

บทที่ 3

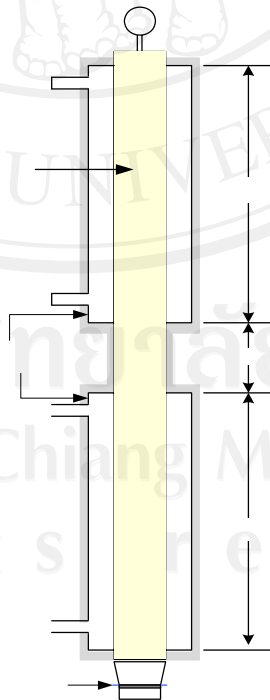
ขั้นตอนการวิจัย

ขั้นตอนการศึกษาวิจัย การออกแบบการทดลอง รายการวัสดุอุปกรณ์ในการจัดสร้างชุดทดสอบและวิธีการทดสอบต่อความร้อนเทอร์โมไซฟอนและระบบอุลตราโซนิก ตลอดจนสมการคำนวณในการวิเคราะห์ผลการทดสอบ ได้นำเสนอไว้ดังต่อไปนี้

3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

3.1.1 ท่อความร้อนเทอร์โมไซฟอน

ท่อเทอร์โมไซฟอนที่ใช้ในการทดสอบทำจากท่อทองแดง มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 27.75 mm หนา 1.3 mm โดยจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนทำระเหย ส่วนอะเดียแบติก และส่วนควบแน่น ดังรูปที่ 3.1 โดยส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นจะเชื่อมติดกับกระบอกน้ำ (Water Jacket) ซึ่งทำจากท่อทองแดง เพื่อทำหน้าที่หมุนเวียนของไหลถ่ายโอนความร้อนกับท่อเทอร์โมไซฟอน ซึ่งมีความยาวเท่ากัน คือ 0.5 m และส่วนอะเดียแบติกมีความยาว 0.20 m ปลายด้านส่วนระเหยมีหัวกำเนิดคลื่นอุลตราโซนิกติดตั้งอยู่ ปลายด้านบนหรือส่วนควบแน่นติดวาล์วถูกสุญญากาศไว้สำหรับเติมสารทำงาน และติดวาล์วความดันเพื่อวัดความดันภายในท่อเทอร์โมไซฟอน และกระบอกน้ำ ถูกหุ้มด้วยฉนวนเพื่อป้องกันการถ่ายเทความร้อนกับสิ่งแวดล้อม



รูปที่ 3.1 ลักษณะท่อเทอร์โมไซฟอนที่ใช้ในการทดสอบ

3.1.2 ชุดระบบอัลตราโซนิก

ชุดอุปกรณ์กำเนิดคลื่นอัลตราโซนิก ประกอบด้วยหัวกำเนิดคลื่นอัลตราโซนิกและเครื่องควบคุมการจ่ายกำลังให้กับหัวอัลตราโซนิก โดยใช้กำลังไฟฟ้าสูงสุด 140 W กำเนิดคลื่นความถี่สูงสุด 40 kHz และเครื่องควบคุมการจ่ายกำลังมีพัลลวขนาด 22 W จำนวน 1 ตัว จ่ายลมให้กับวงจรควบคุมเพื่อระบายความร้อน ชุดระบบอัลตราโซนิกแสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ภาพถ่ายแสดงอุปกรณ์ควบคุมระบบอัลตราโซนิก

3.1.3 อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ

3.1.3.1 ชุดระบบให้ความร้อน

ประกอบด้วยอ่างให้ความร้อนทำจาก แผ่นสแตนเลส ขนาด 50 cm x 50 cm x 45 cm หรือ มีปริมาตร 112.5 L โดยใช้น้ำเป็นสารทำงาน มีขดลวดความร้อน ขนาด 1 kW จำนวน 6 ตัว เป็นตัวให้ความร้อน ตัวควบคุมอุณหภูมิความร้อนในอ่างซึ่งมีค่าความถูกต้อง $\pm 0.4^{\circ}\text{C}$ ใช้ป้อนในการหมุนเวียนน้ำจากอ่างน้ำร้อนเพื่อให้ความร้อนกับส่วนทำระเหย ความเร็วรอบ 3,000 rpm ขนาดกระแสไฟฟ้า 5 Amp ความสูงหัวน้ำ 23-38.5 m โดยมีปริมาตรการไหล 30-80 L/min



