูมินา จะช่วยเพิ่มความดันแคปิลารีทำให้การขนถ่ายอนุภาคของเหลวนั้นทำได้เร็วขึ้น เมื่อเทียบกับน้ำ แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของอนุภาคนาโนจะทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายโอนความร้อนลดลงเนื่องจากความหนาแน่น ความหนืด และความต้านทานการไหลของของไหลเพิ่มขึ้น

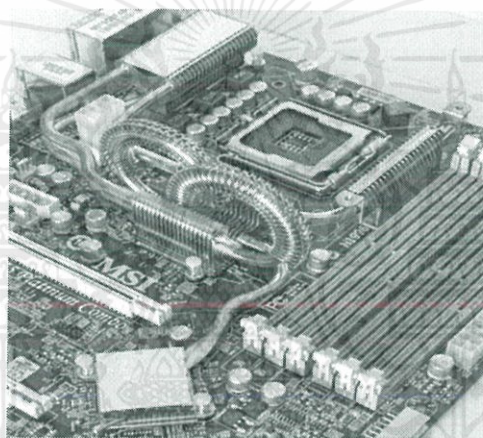
Kang S.W. [10] ได้ทดลองหาประสิทธิภาพของท่อความร้อนแบบร่อง โดยใช้ของไหลนาโนที่มีอนุภาคเงินขนาด 35 นาโนเมตรในน้ำเป็นของไหลทำงาน พบว่าสามารถลดความต้านทานความร้อนลงได้ 10-80% เมื่อเทียบกับน้ำ

2.10 การใช้งานท่อความร้อน

ท่อความร้อนถูกนำไปใช้งานในหลายด้าน ตั้งแต่ปี 1964 ยิ่งเวลาผ่านไปเลยมา มีการวิจัยและพัฒนาประสิทธิภาพอยู่เสมอ ทำให้การประยุกต์ใช้งานมีมากขึ้นซึ่งในหัวข้อนี้จะอธิบายถึงประเภทการใช้งานของท่อความร้อนอย่างคร่าวๆดังนี้

2.10.1 การนำท่อความร้อนไปใช้กับวงจรอิเล็กทรอนิกส์

ในปัจจุบัน ท่อความร้อนถูกนำไปใช้งานอย่างกว้างขวางในงานด้านอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ยกตัวอย่างเช่น ทรานซิสเตอร์ อุปกรณ์กึ่งตัวนำไฟฟ้า และชุดวงจรสำเร็จรูป นอกจากนี้ยังถูกนำไปใช้ในระบบคอมพิวเตอร์ที่มีประสิทธิภาพการประมวลผลสูงๆ นั่นคือต้องมีระบบระบายความร้อนที่ดีเยี่ยมเช่นกัน เช่นในหน่วย CPUs หรือการ์ดจอที่มีความละเอียดสูง

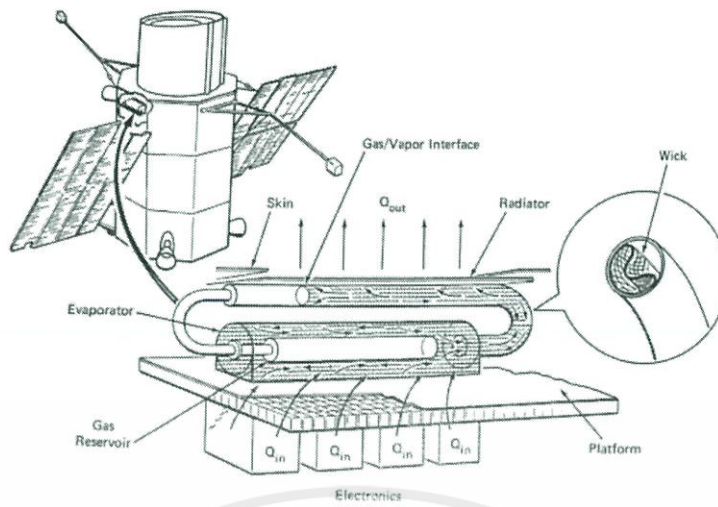


รูปที่ 2-17 เมนบอร์ดคอมพิวเตอร์ที่มีท่อความร้อนในตัวของบริษัท MSI [11]

2.10.2 งานด้านอวกาศ

ท่อความร้อนถูกนำไปใช้งานในงานด้านอวกาศอย่างหลากหลายรูปแบบ โดยมีจุดประสงค์หลักคือการใช้เพื่อควบคุมอุณหภูมิของชิ้นส่วนอุปกรณ์ ที่ถูกส่งขึ้นไปปฏิบัติงานในอวกาศ ซึ่งตัวอย่างรูปแบบการใช้งานท่อความร้อนบางชนิดได้แก่

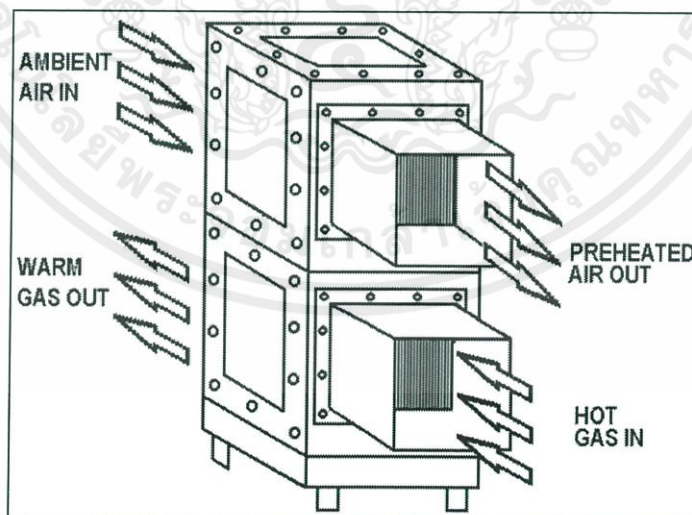
1. การควบคุมอุณหภูมิของยานอวกาศ
2. ใช้ในการระบายความร้อนจากชิ้นส่วนที่ทำงานในด้านเดียวกับดวงอาทิตย์ โดยระบายออกไปยังอีกฝั่งซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่ามาก
3. ใช้งานในแหล่งกำเนิดพลังงานนิวเคลียร์อวกาศ เช่นการระบายความร้อนจากเครื่องปฏิกรณ์ เป็นต้น



รูปที่ 2-18 ภาพจำลองแสดงโครงสร้างของยานสำรวจ OAO-C ที่ใช้ท่อความร้อนเพื่อระบายความร้อนในแผงวงจรข้อมูล [2]

2.10.3 การใช้งานท่อความร้อนเป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

เนื่องจากประสิทธิภาพการถ่ายโอนความร้อนที่ดี ท่อความร้อนจึงถูกนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นอุปกรณ์ที่นำพลังงานความร้อนเหลือทิ้งกลับมาใช้งานใหม่ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับสายป้อนที่ต้องการความร้อน และยังเป็นการประหยัดเชื้อเพลิง พลังงานที่ต้องให้ความร้อนกับสายป้อนนั้นๆ ด้วย



รูปที่ 2-19 ภาพจำลองแสดงการใช้งานท่อความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน [12]

2.10.4 การป้องกันการพังทลายของพื้นน้ำแข็ง

ในรัฐอลาสก้า ประเทศสหรัฐอเมริกา สภาพพื้นดินเป็นแบบดินที่มีชั้นน้ำแข็งปะปนอยู่ (Permafrost) ท่อส่งน้ำมันของ McDonnell Douglas Corporation ที่วางท่อโดยบริษัท Alaska Pipeline Service ได้ใช้ประโยชน์จากท่อความร้อนกว่า 100,000 ชั้น กับท่อส่งน้ำมันดังกล่าว เนื่องจากน้ำมันที่ขนส่งมาทางท่อนั้นมีอุณหภูมิสูง ซึ่งโครงสร้างของท่ออาจจะนำความร้อนจากน้ำมันในท่อนี้ลงไปสู่พื้นดินด้านล่าง ที่มีชั้นน้ำแข็งปะปนอยู่ นั่นจะทำให้น้ำแข็งละลายและโครงสร้างท่อส่งน้ำมันจะพังทลาย ได้รับความเสียหาย ทางบริษัท McDonnell Douglas จึงได้พัฒนาระบบระบายความร้อน โดยใช้ท่อความร้อนถ่ายเทความร้อนจากโครงสร้างท่อส่งน้ำมันออกไปยังบรรยากาศภายนอกที่เย็นกว่าแทน จึงทำให้ความร้อนถูกระบายออกไปยังอากาศแทนที่จะลงไปยังพื้นดินด้านล่าง ช่วยให้โครงสร้างสามารถตั้งอยู่บนพื้นที่บริเวณนั้นได้ ดังรูปที่ 2-21



รูปที่ 2-20 การใช้งานท่อความร้อนกับท่อส่งน้ำมันในอลาสก้า สหรัฐอเมริกา [13]

2.10.5 การใช้ท่อความร้อนเพื่อละลายหิมะ และน้ำแข็ง

ในประเทศญี่ปุ่นได้มีการนำเอาเทคโนโลยีท่อความร้อนนี้ไปใช้ละลายหิมะตามพื้นที่ต่างๆ และป้องกันการเกิดน้ำแข็งจับตัว โดยใช้ความร้อนที่สะสมใต้ดินเป็นแหล่งความร้อน ถ่ายเทสู่ส่วนระเหยในท่อความร้อนและระบายออกทางส่วนควบแน่นที่อยู่บริเวณที่มีหิมะอยู่

2.10.6 ตัวอย่างการใช้งานอื่นๆของท่อความร้อน [4]

- การใช้ท่อความร้อนเพื่อให้ความร้อนกับพื้นห้องน้ำ (ญี่ปุ่น)
- การใช้ท่อความร้อนระบายความร้อนจากน้ำมันของรถมอเตอร์ไซค์(ญี่ปุ่น)
- การใช้ท่อความร้อนเพื่อระบายความร้อนของหัวเจาะ (รัสเซีย)
- การใช้ท่อความร้อนเพื่อระบายความร้อนจากใบพัดของเครื่องแก๊สเทอร์ไบน์(เชค)
- การใช้ท่อความร้อนเพื่อละลายน้ำแข็งในฟาร์มปลา(โรมาเนีย)
- การใช้ท่อความร้อนเพื่อให้ความร้อนกับน้ำมันหนักในถังขนาดใหญ่ (โรมาเนีย)
- การใช้ท่อความร้อนระบายความร้อนจากส่วนแบร์ริงในปั๊มน้ำลูกฉิน(อังกฤษ)
- การใช้ท่อความร้อนเพื่อรักษาระดับอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์แบบไบโอ (จีน)
- การใช้ท่อความร้อนเพื่อให้ความอบอุ่นในรถยนต์
- การใช้ท่อความร้อนเพื่อควบคุมอุณหภูมิของแบตเตอรี่ไฟฟ้าในเครื่องกำจัดความชื้น (สหรัฐอเมริกา)
- การใช้ท่อความร้อนเพื่อให้ความอบอุ่นในครัวเรือน (สหรัฐอเมริกา)
- การใช้ท่อความร้อนเพื่อทำน้ำอุ่น

จากรูปแบบการใช้งานของท่อความร้อนที่กล่าวมานี้ เป็นเพียงตัวอย่างบางส่วนที่มีใช้อยู่ในปัจจุบัน ยังมีการนำท่อความร้อนมาใช้งานในเชิงอุตสาหกรรมอีกด้วย และแน่นอนว่าในอนาคตจะต้องมีการพัฒนาประสิทธิภาพและรูปแบบการใช้งานของท่อความร้อนนี้ ในรูปแบบใหม่ๆอย่างแน่นอน

บทที่ 3

การออกแบบ สร้าง และทดสอบประสิทธิภาพ

ท่อความร้อนที่สร้างขึ้นเป็นท่อทองแดง ใช้ตะแกรงลวดละเอียดสแตนเลสขนาด 70 mesh เป็นโครงสร้างวัสดุพูน มีน้ำเป็นสารทำงาน ในการทดลองแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ

1. การออกแบบท่อความร้อน และสร้างโปรแกรมคำนวณค่าความร้อน
2. การสร้างท่อความร้อน
3. การทดสอบประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน

ซึ่งในบทนี้จะได้กล่าวถึงอุปกรณ์และวิธีทำในแต่ละส่วนดังต่อไปนี้

3.1 การออกแบบท่อความร้อนและสร้างโปรแกรมคำนวณค่าความร้อน

1. ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวกับท่อความร้อน และขีดจำกัดการถ่ายเทความร้อนประเภทต่างๆ
 2. สร้างสมการความสัมพันธ์ต่างๆ จากทฤษฎีบทที่ 2 หัวข้อ 2.6.4 ขีดจำกัดการถ่ายเทความร้อน โดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel ซึ่งแสดงไว้ในภาคผนวก ง
 3. ออกแบบท่อความร้อน โดยจะแสดงวิธีการออกแบบอย่างละเอียดไว้ในภาคผนวก ก-2
- ซึ่งจากการออกแบบท่อความร้อนตามขั้นตอนที่กล่าวไป ทำให้ได้ค่าจากการออกแบบดังนี้

ตารางที่ 3-1 ตารางสรุปผลการออกแบบท่อความร้อน

ชนิดของของไหลทำงาน	น้ำ
วัสดุที่ใช้ทำท่อความร้อน	ทองแดง
วัสดุที่ใช้ทำโครงสร้างวัสดุพูน	สแตนเลส
เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อ (do)	1.91×10^{-2} เมตร
เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อ (di)	1.63×10^{-2} เมตร
ผ่านศูนย์กลางของทางเดินเฟสไอ (dv)	1.50×10^{-2} เมตร
จำนวนชั้นโครงสร้างวัสดุพูน	3
จำนวนช่องของรูพูนต่อหน่วยความยาว (mesh)	70
เส้นผ่านศูนย์กลางของลวดตะแกรง (d)	1.04×10^{-4} เมตร
อัตราส่วนของปริมาตรของรูพูนต่อปริมาตรของวัสดุทั้งหมด (\mathcal{E})	0.7638

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3-1 ตารางสรุปผลการออกแบบท่อความร้อน (ต่อ)

ความยาวรวมท่อความร้อน (Lt)	0.3 เมตร
ความยาวท่อส่วนควบแน่น (Lc)	0.135 เมตร
ความยาวท่อส่วนที่ไม่มีเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (La)	0.03 เมตร
ความยาวท่อส่วนระเหย (Le)	0.135 เมตร
มุมของท่อความร้อนที่วัดจากแนวระดับ (ψ)	0 องศา
ช่วงอุณหภูมิที่ทำงาน	80 °C
ปริมาตรของไหลทำงาน	10 มิลลิลิตร
ความดันไอของของไหลทำงาน	5 นิ้วปรอท
อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกต่อภายใน (Do/Di)	1.1753

จากการคำนวณค่าอัตราการถ่ายโอนความร้อนทั้ง 4 ชนิดจำกัด ในที่อุณหภูมิ 80°C แสดงได้ดังตารางที่ 3-2

ตารางที่ 3-2 ผลการคำนวณค่าอัตราการถ่ายโอนความร้อนทั้ง 4 ชนิดจำกัดที่อุณหภูมิ 80°C

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

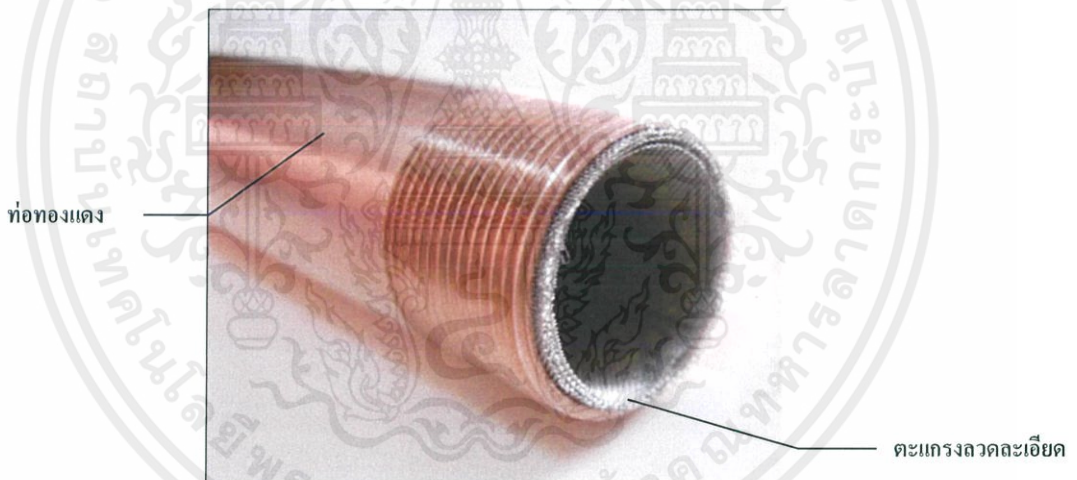
ตามทฤษฎีชนิดจำกัดการถ่ายโอนความร้อนของท่อความร้อน ในหัวข้อ 2.6.4 ได้กล่าวไว้ว่า ชนิดจำกัดการถ่ายโอนความร้อนของท่อความร้อนที่มีค่าน้อยที่สุด จะเป็นตัวบ่งบอกค่าความร้อนที่ท่อความร้อนจะสามารถทำได้ จากตารางที่ 3-2 จะพบว่าค่าการถ่ายโอนความร้อนเนื่องจากชนิดจำกัดความดันแคปพิลารีให้ค่าความร้อนต่ำสุด ที่อุณหภูมิ 80 °C คือ 456.69วัตต์

3.2 การสร้างท่อความร้อน

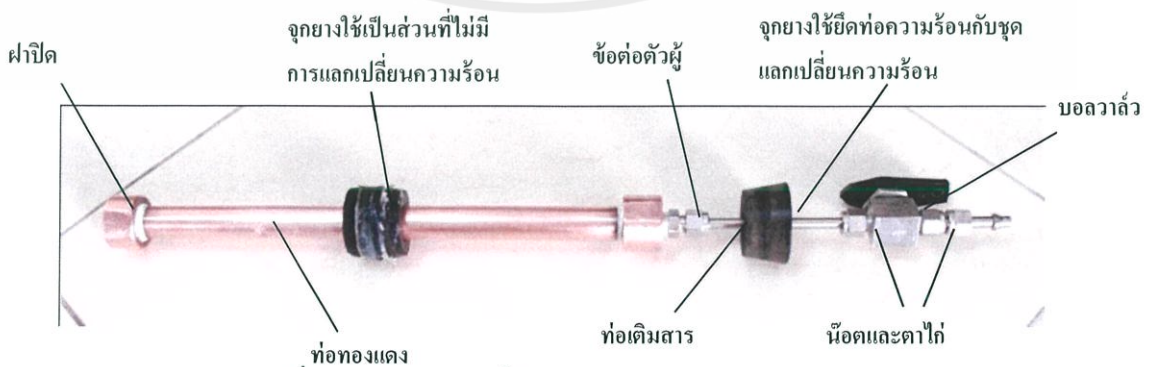
ในการสร้างท่อความร้อนประกอบไปด้วยขั้นตอนหลักๆรวม 2 ขั้นตอนคือ การประกอบท่อความร้อน และการเติมสารทำงาน

3.2.1. การประกอบท่อความร้อน

ท่อความร้อนประกอบไปด้วยท่อทองแดงกลวง ซึ่งใช้เป็นตัวท่อความร้อน ภายในประกอบด้วยตะแกรงลวดละเอียดคสแตนเลส ม้วนเป็นวงอยู่ติดกับผนังด้านในท่อ ดังรูปที่ 3-1 ก่อนจะทำการประกอบ จะต้องทำความสะอาดชิ้นส่วนอุปกรณ์ต่างๆให้สะอาดเสียก่อน ในการทดลองนี้ ติดท่อเติมสารและบอลวาล์วไว้ที่ปลายด้านหนึ่งของท่อความร้อนดังรูปที่ 3-2 เพื่อความสะดวกในการเติมสารทำงาน แต่เมื่อนำไปใช้งานจริงตัวท่อความร้อนจะต้องเชื่อมปิดสนิท หลังจากการประกอบท่อความร้อนจะต้องตรวจสอบรอยรั่ว ในที่นี้ใช้แรงดันอากาศอัดเข้าไปในท่อทองแดงที่จุ่มแช่อยู่ในน้ำ เพื่อตรวจสอบว่าไม่มีรอยรั่ว โดยมีขั้นตอนการประกอบท่อความร้อนดังนี้



รูปที่ 3-1 ตะแกรงลวดละเอียดที่พันอยู่ในท่อทองแดงหนา 3 ชั้น



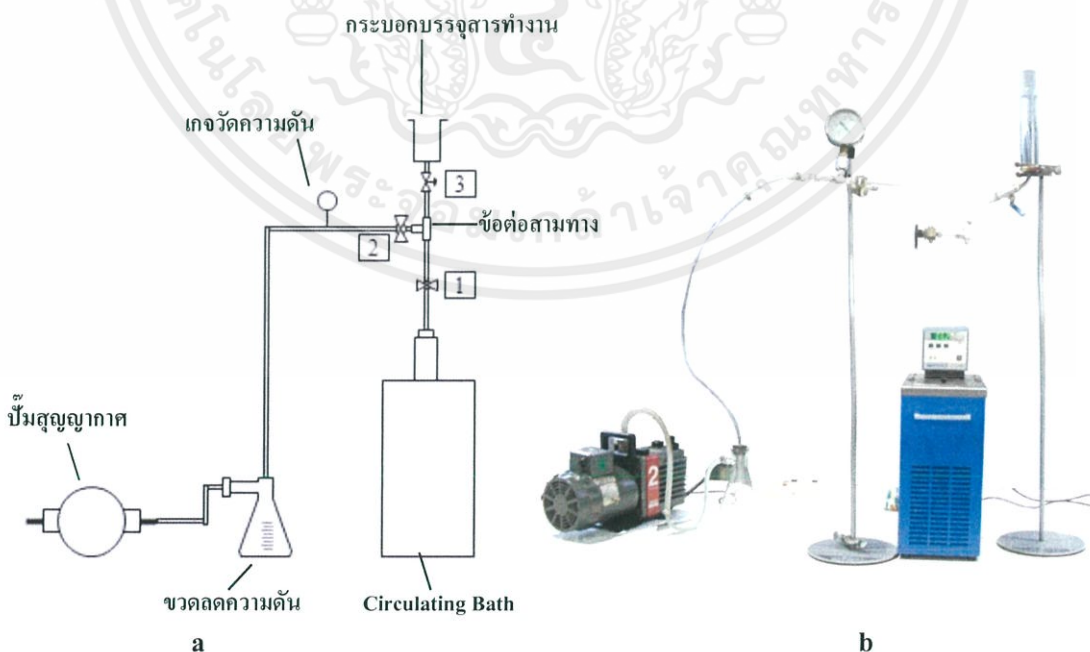
รูปที่ 3-2 ท่อทองแดงที่ประกอบท่อเติมสารและวาล์ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ตัดท่อทองแดงให้มีความยาวประมาณ 30 เซนติเมตร เพื่อใช้เป็นตัวต่อบรรจุ
2. ตัดตะแกรงลวดละเอียดเพื่อใช้เป็นโครงสร้างวัสดุพรุน ให้มีความยาวเพียงพอที่จะม้วนเป็นวงความหนา 3 ชั้น สอดเข้าไปในท่อทองแดง โดยให้ตะแกรงลวดแนบสนิทกับผนังท่อทองแดง
3. ตัดเพลาทองแดง 2 ชั้น เพื่อใช้เป็นฝาครอบท่อความร้อน เจาะรูทำเกลียวเพื่อใช้ปิดท่อความร้อนทั้งสองชั้น แต่ชั้นหนึ่งเจาะรูทำเกลียวสองด้านเพื่อใช้ต่อไปยังท่อเดิมสารด้านที่มีบอลลวลว
4. ทำความสะอาดท่อ เพลาทองแดง และตะแกรงลวดละเอียดทุกชิ้นให้ให้สะอาด
5. ปิดฝาครอบทั้งสองด้าน โดยใช้เทปพันเกลียวพันรอบเกลียวให้แน่นขึ้น ต่อท่อเดิมสารทำงานและบอลลวลว
6. ตรวจสอบรอยรั่วที่ข้อต่อทุกจุด โดยการอัดอากาศเข้าไปในท่อทองแดงที่จุ่มแช่อยู่ในน้ำ เพื่อตรวจสอบว่าไม่มีรอยรั่วที่จุดใดๆ

3.2.2. การเติมสารทำงาน

ชุดเติมสารทำงาน ประกอบไปด้วยส่วนประกอบหลัก 2 ส่วนคือ ส่วนทำสุญญากาศ และ ส่วนเติมสารทำงาน สารทำงานที่ใช้ในการทดลองนี้คือ น้ำ จำนวน 10 ml ซึ่งในส่วนทำสุญญากาศ ทำหน้าที่ดึงเอาอากาศและแก๊สที่ไม่ควมแน่นออกจากท่อความร้อน และส่วนเติมสารทำงานจะทำหน้าที่เติมน้ำเข้าสู่ท่อความร้อนดังรูปที่ 3-3 ซึ่งมีขั้นตอนดังต่อไปนี้



รูปที่ 3-3 ชุดอุปกรณ์เติมสารทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

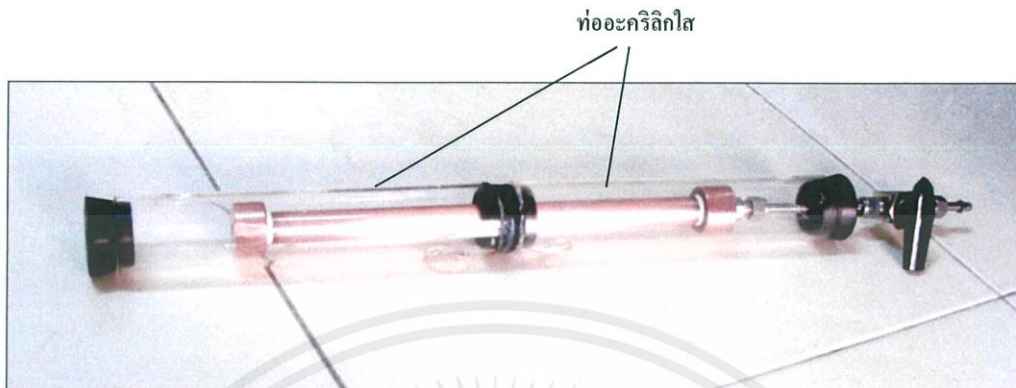
1. ใส่ท่ออะคริลิกที่ต่อความร้อนด้านเดิมสาร อัดจุกยางปิดท่ออะคริลิกให้แน่น ต่อชุดต่อความร้อนเข้ากับชุดเดิมสารทำงานดังรูปที่ 3-3
2. เปิดเครื่อง Circulating Bath เพื่อให้ความร้อนกับท่อความร้อน
3. ปิดวาล์ว 3 ปิดวาล์ว 1 และ 2 เปิดเครื่องปั๊มสุญญากาศเพื่อดึงอากาศออกจากท่อความร้อน จนกว่าความดันรวมของระบบจะคงที่ ดังแสดงในรูปที่ 3-3b
4. ปิดวาล์ว 1, 2 และเครื่องปั๊มสุญญากาศตามลำดับ
5. เปิดวาล์ว 3 และค่อยๆเปิดวาล์ว 1 เพื่อเติมน้ำลงไปในท่อความร้อนเพียงเล็กน้อย (5-10 ml) เพื่อช่วยขับดันแก๊สที่ไม่ควบแน่นออกมา
6. ปิดวาล์ว 3 และ 1 เปิดวาล์ว 2 จากนั้นเปิดปั๊มสุญญากาศเพื่อดึงเอาน้ำที่อยู่ตามท่อออก
7. ให้ความร้อนเรื่อยๆ เพื่อให้ น้ำที่อยู่ในท่อระเหยเป็นไอ เปิดปั๊มสุญญากาศ และเปิดวาล์ว 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. นำท่อความร้อนไปต่อเข้ากับชุดเดิมสาร ปิดวาล์ว 3 เพื่อให้สารทำงานอยู่ในช่องว่างระหว่างวาล์วทั้งสาม จากนั้นค่อยๆเปิดวาล์ว 1 เพื่อเติมสารทำงาน ลงไปในท่อความร้อน 10 ml ปิดวาล์ว 1
11. ถอดท่อความร้อนออกจากข้อต่อสามทาง นำไปชั่งน้ำหนักอีกครั้งบันทึกผลเป็นน้ำหนักท่อความร้อนที่มีสารทำงานอยู่ภายใน นำค่าน้ำหนักที่อ่านได้ไปหักลบกับน้ำหนักท่อความร้อนแห้ง เพื่อตรวจสอบปริมาณน้ำที่เติมลงในท่อความร้อนว่าเท่ากับ 10 ml

