

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยเรื่อง ผลของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในที่มีผลต่อคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนชนิดเทอร์โมไซฟอนที่โหมดความร้อนสูง สำเร็จลงได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์วสันต์ ปินะเต อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการวิจัยที่ให้คำแนะนำตลอดจนความช่วยเหลือในส่วนของวัสดุ อุปกรณ์ และสถานที่ ในการทำโครงการวิจัยจนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์วิจิตร เขาว์วันกลาง อาจารย์ประจำรายวิชาโครงการฟิสิกส์ ที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับการจัดรูปแบบของโครงการวิจัย และให้คำปรึกษาแนะนำ ตลอดจนตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องของโครงการวิจัยนี้จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอบคุณอาจารย์กฤษฏ์ ดิจริง อาจารย์ปฐมพงศ์ พันธุ์พิบูลย์ และ อาจารย์เอกสิทธิ์ สุทธิระพินทุ กรรมการโครงการวิจัยที่ให้คำปรึกษาแนะนำ ตลอดจนตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องของโครงการวิจัยนี้จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอบคุณอาจารย์ประจำสาขาวิชาฟิสิกส์ รวมทั้งเจ้าหน้าที่สาขาฟิสิกส์มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม ที่ได้ให้ความรู้ คำแนะนำและการอบรมสั่งสอนสิ่งที่ตั้งใจมาตลอดจนประสบความสำเร็จ

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม ที่ให้ทุนสนับสนุนโครงการวิจัยในครั้งนี้จนประสบผลสำเร็จ

ขอขอบคุณเพื่อนๆในสาขาวิชาฟิสิกส์ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือ และเป็นกำลังใจตลอดมาในการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้

สุดท้ายนี้ ผู้จัดทำขอน้อมรำลึกถึงพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การอบรมสั่งสอนและสนับสนุนการทำโครงการวิจัยสำเร็จลุล่วงตามความมุ่งหมาย คุณงามความดี และคุณประโยชน์ของโครงการวิจัยนี้ ขอน้อมให้บิดา มารดา ของผู้จัดทำ

อาทิตยา พัฒนโชติ
กมล ใจงาม

ชื่อเรื่อง	ผลของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในที่มีผลต่อคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนชนิดเทอร์โมไซฟอนที่โหมดความร้อนสูง
ผู้ทำวิจัย	อาทิตยา พัฒนโชติ กมล ใจงาม
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์วสันต์ ปินะเต
โปรแกรม / คณะ	ฟิสิกส์ / คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัย	มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
ปีที่พิมพ์	2558

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาผลของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในที่มีผลต่อคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนชนิดเทอร์โมไซฟอนที่โหมดความร้อนสูง ทำการศึกษาท่อแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดเทอร์โมไซฟอนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 16, 21 และ 26 มิลลิเมตร ความสูงครีป 5, 10 และ 15 มิลลิเมตร ความหนาครีป 1, 1.5 และ 2 มิลลิเมตร ระยะห่างระหว่างครีป 10 มิลลิเมตร ความยาวส่วนทำระเหย ส่วนกันความร้อน และส่วนควบแน่น เป็น 200, 100 และ 200 มิลลิเมตรตามลำดับ โดยใช้ น้ำกลั่น และเอทานอล เป็นสารทำงานที่อัตราการเติมสาร 50 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตรของส่วนทำระเหย ควบคุมอุณหภูมิในส่วนทำระเหยที่ 100, 120, 140, 160, 180 และ 200 องศาเซลเซียส และมุมเอียงที่ใช้ในการทดสอบ 90 องศา กับแนวระดับ

จากผลการวิจัยพบว่า ผลของสารทำงานเอทานอล ที่เส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อขนาด 26 มิลลิเมตร ให้ค่าการถ่ายโอนความร้อนได้สูงที่สุด โดยมีลักษณะครีปหนา 1 มิลลิเมตร และความสูงครีป 15 มิลลิเมตร ให้อัตราการถ่ายโอนความร้อนที่ 30.16 วัตต์ต่อตารางเมตร เป็นค่าสูงที่สุดและผลของค่าประสิทธิภาพ ที่ใช้สารทำงานเอทานอล เส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อขนาด 26 มิลลิเมตร มีลักษณะครีปหนา 1 มิลลิเมตร และความสูงครีป 15 มิลลิเมตร ให้ค่าประสิทธิภาพสูงที่สุดเป็น 0.98

Research Title	Effect of Internal Diameters on Heat transfer Characteristics of Thermosyphon at High Temperature
Author	Miss. Artitaya Pattanachot Mr. Kamol Jaingam
Advisor	Mr. Wasan Pinate
Department / Faculty	Physics / Science and Technology
University	Rajabhat Mahasarakham University
Year	2015

Abstract

This research investigates the study effect of internal diameters on heat transfer characteristics of thermosyphon at high temperature. Study of heat pipe thermosyphon inner pipe diameter at 16, 21 and 26 mm. The height of fins were 5, 10 and 15 mm. The thickness of fins were 1, 1.5 and 2 mm. The length between each fin is 10 mm. The length of evaporation part, heat prevention part and condensing part is 200, 100 and 200 mm respectively. The substances in pipe were distilled water and ethanol. The filling rate was 50 percent of evaporation part capacity. The temperature reaches evaporation point at 100, 120, 140, 160, 180 and 200 °C. And tilt angle at 90 degrees to the horizontal test.