รูปที่ 3.3 ภาพถ่ายระบบให้ความร้อน

3.1.3.2 ชุดระบบน้ำเย็น

ประกอบด้วยเครื่องทำความเย็น เครื่องสูบลม และอ่าง โดยใช้น้ำเป็นสารทำงานและมีตู้ควบคุมอุณหภูมิน้ำเย็นในอ่าง ซึ่งถูกควบคุมให้คงที่ที่ 25°C โดยมีค่าความถูกต้อง $\pm 2^{\circ}\text{C}$ อ่างทำความเย็นทำจากแผ่นสแตนเลส มี ปริมาตร 98 L ซึ่งบรรจุคอยล์เย็นไว้ในอ่าง ป้อนหมุนเวียนน้ำจากอ่างน้ำเย็นเพื่อรับความร้อนส่วนควบแน่น มีความเร็วรอบ 3,000 rpm ต้องการกระแสไฟฟ้า 5.5 Amp ความสูงหัวน้ำ 15-33 m ที่ปริมาตรการไหล 20-100 L/min



รูปที่ 3.4 ภาพถ่ายชุดระบบความเย็น

3.1.4 อุปกรณ์วัดข้อมูล

3.1.4.1 เครื่องเก็บข้อมูล (Data Logger)

เครื่องเก็บข้อมูลทำหน้าที่อ่านอุณหภูมิ โดยใช้ร่วมกับสายวัดเทอร์โมคัปเปิลชนิด K แสดงดังรูปที่ 3.5 ผลิตจากบริษัท TASK ค่าความถูกต้อง $\pm 0.01^{\circ}\text{C}$



รูปที่ 3.5 ภาพถ่ายเครื่องเก็บข้อมูลทดสอบ

3.1.4.2 สายวัดอุณหภูมิ

สายวัดอุณหภูมิหรือเทอร์โมคัปเปิลชนิด K ผลิตโดยบริษัท OMEGA ประกอบด้วยโลหะ 2 ชนิด ได้แก่ Chromel และ Alumel ใช้งานร่วมกับเครื่องบันทึกข้อมูล ใช้วัดอุณหภูมิภายในท่อบริเวณส่วนระเหย อุณหภูมิของน้ำในอ่างน้ำเย็นและอ่างน้ำร้อน อุณหภูมิของน้ำขาเข้าและขาออกจากกระบอกน้ำบริเวณส่วนควบแน่นและส่วนทำระเหย ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3.6

Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูปที่ 3.6 ภาพถ่ายสายเทอร์โมคัปเปิลชนิด K

3.1.4.3 เครื่องวัดอัตราการไหล

เป็นอุปกรณ์วัดปริมาณการไหลของน้ำหล่อเย็นเข้าสู่ส่วนควบแน่น ซึ่งเป็นแบบ Rotameter ผลิตโดยบริษัท OMEGA สามารถวัดอัตราการไหล ในช่วง 0.013-0.568 L/min โดยมีค่าความผิดพลาด ± 0.01 L/min แสดงให้เห็นในรูปที่ 3.7

3.1.4.4 เครื่องวัดกำลังไฟฟ้า

เป็นอุปกรณ์วัดปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ป้อนกับเครื่องกำเนิดคลื่นอุลตราโซนิก ซึ่งเป็นเครื่องวัดแบบ Multi-meter ผลิตโดยบริษัท UNIT รุ่น UT55 สามารถวัดไฟฟ้าได้สูงสุด 1,000 Volt กระแสไฟฟ้าสูงสุด 20 Amp ดังแสดงในรูปที่ 3.8



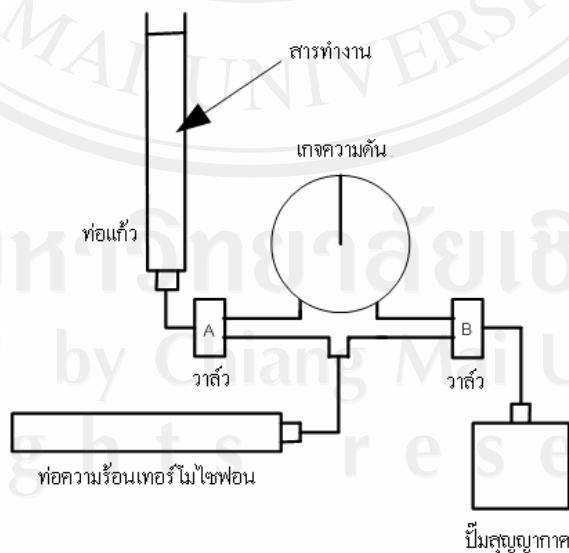
รูปที่ 3.7 ภาพถ่ายเครื่องวัดอัตราการไหล



รูปที่ 3.8 ภาพถ่ายเครื่องวัดกำลังไฟฟ้า

3.1.5 อุปกรณ์เสริมการทำงาน

การเดินสายงานภายใต้สภาวะสุญญากาศนั้น ไม่สามารถเดินสายเข้าไปได้โดยตรง จึงจำเป็นต้องมีอุปกรณ์ช่วย ซึ่งอุปกรณ์เสริมการทำงานเข้าไปในท่อเทอร์โมไซฟอน ประกอบด้วย ปัมสุญญากาศ เกจวัดความดัน และหลอดแก้วสำหรับใส่สายงาน