3.3 การทดสอบประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน

การทดสอบประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนจะประกอบด้วยขั้นตอนหลัก 2 ขั้นตอน คือ

1. การเปรียบเทียบค่าการถ่ายเทความร้อนที่ท่อความร้อนทำได้จริงกับค่าจากการออกแบบ
2. การทดสอบประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนเมื่ออุณหภูมิ แนวนองศาการวาง และรูปแบบของท่อความร้อนเปลี่ยนแปลง

ชุดแลกเปลี่ยนความร้อนของท่อความร้อนประกอบไปด้วยท่ออะคริลิกใส 2 ชั้น ครอบด้วยท่อทองแดง ตรงกลางท่อใช้จุกยางกันเพื่อแยกส่วนระเหยและส่วนควบแน่นออกจากกัน แสดงดังรูปที่ 3-4



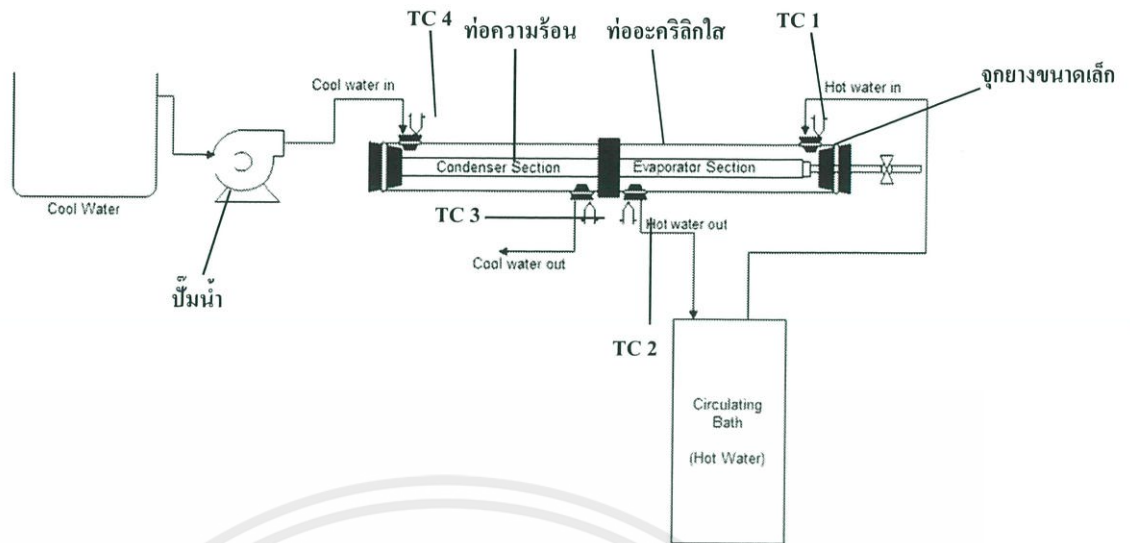
รูปที่ 3-4 ชุดแลกเปลี่ยนความร้อน

ในส่วนของชุดทดสอบประสิทธิภาพ จะใช้น้ำร้อนที่มีอุณหภูมิในช่วง 60 และ 80 °C ให้ความร้อนกับส่วนระเหย และใช้น้ำเย็นระบายความร้อนจากส่วนควบแน่น การคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนจากอุณหภูมิน้ำที่แลกเปลี่ยนความร้อนกับท่อความร้อน ซึ่งชุดทดสอบประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนแสดงดังรูป 3-5 และมีขั้นตอนการทดสอบประสิทธิภาพดังนี้



a

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



b

รูปที่ 3-5 ชุดทดสอบประสิทธิภาพของท่อความร้อน

3.3.1 การเปรียบเทียบค่าการถ่ายเทความร้อนที่ท่อความร้อนทำได้จริงกับค่าจากการ ออกแบบ

1. ประกอบชุดอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน โดยวางในแนวนอน 0 องศา รูปที่ 3-5
2. ต่อชุดวัดอุณหภูมิ เครื่อง Circulating Bath และปั๊มเข้ากับชุดทดสอบประสิทธิภาพ โดยให้ด้านที่มีท่อเติมสารเป็นส่วนระเหย และอีกด้านหนึ่งเป็นส่วนควบแน่น
3. เปิดปั๊ม และเครื่อง Circulating Bath เพื่อเดินระบบหมุนเวียนน้ำ ปรับระดับน้ำให้เต็มท่ออะคริลิก หุ้มฉนวน และวัดอัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำทั้งสองฝั่ง
4. อ่านอุณหภูมิเริ่มต้นทั้ง 4 ค่าจากเทอร์โมคัปเปิล และบันทึกผลเป็นอุณหภูมิเริ่มต้น
5. ปรับอุณหภูมิที่เครื่อง Circulating Bath เป็น 60°C เริ่มจับเวลาและบันทึกผลอุณหภูมิทุก 2 นาที จนกระทั่งท่อความร้อนเข้าสู่สภาวะคงตัว คือ อุณหภูมิไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ
6. ทำซ้ำข้อ 5 โดยปรับเพิ่มอุณหภูมิที่เครื่อง Circulating Bath เป็น 80°C บันทึกผลจนกระทั่งท่อความร้อนเข้าสู่สภาวะคงตัว

หมายเหตุ ในการทดลอง อุณหภูมิของน้ำร้อนจะต้องค่อยๆ เพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิต่ำ ไปยังอุณหภูมิที่ตั้งไว้ เพื่อป้องกันไม่ให้ความเร็วไอในท่อความร้อนสูงเกินไป จนไม่สามารถปฏิบัติงานได้

3.3.2. การทดสอบประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนเมื่ออุณหภูมิ แนวองศาการวางของท่อ ความร้อนและรูปแบบของท่อความร้อนเปลี่ยนแปลง

1. ทำการทดลองเช่นเดียวกันกับการทดลองหัวข้อ 3.3.1 ตั้งแต่ข้อที่ 1 – 5 แต่เปลี่ยนแนวองศาการวางท่อความร้อนเป็น 90° , 45° , 5° , -15° , -30° , -45° และ -90° โดยถ้าส่วนระเหยหรือส่วนที่ได้รับความร้อนอยู่ต่ำกว่าส่วนควบแน่น มุมองศาที่วัดได้จากแนวระดับจะบอกเป็นค่าลบ
2. ทำซ้ำข้อ 1 โดยเปลี่ยนอุณหภูมิค่าน้ำร้อนเป็น 80°C
3. ทำซ้ำตั้งแต่ข้อ 1-2 โดยเปลี่ยนให้ส่วนควบแน่นอยู่ทางด้านที่มีท่อเดิมสารเพื่อศึกษารูปแบบเทคนิคควบคุมแก๊สที่ไม่ควบแน่น



บทที่ 4

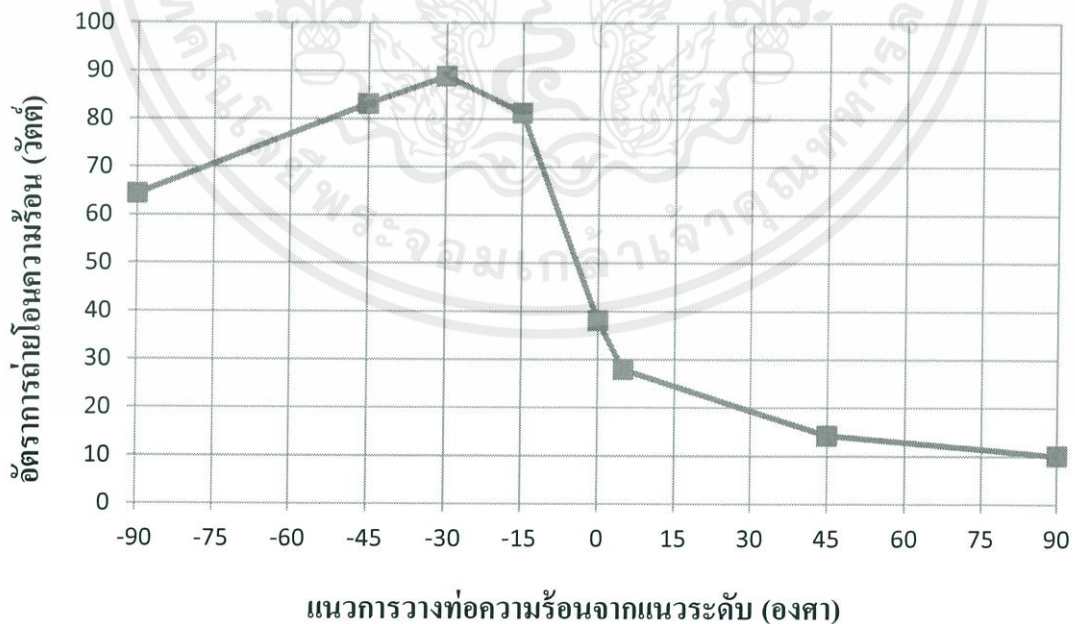
ผลการทดสอบประสิทธิภาพและวิเคราะห์ผล

ในการทดสอบประสิทธิภาพได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อน ซึ่งสามารถแบ่งเป็น 4 ตอนได้ดังนี้

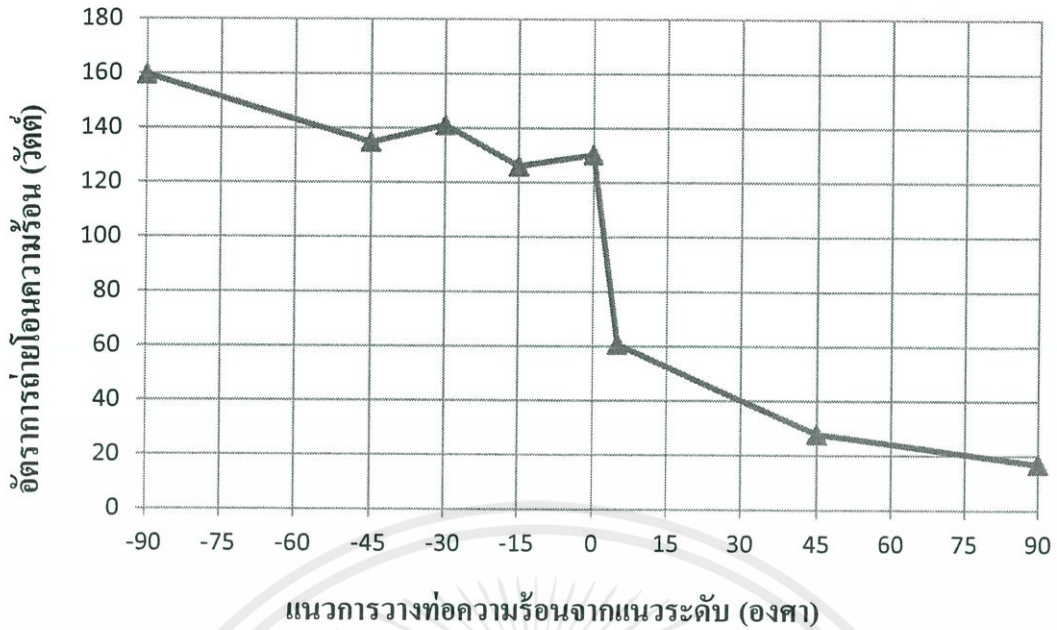
1. ผลขององศาการวางท่อความร้อนที่มีต่ออัตราการถ่ายโอนความร้อน
2. ผลจากการใช้งานท่อความร้อนที่อุณหภูมิ 60 °C และ 80 °C
3. ผลจากการใช้งานท่อความร้อนในรูปแบบ Gas-Loaded
4. ผลจากการออกแบบท่อความร้อน

4.1 ผลขององศาการวางท่อความร้อนที่มีต่ออัตราการถ่ายโอนความร้อน

ในการทดลองนี้ ศึกษาผลขององศาการวางท่อความร้อนที่ส่งผลต่ออัตราการถ่ายโอนความร้อน เมื่อใช้งานท่อความร้อนที่อุณหภูมิ 60 °C และ 80 °C ซึ่งองศาการวางท่อความร้อนที่ศึกษาได้แก่ -90°, -45°, -30°, -15°, 0°, 5°, 45° และ 90° จากแนวระดับ โดยองศาการวางที่มีค่าเป็นลบ หมายถึงส่วนระเหยที่ได้รับความร้อนอยู่ด้านล่าง ส่วนค่าบวก หมายถึงส่วนระเหยที่ได้รับความร้อนจะอยู่ด้านบน แสดงผลได้ดังรูปที่ 4-1 และ 4-2



รูปที่ 4-1 ค่าอัตราการถ่ายโอนความร้อนของท่อความร้อนที่แนวองศาการวางต่างๆ ที่อุณหภูมิ 60°C



รูปที่ 4-2 ค่าอัตราการถ่ายโอนความร้อนของท่อความร้อนที่แนวองศาการวางต่างๆ ที่อุณหภูมิ 80°C

จากรูปที่ 4-1 และ 4-2 จะสังเกตได้ว่าเมื่อมุมของท่อความร้อนเพิ่มมากขึ้นจาก 0 องศา จะทำให้อัตราการถ่ายโอนความร้อนลดลง ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีเรื่องขีดจำกัดเนื่องจากความดันแคปิลารี ดังสมการ 2-20

$$(QL_{c,max}) = \frac{\frac{2\sigma}{r_c} - \rho_l g d_v \cos \psi - \rho_l g L_s \sin \psi}{F_l + F_v} \quad (2-20)$$

เนื่องจากเมื่อมุมเพิ่มขึ้น ส่วนระเหยจะอยู่สูงขึ้นจากแนวเดิม ทำให้ต้องใช้แรงดันแคปิลารีในโครงสร้างวัสดุพูนมากขึ้น เพื่อหมุนเวียนของเหลวจากส่วนควบแน่นซึ่งอยู่ต่ำกว่าเคลื่อนที่เอาชนะแรงโน้มถ่วงของโลก กลับไปยังส่วนระเหย ดังนั้นการที่มุมเพิ่มมากขึ้นนี้จึงทำให้โครงสร้างวัสดุพูนของท่อความร้อน มีความดันแคปิลารีไม่เพียงพอที่จะดึงของเหลวสวนทางกับแรงโน้มถ่วงของโลกกลับขึ้นไปยังส่วนระเหย เป็นสาเหตุให้บริเวณส่วนระเหยมีของเหลวไม่เพียงพอต่อการดูดซับความร้อนจากแหล่งความร้อน จึงทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนมีค่าลดลง

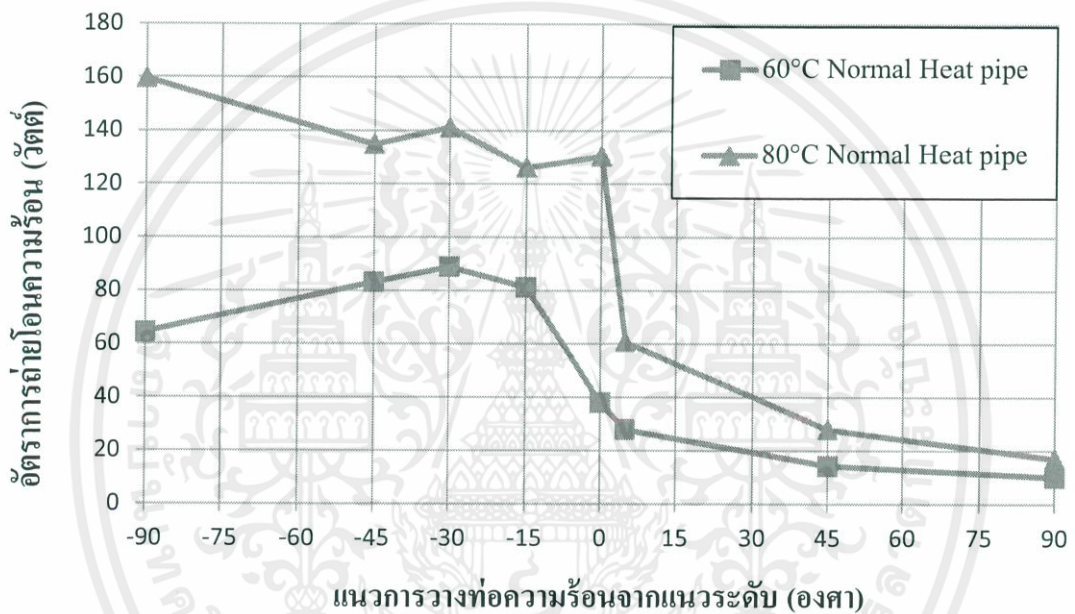
และเมื่อมุมของท่อความร้อนลดลงจาก 0 องศาจะทำให้อัตราการถ่ายโอนความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากส่วนระเหยอยู่ต่ำกว่าส่วนควบแน่น จึงทำให้ของเหลวสามารถหมุนเวียนกลับจากส่วนควบแน่นมายังส่วนระเหยได้ดีขึ้นเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีเรื่องขีดจำกัดเนื่องจากความดันแคปิลารีดังสมการที่ 2-20

แต่จากผลการทดลองกลับพบว่าที่มุมบางมุม เช่น -45, -90 องศา มีค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนต่ำกว่าที่ควรจะเป็นตามแนวโน้มทางทฤษฎีที่กล่าวไปข้างต้นซึ่งเกิดจากของเหลวที่ควบแน่นจะเคลื่อนที่ไปยังส่วนระเหยเร็วขึ้นด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก จึงทำให้มีแรงเฉือนที่

ผิวสัมผัสทั้ง 2 เฟสมากขึ้นจนทำให้ของเหลวบางส่วนหลุดลอยไปตามไอ และมีการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างกัน ทำให้ปริมาณความร้อนที่ควรจะไปยังส่วนควบแน่นมีน้อยลง และสาเหตุสำคัญอีกประการหนึ่งที่ทำให้ค่าการถ่ายเทความร้อนลดลง คือ แก๊สที่ไม่ควบแน่น ซึ่งจะอธิบายต่อในหัวข้อ 4.3

4.2 ผลจากการใช้งานท่อความร้อนที่อุณหภูมิ 60 °C และ 80 °C

ในการทดลองนี้ศึกษาผลของอุณหภูมิของแหล่งความร้อนที่มีต่อค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนที่อุณหภูมิ 60°C และ 80 °C ซึ่งแสดงไว้ดังรูป 4-3



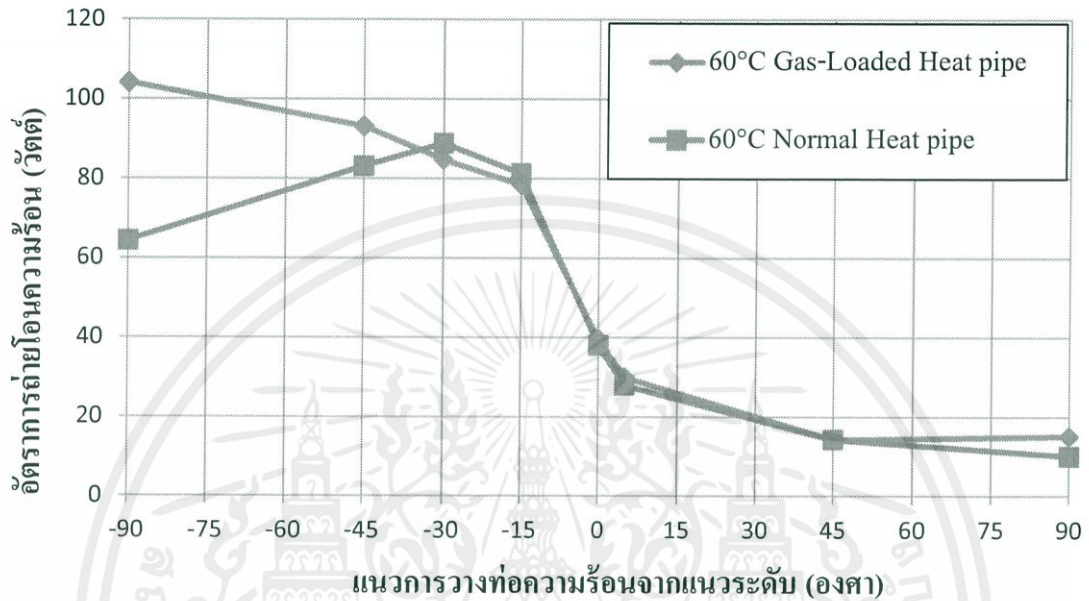
รูปที่ 4-3 การเปรียบเทียบการทำงานของท่อความร้อนแบบปกติ ที่อุณหภูมิ 60 °C และ 80 °C

จากรูปที่ 4-3 พบว่าเมื่อแหล่งความร้อนที่ให้แก่ท่อความร้อนสูงขึ้นจากอุณหภูมิ 60 °C เป็น 80 °C จะทำให้อัตราการถ่ายโอนความร้อนสูงขึ้น ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎี เนื่องจากที่อุณหภูมิสูง จะทำให้ อัตราการระเหยของของไหลทำงานมีสูงขึ้น ความดันไอของของไหลทำงานมีมากขึ้น จึงขยายตัวไปดันแก๊สที่ไม่ควบแน่นที่สะสมอยู่ที่ด้านท้ายของส่วนควบแน่นได้มากกว่า ดังนั้นที่ส่วนควบแน่นจึงมีพื้นที่การถ่ายเทความร้อนมากขึ้น

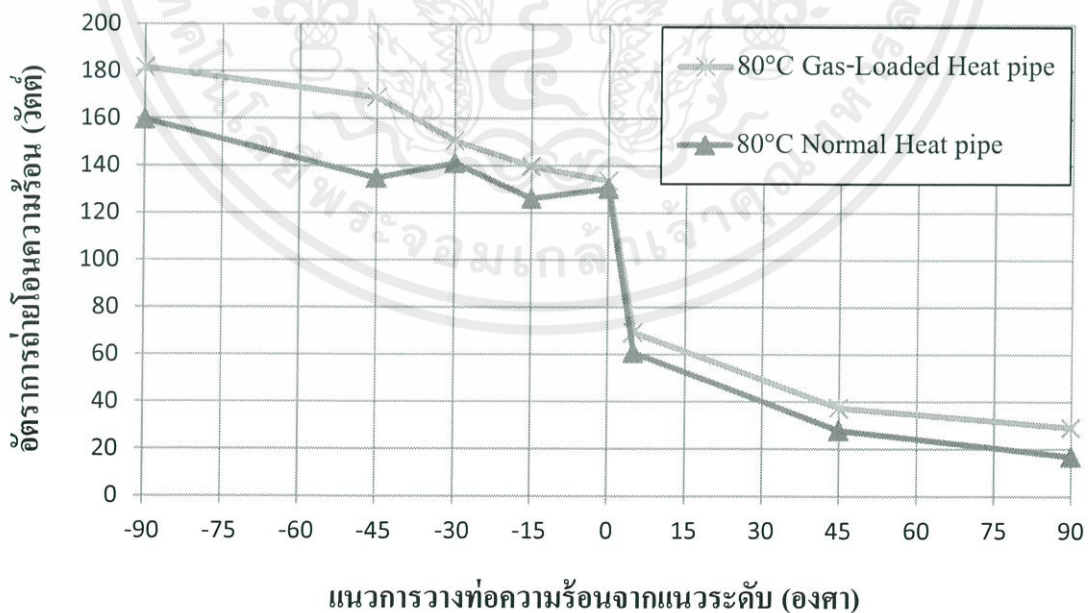
ส่วนสาเหตุที่มุมมองจากการวาง -45 และ -90 องศาจากแนวระดับ มีค่าอัตราการถ่ายโอนความร้อนที่อุณหภูมิ 60°C ต่ำกว่าแนวโน้มที่ควรจะเป็น เนื่องจากไอดีของไหลเคลื่อนที่สวนทางกับแรงโน้มถ่วงโลก และแรงดันไออาจมีไม่เพียงพอที่จะขยายตัวอัดแก๊สที่ไม่ควบแน่น ทำให้พื้นที่การถ่ายเทความร้อนน้อยลง

4.3 ผลจากการใช้งานท่อความร้อนในรูปแบบ Gas-Loaded

จากการศึกษารูปแบบการใช้งานท่อความร้อนแบบ Gas-Loaded ได้เปรียบเทียบกับอัตราการถ่ายเทความร้อนท่อความร้อนแบบปกติและแบบ Gas-Loaded ที่อุณหภูมิ 60°C และ 80 °C ดังรูป 4-4 และ 4-5 ดังนี้



รูปที่ 4-4 การเปรียบเทียบการทำงานของท่อความร้อนแบบปกติ กับแบบ Gas-Loaded ที่อุณหภูมิ 60°C



รูปที่ 4-5 การเปรียบเทียบการทำงานของท่อความร้อนแบบปกติ กับแบบ Gas-Loaded ที่อุณหภูมิ 80°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4-4 และ 4-5 การเปรียบเทียบอัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อน แบบปกติ และแบบ Gas-Loaded พบว่าที่อุณหภูมิ และแนวการวางท่อเดียวกัน ท่อความร้อนแบบ Gas-Loaded ให้อัตราการถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่า เนื่องจากท่อความร้อนแบบ Gas-Loaded จะมีส่วนกักเก็บแก๊สที่ไม่ควบแน่นอยู่ด้านปลายของส่วนควบแน่น ส่วนท่อความร้อนแบบปกติจะไม่มีส่วนกักเก็บแก๊สจึงทำให้แก๊สที่ไม่ควบแน่นนี้อัดตัวกันอยู่ที่ด้านท้ายของส่วนควบแน่น ทำให้พื้นที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อนกับสิ่งแวดล้อมมีน้อยลง อัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบปกติ จึงมีค่าน้อยกว่าของท่อความร้อนแบบ Gas-Loaded

4.4 ผลจากการออกแบบท่อความร้อน

จากการออกแบบท่อความร้อนที่ได้แสดงในตารางที่ 3-1 เมื่อนำไปใช้ทดสอบประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนจะมีอัตราการถ่ายเทความร้อนแสดงดังตารางที่ 4-1 โดยรายงานเป็นเปอร์เซ็นต์ของค่าการถ่ายโอนที่ท่อความร้อนสามารถทำได้จริงเทียบกับขีดจำกัดการถ่ายเทความร้อนสูงสุดเนื่องจากความดันแคปปีลารี (% eff)