รูปที่ 3.9 แสดงอุปกรณ์สำหรับการเดินสายงาน

รูปที่ 3.9 แสดงอุปกรณ์สำหรับการเดิมสารทำงาน ขั้นตอนการเดิมสารทำงานเริ่มจากปิดวาล์ว A เดิมสารทำงานในท่อแก้ว เปิดวาล์ว B เปิดปั๊มสุญญากาศ เพื่อดูดอากาศในท่อเทอร์โมไซฟอน เมื่อท่อเทอร์โมไซฟอนอยู่ในสถานะเป็นสุญญากาศ ทำการปิดวาล์ว B และปิดปั๊มสุญญากาศ เปิดวาล์ว A เพื่อให้สารทำงานถูกดูดเข้าสู่ท่อเทอร์โมไซฟอนตามปริมาตรที่ต้องการ ปิดวาล์ว A และถอดท่อเทอร์โมไซฟอนออกอย่างระมัดระวังเพื่อป้องกันอากาศไหลเข้าสู่ท่อเทอร์โมไซฟอน และปิดผนึกท่อ สามารถนำไปใช้ในการทดลองได้

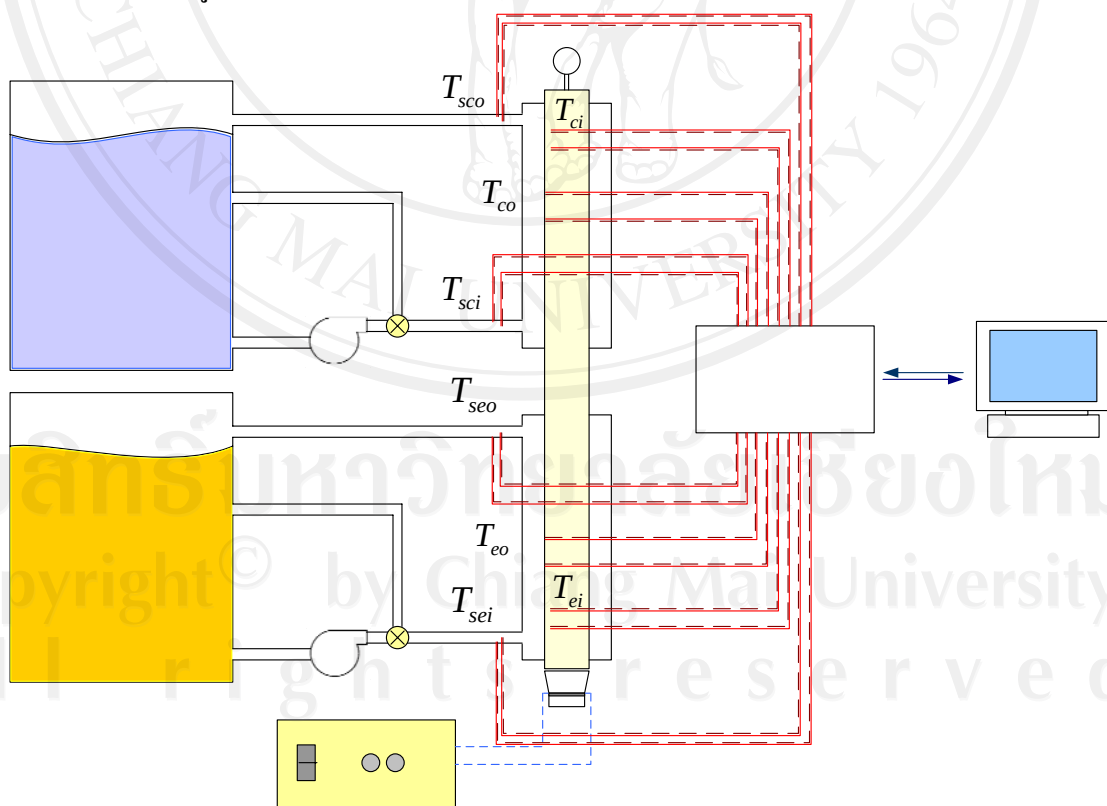
3.2 วิธีดำเนินการศึกษา

ในการดำเนินงานวิจัย สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ การปฏิบัติการทดสอบระบบท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนกับอุลตราโซนิกภายในห้องปฏิบัติการ กับส่วนของการสร้างแบบจำลองหาค่าความต้านทานภายในท่อความร้อนกรณีมีคลื่นอุลตราโซนิก โดยมีขั้นตอนและรายละเอียดดังนี้