ตารางที่ 4-1 ขีดจำกัดการถ่ายเทความร้อนสูงสุดเนื่องจากความดันแคปปีลารีเปรียบเทียบกับค่าจากการทดลองที่อุณหภูมิ 80°C

อัตราการถ่ายเทความร้อน (วัตต์)		% eff
การทดลอง	ขีดจำกัดเนื่องจากความดันแคปปีลารี	
130.34	456.69	28.54

จากตารางที่ 4-1 พบว่าเมื่อนำท่อความร้อนที่ออกแบบไว้มาทำการทดสอบประสิทธิภาพพบว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนมีค่าความคลาดเคลื่อนจากค่าที่ออกแบบไว้ เนื่องจากอัตราการถ่ายโอนความร้อนที่ออกแบบนั้นคำนวณจากอุณหภูมิต่อความร้อนที่ 80°C แต่ในการทดลองอุณหภูมิของน้ำที่ใช้ให้ความร้อนแก่ส่วนระเหยของท่อเป็น 80°C ดังนั้นจึงทำให้อุณหภูมิต่อความร้อนอาจจะไม่สูงถึง 80°C เนื่องจากมีอุณหภูมิตกคร่อมระหว่างทางที่มีการนำความร้อนจากแหล่งความร้อนเข้าไปยังด้านในของท่อ และโครงสร้างวัสดุพูนที่ใช้คือสแตนเลส ซึ่งมีค่าการนำความร้อนต่ำมาก จึงทำให้อุณหภูมิต่อความร้อนต่ำกว่า 80°C มีผลทำให้ขีดจำกัดการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากความดันแคปปีลารีควรมีค่าน้อยกว่า 456.69 วัตต์ ดังนั้นเปอร์เซ็นต์ของค่าการถ่ายโอนที่ท่อความร้อนสามารถทำได้จริงเทียบกับขีดจำกัดการถ่ายเทความร้อนสูงสุดเนื่องจากความดันแคปปีลารี (% eff) มีค่าสูงขึ้นมากกว่า 28.54%

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

1. เมื่อนำค่าจากออกแบบท่อความร้อนไปสร้างท่อความร้อน พบว่าท่อความร้อนปฏิบัติงานได้จริง โดยท่อความร้อนจะสามารถถ่ายเทความร้อนได้ 28.54% เทียบกับขีดจำกัดการถ่ายเทความร้อนสูงสุด
2. ผลจากการศึกษาของสสารวางท่อความร้อนพบว่าสสารวางที่มากขึ้นจากแนวระดับ มีผลทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนน้อยลง
3. อุณหภูมิของแหล่งความร้อนที่นำท่อความร้อนไปใช้งานที่สูงขึ้นจะทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงขึ้น
4. แก๊สที่ไม่ควมแน่นมีผลทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนลดลง เนื่องจากจะไปรวมตัวกันที่ปลายของส่วนควมแน่นและลดพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งสามารถแก้ปัญหาได้ด้วยการใช้ท่อความร้อนรูปแบบ Gas-Loaded ในการแก้ปัญหา

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ปรับปรุงอุปกรณ์ชุดเดิมสารทำงาน โดยใช้วิธีการเดิมด้วยการให้ความร้อนแก่สารทำงาน ให้เปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นไอ และเคลื่อนที่ไปยังท่อความร้อนที่มีการหล่อเย็นเอาไว้เพื่อให้สารทำงานควมแน่นเข้าไปยังท่อความร้อน ซึ่งจะทำได้สารทำงานที่บริสุทธิ์ขึ้น และจะทำให้ช่วยลดปริมาณแก๊สที่ไม่ควมแน่นลงไปได้
2. ทำการศึกษาปรับปรุงชุดอุปกรณ์เดิมสารทำงาน และควบคุมควมดันภายในระบบ ของท่อความร้อน เพื่อให้สามารถนำท่อความร้อนที่ออกแบบไปใช้งานกับสภาพแวดล้อมที่มีช่วงอุณหภูมิที่สูงหรือต่ำกว่าการทดลองนี้ได้ เนื่องจากการใช้งานจริงนั้น อาจต้องใช้งานท่อความร้อนที่อุณหภูมิห้องหรือสูงกว่าเล็กน้อย เช่น อุปกรณ์ วงจรอิเล็กทรอนิกส์ ดังนั้นควมดันของท่อความร้อนจึงควรเข้าใกล้ควมดันสุญญากาศมากขึ้น เพื่อให้สามารถระบายได้ดีขึ้นในช่วงอุณหภูมิต่ำๆ

3. เราสามารถนำท่อความร้อนรูปแบบ Gas-Loaded มาใช้ในการแก้ปัญหา แก๊สที่ไม่ควบแน่นที่มีในท่อความร้อนได้ ซึ่งเป็นการเพิ่มพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนของท่อความร้อนให้มีมากขึ้น และทำให้ประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนมีมากขึ้นอีกด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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**. 3rd ed, Pergamon Press, Oxford, 1982
- [4] Bahman Zohuri, **Heat pipe Design and Technology**, CRC press, Oxford, 2011.
- [5] The Engineering Toolbox, **Pressure and Boiling Point of Water**. [Online].
Available: http://www.engineeringtoolbox.com/boiling-point-water-d_926.html.
- [6] 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.
- [7] S. C. Wong, **Visualization and performance measurement of operating mesh-wicked heat pipes**, International Journal of Heat and Mass Transfer 51 (2008) 4249-4259.
- [8] Jianlin Yu, Hua Chen, **An experimental investigation on capillary pumped loop with the meshes wick**, International Journal of Heat and Mass Transfer 50 (2007) 4503-4507.
- [9] M.G. Mousa, **Effect of nanofluid concentration on the performance of circular heat pipe**, Ain Shams Engineering Journal 2 (2011) 63-69.
- [10] Kang S.W., Wei W.C., Tsai S.H., **Experimental investigation of silver nanofluid on heat pipe thermal performance**, Applied Thermal Engineering 26 (2006) 2377-2382.
- [11] Doors4ever, **DDR2 or DDR3: MSI P35 Platinum Combo Mainboard Review**. [Online].
Available: http://www.xbitlabs.com/articles/mainboards/display/msi-p35-platinum-combo_3.html.
- [12] **Manor Enterprises**. [Online].
Available: http://www.manorenterprises.com/product_heat_pipe.html.
- [13] C. Welch, **Trans-Alaska Pipeline**. [Online]. Available:
<http://www.earthlyissues.com/transalaska.htm>.

- [14] Per Wallin, **Heat Pipe-Selection of Working Fluid**, Bachelor's Thesis, Department of Energy Sciences, Faculty of Engineering, Lund University, Box 118, 22100 Lund, 2012.
- [15] กฤษณ์ ตีรทรงเกียรติ และคณะ, **เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบฮีทไปป์**, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2534.
- [16] ณภัทร์ วรราชต์กุล และคณะ, **การออกแบบเทอร์โมไซฟอนเพื่อใช้ในอาคารปิดขนาดเล็ก**, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2553.





ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 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 โดยฝาหนึ่งจะทำเกลียวทั้งสองฝั่ง เพื่อใส่ข้อต่อตัวผู้ หรือ Male Connector ขนาด 1/4 นิ้ว</p>
	<p>ตะแกรงลวดละเอียด ทำจากสแตนเลส มีขนาดรูพรุนต่อหน่วยความยาวเป็น 70 mesh ใช้เป็น โครงสร้างวัสดุพรุนภายในท่อความร้อน 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>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-1 ลักษณะ รูปร่าง และรายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง(ต่อ)

รูปภาพ	รายละเอียดอุปกรณ์
	<p>ท่อสแตนเลส ขนาด 1/4 นิ้ว ใช้เป็นท่อเดิมสารคั่นระหว่างท่อความร้อน และบอกลาว์ และยังใช้ต่อเชื่อมระหว่างอุปกรณ์อื่นๆ ในการตั้งอากาศออกและเดิมสาร</p>
	<p>นัตและตาไก่ (Nut and Ferrule) เป็นตัวยึดต่อกับข้อต่อต่างๆ ตาไก่ช่วยป้องกันการรั่วซึมของสารในช่วงข้อต่อ ซึ่งในการทดลองนี้จะใช้นัตและตาไก่ที่ปลายท่อสแตนเลสทุกจุด</p>
	<p>ข้อต่อสามทาง ในการทดลองนี้จะใช้ข้อต่อสามทาง โดยทางด้านขวามือของรูปจะต่อไปยังอุปกรณ์เดิมสาร ด้านล่างจะต่อไปยังปั๊มสุญญากาศ และด้านซ้ายมือจะต่อไปยังท่อเดิมสารของท่อความร้อน โดยข้อต่อนี้มีขนาด 1/4 นิ้ว</p>
	<p>ข้อต่อตัวเมีย หรือ Female Connector ขนาด 1/4 นิ้ว ใช้เชื่อมต่อระหว่างท่อสแตนเลสและข้อต่อสายยาง</p>
	<p>ข้อต่อสายยาง หรือ Hose Connector ขนาด 1/4 นิ้ว เป็นข้อต่อที่เชื่อมต่อระหว่างข้อต่อตัวเมียและสายยาง โดยในภาพนี้ ข้อต่อสายยางตัวบนเป็นตัวที่ต่อกับข้อต่อตัวเมียและเชื่อมสายยางไปยังภาชนะรองรับน้ำ ส่วนข้อต่อสายยางตัวล่างเป็นตัวที่ต่อจากข้อต่อสามทางไปยังอุปกรณ์เดิมสาร</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 ส่วนเกจทางขวามือเป็นเกจที่ใช้ในตอนตรวจสอบความดันของท่อความร้อน</p>
	<p>ขวดลดความดัน หรือ Suction Flask ในที่นี้ใช้ขนาด 1 ลิตร เป็นอุปกรณ์ที่นำมาประยุกต์ใช้เป็นภาชนะรองรับน้ำ ในกรณีที่ท่อความร้อนมีน้ำอยู่และเพื่อป้องกันของเหลวเข้าไปในปั๊มสุญญากาศ</p>
	<p>ปั๊มสุญญากาศ หรือ Vacuum Pump เป็นปั๊มที่ใช้ดึงอากาศออกจากระบบเพื่อทำให้ระบบเป็นสุญญากาศ เนื่องจากในท่อความร้อนอาจจะมีแก๊สที่ไม่ควมแน่นอยู่ในระบบ ซึ่งแก๊สนี้จะทำให้การถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนลดลง จึงต้องกำจัดออกก่อนที่จะเริ่มการทำงาน</p>
	<p>อุปกรณ์เดิมสารทำงาน อุปกรณ์นี้ประกอบด้วยท่ออะคริลิก สายยาง จุกยาง วาล์วเปิด/ปิด ดังรูป โดยปลายสายยางจะไปเชื่อมต่อกับข้อต่อสายยางที่ข้อต่อสามทาง</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-1 ลักษณะ รูปร่าง และรายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง(ต่อ)

รูปภาพ	รายละเอียดอุปกรณ์
	<p>สายยาง ในการทดลองนี้ใช้สายยางขนาดเล็ก และใหญ่ โดยใช้ในอุปกรณ์ดึงอากาศออกและเติมสารทำงาน และอุปกรณ์ทดสอบประสิทธิภาพความร้อนด้วย</p>
	<p>เข็มขัดรัดสายยาง เนื่องจากในการดึงอากาศออกจาก ระบบมีการใช้สายยางเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์ จึง จำเป็นต้องใช้เข็มขัดรัดสายยางเพื่อป้องกันการรั่วซึม ของอากาศภายนอกเข้ามาในระบบ</p>
	<p>อ่างหมุนเวียนน้ำแบบควบคุมอุณหภูมิได้ หรือ Circulating Bath ใช้ในตอนการดึงสารทำงาน ให้ความร้อนกับท่อความร้อนเพื่อช่วยให้อากาศขยายตัว และ ความชื้นระเหยเป็น ไอ ง่ายต่อการทำให้เป็นสูญญากาศ มากขึ้น และยังเป็นเครื่องที่ใช้ควบคุมอุณหภูมิของน้ำที่ เข้ามาแลกเปลี่ยนในส่วนระเหยในการทดสอบ ประสิทธิภาพด้วย</p>
	<p>ถังน้ำ ในการทดลองนี้ใช้ถังน้ำขนาดใหญ่ในการ ตรวจสอบรอยรั่วของท่อความร้อน และใช้ถังน้ำขนาด เล็กบรรจุน้ำที่จะนำไปแลกเปลี่ยนกับส่วนควบแน่นใน การทดสอบประสิทธิภาพ</p>
	<p>เครื่องอัดอากาศ ในการทดลองนี้ใช้เครื่องอัดอากาศเพื่อ ทดสอบรอยรั่วของท่อความร้อน โดยนำท่อความร้อน จุ่มลงในถังที่บรรจุน้ำ และอัดอากาศเข้าไป สังเกต ฟองอากาศที่ลอยขึ้นมา ซึ่งจะเป็นตัวบ่งชี้ว่าจุดใดของ ท่อความร้อนมีรอยรั่ว</p>
	<p>ท่ออะคริลิก ในการทดลองนี้ใช้ท่ออะคริลิกใส เพื่อสวม เป็นท่อสองชั้นใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพของท่อ ความร้อน เจาะรูเพื่อให้สวมจุกยางขนาดเล็กได้</p>

ตารางที่ ก-1 ลักษณะ รูปร่าง และรายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง(ต่อ)

รูปภาพ	รายละเอียดอุปกรณ์
	<p>จุกยาง ในการทดลองนี้ใช้จุกยาง 2 ขนาด โดยขนาดใหญ่ใช้เพื่อปิดท่ออะคริลิก ใช้เป็นจุกยางที่คั่นระหว่างส่วนระเหยและส่วนควบแน่น และขนาดเล็กใช้เป็นข้อต่อสายยางและเทอร์โมคัปเปิล สวมเข้ากับท่ออะคริลิก ในชุดทดสอบประสิทธิภาพ</p>
	<p>ฉนวนกันความร้อน ใช้หุ้มชุดทดสอบประสิทธิภาพ เพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนสู่สิ่งแวดล้อมภายนอก</p>
	<p>ปั้มน้ำ ใช้ในการป้อนน้ำเย็นเข้าสู่ชุดอุปกรณ์ทดสอบประสิทธิภาพของท่อความร้อน</p>
	<p>เทอร์โมคัปเปิล ในการทดสอบประสิทธิภาพนี้ใช้เทอร์โมคัปเปิล ประเภท K ทั้งหมด 4 ตัว เพื่อวัดอุณหภูมิของน้ำขาเข้า และขาออก ของทั้งส่วนระเหยและควบแน่น</p>
	<p>เครื่องอ่านอุณหภูมิจากเทอร์โมคัปเปิล ใช้อ่านอุณหภูมิจากเทอร์โมคัปเปิล</p>



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทดลองนี้จะทำการวัดอัตราการไหลของน้ำซึ่งได้แสดงไว้ดังตารางที่ ข-1 เพื่อนำไปคำนวณค่าอัตราการถ่ายโอนความร้อนต่อไป

กำหนดให้ N-60 °C คือ ท่อความร้อนแบบปกติ ที่อุณหภูมิ 60 °C
 G-60 °C คือ ท่อความร้อนแบบ Gas-Loaded ที่อุณหภูมิ 60 °C
 N-80 °C คือ ท่อความร้อนแบบปกติ ที่อุณหภูมิ 80 °C
 G-80 °C คือ ท่อความร้อนแบบ Gas-Loaded ที่อุณหภูมิ 80 °C

ตารางที่ ข-1 อัตราการไหลของน้ำที่วัดได้จากแนวองศาการวางต่างๆ

การวางท่อความร้อนจากแนวระดับ (องศา)	อัตราการไหลของน้ำเย็น (L/h)			
	N-60 °C	G-60 °C	N-80 °C	G-80 °C
90	8.64	6.48	7.26	6.24
45	6.12	6.12	7.98	6.42
5	7.98	6.42	7.44	6.60
0	8.16	6.78	7.98	6.36
-15	7.68	6.72	6.36	6.30
-30	7.62	6.60	7.56	6.45
-45	7.92	7.26	6.42	6.90
-90	6.90	7.44	7.20	7.08

โดยถ้าส่วนระเหยหรือส่วนที่ได้รับความร้อนอยู่ต่ำกว่าส่วนควบแน่น มุมองศาที่วัดได้จากแนวระดับจะบอกเป็นค่าลบ

ซึ่งในการทดลองนี้จะทำการวัดอุณหภูมิของน้ำ ณ แนวการวางที่องศาต่างๆอย่างต่อเนื่อง โดยใช้ท่อความร้อนแบบปกติ และท่อความร้อนแบบ Gas-Loaded ที่อุณหภูมิ 60 °C และ 80 °C เพื่อนำไปคำนวณค่าอัตราการถ่ายโอนความร้อนต่อไป

กำหนดให้ H in คือ น้ำร้อนขาเข้า
 H out คือ น้ำร้อนขาออก
 C out คือ น้ำเย็นขาออก
 C in คือ น้ำเย็นขาเข้า

ตารางที่ ข-2 ข้อมูลที่บันทึกได้ของท่อความร้อนแบบปกติ ที่อุณหภูมิ 60 °C

องศา	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)			
		H in	H out	C out	C in
90	0	31	31	28	28
90	2	37	36	28	28
90	4	43	42	28	28
90	6	51	50	29	28
90	8	57	55	29	28
90	10	58	56	29	28
90	12	58	57	29	28
90	14	58	57	29	28
90	16	59	57	29	28
90	18	59	57	29	28
90	20	60	58	29	28
90	22	60	58	29	28
90	24	60	58	29	28
90	26	60	58	29	28
90	28	60	59	29	28
90	30	60	59	29	28
90	32	60	59	29	28
90	34	60	59	29	28
90	36	60	59	29	28
90	38	60	59	29	28
45	40	60	59	29	28
45	42	60	59	30	28
45	44	60	59	30	28

องศา	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)			
		H in	H out	C out	C in
45	46	60	59	30	28
45	48	60	59	30	28
45	50	60	59	30	28
45	52	60	59	30	28
45	54	60	59	30	28
45	56	60	59	30	28
5	58	60	59	31	28
5	60	60	59	31	28
5	62	60	59	31	28
5	64	60	59	31	28
5	66	60	59	31	28
5	68	60	59	31	28
5	70	60	59	31	28
5	72	60	59	31	28
0	74	60	59	31	28
0	76	60	59	31	28
0	78	60	59	31	28
0	80	60	59	32	28
0	82	60	59	32	28
0	84	60	59	32	28
0	86	60	59	32	28
0	88	60	59	32	28
0	90	60	59	32	28

ตารางที่ ข-2 ข้อมูลที่บันทึกได้ของท่อความร้อนแบบปกติ ที่อุณหภูมิ 60 °C (ต่อ)

องศา	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)			
		H in	H out	C out	C in
0	92	60	59	32	28
0	94	60	59	32	28
0	96	60	59	32	28
-15	98	60	59	33	28
-15	100	60	59	34	28
-15	102	60	59	36	28
-15	104	60	59	37	28
-15	106	60	59	37	28
-15	108	60	59	37	28
-15	110	60	59	37	28
-15	112	60	59	37	28
-15	114	60	59	37	28
-30	116	60	59	36	28
-30	118	60	59	36	28
-30	120	60	59	36	28
-30	122	60	59	37	28
-30	124	60	59	37	28
-30	126	60	59	38	28
-30	128	60	59	38	28
-30	130	60	59	38	28
-30	132	60	59	38	28
-30	134	60	59	38	28
-30	136	60	59	38	28

องศา	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)			
		H in	H out	C out	C in
-30	138	60	59	38	28
-30	140	60	59	38	28
-45	142	60	59	35	28
-45	144	60	59	35	28
-45	146	60	59	35	28
-45	148	60	59	35	28
-45	150	60	59	36	28
-45	152	60	59	36	28
-45	154	60	59	36	28
-45	156	60	59	37	28
-45	158	60	59	37	28
-45	160	60	59	37	28
-45	162	60	59	37	28
-45	164	60	59	37	28
-45	166	60	59	37	28
-45	168	60	59	37	28
-90	170	60	59	34	28
-90	172	60	59	35	28
-90	174	60	59	36	28
-90	176	60	59	35	28
-90	178	60	59	36	28
-90	180	60	59	36	28
-90	182	60	59	36	28

ตารางที่ ข-3 ข้อมูลที่บันทึกได้ของท่อความร้อนแบบ Gas-Loaded ที่อุณหภูมิ 60 °C

องศา	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)			
		H in	H out	C out	C in
90	0	22	22	25	25
90	2	32	31	25	25
90	4	37	36	25	25
90	6	46	45	26	25
90	8	53	52	26	25
90	10	58	57	26	25
90	12	60	58	27	25
90	14	60	59	27	25
90	16	60	59	27	25
90	18	60	59	27	25
90	20	60	59	27	25
45	22	60	59	27	25
45	24	60	59	27	25
45	26	60	59	27	25
45	28	60	59	27	25
45	30	60	59	27	25
5	32	60	59	28	25
5	34	60	59	28	25
5	36	60	59	29	25
5	38	60	59	29	25
5	40	60	59	29	25
5	42	60	59	29	25
5	44	60	59	29	25
5	46	60	59	29	25
5	48	60	59	29	25
0	50	60	59	30	25
0	52	60	59	30	25
0	54	60	59	30	25

องศา	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)			
		H in	H out	C out	C in
0	56	60	59	30	25
0	58	60	59	30	25
-15	60	60	59	33	25
-15	62	60	59	35	25
-15	64	60	59	35	25
-15	66	60	59	35	25
-15	68	60	59	35	25
-30	70	60	59	33	25
-30	72	60	59	35	25
-30	74	60	59	36	25
-30	76	60	59	36	25
-30	78	60	59	36	25
-30	80	60	59	36	25
-45	82	60	59	35	25
-45	84	60	59	35	25
-45	86	60	59	35	25
-45	88	60	59	36	25
-45	90	60	59	36	25
-45	92	60	59	36	25
-90	94	60	59	36	25
-90	96	60	59	36	25
-90	98	60	59	36	25
-90	100	60	59	36	25
-90	102	60	59	37	25
-90	104	60	59	37	25
-90	106	60	59	37	25
-90	108	60	59	37	25
-90	110	60	59	37	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-4 ข้อมูลที่บันทึกได้ของท่อความร้อนแบบปกติ ที่อุณหภูมิ 80 °C

องศา	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)			
		H in	H out	C out	C in
90	0	60	60	29	29
90	2	75	69	31	29
90	4	78	73	31	29
90	6	79	78	31	29
90	8	80	78	31	29
90	10	80	79	31	29
90	12	80	79	31	29
90	14	80	79	31	29
90	16	80	79	31	29
90	18	80	79	31	29
45	20	80	79	31	29
45	22	80	79	32	29
45	24	80	79	32	29
45	26	80	79	32	29
45	28	80	79	32	29
45	30	80	79	32	29
45	32	80	79	32	29
45	34	80	79	32	29
5	36	80	79	35	29
5	38	80	79	36	29
5	40	80	79	36	29
5	42	80	79	36	29
5	44	80	79	36	29
5	46	80	79	36	29
5	48	80	79	36	29
0	50	80	79	41	29
0	52	80	79	41	29
0	54	80	79	43	29
0	56	80	79	43	29
0	58	80	79	43	29
0	60	80	79	43	29
0	62	80	79	43	29
-15	64	80	79	44	29
-15	66	80	79	45	29
-15	68	80	79	45	29
-15	70	80	79	45	29
-15	72	80	79	45	29
-15	74	80	79	46	29
-15	76	80	79	46	29
-15	78	80	79	46	29
-15	80	80	79	46	29
-15	82	80	79	46	29
-15	84	80	79	46	29
-15	86	80	79	46	29
-30	88	80	79	44	29
-30	90	80	79	44	29
-30	92	80	79	45	29
-30	94	80	79	45	29
-30	96	80	79	45	29
-30	98	80	79	45	29
-30	100	80	79	45	29
-30	102	80	79	45	29
-45	104	80	79	42	29
-45	106	80	79	43	29
-45	108	80	79	44	29
-45	110	80	79	46	29
-45	112	80	79	46	29
-45	114	80	79	47	29
-45	116	80	79	47	29
-45	118	80	79	47	29
-45	120	80	79	47	29
-45	122	80	79	47	29
-90	124	80	79	47	29
-90	126	80	79	47	29
-90	128	80	79	48	29
-90	130	80	79	48	29
-90	132	80	79	48	29
-90	134	80	79	48	29
-90	136	80	79	48	29
-90	138	80	79	48	29
-90	140	80	79	48	29
-90	142	80	79	48	29
-90	144	80	79	48	29
-90	146	80	79	48	29
-90	148	80	79	48	29
-90	150	80	79	48	29