3.2.1 ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3.2.2 ออกแบบ ประกอบและสร้างอุปกรณ์สำหรับการทดสอบท่อเทอร์โมไซฟอน

ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 ชุดทดสอบเพื่อศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนของท่อเทอร์โมไซฟอนเมื่อมีระบบอุลตราโซนิกประกอบ

จากรูปที่ 3.10 น้ำร้อนจากอ่างความร้อนไหลผ่านด้านล่างของส่วนทำระเหย ถ่ายเทความร้อนให้ส่วนทำระเหยและไหลออกด้านบนของส่วนทำระเหย กลับสู่อ่างความร้อน โดยสารทำงานในท่อถูกกระตุ้นให้เกิดการเดือดที่ง่ายขึ้น เนื่องจากการสั้นของคลื่นอุลตราโซนิกที่ถูกติดบริเวณปลายด้านล่างของท่อเทอร์โมไซฟอน ในขณะที่น้ำเย็นจากอ่างน้ำเย็นไหลผ่านเครื่องวัดอัตราการไหลผ่านด้านล่างของส่วนควบแน่นรับความร้อนจากส่วนควบแน่นแล้วไหลออกทางด้านบนของส่วนควบแน่น และไหลกลับเข้าสู่อ่างทำความเย็น โดยวัดอุณหภูมิทั้งหมด 18 จุดด้วยสายวัดอุณหภูมิเทอร์โมคัปเปิลชนิด K ดังนี้

- (1) ติดตั้งที่อ่างน้ำร้อนและอ่างน้ำเย็นแห่งละ 1 จุด
- (2) ติดตั้งบริเวณผิวท่อด้านบนนอกของส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นตำแหน่งละ 2 จุด
- (3) ติดตั้งภายในท่อของส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นตำแหน่งละ 2 จุด
- (4) ติดตั้งตรงทางเข้าและทางออกของกระบอกน้ำของส่วนควบแน่นตำแหน่งละ 2 จุด
- (5) ติดตั้งตรงทางเข้าและทางออกของกระบอกน้ำของส่วนทำระเหยตำแหน่งละ 2 จุด

3.2.3 จำยคลื่นความถี่ของระบบอุลตราโซนิกให้กับท่อเทอร์โมไซฟอนที่ 8 kHz, 10 kHz และ 14kHz

3.2.4 อุณหภูมิน้ำร้อนส่วนทำระเหย 50 °C, 60 °C, 70 °C, และ 80 °C

3.2.5 มุมเอียงที่ทำกับแนวระนาบ ได้แก่ 18, 30, 45, 60, 75 และ 90 องศา

3.2.6 อัตราส่วนของสารทำงานน้ำ คือ 50% และ 100%

3.2.7 ปรับเปลี่ยนสารทำงาน 3 ชนิด คือ น้ำ เมทานอล และ อะซิโตน (เมทานอลและอะซิโตน ทำการทดลองเฉพาะสารทำงาน 50% ของปริมาตรส่วนทำระเหย และ มุม 90 องศา กับแนวระนาบ)

3.2.8 เก็บและบันทึกข้อมูลอุณหภูมิถ่ายโอนความร้อนขาเข้าและขาออกส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่น

3.2.9 คำนวณหาค่าความต้านทานความร้อนของการเดือดภายในท่อเทอร์โมไซฟอนบริเวณส่วนทำระเหย (Z_3) ขณะไม่มีระบบคลื่นอุลตราโซนิกจากการทดลองแล้วนำมาเปรียบเทียบกับแบบจำลองของ ESDU

3.2.10 สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของค่าความต้านทานความร้อนภายในท่อ (Z_3) บริเวณส่วนทำระเหยกรณีมีคลื่นอุลตราโซนิก