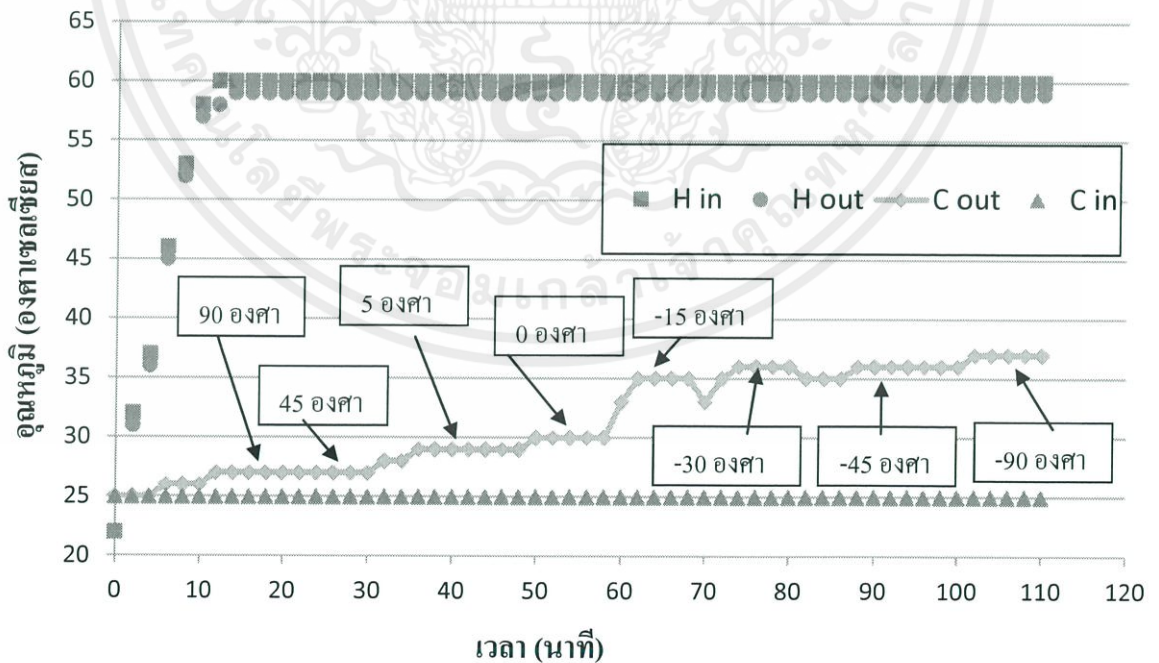
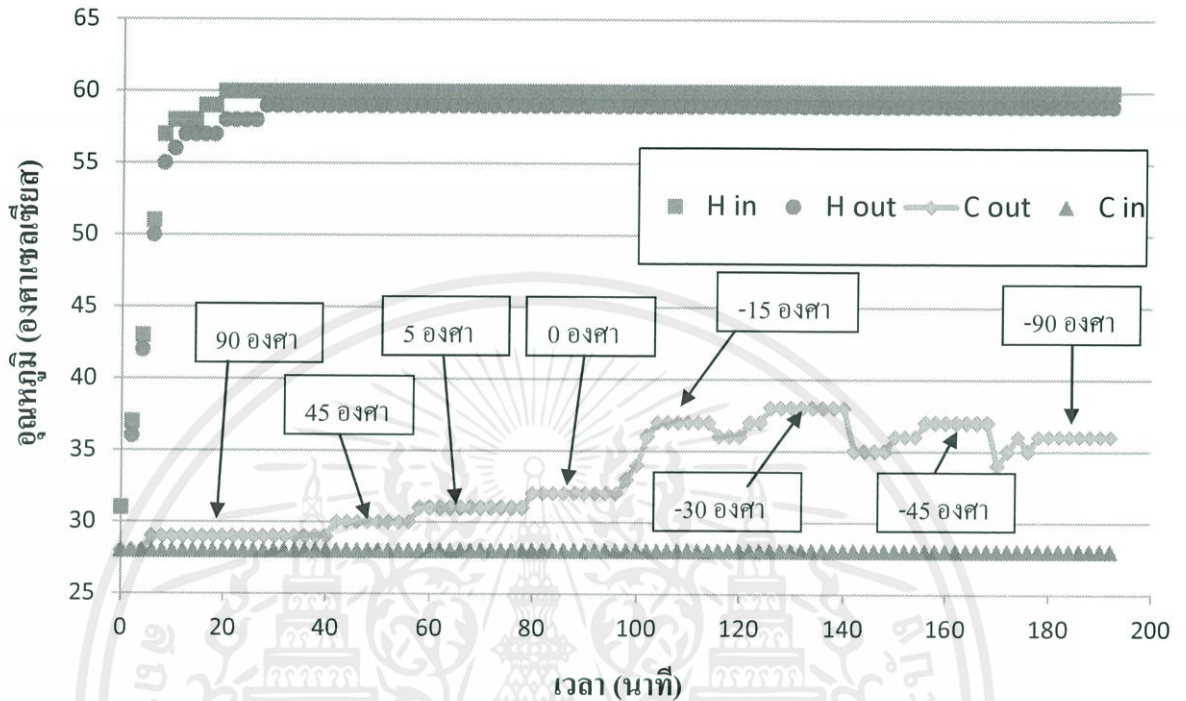
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-5 ข้อมูลที่บันทึกได้ของท่อความร้อนแบบ Gas-Loaded ที่อุณหภูมิ 80 °C

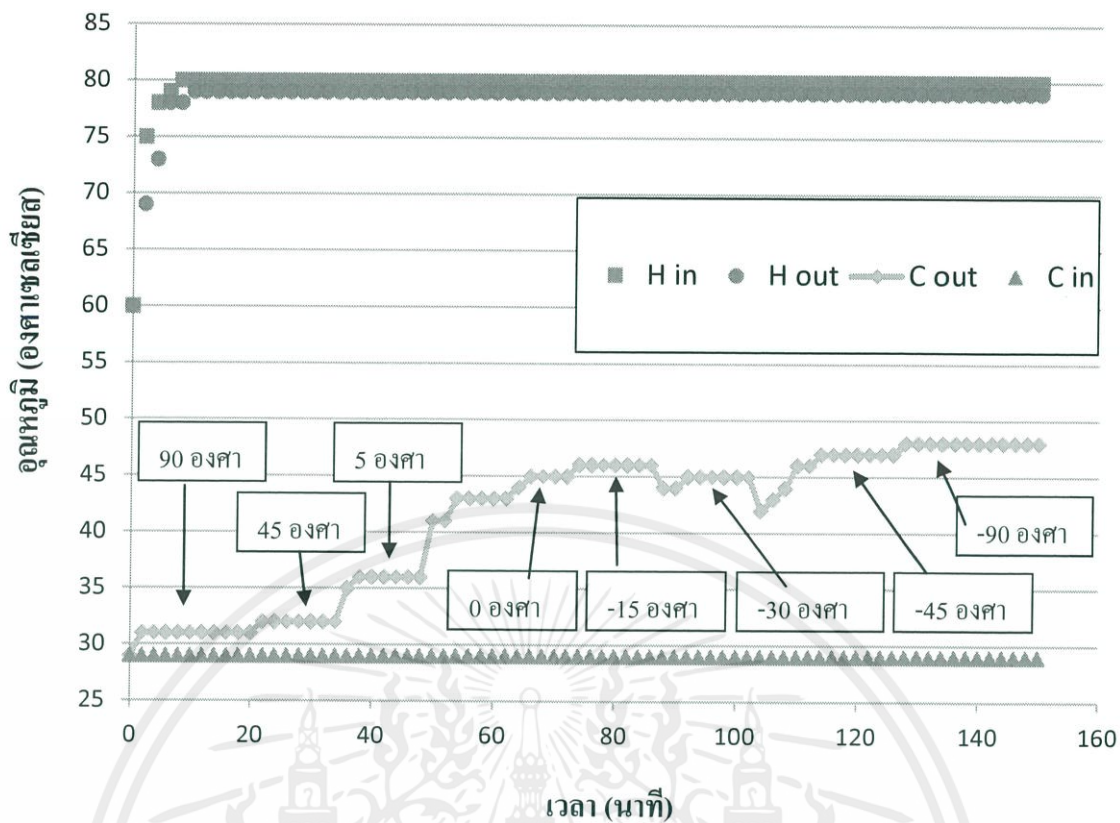
องศา	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)			
		H in	H out	C out	C in
90	0	60	59	28	28
90	2	65	63	29	28
90	4	69	66	30	28
90	6	74	72	31	28
90	8	77	74	32	28
90	10	80	79	32	28
90	12	80	79	32	28
90	14	80	79	32	28
90	16	80	79	32	28
45	18	80	79	32	28
45	20	80	79	33	28
45	22	80	79	33	28
45	24	80	79	33	28
45	26	80	79	33	28
45	28	80	79	33	28
5	30	80	79	34	28
5	32	80	79	35	28
5	34	80	79	37	28
5	36	80	79	37	28
5	38	80	79	37	28
5	40	80	79	37	28
0	42	80	79	40	28
0	44	80	79	43	28
0	46	80	79	46	28
0	48	80	79	46	28
0	50	80	79	46	28
-15	52	80	79	43	28
-15	54	80	79	43	28
-15	56	80	79	45	28
-15	58	80	79	46	28
-15	60	80	79	46	28
-15	62	80	79	47	28
-15	64	80	79	47	28
-15	66	80	79	47	28
-15	68	80	79	47	28
-15	70	80	79	47	28
-30	72	80	79	44	28
-30	74	80	79	45	28
-30	76	80	79	46	28
-30	78	80	79	47	28
-30	80	80	79	47	28
-30	82	80	79	48	28
-30	84	80	79	48	28
-30	86	80	79	48	28
-30	88	80	79	48	28
-45	90	80	79	44	28
-45	92	80	79	45	28
-45	94	80	79	46	28
-45	96	80	79	47	28
-45	98	80	79	49	28
-45	100	80	79	49	28
-45	102	80	79	49	28
-45	104	80	79	49	28
-45	106	80	79	49	28
-90	108	80	79	47	28
-90	110	80	79	48	28
-90	112	80	79	49	28
-90	114	80	79	50	28
-90	116	80	79	50	28
-90	118	80	79	50	28
-90	120	80	79	50	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

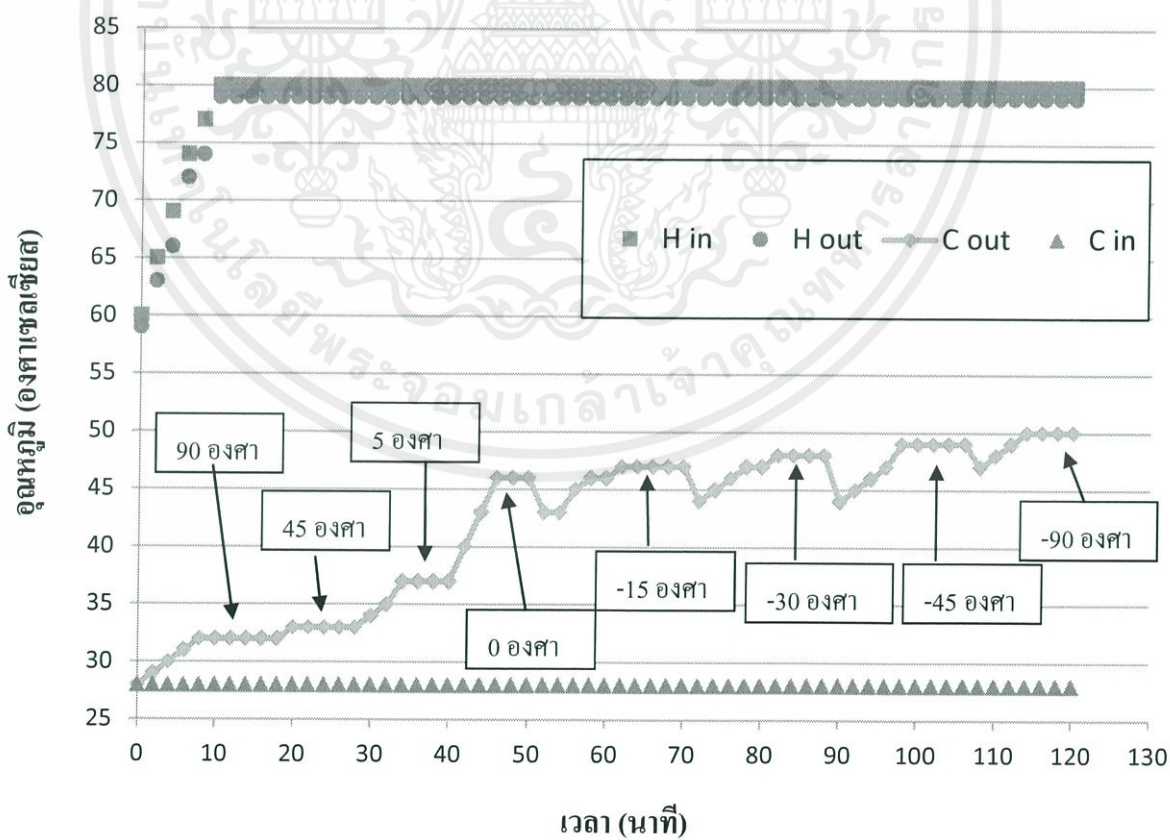
จากข้อมูลในตารางที่ ข-2 ถึงตารางที่ ข-5 สามารถนำมาพลอกราฟผลการบันทึกอุณหภูมิ
น้ำที่เวลาต่างๆ ได้ดังรูปที่ ข-1 ถึง รูปที่ ข-4 ตามลำดับ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข-3 ท่อความร้อนรูปแบบปกติ ที่อุณหภูมิสูงสุด 80°C



รูปที่ ข-4 ท่อความร้อนรูปแบบ Gas-Loaded ที่อุณหภูมิสูงสุด 80°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทดลองนี้จะทำการวัดอัตราการไหลของน้ำเย็นซึ่งได้แสดงไว้ดังตารางที่ ข-6 เพื่อนำไปคำนวณค่าอัตราการถ่ายโอนความร้อนต่อไป

ตารางที่ ข-6 อัตราการไหลของน้ำที่วัดได้จากแนวองศาการวางต่างๆ

การวางท่อความร้อนจากแนวระดับ (องศา)	อัตราการไหลของน้ำเย็น (L/h)
90	6.18
45	5.34
5	5.48
0	5.52
-45	6.46
-90	6.60
ท่อเปล่า	5.52

โดยถ้าส่วนระเหยหรือส่วนที่ได้รับความร้อนอยู่ต่ำกว่าส่วนควบแน่น มุมองศาที่วัดได้จากแนวระดับจะบอกเป็นค่าลบ

ซึ่งในการทดลองนี้จะทำการวัดอุณหภูมิของน้ำ ที่ละแนวองศาการวางของท่อ (ไม่ต่อเนื่อง) โดยใช้ท่อความร้อนแบบปกติ และท่อความร้อนแบบ Gas-Loaded ที่อุณหภูมิ 60 °C และ 80 °C เพื่อนำไปคำนวณค่าอัตราการถ่ายโอนความร้อนต่อไป

กำหนดให้

- H in คือ น้ำร้อนขาเข้า
- H out คือ น้ำร้อนขาออก
- C out คือ น้ำเย็นขาออก
- C in คือ น้ำเย็นขาเข้า

ตารางที่ ข-7 ข้อมูลที่บันทึกได้ของท่อทองแดงเปล่า ที่อุณหภูมิ 60 °C

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)				เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)			
	H in	H out	C out	C in		H in	H out	C out	C in
0	22	22	22	22	16	60	58	23	22
1	24	24	22	22	17	60	59	23	22
2	27	26	22	22	18	60	59	23	22
3	31	29	22	22	19	60	59	23	22
4	34	33	22	22	20	60	59	23	22
5	38	37	22	22	21	60	59	24	22
6	43	41	22	22	22	60	59	24	22
7	47	45	22	22	23	60	59	24	22
8	49	47	22	22	24	60	59	24	22
9	52	51	22	22	25	60	59	24	22
10	55	53	22	22	26	60	59	24	22
11	58	57	22	22	27	60	59	24	22
12	59	57	22	22	28	60	59	24	22
13	59	58	22	22	29	60	59	24	22
14	60	58	23	22	30	60	59	24	22
15	60	58	23	22					

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-8 ข้อมูลที่บันทึกได้ของท่อทองแดงเปล่า ที่อุณหภูมิ 80 °C

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)			
	H in	H out	C out	C in
0	22	22	22	22
1	24	24	22	22
2	27	26	22	22
3	31	29	22	22
4	34	33	22	22
5	38	37	22	22
6	43	41	22	22
7	47	45	22	22
8	49	47	22	22
9	52	51	22	22
10	55	53	22	22
11	58	57	23	22
12	59	58	23	22
13	60	59	24	22
14	62	61	24	22
15	64	63	24	22
16	68	67	24	22
17	72	70	24	22
18	75	74	25	22
19	78	77	25	22
20	79	78	25	22

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)			
	H in	H out	C out	C in
21	80	78	25	22
22	80	78	25	22
23	81	79	26	22
24	82	79	26	22
25	82	79	26	22
26	82	79	26	22
27	82	79	26	22
28	82	80	26	22
29	82	80	26	22
30	82	80	26	22
31	82	80	26	22
32	82	80	27	22
33	82	80	27	22
34	82	80	27	22
35	82	80	27	22
36	82	80	27	22
37	82	80	27	22
38	82	80	27	22
39	82	80	27	22
40	82	80	27	22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-9 ข้อมูลที่บันทึกได้ของท่อความร้อนรูปแบบ Gas-Loaded มุม -90 องศาที่อุณหภูมิ 60 °C

ครั้งที่ 1					ครั้งที่ 2				
เวลา (นาทีก)	อุณหภูมิ (°C)				เวลา (นาทีก)	อุณหภูมิ (°C)			
	H in	H out	C out	C in		H in	H out	C out	C in
0	22	22	25	25	0	25	25	24	24
1	26	26	25	25	1	28	28	25	24
2	30	29	26	25	2	31	31	25	24
3	35	34	26	25	3	35	33	25	24
4	39	37	26	25	4	39	37	25	24
5	44	42	26	25	5	43	41	25	24
6	48	46	29	25	6	46	45	28	24
7	54	52	30	25	7	54	52	32	24
8	58	55	33	25	8	55	53	32	24
9	58	56	33	25	9	56	54	32	24
10	59	57	33	25	10	59	57	32	24
11	59	57	33	25	11	61	57	34	24
12	60	58	34	25	12	61	58	36	24
13	60	58	36	25	13	61	59	36	24
14	60	58	36	25	14	61	59	36	24
15	60	58	36	25	15	61	59	36	24
16	60	58	36	25	16	61	59	36	24
17	60	58	36	25	17	61	59	36	24
18	60	58	36	25	18	61	59	36	24
19	60	58	36	25	19	62	59	37	24
20	60	58	36	25	20	62	59	37	24
21	60	58	36	25	21	62	59	37	24
22	60	58	36	25	22	62	59	37	24
23	60	58	36	25	23	62	59	37	24
24	60	58	36	25	24	62	59	37	24
25	60	58	36	25	25	62	59	37	24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-10 ข้อมูลที่บันทึกได้ของท่อความร้อนรูปแบบปกติ มุม -90 องศา ที่อุณหภูมิ 60 °C

ครั้งที่ 1					ครั้งที่ 2				
เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)				เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)			
	H in	H out	C out	C in		H in	H out	C out	C in
0	24	24	26	26	0	24	24	25	25
1	27	25	26	26	1	30	25	25	25
2	31	27	26	26	2	33	27	25	25
3	35	30	26	26	3	38	31	25	25
4	40	33	26	26	4	42	34	25	25
5	43	36	27	26	5	46	37	26	25
6	48	40	27	26	6	50	41	26	25
7	51	43	27	26	7	53	44	27	25
8	55	47	28	26	8	56	47	28	25
9	59	51	30	26	9	60	50	29	25
10	61	52	30	26	10	60	52	30	25
11	61	54	32	26	11	61	53	31	25
12	62	55	32	26	12	62	55	32	25
13	62	56	33	26	13	62	55	32	25
14	62	56	33	26	14	62	55	32	25
15	62	56	33	26	15	62	55	32	25
16	62	56	33	26	16	62	55	32	25
17	62	56	33	26	17	62	55	32	25
18	62	56	33	26	18	62	56	33	25
19	62	56	33	26	19	62	56	33	25
20	62	56	33	26	20	62	56	33	25
					21	62	56	33	25
					22	62	56	33	25
					23	62	56	33	25
					24	62	56	33	25
					25	62	56	33	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-11 ข้อมูลที่บันทึกได้ของท่อความร้อนรูปแบบปกติ มุม -45 องศาที่อุณหภูมิ 60 °C

ครั้งที่ 1					ครั้งที่ 2				
เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)				เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)			
	H in	H out	C out	C in		H in	H out	C out	C in
0	23	23	24	24	0	24	24	24	24
1	26	25	24	24	1	27	27	24	24
2	30	28	24	24	2	31	31	24	24
3	33	31	25	24	3	38	37	24	24
4	37	35	25	24	4	40	39	24	24
5	40	38	25	24	5	44	43	24	24
6	45	42	25	24	6	48	47	25	24
7	48	45	25	24	7	52	50	26	24
8	51	48	26	24	8	56	54	27	24
9	55	51	27	24	9	59	57	28	24
10	58	54	28	24	10	60	58	29	24
11	59	56	29	24	11	60	58	30	24
12	60	56	30	24	12	60	58	30	24
13	61	57	30	24	13	61	58	30	24
14	61	57	30	24	14	61	58	30	24
15	61	58	30	24	15	61	58	30	24
16	61	58	31	24	16	61	59	31	24
17	61	58	31	24	17	61	59	31	24
18	61	58	31	24	18	61	59	31	24
19	61	58	31	24	19	61	59	31	24
20	61	58	31	24	20	61	59	31	24
21	61	58	31	24					
22	61	58	31	24					
23	61	58	31	24					
24	61	58	31	24					
25	61	58	31	24					

ตารางที่ ข-12 ข้อมูลที่บันทึกได้ของท่อความร้อนรูปแบบ Gas-Loaded มุม 0 องศาที่อุณหภูมิ 60 °C

ครั้งที่ 1					ครั้งที่ 2				
เวลา (นาทึ่)	อุณหภูมิ (°C)				เวลา (นาทึ่)	อุณหภูมิ (°C)			
	H in	H out	C out	C in		H in	H out	C out	C in
0	26	26	26	26	0	26	26	26	26
1	31	29	26	26	1	30	29	27	26
2	34	32	27	26	2	34	33	27	26
3	40	36	28	26	3	39	37	28	26
4	43	39	29	26	4	42	39	29	26
5	46	42	31	26	5	45	42	31	26
6	53	49	35	26	6	49	46	34	26
7	59	53	38	26	7	52	49	36	26
8	60	54	42	26	8	55	52	39	26
9	61	55	43	26	9	59	55	39	26
10	62	56	44	26	10	60	56	40	26
11	62	57	44	26	11	62	59	41	26
12	62	58	44	26	12	62	59	42	26
13	62	58	45	26	13	62	60	43	26
14	62	58	45	26	14	62	60	43	26
15	62	58	45	26	15	62	60	43	26
16	62	58	45	26	16	62	60	43	26
17	62	59	45	26	17	62	60	43	26
18	62	59	45	26	18	62	60	43	26
19	62	59	45	26	19	62	60	43	26
20	62	59	45	26	20	62	60	43	26
21	62	59	45	26	21	62	60	43	26
22	62	59	45	26	22	62	60	43	26
23	62	59	45	26	23	62	60	43	26
24	62	59	45	26	24	62	60	43	26
25	62	59	45	26	25	62	60	43	26

ตารางที่ ข-13 ข้อมูลที่บันทึกได้ของท่อความร้อนรูปแบบปกติ มุม 0 องศาที่อุณหภูมิ 60 °C

ครั้งที่ 1					ครั้งที่ 2				
เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)				เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)			
	H in	H out	C out	C in		H in	H out	C out	C in
0	22	22	25	25	0	25	25	26	26
1	25	24	25	25	1	28	27	26	26
2	29	28	25	25	2	31	30	26	26
3	33	32	26	25	3	34	33	26	26
4	37	35	26	25	4	38	36	26	26
5	41	39	26	25	5	41	39	26	26
6	45	43	27	25	6	45	43	27	26
7	48	46	27	25	7	48	46	27	26
8	52	50	30	25	8	51	49	28	26
9	56	53	33	25	9	54	52	32	26
10	57	55	34	25	10	57	54	34	26
11	58	56	34	25	11	59	57	34	26
12	58	56	34	25	12	61	58	36	26
13	59	56	34	25	13	61	59	37	26
14	59	57	35	25	14	62	59	37	26
15	59	57	35	25	15	62	59	37	26
16	59	57	35	25	16	62	60	37	26
17	59	57	35	25	17	62	60	38	26
18	59	57	35	25	18	62	60	38	26
19	59	57	35	25	19	62	60	38	26
20	59	57	35	25	20	62	60	38	26
					21	62	60	38	26
					22	62	60	38	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-14 ข้อมูลที่บันทึกได้ของท่อความร้อนรูปแบบปกติ มุม 5 องศาที่อุณหภูมิ 60 °C

ครั้งที่ 1					ครั้งที่ 2				
เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)				เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)			
	H in	H out	C out	C in		H in	H out	C out	C in
0	25	25	28	28	0	24	24	25	25
1	30	28	28	28	1	27	26	25	25
2	34	32	28	28	2	31	29	25	25
3	38	35	28	28	3	35	33	25	25
4	43	40	29	28	4	38	36	25	25
5	47	44	29	28	5	44	42	26	25
6	51	48	30	28	6	46	44	26	25
7	55	52	33	28	7	50	47	27	25
8	59	55	36	28	8	53	50	27	25
9	61	58	38	28	9	55	53	30	25
10	62	59	39	28	10	57	55	32	25
11	62	60	39	28	11	60	57	34	25
12	62	60	39	28	12	61	58	35	25
13	62	60	39	28	13	61	59	36	25
14	62	60	39	28	14	61	59	36	25
15	62	60	39	28	15	61	59	36	25
16	62	60	39	28	16	61	59	37	25
17	62	60	39	28	17	61	59	37	25
18	62	60	39	28	18	61	59	37	25
19	62	60	39	28	19	61	59	37	25
20	62	60	39	28	20	61	59	37	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-15 ข้อมูลที่บันทึกได้ของท่อความร้อนรูปแบบปกติ มุม 45 องศาที่อุณหภูมิ 60 °C

ครั้งที่ 1					ครั้งที่ 2				
เวลา (นาทีก)	อุณหภูมิ (°C)				เวลา (นาทีก)	อุณหภูมิ (°C)			
	H in	H out	C out	C in		H in	H out	C out	C in
0	25	25	25	25	0	26	26	25	25
1	28	28	25	25	1	30	29	25	25
2	32	31	25	25	2	33	32	25	25
3	35	34	25	25	3	37	36	25	25
4	39	37	25	25	4	41	39	25	25
5	43	41	25	25	5	45	43	25	25
6	46	44	26	25	6	49	46	25	25
7	50	48	26	25	7	52	50	26	25
8	53	51	26	25	8	55	53	26	25
9	56	53	26	25	9	59	56	26	25
10	59	57	27	25	10	61	59	26	25
11	60	58	27	25	11	62	59	26	25
12	60	58	27	25	12	62	60	26	25
13	61	58	27	25	13	62	60	26	25
14	61	58	27	25	14	62	60	26	25
15	61	58	27	25	15	62	60	26	25
16	61	58	27	25	16	62	60	27	25
17	61	58	27	25	17	62	60	27	25
18	61	58	27	25	18	62	60	27	25
19	61	58	27	25	19	62	60	27	25
20	61	58	27	25	20	62	60	27	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-16 ข้อมูลที่บันทึกได้ของท่อความร้อนรูปแบบปกติ มุม 90 องศาที่อุณหภูมิ 60 °C

ครั้งที่ 1					ครั้งที่ 2				
เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)				เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)			
	H in	H out	C out	C in		H in	H out	C out	C in
0	26	26	26	26	0	26	26	27	27
1	29	28	26	26	1	30	28	27	27
2	33	32	26	26	2	34	32	27	27
3	36	34	26	26	3	38	35	27	27
4	39	37	26	26	4	44	40	27	27
5	43	41	26	26	5	47	43	27	27
6	46	44	26	26	6	49	45	27	27
7	49	47	26	26	7	51	48	27	27
8	52	50	27	26	8	55	51	27	27
9	55	53	27	26	9	58	53	28	27
10	57	55	27	26	10	60	55	28	27
11	59	58	27	26	11	61	56	28	27
12	60	58	27	26	12	61	58	28	27
13	60	59	27	26	13	62	58	28	27
14	60	59	27	26	14	62	58	28	27
15	60	59	27	26	15	62	59	28	27
16	60	59	27	26	16	62	60	28	27
17	60	59	27	26	17	62	60	28	27
18	60	59	27	26	18	62	60	28	27
19	60	59	27	26	19	62	60	28	27
20	60	59	27	26	20	62	60	28	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-17 ข้อมูลที่บันทึกได้ของท่อความร้อนรูปแบบ Gas-Loaded มุม -90 องศาอุณหภูมิ 80 °C

ครั้งที่ 1					ครั้งที่ 2				
เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)				เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)			
	H in	H out	C out	C in		H in	H out	C out	C in
0	26	26	26	26	0	26	26	26	26
1	31	30	26	26	1	33	32	27	26
2	34	33	27	26	2	35	34	27	26
3	40	38	27	26	3	41	39	28	26
4	42	40	27	26	4	45	44	28	26
5	46	44	28	26	5	46	45	29	26
6	50	48	30	26	6	52	50	34	26
7	54	52	37	26	7	55	53	37	26
8	59	56	39	26	8	57	55	39	26
9	61	58	41	26	9	61	58	41	26
10	64	62	43	26	10	63	60	42	26
11	68	66	45	26	11	66	64	44	26
12	72	68	47	26	12	68	66	45	26
13	75	72	48	26	13	73	69	46	26
14	79	75	50	26	14	77	73	49	26
15	80	76	51	26	15	80	75	50	26
16	82	77	52	26	16	82	76	51	26
17	82	78	53	26	17	82	78	51	26
18	83	79	53	26	18	82	78	52	26
19	83	79	54	26	19	83	78	53	26
20	83	79	54	26	20	83	78	53	26
21	83	79	54	26	21	83	78	53	26
22	83	79	54	26	22	83	78	53	26
23	83	79	54	26	23	83	79	53	26
24	83	79	54	26	24	83	79	53	26
25	83	79	54	26	25	83	79	53	26
26	83	79	54	26	26	83	79	53	26
27	83	79	54	26	27	83	79	53	26
28	83	79	54	26	28	83	79	53	26
29	83	79	54	26	29	83	79	53	26
30	83	79	54	26	30	83	79	53	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-18 ข้อมูลที่บันทึกได้ของท่อความร้อนรูปแบบปกติ มุม -90 องศาที่อุณหภูมิ 80 °C

ครั้งที่ 1					ครั้งที่ 2				
เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)				เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)			
	H in	H out	C out	C in		H in	H out	C out	C in
0	25	25	25	25	0	25	25	24	24
1	30	27	25	25	1	28	26	24	24
2	33	28	25	25	2	36	30	25	24
3	35	30	25	25	3	42	34	25	24
4	39	33	25	25	4	46	38	25	24
5	43	36	25	25	5	50	41	26	24
6	45	37	25	25	6	54	45	26	24
7	48	40	26	25	7	59	49	27	24
8	51	43	26	25	8	62	52	28	24
9	55	46	26	25	9	67	55	29	24
10	57	48	27	25	10	70	58	30	24
11	60	50	28	25	11	74	62	32	24
12	62	52	29	25	12	78	65	34	24
13	65	55	32	25	13	81	68	35	24
14	68	58	33	25	14	82	70	37	24
15	72	61	34	25	15	82	71	38	24
16	75	64	35	25	16	82	72	39	24
17	76	66	36	25	17	83	72	39	24
18	77	67	36	25	18	83	72	40	24
19	78	69	37	25	19	83	73	40	24
20	78	69	37	25	20	83	73	40	24
21	79	70	38	25	21	83	74	40	24
22	79	70	39	25	22	83	74	40	24
23	80	70	39	25	23	83	74	40	24
24	80	72	39	25	24	83	74	40	24
25	82	73	39	25	25	83	74	40	24
26	82	73	40	25	26	83	74	40	24
27	82	73	40	25	27	83	74	40	24
28	82	73	40	25	28	83	74	40	24
29	82	73	41	25	29	83	74	40	24
30	82	73	41	25	30	83	74	40	24
31	82	73	41	25					
32	82	73	41	25					

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-19 ข้อมูลที่บันทึกได้ของท่อความร้อนรูปแบบปกติ มุม -45 องศาที่อุณหภูมิ 80 °C

ครั้งที่ 1					ครั้งที่ 2				
เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)				เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)			
	H in	H out	C out	C in		H in	H out	C out	C in
0	24	24	26	26	0	26	26	26	26
1	28	27	26	26	1	31	30	26	26
2	33	32	26	26	2	34	33	26	26
3	38	37	26	26	3	38	36	26	26
4	42	39	26	26	4	42	40	27	26
5	47	43	26	26	5	45	43	27	26
6	51	47	27	26	6	49	47	27	26
7	54	50	28	26	7	53	51	28	26
8	58	55	29	26	8	56	53	28	26
9	62	58	31	26	9	59	56	29	26
10	65	61	31	26	10	62	59	31	26
11	68	64	31	26	11	66	63	33	26
12	74	69	33	26	12	71	67	36	26
13	77	72	36	26	13	73	69	36	26
14	78	73	37	26	14	75	71	36	26
15	80	74	38	26	15	78	74	38	26
16	80	74	40	26	16	80	76	39	26
17	80	75	42	26	17	81	77	41	26
18	81	75	43	26	18	82	78	40	26
19	81	76	43	26	19	82	78	42	26
20	81	76	43	26	20	82	78	42	26
21	81	76	43	26	21	82	78	43	26
22	81	76	43	26	22	82	78	43	26
23	81	76	43	26	23	83	78	43	26
24	81	76	43	26	24	83	78	45	26
25	81	76	43	26	25	83	78	45	26
					26	83	78	45	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-20 ข้อมูลที่บันทึกได้ของท่อความร้อนรูปแบบ Gas-Loaded มุม 0 องศาที่อุณหภูมิ 80 °C

ครั้งที่ 1					ครั้งที่ 2				
เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)				เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)			
	H in	H out	C out	C in		H in	H out	C out	C in
0	26	26	26	26	0	25	25	23	23
1	31	29	27	26	1	32	31	24	23
2	34	32	27	26	2	36	34	24	23
3	40	38	27	26	3	40	38	25	23
4	45	42	29	26	4	47	45	28	23
5	50	47	32	26	5	51	48	31	23
6	54	50	38	26	6	54	52	33	23
7	58	54	41	26	7	57	54	34	23
8	61	57	43	26	8	62	59	35	23
9	64	60	45	26	9	66	62	36	23
10	69	64	46	26	10	70	66	38	23
11	71	66	48	26	11	74	70	39	23
12	73	68	48	26	12	77	73	42	23
13	76	71	49	26	13	79	75	43	23
14	80	75	51	26	14	80	76	43	23
15	82	77	52	26	15	82	78	43	23
16	82	78	52	26	16	82	78	43	23
17	83	78	53	26	17	82	78	43	23
18	83	79	53	26	18	82	78	43	23
19	83	79	53	26	19	83	79	47	23
20	83	79	53	26	20	83	79	47	23
21	83	79	53	26	21	83	79	47	23
22	83	79	53	26	22	83	79	47	23
23	83	79	53	26	23	83	79	47	23
24	83	79	53	26	24	83	79	47	23
25	83	79	53	26	25	83	79	47	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-21 ข้อมูลที่บันทึกได้ของท่อความร้อนรูปแบบปกติ มุม 0 องศาที่อุณหภูมิ 80 °C

ครั้งที่ 1					ครั้งที่ 2				
เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)				เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)			
	H in	H out	C out	C in		H in	H out	C out	C in
0	25	25	25	25	0	25	25	25	25
1	29	27	25	25	1	28	27	26	25
2	33	31	25	25	2	31	29	26	25
3	37	34	25	25	3	36	34	26	25
4	41	38	26	25	4	40	38	27	25
5	45	42	27	25	5	45	43	27	25
6	49	46	28	25	6	48	46	28	25
7	52	49	30	25	7	51	49	29	25
8	56	52	31	25	8	55	53	31	25
9	60	56	33	25	9	58	55	32	25
10	63	60	34	25	10	62	59	34	25
11	67	62	36	25	11	65	62	35	25
12	71	65	38	25	12	69	66	36	25
13	74	69	40	25	13	72	69	38	25
14	77	71	42	25	14	76	72	39	25
15	78	73	44	25	15	79	76	41	25
16	78	73	44	25	16	81	78	42	25
17	79	73	44	25	17	82	78	43	25
18	79	73	45	25	18	82	79	43	25
19	79	73	45	25	19	82	79	43	25
20	79	73	45	25	20	83	79	44	25
21	79	74	45	25	21	83	79	44	25
22	79	74	46	25	22	83	79	44	25
23	79	74	46	25	23	83	79	45	25
24	79	75	46	25	24	83	79	45	25
25	80	75	46	25	25	83	79	45	25
26	80	75	46	25	26	83	79	45	25
27	80	75	46	25	27	83	79	45	25
28	80	75	46	25	28	83	79	45	25
29	80	75	46	25	29	83	79	45	25
30	80	75	46	25	30	83	79	45	25
31	80	75	46	25	31	83	79	45	25
32	80	76	46	25	32	83	79	45	25
33	80	76	47	25	33	83	79	45	25
34	80	76	47	25	34	83	79	45	25
35	80	76	47	25	35	83	79	45	25
36	80	76	47	25					
37	80	76	48	25					
38	80	76	48	25					
39	80	76	48	25					
40	80	76	48	25					

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-22 ข้อมูลที่บันทึกได้ของท่อความร้อนรูปแบบปกติ มุม 5 องศาที่อุณหภูมิ 80 °C

ครั้งที่ 1					ครั้งที่ 2				
เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)				เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)			
	H in	H out	C out	C in		H in	H out	C out	C in
0	24	24	24	24	0	25	25	25	25
1	26	25	24	24	1	29	27	25	25
2	29	28	24	24	2	32	30	25	25
3	33	31	24	24	3	36	33	25	25
4	36	34	25	24	4	40	37	25	25
5	40	37	25	24	5	43	40	26	25
6	43	41	25	24	6	47	44	26	25
7	46	44	25	24	7	50	48	26	25
8	50	48	26	24	8	53	50	26	25
9	54	51	27	24	9	57	53	26	25
10	56	53	28	24	10	60	57	33	25
11	59	55	33	24	11	64	60	34	25
12	63	59	33	24	12	67	63	35	25
13	65	62	35	24	13	70	65	37	25
14	69	65	37	24	14	73	69	39	25
15	72	67	37	24	15	76	72	40	25
16	75	71	39	24	16	79	75	42	25
17	77	74	39	24	17	80	77	43	25
18	80	75	39	24	18	81	77	43	25
19	81	76	40	24	19	82	77	43	25
20	81	77	40	24	20	82	78	43	25
21	82	77	40	24	21	82	78	43	25
22	82	77	42	24	22	83	78	43	25
23	82	78	42	24	23	83	78	43	25
24	82	78	42	24	24	83	78	43	25
25	82	78	43	24	25	83	78	43	25
26	82	79	43	24	26	83	78	44	25
27	82	79	43	24	27	83	78	44	25
28	83	79	44	24	28	83	78	44	25
29	83	79	44	24	29	83	79	44	25
30	83	79	45	24	30	83	79	44	25
31	83	79	45	24	31	83	79	44	25
32	83	79	45	24	32	83	79	44	25
33	83	79	46	24	33	83	79	44	25
34	83	79	46	24					
35	83	79	46	24					
36	83	79	46	24					

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-23 ข้อมูลที่บันทึกได้ของท่อความร้อนรูปแบบปกติ มุม 45 องศาที่อุณหภูมิ 80 °C

ครั้งที่ 1					ครั้งที่ 2				
เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)				เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)			
	H in	H out	C out	C in		H in	H out	C out	C in
0	25	25	25	25	0	26	26	26	26
1	29	28	25	25	1	31	29	26	26
2	32	31	25	25	2	34	32	26	26
3	33	34	25	25	3	37	36	26	26
4	34	33	25	25	4	42	39	26	26
5	37	36	25	25	5	44	42	26	26
6	41	39	25	25	6	47	45	26	26
7	45	43	26	25	7	51	49	26	26
8	48	46	26	25	8	53	51	26	26
9	52	50	26	25	9	56	53	26	26
10	55	53	26	25	10	59	56	26	26
11	58	56	26	25	11	63	60	26	26
12	62	59	26	25	12	67	64	26	26
13	65	63	27	25	13	70	66	27	26
14	68	66	27	25	14	72	68	27	26
15	71	69	27	25	15	75	72	27	26
16	75	72	28	25	16	77	74	27	26
17	77	74	28	25	17	81	77	28	26
18	80	76	28	25	18	82	79	28	26
19	80	77	28	25	19	82	79	28	26
20	81	77	28	25	20	83	79	28	26
21	82	78	28	25	21	83	79	28	26
22	82	79	29	25	22	83	79	28	26
23	82	79	29	25	23	83	79	28	26
24	82	79	29	25	24	83	79	28	26
25	82	79	29	25	25	83	79	28	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

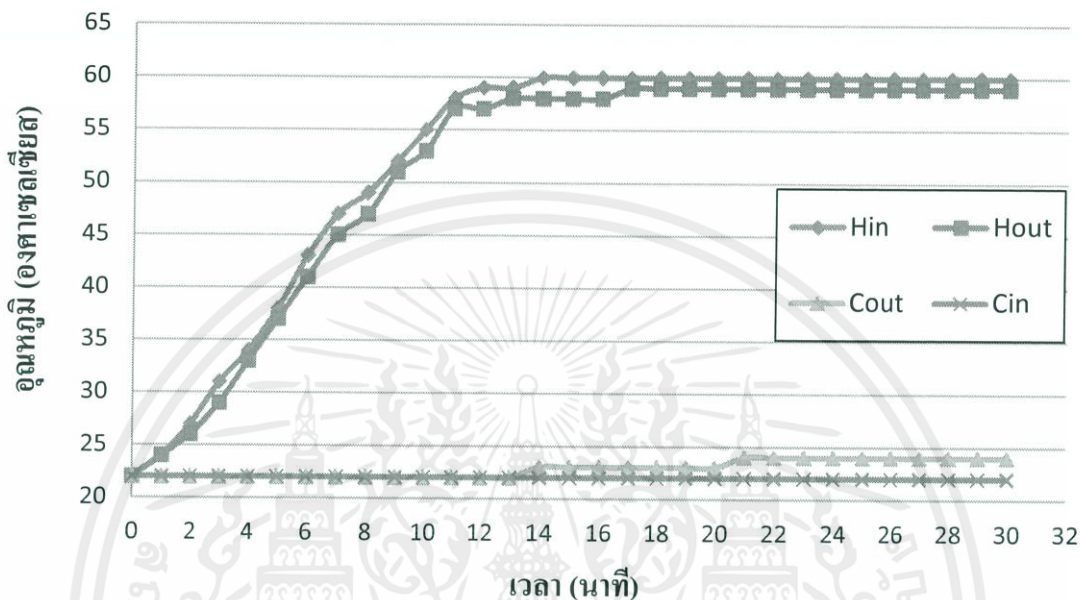
ตารางที่ ข-24 ข้อมูลที่บันทึกได้ของท่อความร้อนรูปแบบปกติ มุม 90 องศา ที่อุณหภูมิ 80 °C

ครั้งที่ 1					ครั้งที่ 2				
เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)				เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)			
	H in	H out	C out	C in		H in	H out	C out	C in
0	26	26	26	26	0	24	24	25	25
1	32	30	26	26	1	27	26	25	25
2	36	33	26	26	2	30	28	25	25
3	41	38	26	26	3	35	31	26	25
4	49	45	26	26	4	38	34	26	25
5	51	48	26	26	5	42	37	26	25
6	55	51	26	26	6	46	40	26	25
7	61	57	26	26	7	51	45	26	25
8	63	59	26	26	8	53	47	26	25
9	68	64	26	26	9	56	50	26	25
10	68	64	26	26	10	60	53	26	25
11	76	72	26	26	11	64	56	26	25
12	81	76	27	26	12	67	59	26	25
13	82	78	27	26	13	71	62	26	25
14	83	79	27	26	14	74	65	26	25
15	83	80	27	26	15	77	68	26	25
16	83	80	27	26	16	80	71	26	25
17	83	80	27	26	17	82	73	26	25
18	83	80	27	26	18	83	73	26	25
19	83	80	27	26	19	83	74	26	25
20	83	80	27	26	20	83	75	26	25
					21	83	75	26	25
					22	83	76	26	25
					23	83	76	27	25
					24	83	76	27	25
					25	83	76	27	25
					26	83	76	27	25
					27	83	76	27	25
					28	83	76	27	25
					29	83	77	28	25
					30	83	78	28	25
					31	83	78	28	25
					32	83	78	28	25
					33	83	78	28	25
					34	83	78	28	25
					35	83	78	28	25
					36	83	78	28	25
					37	83	78	28	25
					38	83	78	28	25
					39	83	78	28	25
					40	83	78	28	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

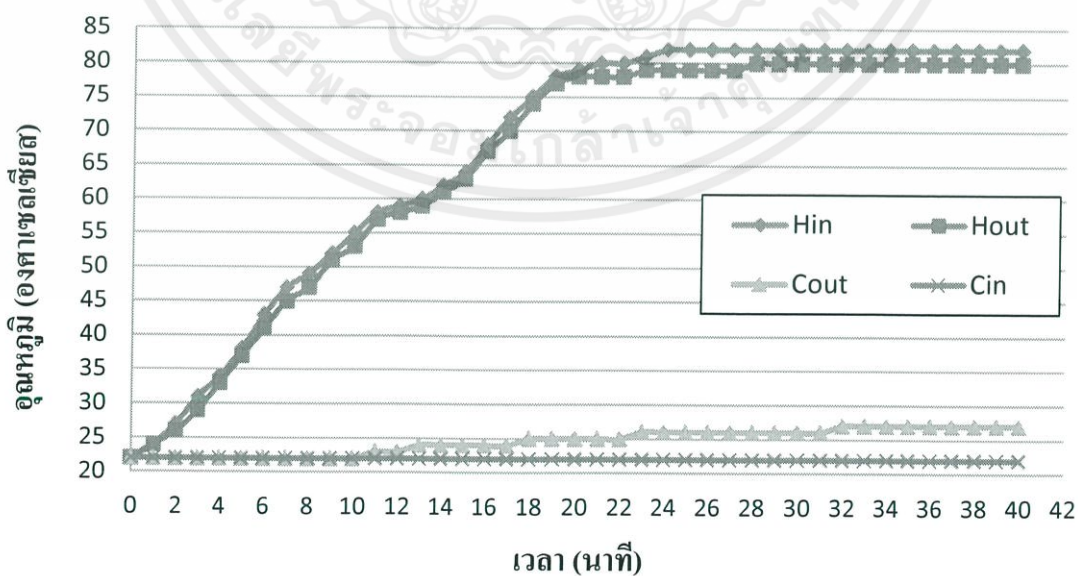
จากข้อมูลในตารางที่ ข-7 ถึงตารางที่ ข-24 สามารถนำมาพลอกราฟผลการบันทึกอุณหภูมิ น้ำที่เวลาต่างๆ ได้ดังรูปที่ ข-5 ถึง รูปที่ ข-22 ตามลำดับ

- ท่อทองแดงเปล่า อุณหภูมิสูงสุด 60°C



รูปที่ ข-5 ผลการบันทึกอุณหภูมิ น้ำที่เวลาต่างๆ ของท่อทองแดงเปล่า อุณหภูมิสูงสุด 60°C

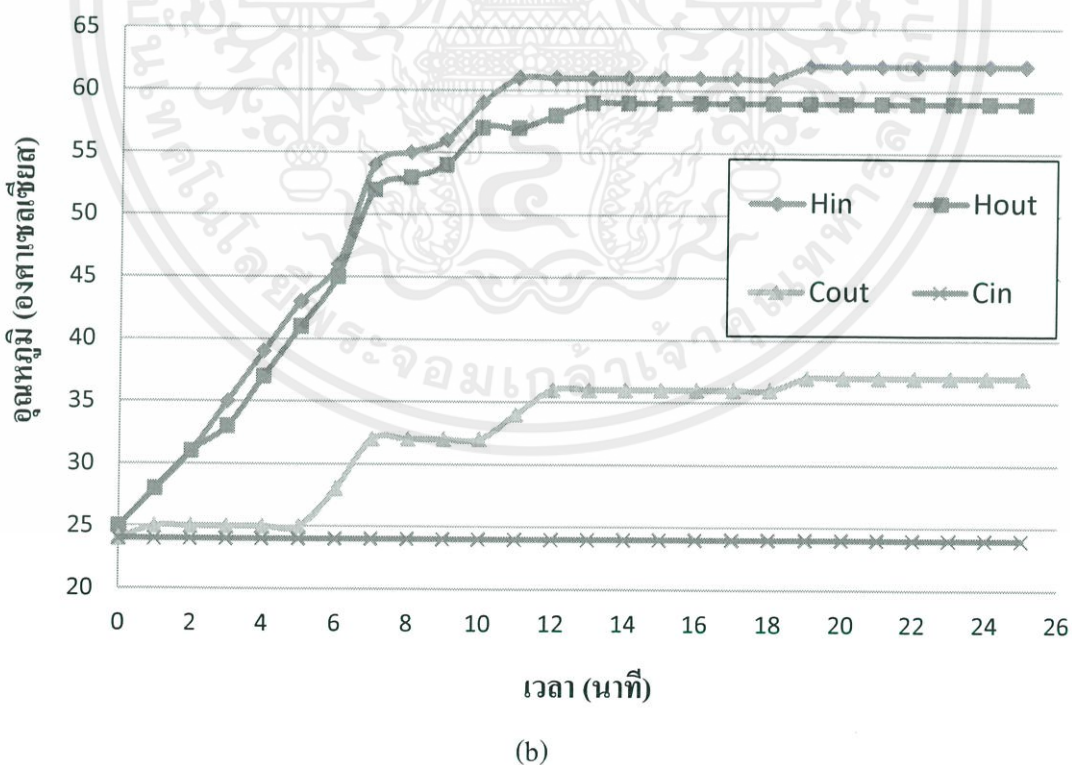
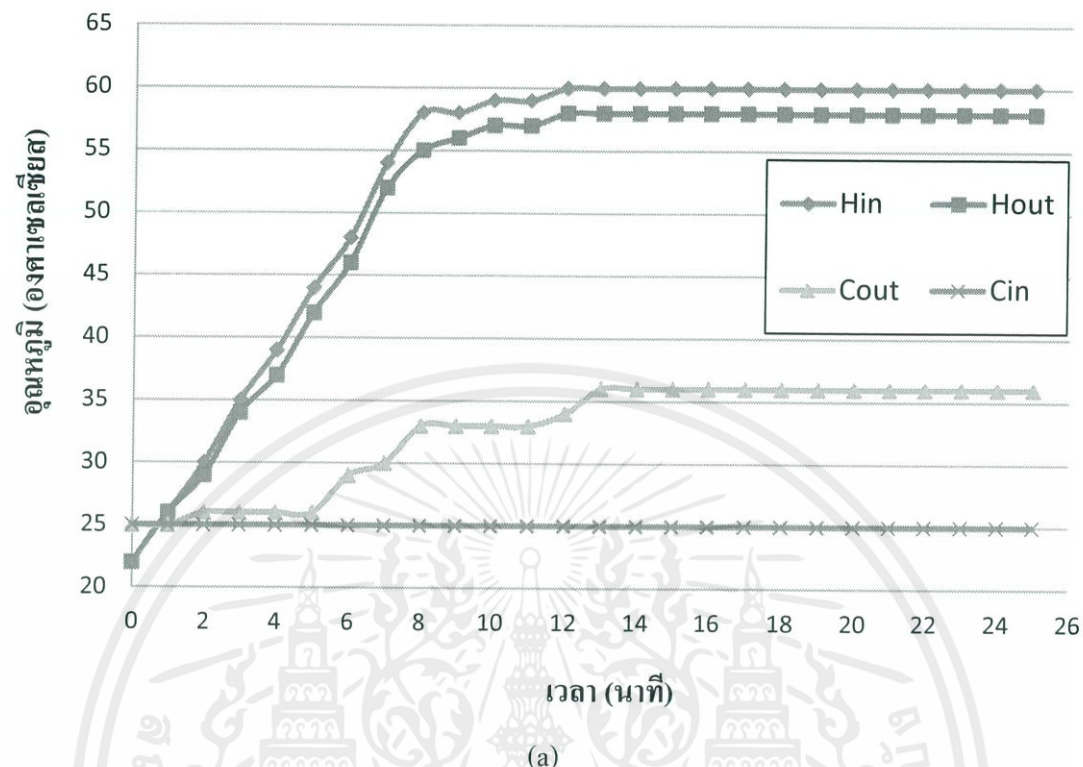
- ท่อทองแดงเปล่า อุณหภูมิสูงสุด 80°C



รูปที่ ข-6 ผลการบันทึกอุณหภูมิ น้ำที่เวลาต่างๆ ของท่อทองแดงเปล่า อุณหภูมิสูงสุด 80°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

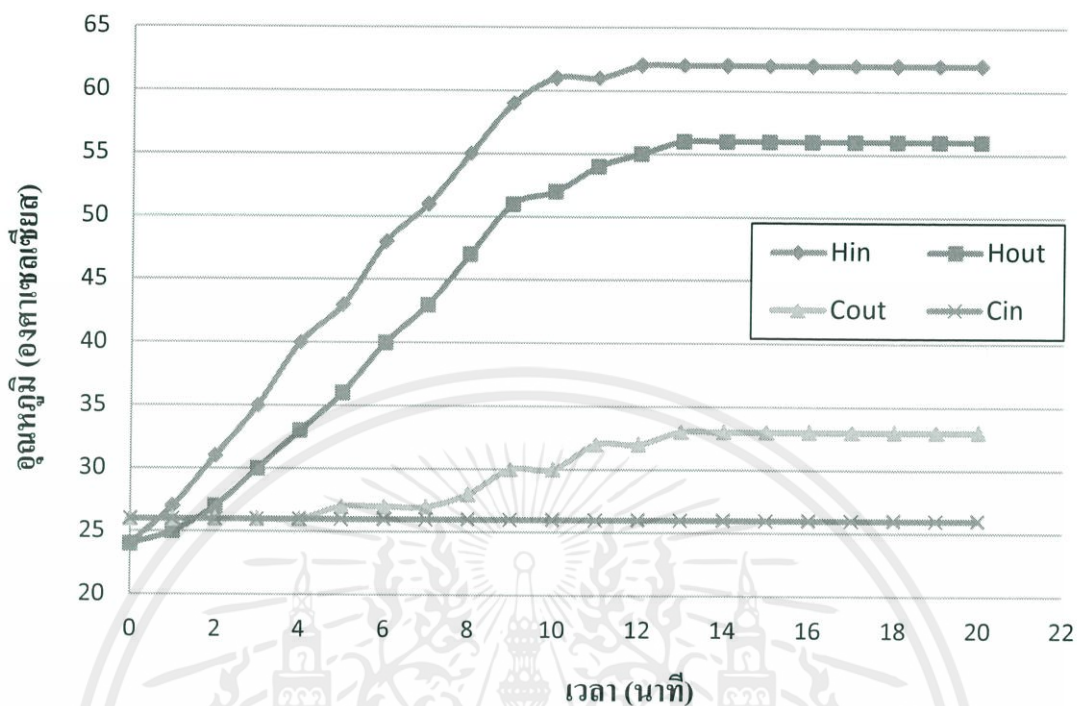
- ท่อความร้อนแบบ Gas-Loaded มุม -90 องศา อุณหภูมิสูงสุด 60°C