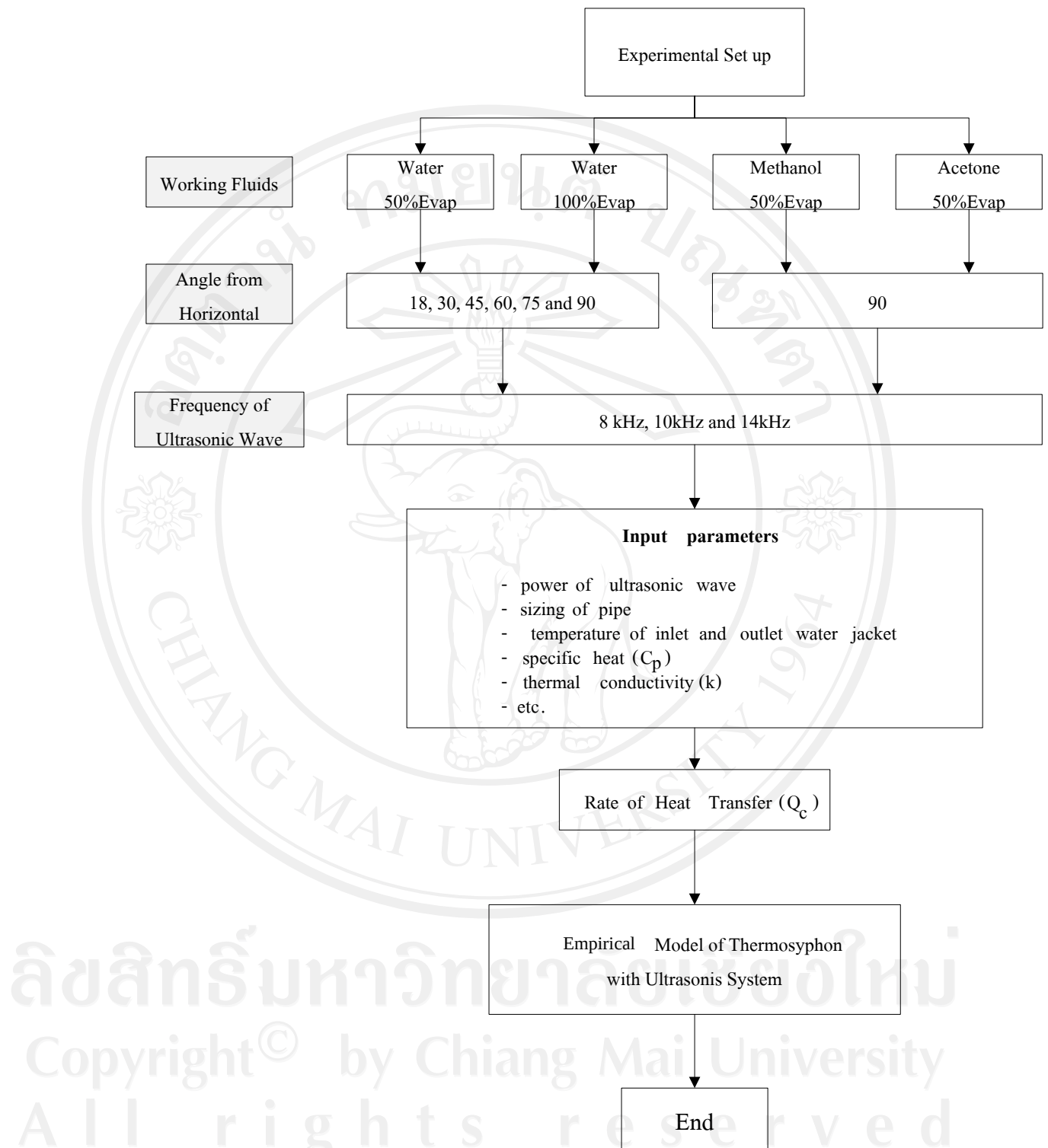
ตัวแปรและเงื่อนไขที่ใช้ในการทดสอบการถ่ายเทความร้อนของท่อเทอร์โมไซฟอน แสดงดังตารางที่ 3.1 โดยแนวทางในการทดสอบแสดงตามรูปที่ 3.11

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรและเงื่อนไขที่ใช้ในการทดสอบ

No.	ตัวแปร	เงื่อนไข
1	อัตราการเติมสารทำงานในท่อ	50 %, 100%ของปริมาตรส่วนทำระเหย
2	อัตราการไหลของน้ำส่วนควบแน่น *	0.33 kg/s
3	อัตราการไหลของน้ำส่วนทำระเหย *	0.02 kg/s
4	อุณหภูมิน้ำส่วนควบแน่น *	25 °C
5	ชนิดสารทำงาน	น้ำ เมทานอล และ อะซิโตน**
6	วัสดุที่ใช้ทำท่อ	ทองแดง
7	ขนาดท่อ	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 27.75 mm หนา 1.3 mm
8	ความถี่คลื่นอัลตราโซนิก	8 kHz 10 kHz และ 14 kHz
9	มุมที่ทำกับแนวระนาบ	18, 30, 45, 60, 75 และ 90 องศา
10	ความยาวส่วนควบแน่นและทำระเหย	0.5 m
11	อุณหภูมิน้ำถ่ายเทความร้อนที่ส่วนทำระเหย	50°C , 60°C , 70°C และ 80°C

* หมายถึงใช้น้ำเป็นสารถ่ายโอนความร้อน

** เมทานอลและอะซิโตนทำการทดลองเฉพาะ 50%ของปริมาตรส่วนทำระเหยและ 90 องศา กับแนวระดับ



รูปที่ 3.11 แนวทางการทดลองและวิเคราะห์ผล

ขั้นตอนเตรียมระบบก่อนการทดสอบ มีดังนี้

- (1) บรรจุสารทำงานน้ำปริมาตร 151 cm^3 (50% Evaporator) เข้าสู่ท่อเทอร์โมไซฟอน
- (2) ตรวจสอบเชื้อเพลิงของอากาศของท่อความร้อน
- (3) ติดตั้งท่อเทอร์โมไซฟอนกับชุดทดสอบ
- (4) ต่อท่อน้ำร้อนจากชุดให้ความร้อนทั้งด้านป้อนและด้านส่งกลับส่วนทำระเหย
- (5) ต่อท่อน้ำเย็นจากจากอ่างความเย็นทั้งด้านป้อนและด้านส่งกลับยังส่วนควบแน่น
- (6) ต่อสายวัดอุณหภูมิเทอร์โมคัปเปิลทุกจุดเข้ากับเครื่องบันทึกข้อมูล
- (7) ดำเนินการทดลองตามชุดการทดลองที่ได้ออกแบบไว้ มีขั้นตอนต่อไปนี้
- (8) เปิดวาล์วน้ำเย็นปรับอัตราการไหลของน้ำที่จ่ายส่วนควบแน่นคงที่เป็น 0.02 kg/s และควบคุมอุณหภูมิ 25°C
- (9) ปรับการเอียงของท่อเทอร์โมไซฟอนที่ 18 องศาับแนวระนาบ
- (10) ตั้งอุณหภูมิที่ถ่ายเทความร้อนให้แก่ส่วนระเหยเท่ากับ 50°C
- (11) เปิดเครื่องกำเนิดคลื่นอุลตราโซนิกที่ความถี่ประมาณ 8 kHz
- (12) รอระบบเข้าสู่สภาวะสมดุล วัดความดันและเก็บข้อมูลทุกๆ 10 วินาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยใช้เครื่องเก็บข้อมูลทดสอบ
- (13) ทำการทดลองในหัวข้อที่ (8) ถึง (12) โดยเปลี่ยนความถี่ของเครื่องกำเนิดความถี่เป็น 10 kHz และ 14 kHz ตามลำดับ
- (14) ทำการทดลองในหัวข้อที่ (8) ถึง (13) โดยเปลี่ยนอุณหภูมิถ่ายเทความร้อนส่วนทำระเหยเป็น 60°C , 70°C และ 80°C ตามลำดับ
- (15) ทำการทดลองในหัวข้อที่ (8) ถึง (14) โดยเปลี่ยนมุมเอียงของท่อเทอร์โมไซฟอน เป็น 30, 45, 60, 75 และ 90 องศาับแนวระนาบ
- (16) เตรียมระบบก่อนการทดสอบใหม่ โดยเปลี่ยนสารทำงานเป็นน้ำ 302 cm^3 จากนั้นทำการทดสอบซ้ำจากหัวข้อ (2) ถึง (15) ส่วน เมทานอล 151 cm^3 และอะซิโตน 151 cm^3 ทำซ้ำจากหัวข้อ (2) ถึง (14) โดยที่มุมเอียงของท่อเทอร์โมไซฟอนคือ 90 องศาับแนวระนาบ
- (17) นำผลการทดลองที่ได้มาทำการวิเคราะห์ข้อมูล

3.3 วิธีการวิเคราะห์ข้อมูล

นำข้อมูล อุณหภูมิ ความดัน และอัตราการไหล มาคำนวณหาค่าอัตราการถ่ายเทความร้อน ความต้านทานความร้อนภายในท่อเทอร์โมไซฟอน สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน และใช้ในการสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ค่าความต้านทานความร้อนจากผลการทดลอง

3.3.1 อัตราการถ่ายเทความร้อน (Q)

การคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนของเทอร์โมไซฟอนโดยพิจารณาบริเวณส่วนควบแน่น ดังสมการที่ (3.1)

$$\dot{Q}_c = \dot{m}_w C_p (T_{sc,out} - T_{sc,in}) \quad (3.1)$$

โดย $\dot{Q}_c$ = อัตราการถ่ายเทความร้อนที่ส่วนควบแน่น (W)
 $\dot{m}_w$ = อัตราการไหลน้ำหล่อเย็นที่อุณหภูมิ 25°C (kg/s)
 C_p = ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ (J/kg.K)
 $(T_{sc,out} - T_{sc,in})$ = อุณหภูมิแตกต่างของกระแสน้ำหล่อเย็นที่ส่วนควบแน่น (°C)