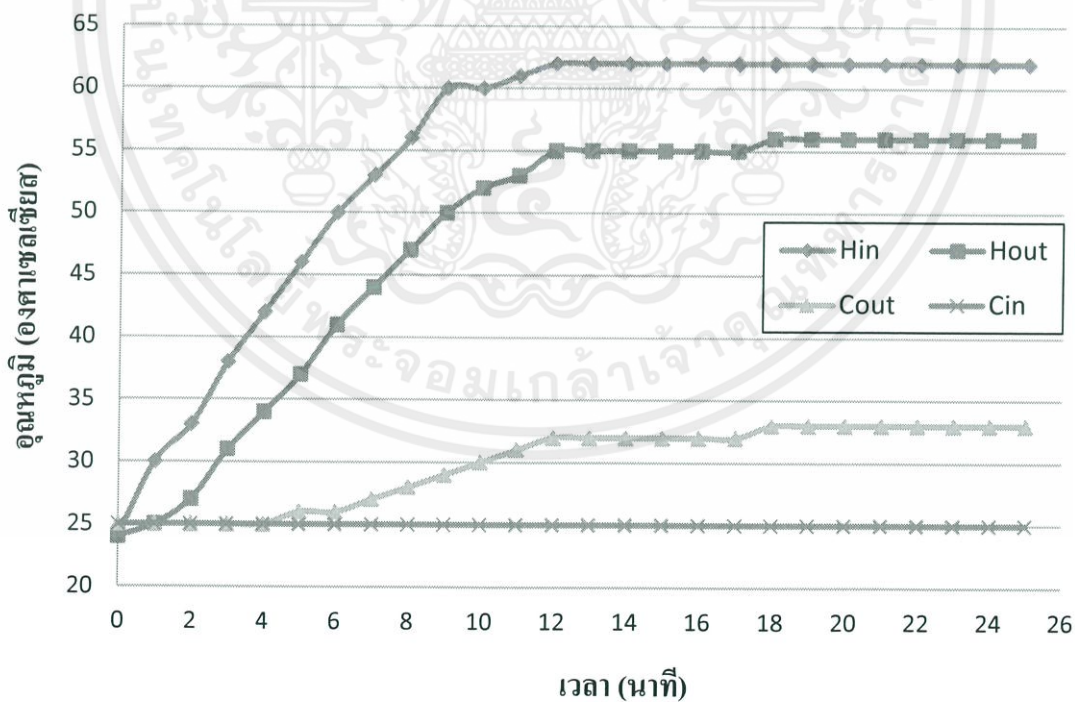
รูปที่ ข-7 ผลการบันทึกอุณหภูมิน้ำที่เวลาต่างๆ
 (a) ครั้งที่ 1 (b) ครั้งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ท่อความร้อนแบบปกติ มุม -90 องศา อุณหภูมิสูงสุด 60°C



(a)



(b)

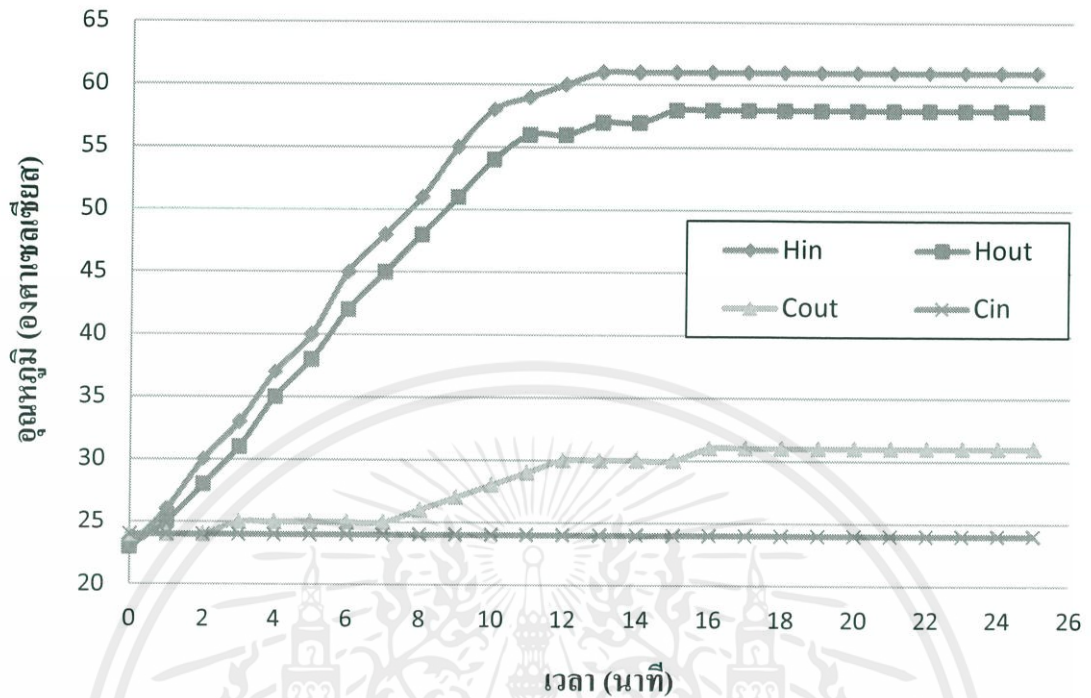
รูปที่ ข-8 ผลการบันทึกอุณหภูมิน้ำที่เวลาต่างๆ

(a) ครั้งที่ 1

(b) ครั้งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เพื่อความร้อนแบบปกติ มุม -45 องศา อุณหภูมิสูงสุด 60°C



(a)



(b)

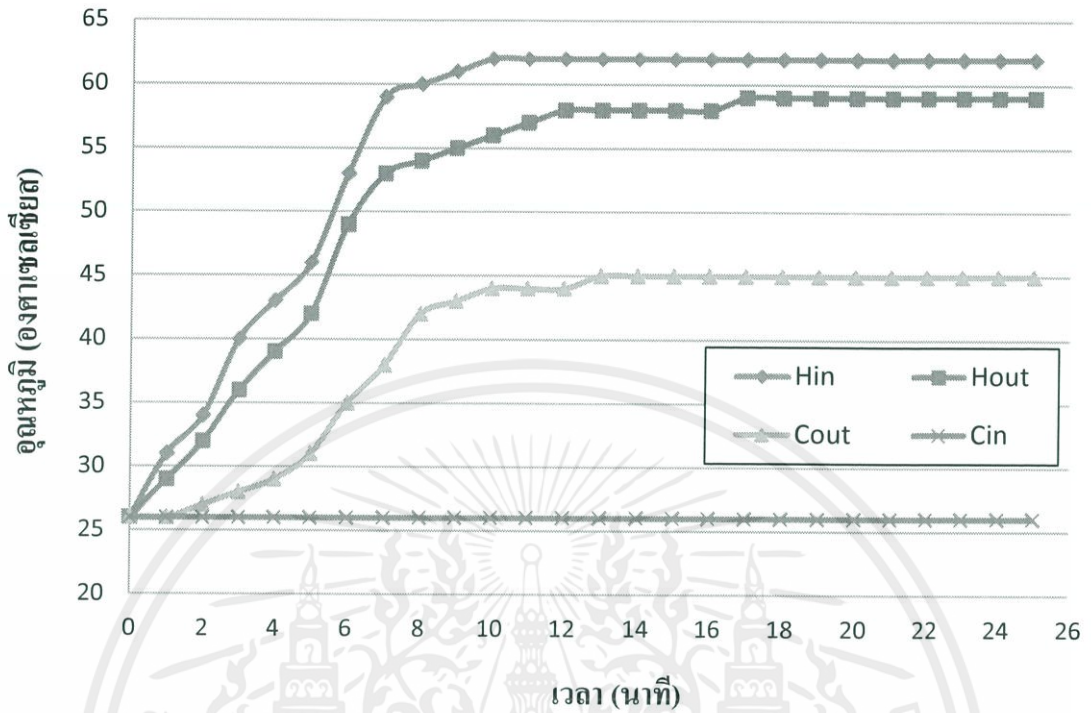
รูปที่ ข-9 ผลการบันทึกอุณหภูมิน้ำที่เวลาต่างๆ

(a) ครั้งที่ 1

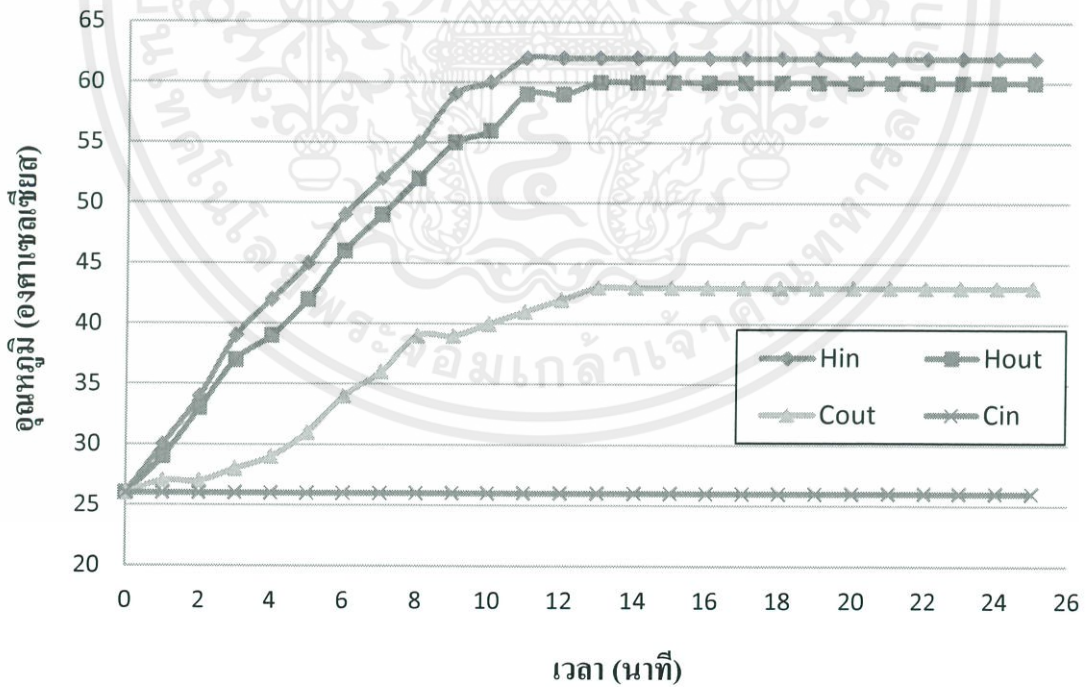
(b) ครั้งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เพื่อความร้อนแบบ Gas-Loaded มุม 0 องศา อุณหภูมิสูงสุด 60°C



(a)



(b)

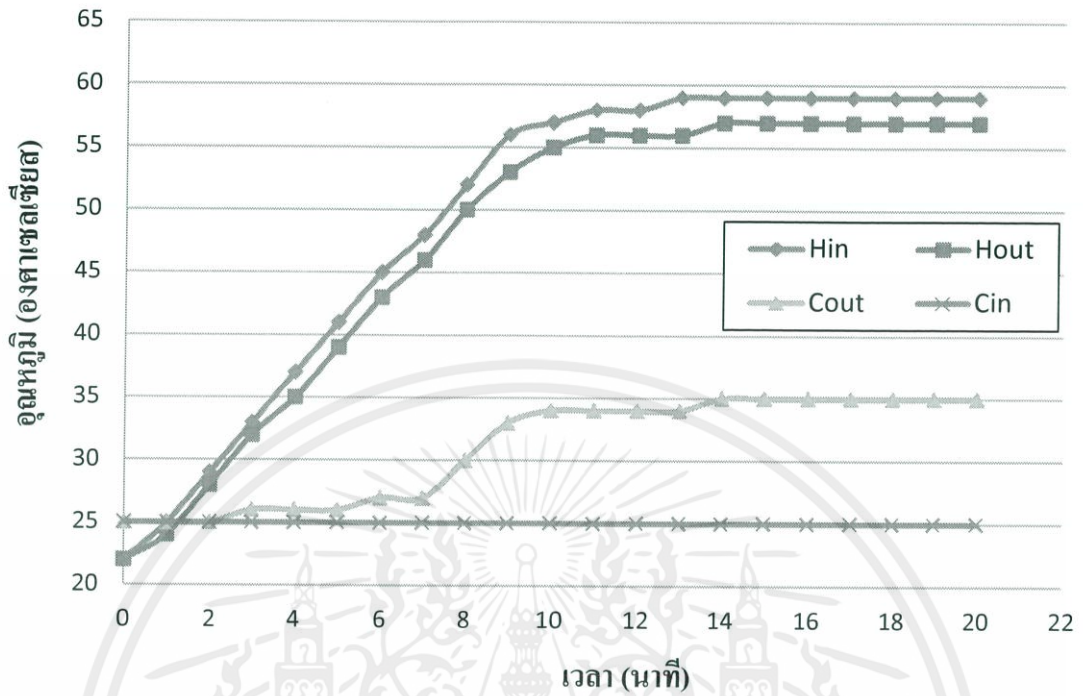
รูปที่ ข-10 ผลการบันทึกอุณหภูมิน้ำที่เวลาต่างๆ

(a) ครั้งที่ 1

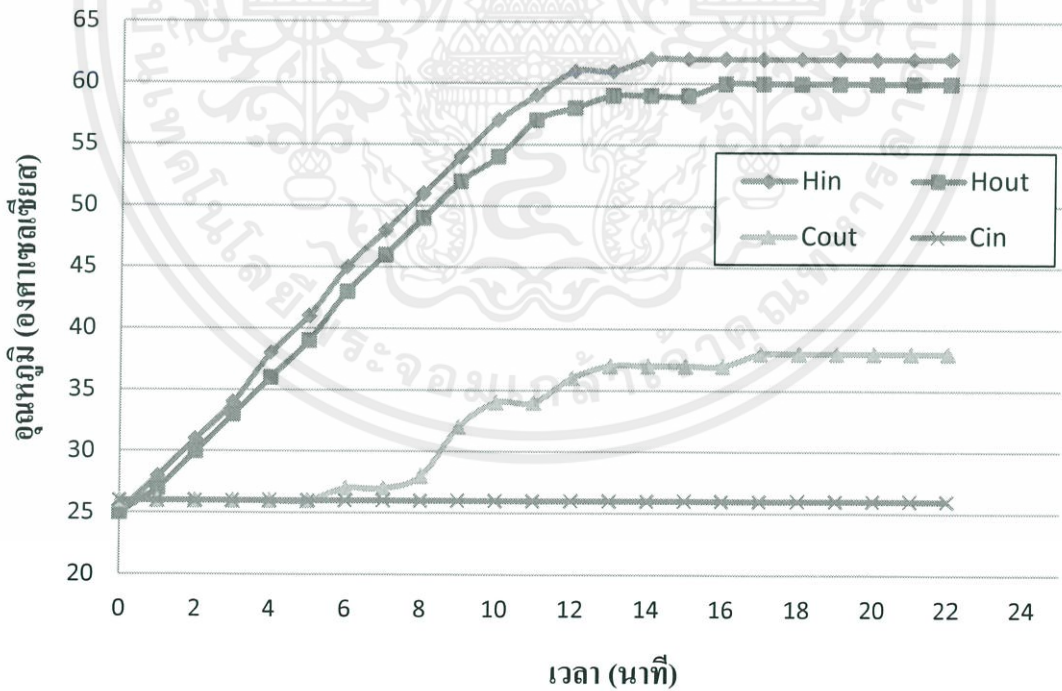
(b) ครั้งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ท่อความร้อนปกติ มุม 0 องศา อุณหภูมิสูงสุด 60°C



(a)



(b)

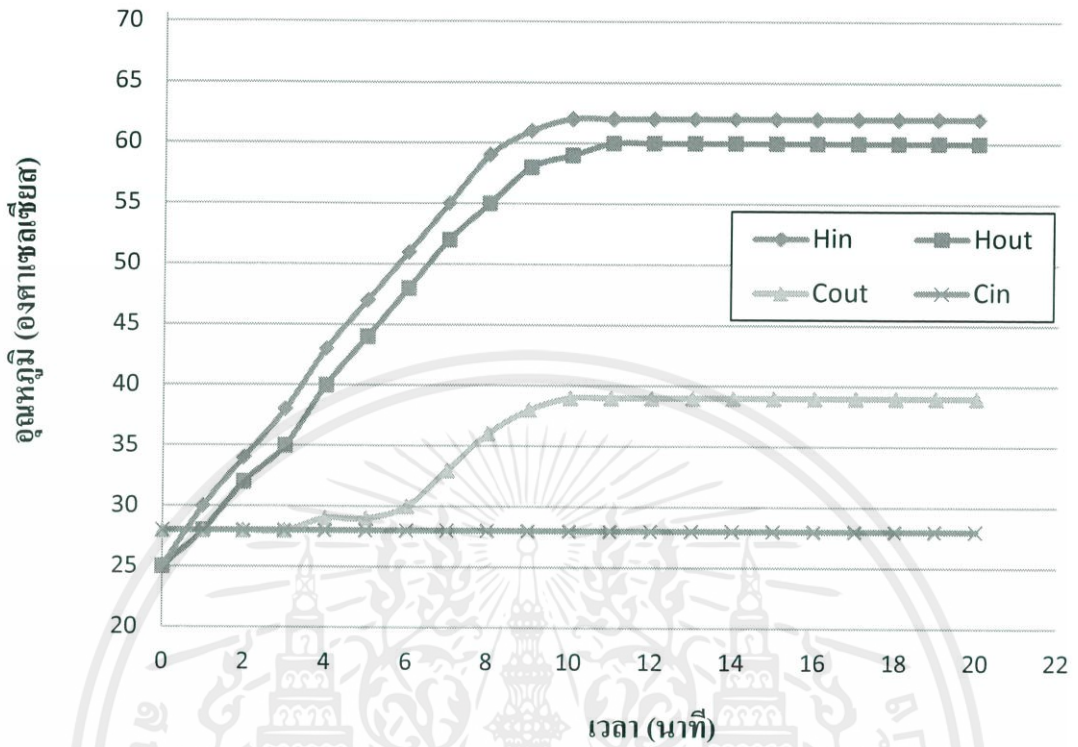
รูปที่ ข-11 ผลการบันทึกอุณหภูมิที่เวลาต่างๆ

(a) ครั้งที่ 1

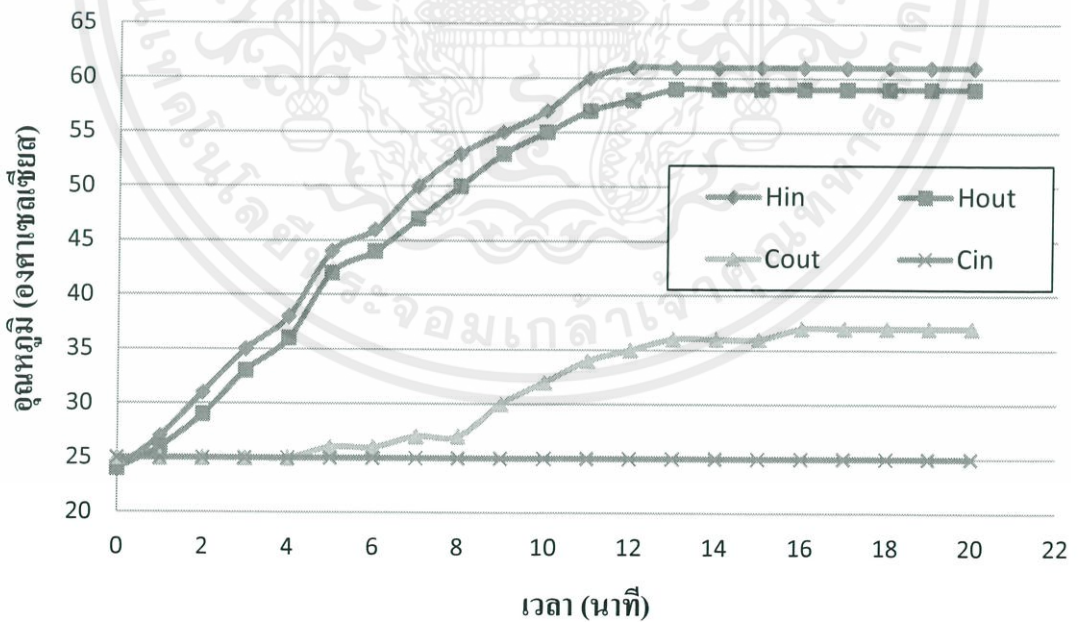
(b) ครั้งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ท่อความร้อนแบบปกติ มุม 5 องศา อุณหภูมิสูงสุด 60°C



(a)



(b)

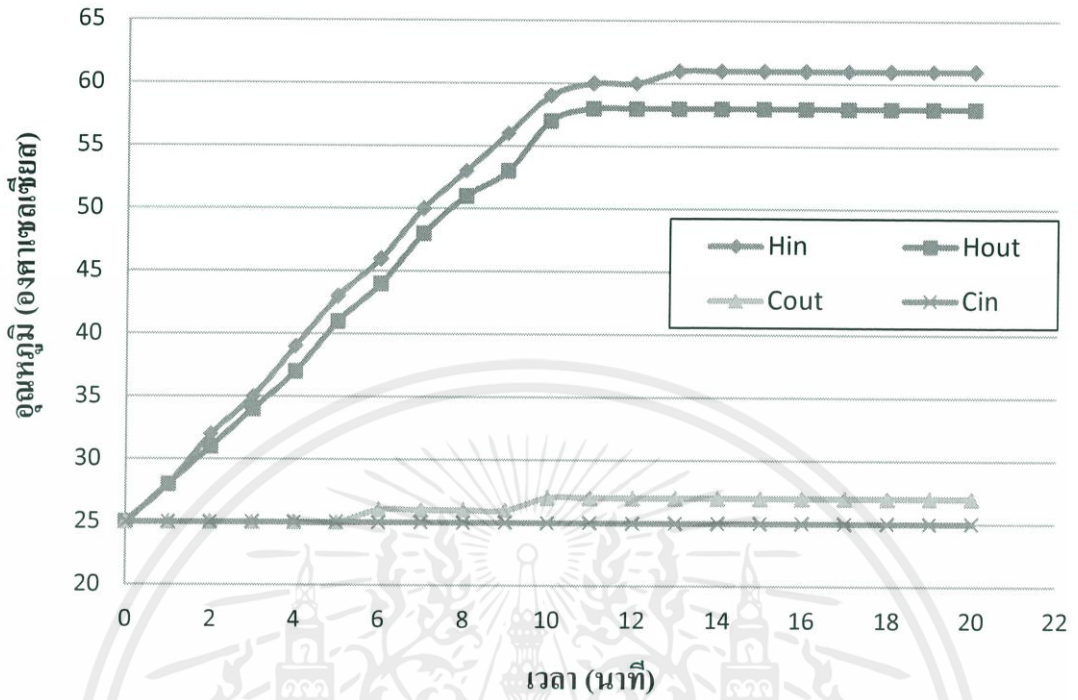
รูปที่ ข-12 ผลการบันทึกอุณหภูมิน้ำที่เวลาต่างๆ

(a) ครั้งที่ 1

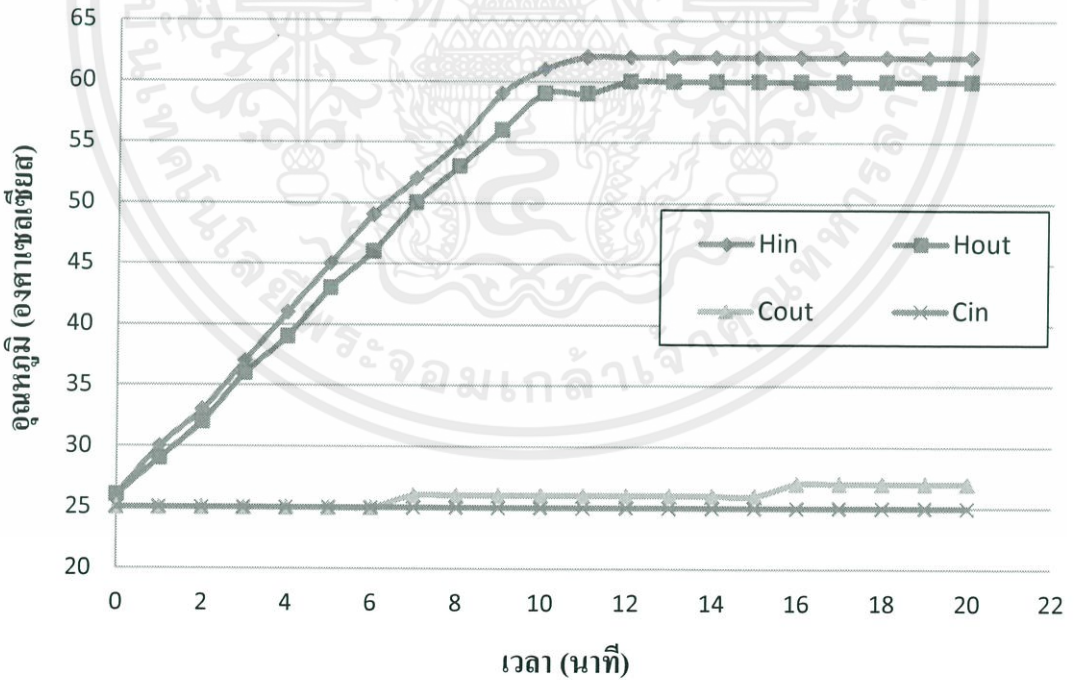
(b) ครั้งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ท่อความร้อนแบบปกติ มุม 45 องศา อุณหภูมิสูงสุด 60°C



(a)



(b)

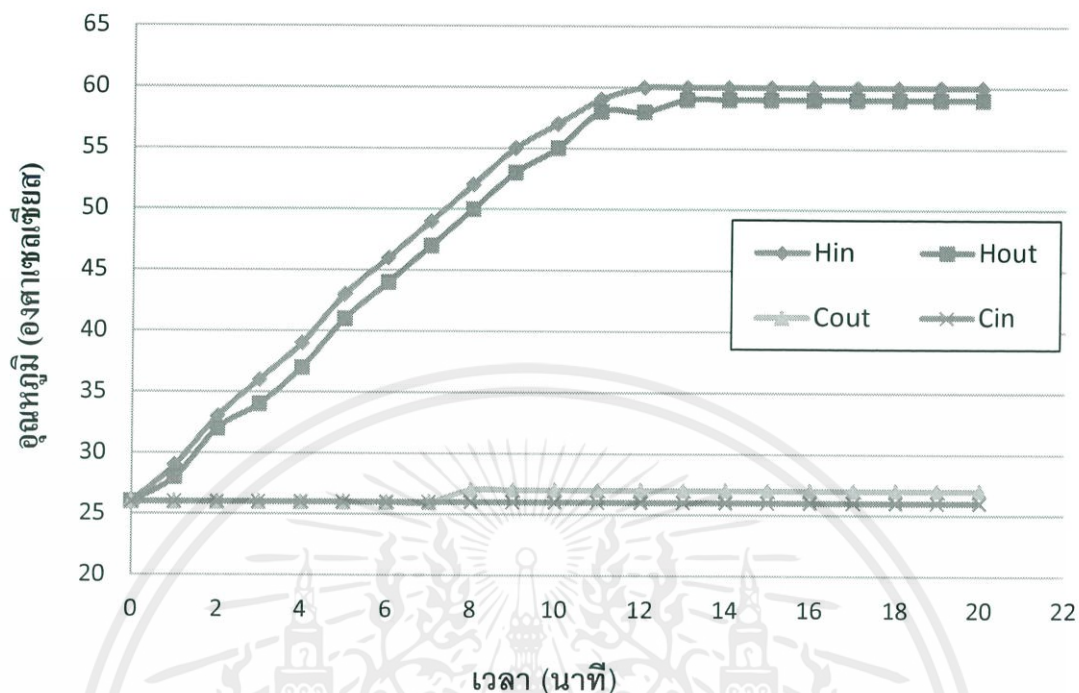
รูปที่ ข-13 ผลการบันทึกอุณหภูมิน้ำที่เวลาต่างๆ

(a) ครั้งที่ 1

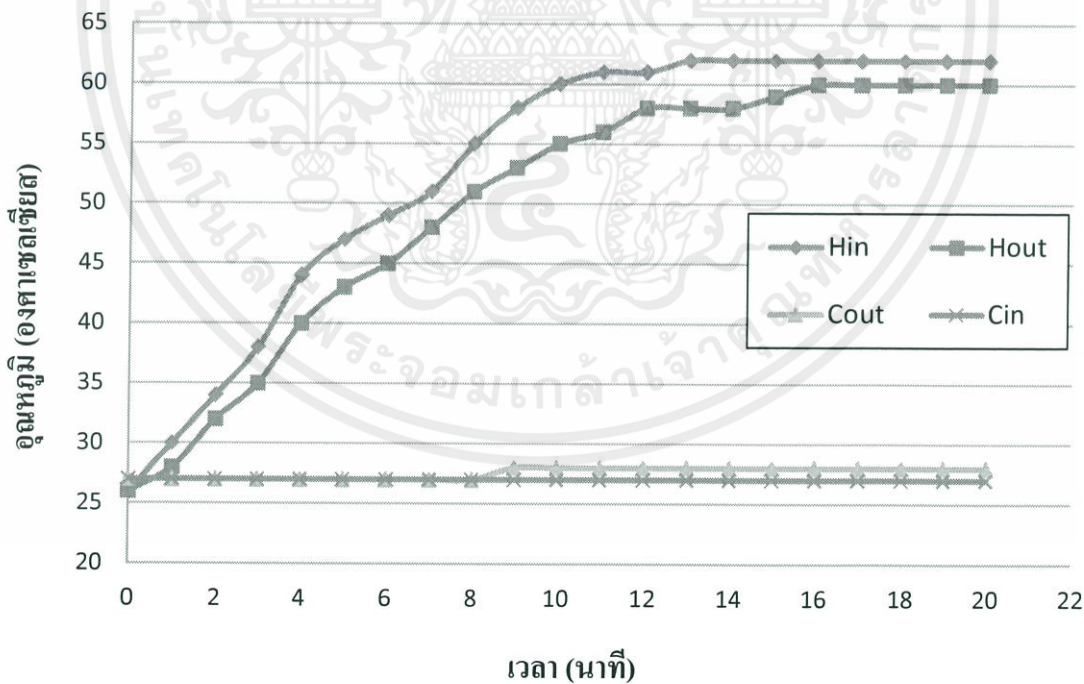
(b) ครั้งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ท่อความร้อนแบบปกติ มุม 90 องศา อุณหภูมิสูงสุด 60°C



(a)



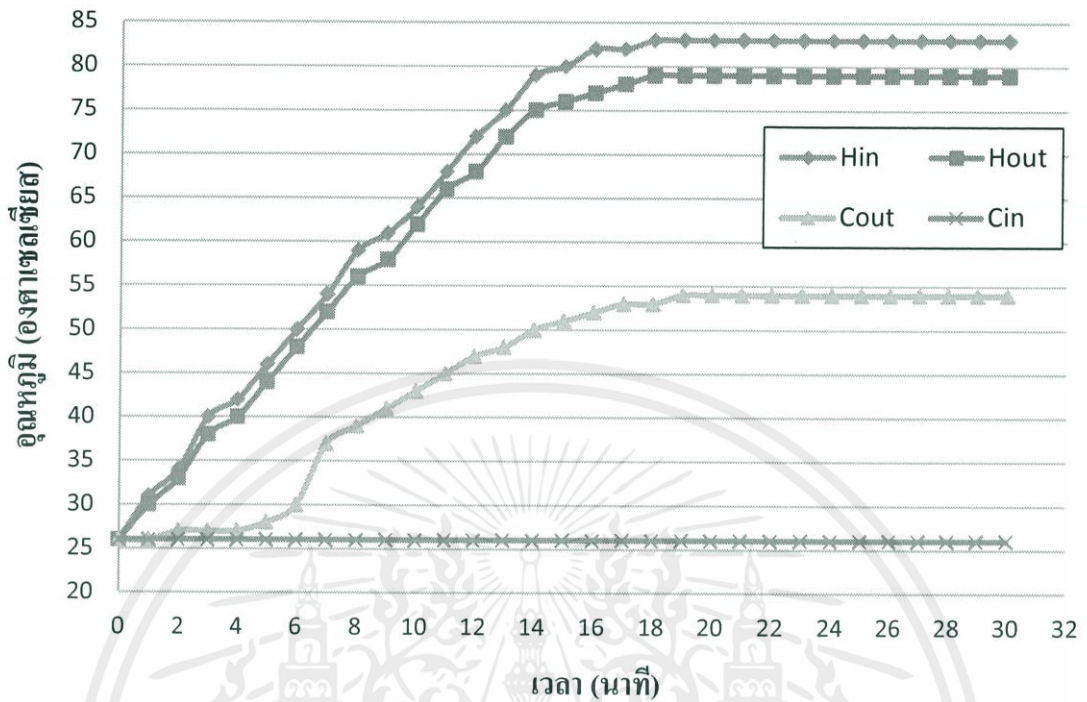
(b)

รูปที่ ข-14 ผลการบันทึกอุณหภูมิที่เวลาต่างๆ

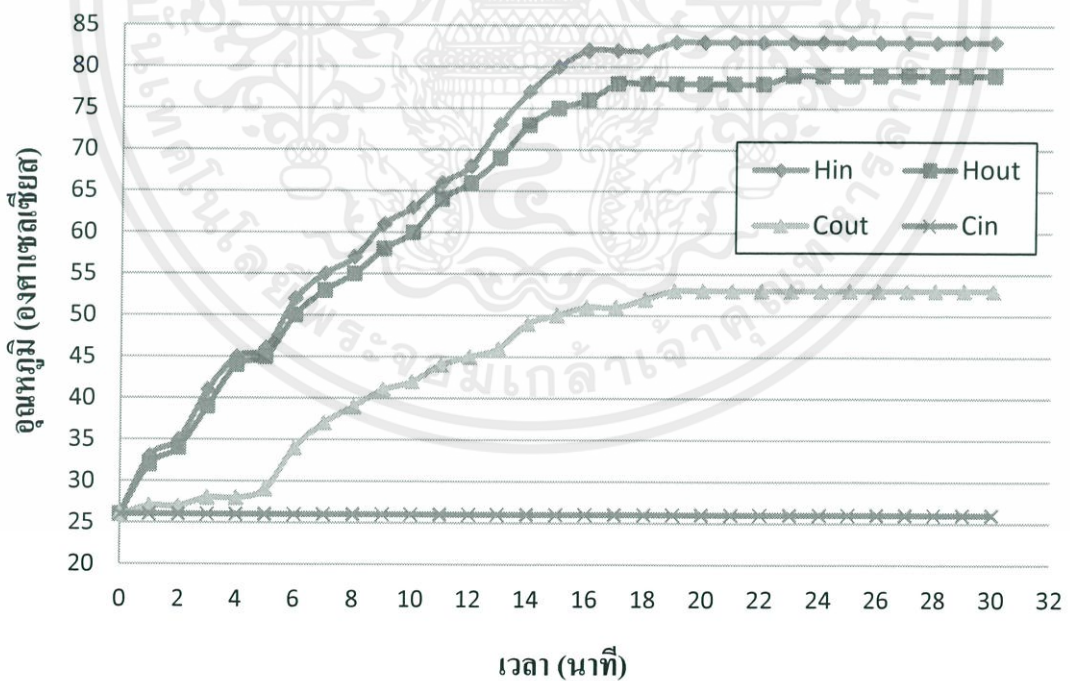
(a) ครั้งที่ 1 (b) ครั้งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ท่อความร้อนแบบ Gas-Loaded มุม -90 องศา อุณหภูมิสูงสุด 80°C



(a)



(b)

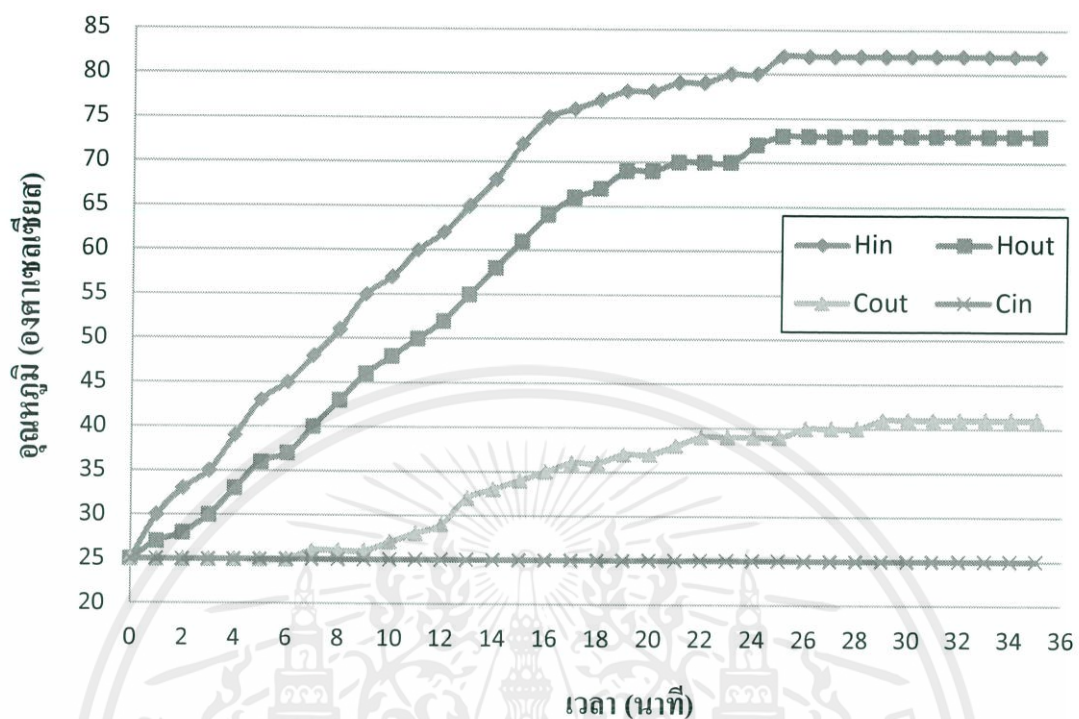
รูปที่ ข-15 ผลการบันทึกอุณหภูมิที่เวลาต่างๆ

(a) ครั้งที่ 1

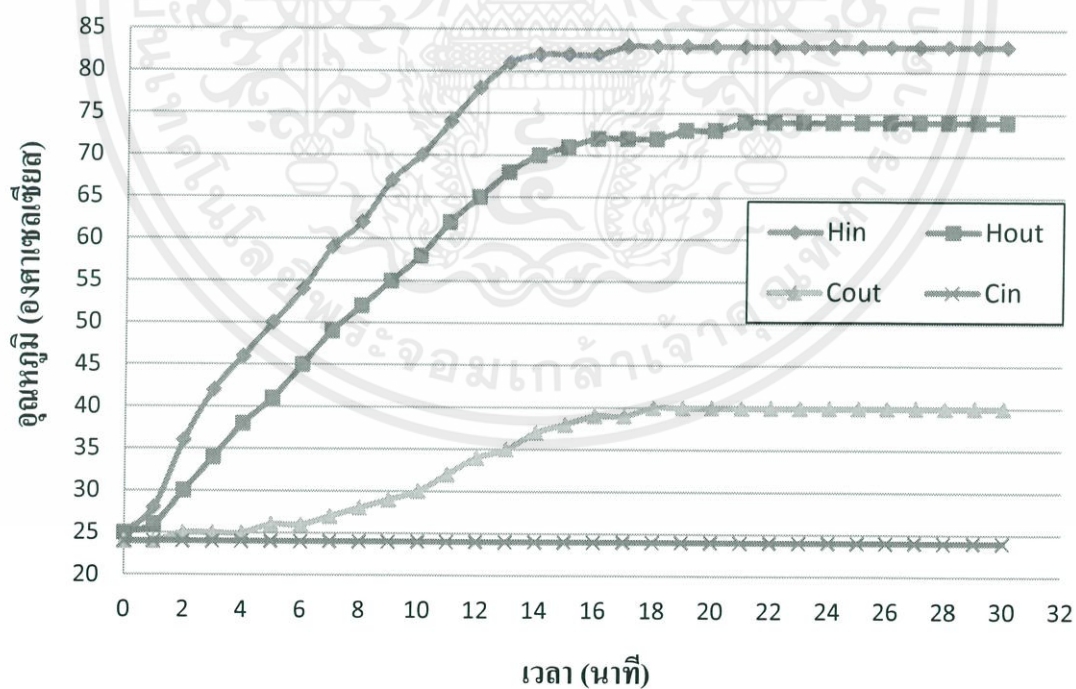
(b) ครั้งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ท่อความร้อนแบบปกติ มุม -90 องศา อุณหภูมิสูงสุด 80°C



(a)



(b)

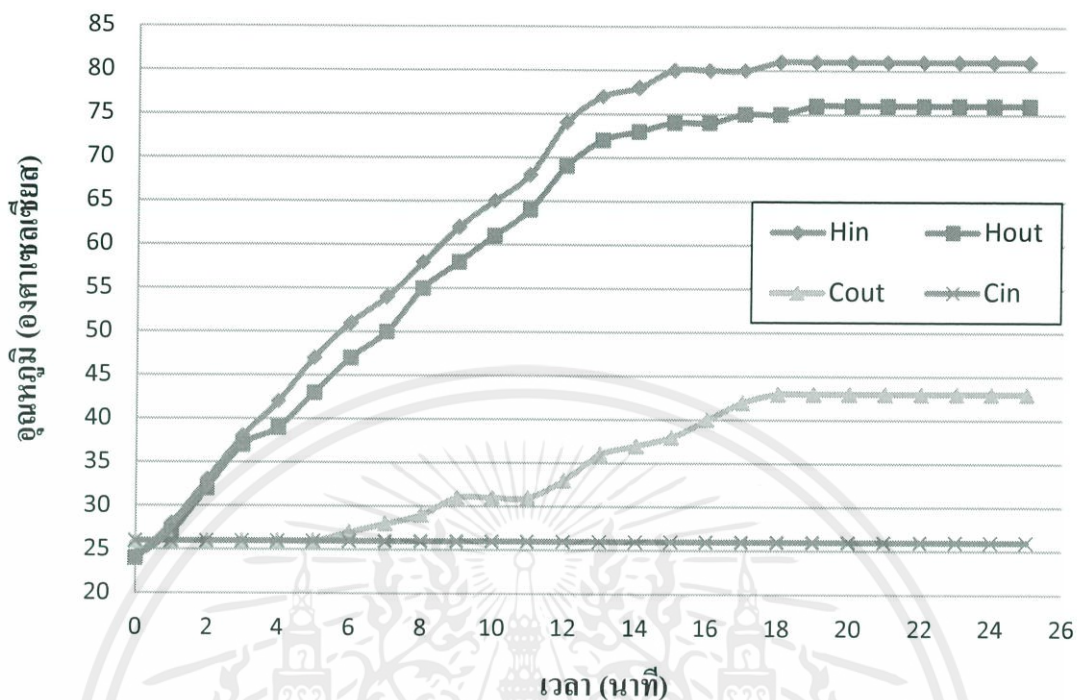
รูปที่ ข-16 ผลการบันทึกอุณหภูมิน้ำที่เวลาต่างๆ

(a) ครั้งที่ 1

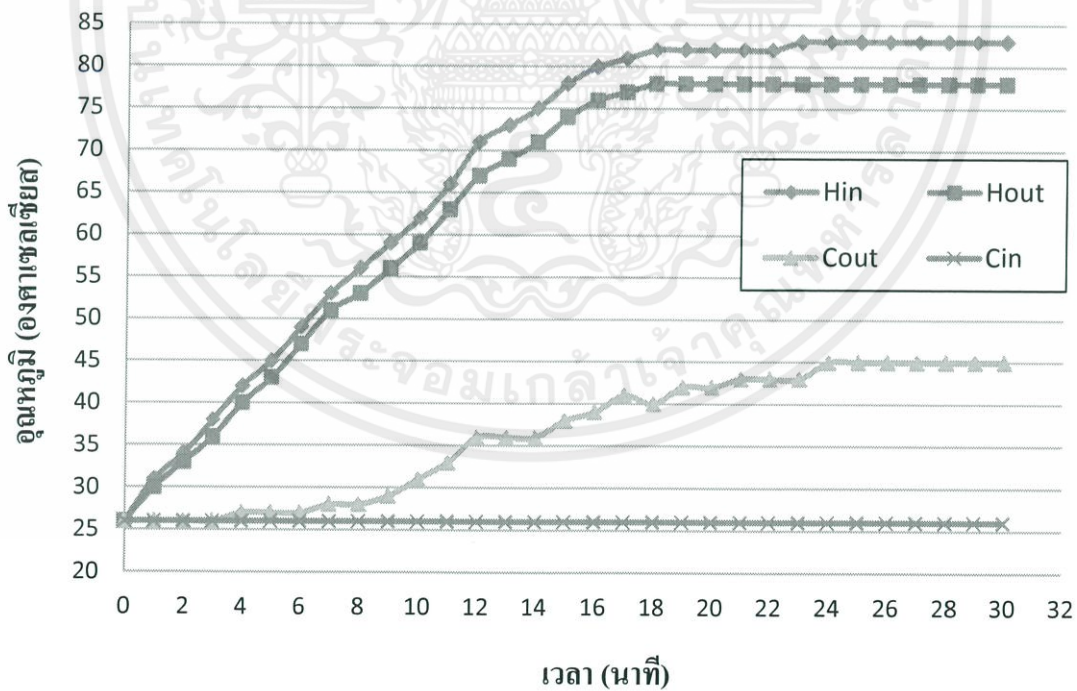
(b) ครั้งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ท่อความร้อนแบบปกติ มุม -45 องศา อุณหภูมิสูงสุด 80°C



(a)



(b)

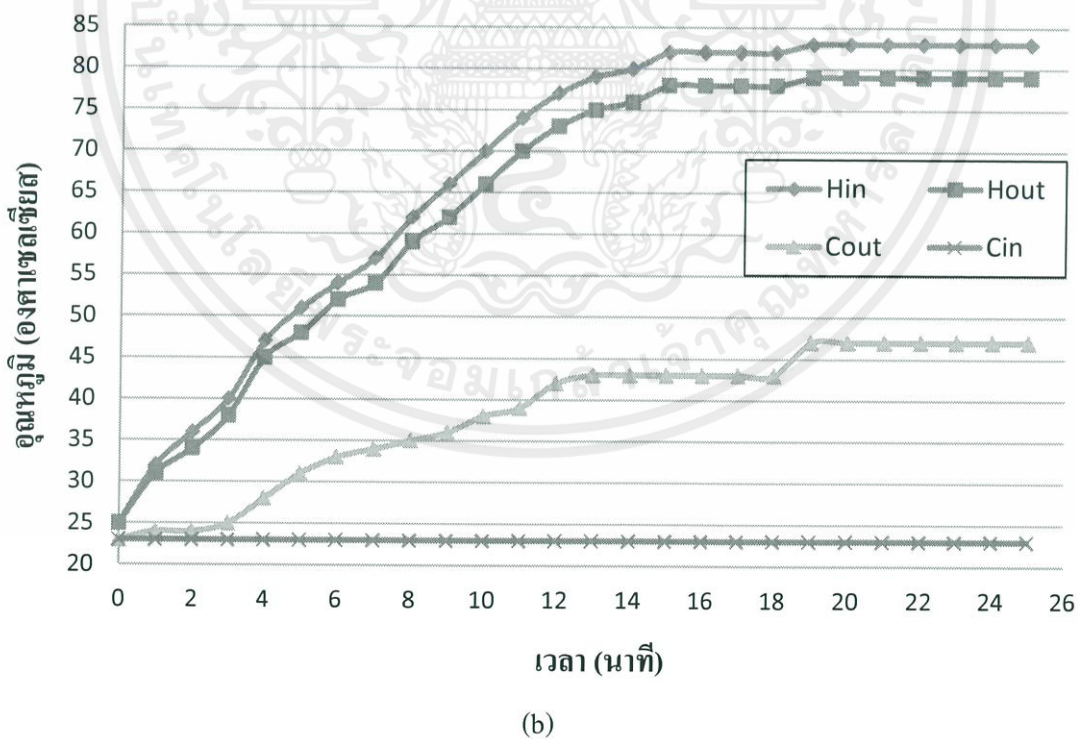
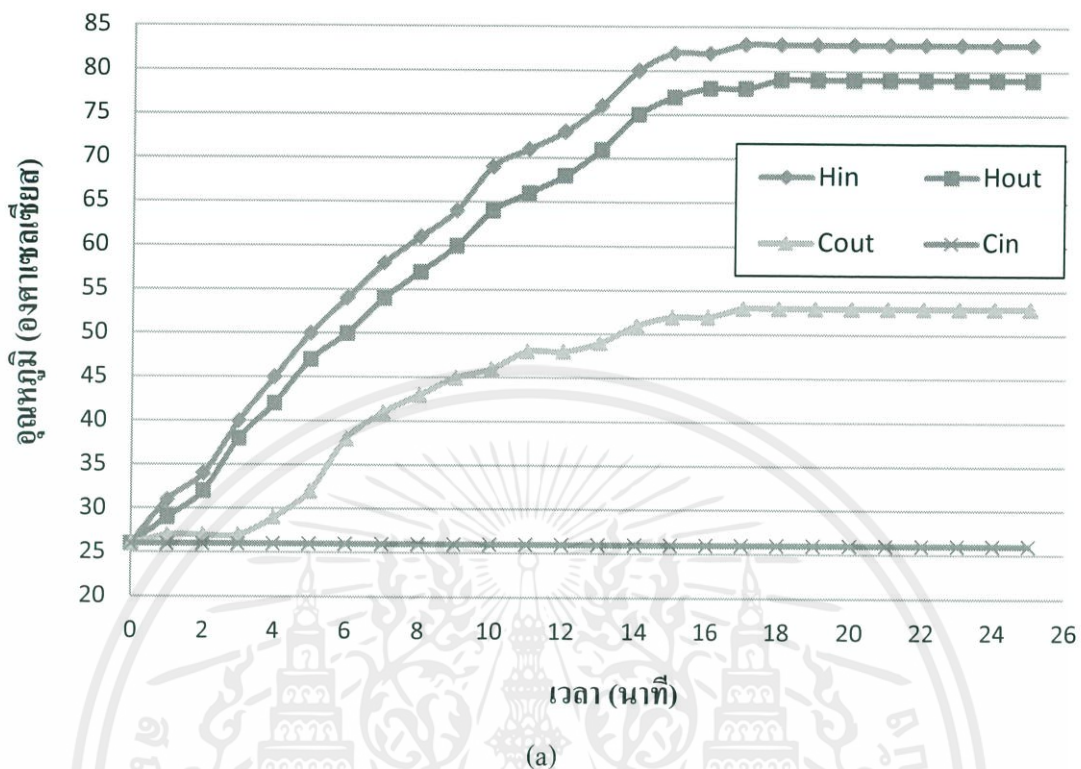
รูปที่ ข-17 ผลการบันทึกอุณหภูมิที่เวลาต่างๆ

(a) ครั้งที่ 1

(b) ครั้งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ท่อความร้อนแบบ Gas-Loaded มุม 0 องศา อุณหภูมิสูงสุด 80°C

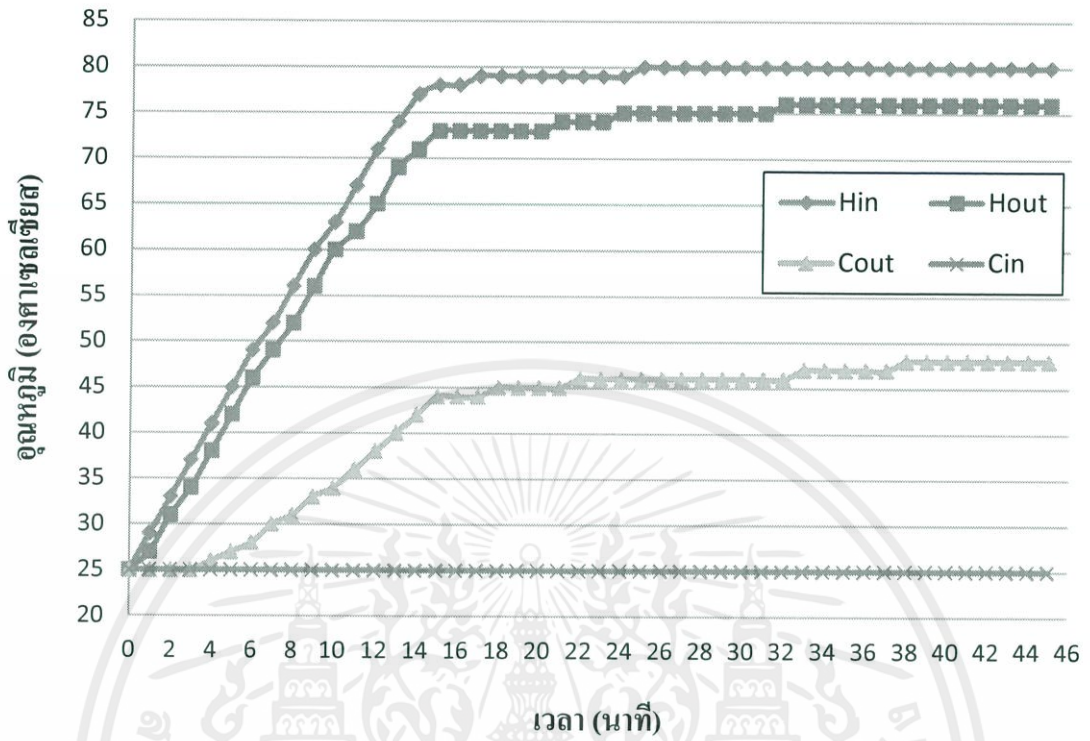


รูปที่ ข-18 ผลการบันทึกอุณหภูมิน้ำที่เวลาต่างๆ

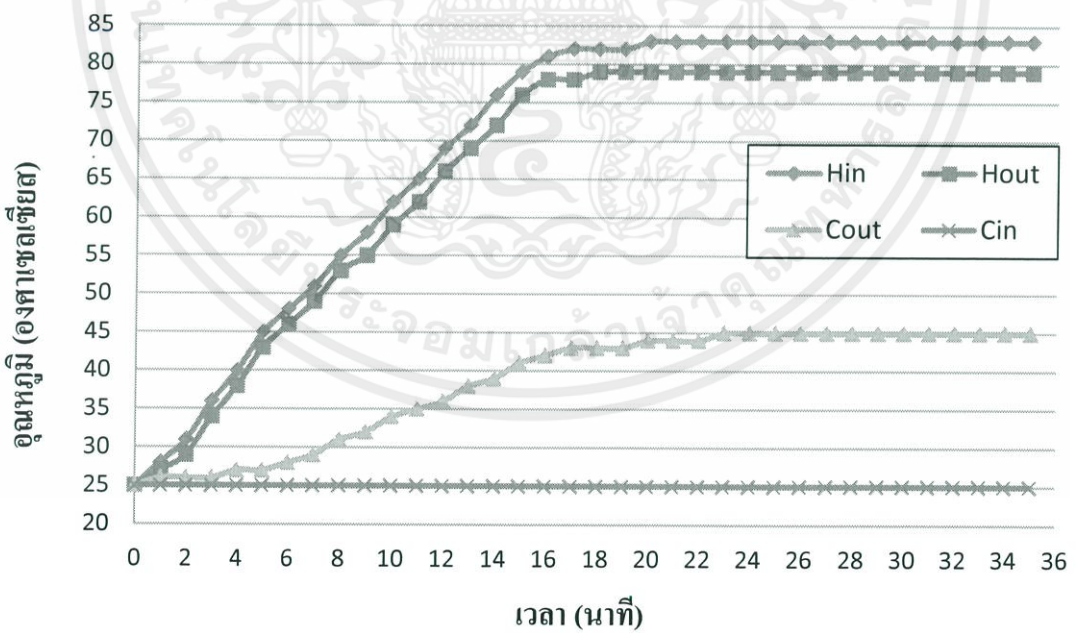
(a) ครั้งที่ 1 (b) ครั้งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ท่อความร้อนแบบปกติ มุม 0 องศา อุณหภูมิสูงสุด 80°C