3.3.2 ค่าความต้านทานความร้อนภายในท่อเทอร์โมไซฟอน (Z_3)

เนื่องจากว่าไม่มีความร้อนสูญเสียในขณะที่มีการส่งผ่านความร้อน จากการคำนวณความหนาของฉนวนที่เพียงพอ ดังนั้นอัตราการถ่ายเทความร้อนมายังส่วนทำระเหยเท่ากับอัตราการถ่ายเทความร้อนที่คายจากส่วนควบแน่น ซึ่งสมการหาค่าความต้านทานความร้อนภายในท่อเทอร์โมไซฟอน (Z_3) แสดงดังสมการที่ (3.2)

$$\dot{Q}_e = \frac{T_{eo} - T_{ei}}{Z_2 + Z_3} \quad (3.2)$$

$$\text{เมื่อ } Z_2 = \frac{\ln \left(\frac{D_o}{D_i} \right)}{2 \pi k_{cu} L_e} \quad (3.3)$$

$$\text{ดังนั้น } Z_3 = \frac{T_{eo} - T_{ei}}{\dot{Q}_e} - Z_2 \quad (3.4)$$

โดย

Z_2 = ค่าความต้านทานความร้อนของผนังท่อความร้อน (K/W)

Z_3 = ค่าความต้านทานความร้อนภายในท่อความร้อน (K/W)

D_i, D_o = เส้นผ่านศูนย์กลางภายในและภายนอกท่อความร้อน (m)

k_{Cu} = การนำความร้อนของท่อทองแดง (W/m.K)

L_e = ความยาวของส่วนทำระเหย (m)

T_{ei}, T_{eo} = อุณหภูมิภายในท่อความร้อนและอุณหภูมิของผนังท่อด้านนอก (K)

3.3.2 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของการเดือด (h_{ei}) ในท่อความร้อนเทอร์โมไซฟอน

เนื่องจากว่าไม่มีความร้อนสูญเสียในขณะที่มีการส่งผ่านความร้อน เพราะมีการหุ้มฉนวนอย่างดี ดังนั้นอัตราการถ่ายเทความร้อนมายังส่วนทำระเหยเท่ากับอัตราการถ่ายเทความร้อนที่คายจากส่วนควบแน่น ซึ่งสมการหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของการเดือด (h_{ei}) แสดงดังสมการที่ (3.2)

$$\dot{Q}_e = (T_{eo} - T_{ei}) / \left(\frac{\ln\left(\frac{D_o}{D_i}\right)}{2\pi k L_e} + \frac{1}{h_{ei} A_{ei}} \right) \quad (3.5)$$

หรือ เขียนใหม่ในรูปสมการที่ (3.6) เพื่อใช้ในการคำนวณหาค่า h_{ei}

$$h_{ei} = \frac{1}{A_{ei} \left(\frac{T_{eo} - T_{ei}}{\dot{Q}_e} - \frac{\ln(D_o / D_i)}{2\pi k_{Cu} L_e} \right)} \quad (3.6)$$

โดย

$\dot{Q}_e$ = อัตราการถ่ายเทความร้อนที่ส่วนทำระเหย (W)

k_{Cu} = การนำความร้อนของท่อทองแดง (W/m.K)

h_{ei} = ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของผิวด้านในของส่วนรับความร้อน (W/m².K)

A_{ei} = พื้นที่ผิวด้านในของส่วนทำระเหย (m²)

D_i, D_o = เส้นผ่าศูนย์กลางภายในและภายนอกท่อ (m)

$(T_{eo} - T_{ei})$ = อุณหภูมิแตกต่างของผนังท่อความร้อนกับภายในท่อความร้อน (°C)

3.3.3 ค่าความต้านทานความร้อนภายในท่อความร้อนเทอร์โมไซฟอนจากแบบจำลอง (Z_3)

ของ ESDU

นำค่า Z_3 จากการคำนวณจากสมการ (3.4) มาเปรียบเทียบกับค่า Z_3 จากสมการของ ESDU (3.7) เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของผลการทดลอง จากทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการเดือด

ภายในท่อเทอร์โมไซฟอนที่แสดงไว้ในบทที่ 2 พบว่า ค่า Z_3 สามารถคำนวณได้ตามสมการของ ESDU ดังนี้

$$Z_3 = Z_{3p} \quad \text{if } Z_{3p} < Z_{3f} \quad (3.7)$$

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

เมื่อ $Z_{3f} = \frac{C\dot{Q}^{1/3}}{D_i^{4/3}g^{1/3}L_e\Phi_2^{4/3}}; C = 0.235 \quad (3.8)$

$$Z_{3p} = \frac{1}{\Phi_3 g^{0.2} \dot{Q}^{0.4} (\pi D_i L_e)^{0.6}} \quad (3.9)$$

$$\Phi_2 = \left(\frac{q_{latent} k^3 \rho_l^2}{\mu_l} \right)^{1/4} \quad (3.10)$$

$$\Phi_3 = 0.32 \frac{\rho_l^{0.65} k_l^{0.3} C_{p_l}^{0.7}}{\rho_v^{0.25} q_{latent}^{0.4} \mu_l^{0.1}} \left[\frac{P_v}{P_a} \right]^{0.23} \quad (3.11)$$