(a)



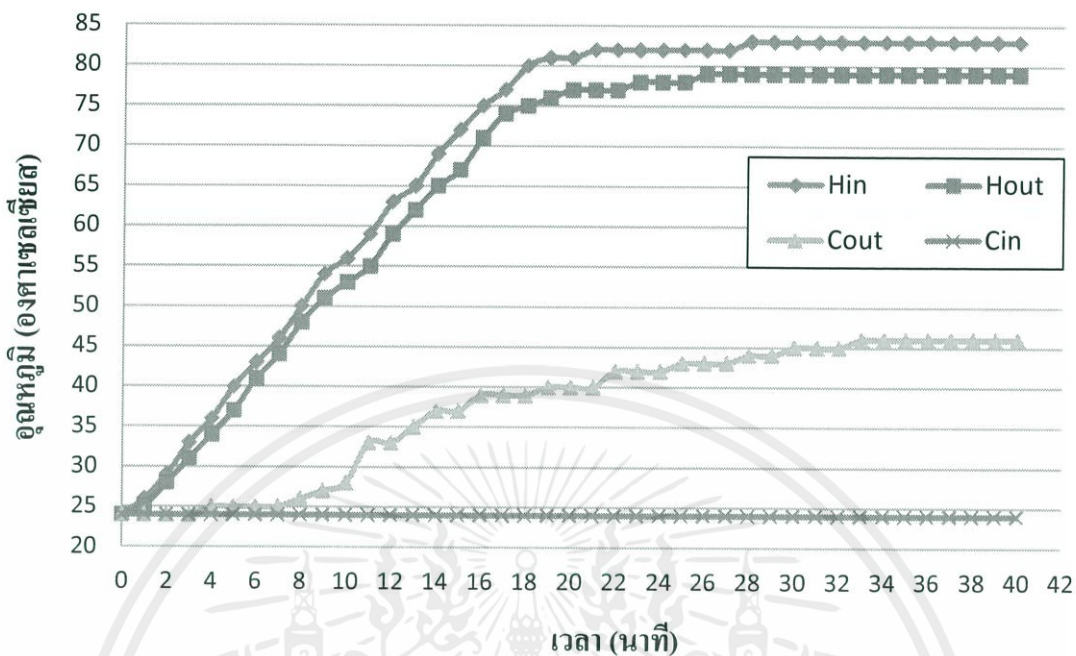
(b)

รูปที่ ข-19 ผลการบันทึกอุณหภูมิเวลาที่เวลาต่างๆ

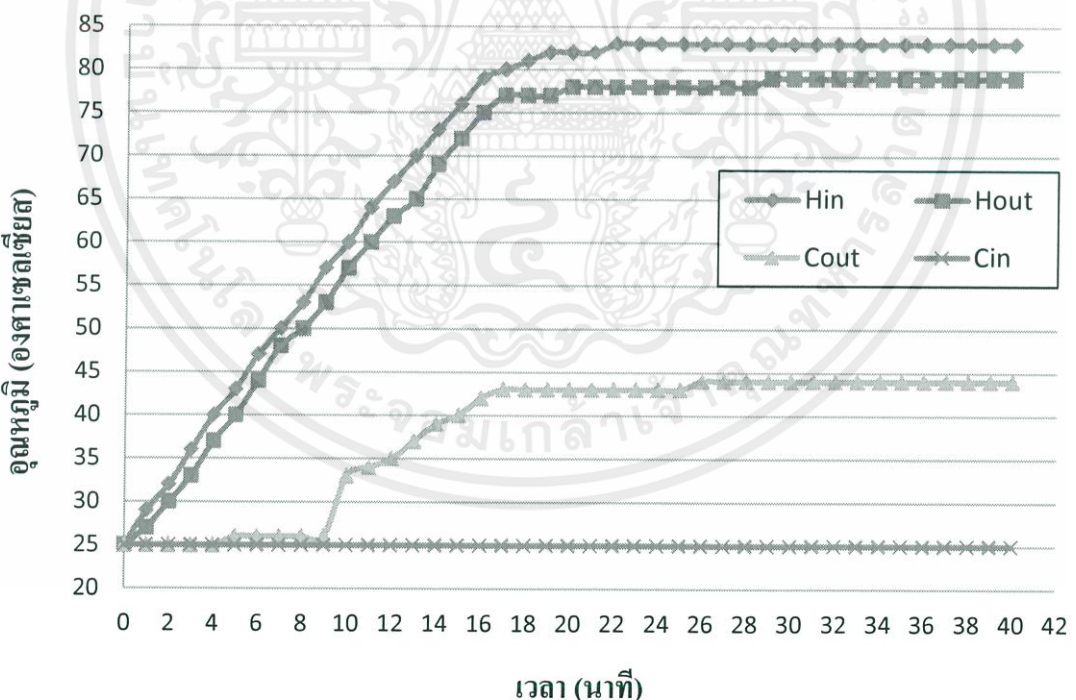
(a) ครั้งที่ 1 (b) ครั้งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ท่อความร้อนแบบปกติ มุม 5 องศา อุณหภูมิสูงสุด 80°C



(a)

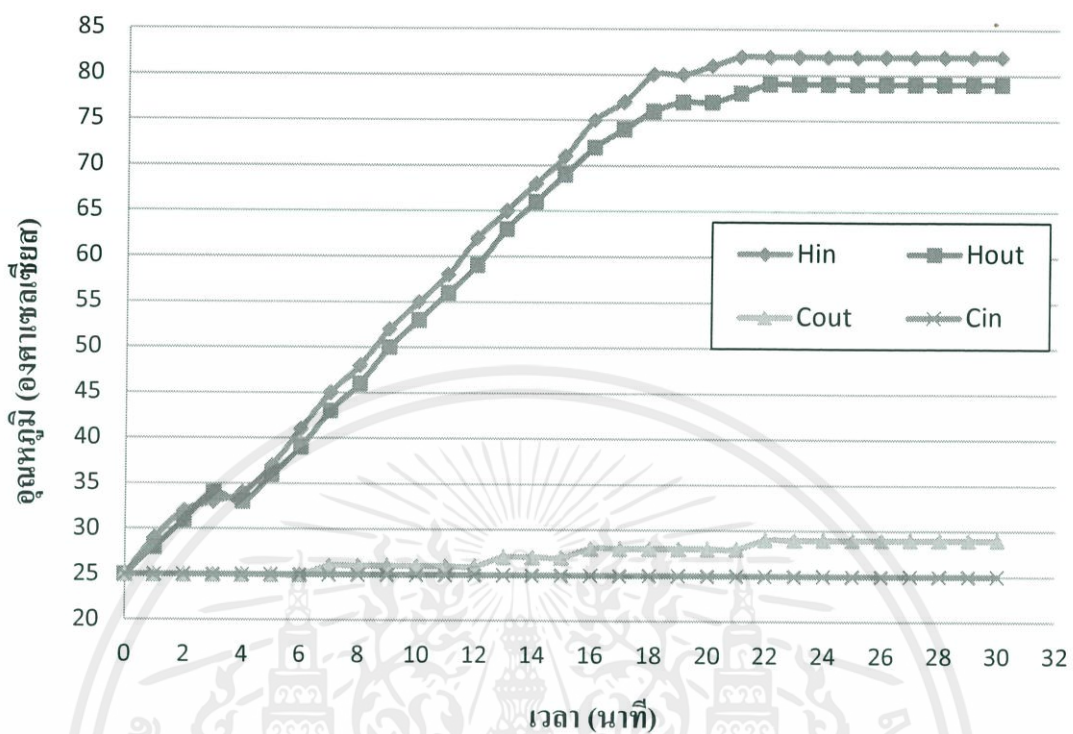


(b)

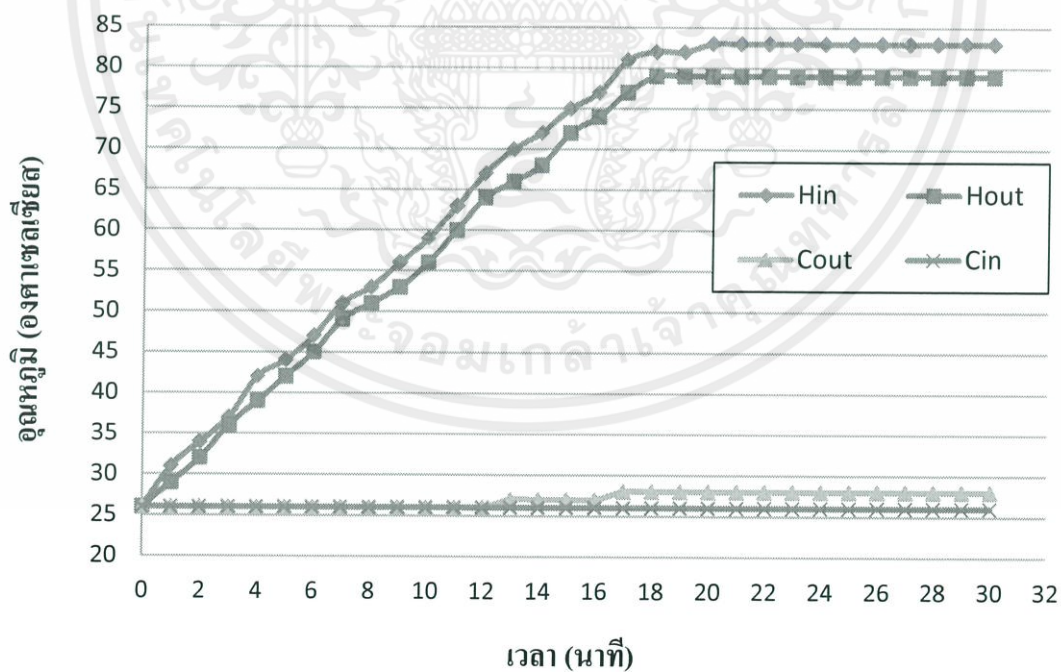
รูปที่ ข-20 ผลการบันทึกอุณหภูมิที่เวลาต่างๆ
(a) ครั้งที่ 1 (b) ครั้งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ท่อความร้อนแบบปกติ มุม 45 องศา อุณหภูมิสูงสุด 80°C



(a)



(b)

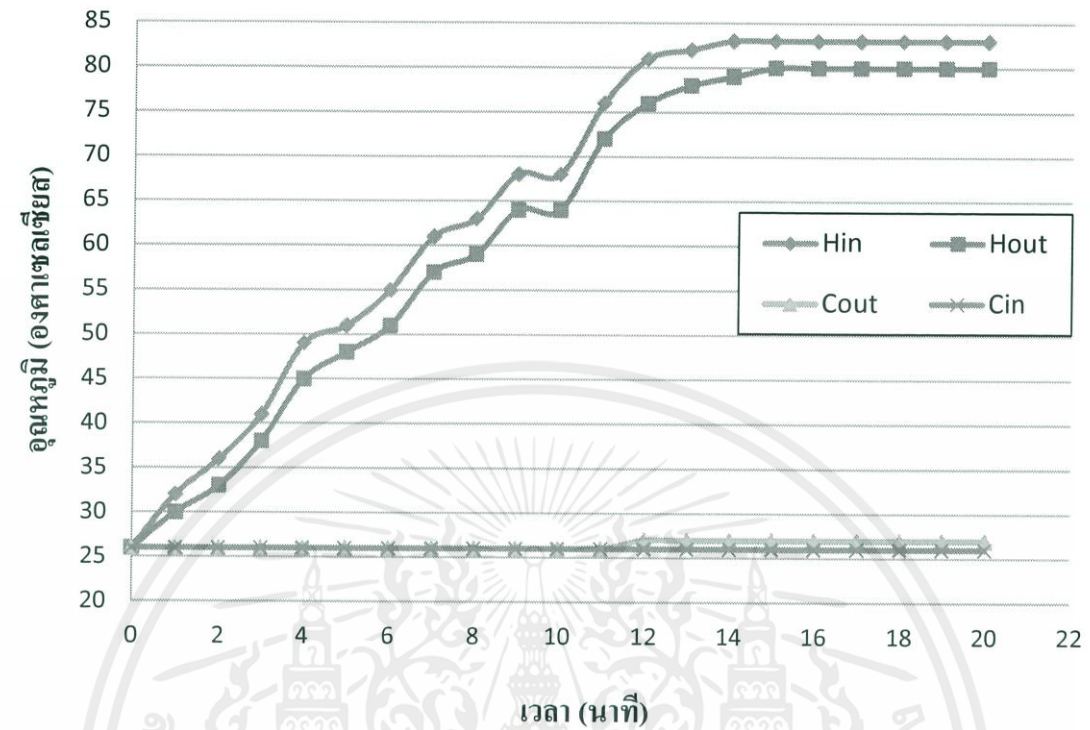
รูปที่ ข-21 ผลการบันทึกอุณหภูมิน้ำที่เวลาต่างๆ

(a) ครั้งที่ 1

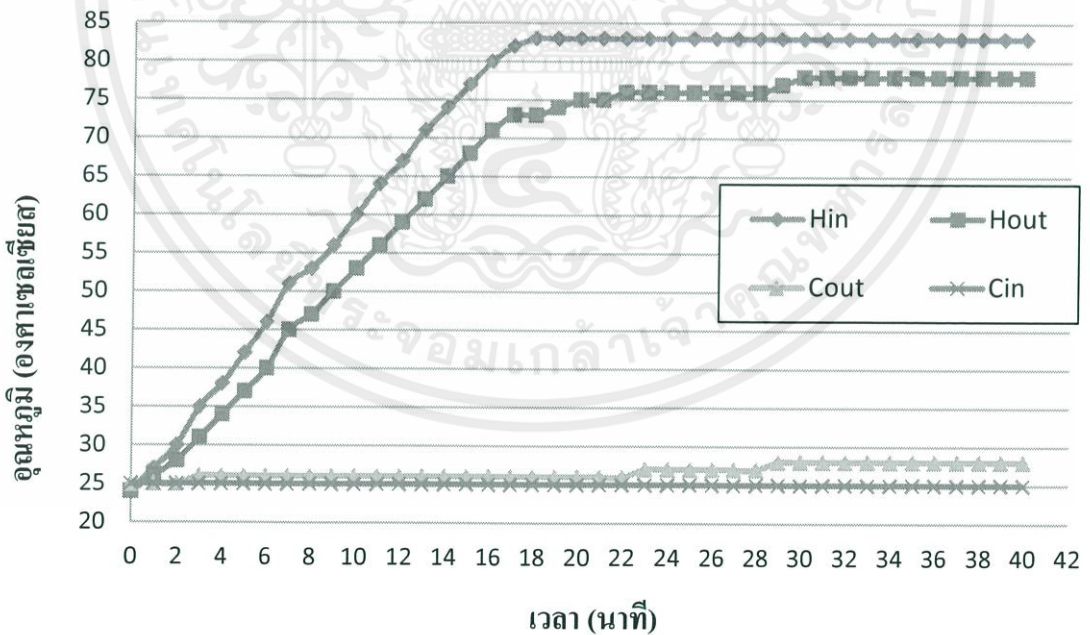
(b) ครั้งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ท่อความร้อนแบบปกติ มุม 90 องศา อุณหภูมิสูงสุด 80°C



(a)



(b)

รูปที่ ข-22 ผลการบันทึกอุณหภูมิที่เวลาต่างๆ

(a) ครั้งที่ 1

(b) ครั้งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก-1. การคำนวณปริมาตรของไหลทำงาน

ปริมาตรของของไหลทำงานที่ใส่ในท่อความร้อน จะคำนวณจากปริมาตรช่องว่างของโครงสร้างวัสดุพูน จากงานวิจัยของ R. Kempers และคณะ กล่าวว่าปริมาตรของไหลทำงานที่ส่งผลดีต่อประสิทธิภาพการถ่ายโอนความร้อนควรอยู่ในช่วง 100-120% ของปริมาตรรูพูนในวัสดุพูน ดังนั้นในที่นี้จึงกำหนดให้ปริมาตรของไหลเป็น 120% ของปริมาตรช่องว่างในโครงสร้างวัสดุพูน จำนวนได้ดังนี้

ปริมาตรของไหลทำงาน 100 % เท่ากับปริมาตรรูพูนในโครงสร้างวัสดุพูน

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

อัตราส่วนรูพูนของตะแกรงลวด (ε) จากตารางที่ 4

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

เมื่อ N คือ จำนวนรูพูนของโครงสร้างวัสดุพูนต่อหน่วยความยาว (2,755.9 เมตร)

d คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นลวด (0.000104 เมตร)

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

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

เมื่อ L_w คือ ความยาวของตะแกรงลวดสเตนเลส (0.3 เมตร)

d_i คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อความร้อน (0.01625 เมตร)

d_v คือ เส้นผ่านศูนย์กลางทางเดินเฟสไอ (0.015 เมตร)

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

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

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

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

ค-2. การคำนวณออกแบบท่อความร้อน

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 และอะซิโตนที่จัดจำกัดการถ่ายเทความร้อนประเภทต่างๆ พบว่า น้ำจะให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงสุด

ค-2.2 การเลือกวัสดุ

เมื่อพิจารณาความเข้ากันได้ของวัสดุและของไหลทำงาน โดยใช้ตารางที่ 2-2 จะได้ว่าเลือกใช้ ทองแดง เพราะมีความเข้ากันได้กับ น้ำ 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 จะนำไปหาอัตราส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลางกลางภายนอกต่อเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ ได้จากรูปที่ 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) ซึ่งหมายความว่าความหนาขั้นต่ำจึงมั่นใจได้ว่าท่อที่ใช้นี้จะทนแรงดันไอของสารทำงานได้

ค-2. 4 การออกแบบโครงสร้างวัสดุพอรุน

เลือกโครงสร้างวัสดุพอรุนเป็นแบบ ตะแกรงลวดละเอียด

สมมติให้ เส้นผ่านศูนย์กลางของทางเดินเฟสไอ = 0.6 นิ้ว

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

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

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

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

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น } QL &= (456) \left[(0.5)(0.3) \left(\frac{4.5}{10} \right) + (0.3) \left(\frac{1}{10} \right) + (0.5)(0.3) \left(\frac{4.5}{10} \right) \right] \\ &= 75.24 \text{ Wm} \end{aligned}$$

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 สำหรับท่อที่เลือกให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางของทางเดินเฟสไอ เป็น 0.6 นิ้ว ซึ่งจากรูปที่ 2-9 จะได้ค่าอัตราการถ่ายโอนความร้อนประมาณ 100,000 Btu/h ซึ่งมากกว่า ค่าที่ตั้งไว้ที่ 1,500 Btu/h

- ความหนาของชั้นโครงสร้างวัสดุพอรุน

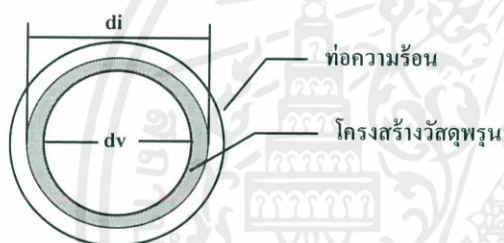
ความหนาของชั้นโครงสร้างวัสดุพอรุนดังแสดงในรูป ค-1 สามารถหาได้จาก

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

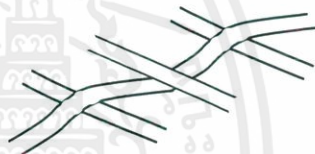
ความหนาเส้นลวดของตะแกรงละเอียด = 1.04×10^{-4} เมตร

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

หลังจากได้ลักษณะโครงสร้างของท่อความร้อนจากการออกแบบแล้ว จึงนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาขีดจำกัดความร้อนแต่ละประเภทเพื่อประมาณค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนต่อไป

ค-3. ตัวอย่างการคำนวณค่าขีดจำกัดความร้อนประเภทต่างๆ

สมมติฐาน : ให้การกระจายตัวของการถ่ายเทความร้อนมีความสม่ำเสมอตลอดแนวยาวท่อ กำหนดอุณหภูมิที่ใช้งานเป็น 80°C หรือ 333.15 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

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

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

σ คือ สัมประสิทธิ์แรงตึงผิว (0.0627 นิวตัน/เมตร)

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

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

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

เมื่อ ΔP_{\perp} มีผลมาจากแรงโน้มถ่วงของโลก และสามารถคำนวณหาได้จากสมการ 15

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

เมื่อ ρ_l คือ ความหนาแน่นของของเหลว (977.4096 กิโลกรัม/เมตร³)

g คือ แรงโน้มถ่วงของโลก (9.81 เมตร/วินาที²)

d_v คือ เส้นผ่านศูนย์กลางกลางทางเดินเฟสไอ (0.015 เมตร)

ψ คือ มุมการวางท่อความร้อนจากแนวระดับ (0 องศา)

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

$$\text{ดังนั้น } P_{cm,e} = 547.1850 \text{ นิวตัน/เมตร}^2$$

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

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

เมื่อ L_l คือ ความยาวรวมของท่อความร้อน (0.3 เมตร)

F_l คือ สัมประสิทธิ์แรงต้านทานการไหลในเฟสของเหลว

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

เมื่อ μ_l คือ ความหนืดของของเหลว (3.62×10^{-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 (3.0632×10^{-5} เมตร²)

λ 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

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

เมื่อ $(f_v Re_v)$ คือ สัมประสิทธิ์แรงต้าน ที่การไหลแบบลามินาร์มีค่าเท่ากับ 16

μ_v คือ ความหนืดของไอ (1.0937×10^{-5} ปาสคาล-วินาที)

$r_{h,v}$ คือ ค่ารัศมีไฮดรอลิก สำหรับโครงสร้างวัสดุพอร์นที่เป็นตะแกรงลวดละเอียด

เป็น

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

A_v คือ พื้นที่หน้าตัดทางเดินเฟสไอ (1.7676×10^{-4} เมตร²)

ρ_v คือ ความหนาแน่นของไอ (0.1106 กิโลกรัม/เมตร³)

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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)

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

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 γ_v คือ อัตราส่วนความร้อนจำเพาะของไอ (1.3280)

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

T_v คือ อุณหภูมิที่ใช้งาน (353.15 K)

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

ค-3.3. การคำนวณหาอัตราการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากขีดจำกัดของเหลวหลุดลอยตามไอ

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

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

ค-3.4. การคำนวณหาอัตราการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากขีดจำกัดการเดือด

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ k_c คือ ค่าการนำความร้อนประสิทธิผล จากตารางที่ 6

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

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

ตามทฤษฎีในบทที่ 2 หัวข้อ 2.6.4 ชีดจำกัดการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากชีดจำกัดประเภทต่างๆ ได้กล่าวไว้ว่า อัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนที่สภาวะหนึ่งๆ จะมีค่าเท่ากับชีดจำกัดที่มีค่าน้อยที่สุดในบรรดาชีดจำกัดทั้ง 4 ซึ่งค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนสำหรับชีดจำกัดที่น้อยที่สุด ที่อุณหภูมิใช้งาน 60 °C และ 80 °C ของแนวองศาการวางท่อความร้อนต่างๆ แสดงไว้ดังตารางที่ ง-1 ดังนี้

ตารางที่ ก-1 ตารางแสดงอัตราการถ่ายเทความร้อนจากการคำนวณ

แนวองศาการวาง ท่อความร้อน(องศา)	อุณหภูมิ 80 °C	
	ประเภทชีดจำกัด	อัตราการถ่ายเทความร้อน(วัตต์)
-90	Q_E	2,100.83
-45	Q_E	2,100.83
0	Q_C	456.69
5	Q_C	248.12
45	Q_C	-1,264.06
90	Q_C	-1,821.71

ก-4 ตัวอย่างการคำนวณค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนในชุดทดสอบประสิทธิภาพ

ในการทดสอบประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนจะใช้น้ำที่อุณหภูมิห้องแลกเปลี่ยนกับส่วนควบแน่นและใช้น้ำร้อนที่อุณหภูมิ 60°C และ 80°C ให้ความร้อนกับส่วนระเหยซึ่งสามารถคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนได้โดยใช้สมการ 40

$$Q = mc\Delta T \quad (2-25)$$

เมื่อ Q คือ อัตราการถ่ายเทความร้อน (วัตต์)

m คือ อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำ (ลิตรต่อชั่วโมง)

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย อุณหภูมิที่ใช้เป็นอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำขาเข้าและน้ำขาออก

ΔT คือผลต่างของอุณหภูมิของน้ำขาเข้าและน้ำขาออก (เคลวิน)

กำหนดให้ อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำเป็น 7.98 ลิตรต่อชั่วโมง

อุณหภูมิของน้ำขาเข้าเป็น 29 °C

อุณหภูมิของน้ำออกเข้าเป็น 43 °C

ดังนั้น ผลต่างอุณหภูมิจะเป็น $43-29= 14$ °C

ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำ 36 °C เป็น 4.2 kJ/kg K

$$\text{ดังนั้น } Q = \frac{7.98 \times 4.2 \times 14 \times 1,000}{3,600} = 130.34 \text{ วัตต์}$$





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 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	ψ	0	degree		
wick structure	Stainless steel				
number of mesh	N	70	mesh	2755.9	m^{-1}
wire diameter	d	0.000104	m		
viod fraction	ε	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	ρ_L	987.1141			
viscosity of liquid	μ_L	4.67E-04			
thermal conductivity	kL	0.65284	W/mK		
surface tension coefficient	σ	0.06624	N/m		
latent heat of vapor	λ	2,366,110			
density of vapor	ρ_v	0.1106			
viscosity of vapor	μ_v	1.09E-05			
molecular weight	mw	18			
vapor specific heat ratio	γ_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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการคำนวณออกแบบท่อความร้อน จะต้องใช้สมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของของไหลทำงาน ซึ่งในการทดลองนี้คือ น้ำ เพื่อคำนวณหาขีดจำกัดการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อน โดยสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของน้ำในแต่ละสถานะ แสดงดังรูป

6/2/2556

เส้นนำอิมตัว : Sprax Sarco Thailand

Inputs

Output

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/m³

Specific Volume of Water (v) 1.01531E-03 m³/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)

6/2/2556

ขอบเขตไอรอนยิ่งยวด : Sprax Sarco Thailand

Inputs

Output

Pressure and Superheat Temperature

Single Value 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/m³

Specific Volume of Steam (v) 9.04230 m³/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_p) 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

รูปที่ จ-2 คุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของไอรอนยิ่งยวดที่ที่ความดัน 0.01693 MPa

อุณหภูมิ 60°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6/272566

ขอบเขตไอออนยิ่งยวด : Spirax Sarco Thailand

Inputs

Pressure and Superheat Temperature

Output

 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/m³Specific Volume of Steam (v)

9.59587

m³/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_p)

1.44337

kJ/ka K

รูปที่ จ-3 คุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของไอออนยิ่งยวดที่ความดัน 0.01693 MPa อุณหภูมิ 80°C