โดย

Z_3 = ค่าความต้านทานความร้อนภายในท่อความร้อน (K/W)

Z_{3p} = ค่าความต้านทานความร้อนของอ่างของเหลว (K/W)

Z_{3f} = ค่าความต้านทานความร้อนของฟิล์ม (K/W)

$\dot{Q}$ = อัตราการถ่ายเทความร้อน (W)

D_i = เส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อความร้อน (m)

g = ค่าแรงโน้มถ่วงของโลก (9.81 m/s^2)

L_e = ความยาวของส่วนทำระเหย (m)

ρ_l = ความหนาแน่นสารทำงานเหลว (kg/m^3)

ρ_v = ความหนาแน่นไอสารทำงาน (kg/m^3)

q_{latent} = ค่าความร้อนแฝงกลายเป็นไอ (J/kg)

k = ค่าการนำความร้อน (W/m.K)

C_{p_l} = ค่าความจุความร้อนจำเพาะ (J/kg.K)

μ_l = ค่าความหนืดของของเหลว (N.s/m^2)

P_v = ความดันไอ (Pa)

P_a = ความดันบรรยากาศ (101.325 Pa)

โดยค่าคงที่ต่างๆ อ่านจากตารางที่ 1.1 หากพบว่าผลการทดลองกับผลการทำนาย Z_3 จากสมการของ ESDU มีค่าความคลาดเคลื่อนในระดับที่ยอมรับได้ แสดงว่า สามารถใช้ได้ ในทาง

กลับกันหากผลการคำนวณ Z_3 คลาดเคลื่อนมาก จำเป็นต้องทำการปรับปรุงสมการใหม่ให้มีความเหมาะสมยิ่งขึ้น

3.3.4 แบบจำลองจากการทดลองกรณีมีระบบอุตตร้าโซนิกประกอบ

การสร้างแบบจำลองจากการทดลองของสัมประสิทธิ์การพาความร้อนในท่อเทอร์โมไซโฟนกรณีใช้ร่วมกับระบบอุตตร้าโซนิก อาศัยโปรแกรม MLeast_3 เพื่อหาค่าคงที่ C_0 , C_1 และ C_2 ตามรูปแบบสมการที่ (3.12) สำหรับ เมทานอลและอะซิโตนเป็นสารทำงาน โดยพิจารณาจากผลกระทบที่สำคัญของความถี่คลื่นอุตตร้าโซนิกและความดันในท่อเทอร์โมไซโฟน อันเป็นแนวคิดที่ได้จากการประมวลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

$$Z_{3,ul} = C_0 \left(\frac{f}{f_{\max}} \right)^{C_1} (Z_{3,noul})^{C_2} \quad (3.12)$$

โดย

$Z_{3,ul}, Z_{3,noul}$ = ค่าความต้านทานความร้อนภายในท่อความร้อนในกรณีที่มีและไม่มีคลื่นอุตตร้าโซนิก (K/W)

$\frac{f}{f_{\max}}$ = อัตราส่วนความถี่ต่อความถี่สูงสุดของคลื่นอุตตร้าโซนิกที่ใช้

F = อัตราส่วนการเติมสารทำงานต่อปริมาตรภายในทั้งหมดของท่อความร้อนเทอร์โมไซโฟน

β = มุมที่ท่อความร้อนกระทำต่อแนวระนาบ (radial)

ค่า C_0 , C_1 และ C_2 เป็นสัมประสิทธิ์ที่ได้จากกรรมวิธีทางสถิติกับผลการทดลองจริง

ในกรณีที่ใช้น้ำเป็นสารทำงานนั้น มีมุมที่กระทำต่อแนวระนาบและ อัตราส่วนการเติมสารทำงานมาเกี่ยวข้อง จึงมีตัวแปรเพิ่มขึ้นมาจากการใช้เมทานอลและอะซิโตนเป็นสารทำงาน ดังแสดงดังสมการที่ (3.13)

$$Z_{3,ul} = C_0 \cdot (F)^{C_1} \cdot (\beta)^{C_2} \cdot (Z_{3,noul})^{C_3} \cdot \left(\frac{f}{f_{\max}} \right)^{C_4} \quad (3.13)$$