The research discovered that effects of ethanol work. The inner pipe diameter of 26 mm. To transfer the heat to high. By a fin thick of 1 mm and height 15 mm fins for heat transfer rates at 30.16 watts per square meter. It is the highest. And the effectiveness of The working fluid ethanol. Diameter 26 mm internal diameter and 1 mm thick fins have high fin 15 mm for the highest effectiveness is 0.98.

บทที่ 1

บทนำ

จากการศึกษาผลของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในที่มีผลต่อคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนชนิดเทอร์โมไซฟอนที่โหมดความร้อนสูงย่อมมีความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขต ข้อตกลงเบื้องต้น รวมไปถึงประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

พลังงานเป็นสิ่งจำเป็นอย่างมากในการพัฒนาประเทศ มีการนำพลังงานมาใช้ในเชิงอุตสาหกรรมกันอย่างแพร่หลาย ซึ่งส่งผลทำให้มีการใช้พลังงานเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่ปริมาณของพลังงานมีอยู่อย่างจำกัด ดังนั้นการนำพลังงานมาใช้ให้เกิดประโยชน์อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด ถือว่าเป็นปัจจัยพื้นฐานหลักในการอนุรักษ์พลังงาน ซึ่งปัจจุบันทวีความสำคัญมากขึ้นทุกขณะ โดยทั่วไปในโรงงานอุตสาหกรรมมีพลังงานส่วนหนึ่งที่เหลือจากการใช้งานและทิ้งไปโดยไม่เกิดประโยชน์ ถ้าหากมีการนำพลังงานกลับมาใช้ประโยชน์ได้ ก็จะเป็นการใช้พลังงานอย่างคุ้มค่า อุปกรณ์อย่างหนึ่งที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการนำพลังงานกลับมาใช้ประโยชน์ได้อีกคืออุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งมีอยู่หลายชนิดด้วยกัน แต่ในงานวิจัยนี้จะเสนอถึงการประยุกต์ใช้ท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน (Thermosyphon) สำหรับใช้ช่วยในการประหยัดพลังงานเนื่องจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดนี้มีลักษณะพิเศษต่างจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดอื่นๆ (สัมพันธฤทธิเดช, 2554) คือมีการส่งถ่ายความร้อนได้ดี สามารถส่งถ่ายความร้อนได้ เมื่อแหล่งรับความร้อนและระบายความร้อนอยู่ห่างกันมากๆ ไม่ต้องการพลังงานจากภายนอก สร้างและติดตั้งง่าย มีค่าอัตราการลงทุนต่ำ และยังสะดวกต่อการบำรุงรักษา

อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนชนิดเทอร์โมไซฟอน (Huminc G and huminc A, 2011) มีโครงสร้างที่ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วนคือ ส่วนทำระเหย (Evaporator section) ส่วนกันความร้อน (Adiabatic section) และส่วนควบแน่น (Condenser section) โครงสร้างทั้งหมดจะรวมกันอยู่ในท่อปิดภายในท่อจะบรรจุด้วยของไหลทำงาน (Working fluid) อยู่ภายใต้แรงโน้มถ่วงของโลก (Faghri A, 1995) หลักการทำงานของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนชนิดเทอร์โมไซฟอนคือ เมื่อท่อทำความร้อนได้รับความร้อนเข้าที่ส่วนทำระเหยของไหลทำงานจะเดือดและเปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอ (Faghri A, 1995)

หลักการการทำงานของ อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนชนิดเทอร์โมไซฟอนคือ เมื่อท่อความร้อนได้รับความร้อนเข้าที่ส่วนทำระเหยของไหลทำงานจะเดือดและเปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอของของไหลทำงานจะลอยขึ้นไปในส่วนควบแน่น และระบายความร้อนออก แล้วจึงเปลี่ยนสถานะกลายเป็นของเหลวไหลลงไปตามผนังท่อกลับสู่ส่วนทำระเหยอีกครั้ง สำหรับการอนุรักษ์พลังงานท่อความร้อนชนิดเทอร์โมไซฟอนจึงเป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดหนึ่งที่ถูกนำมาใช้กระบวนการอุตสาหกรรมเนื่องจากมีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงแม้ว่าอุณหภูมิแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย มีรูปแบบโครงสร้างง่ายต่อการผลิต และที่สำคัญใช้เพียงพลังงานความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของสารทำงานภายในท่อความร้อนและแรงโน้มถ่วงของโลก

เนื่องจากผู้วิจัยได้เห็นปัญหาในโรงงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ได้มีการปล่อยพลังงานความร้อนที่เหลือใช้ทิ้งไปโดยเปล่าประโยชน์เป็นจำนวนมากทำให้เกิดการสูญเสียทางด้านเศรษฐศาสตร์อย่างมากมาด้วยเหตุนี้วิธีที่จะช่วยและประหยัดพลังงานได้ก็คือการนำความร้อนก่อนปล่อยทิ้งกลับมาใช้ประโยชน์ หรือการแลกเปลี่ยนความร้อนจะทำให้มีการลดการพลังงานในอุตสาหกรรมต่างๆและรายจ่ายลดลง

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อความร้อนชนิดเทอร์โมไซฟอนในโหมดความร้อนสูง
2. เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพผลของค่าการถ่ายเทความร้อนที่ได้จากเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดต่างๆ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. สารทำงานในงานวิจัยนี้ใช้ เอทานอล และ น้ำบริสุทธิ์
2. มุมเอียงที่ใช้ในการทดสอบ 90 องศากับแนวระดับ
3. อุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบ คือ 100 ถึง 200 องศาเซลเซียส
4. ความยาวส่วนทำระเหย 200 มิลลิเมตร ความยาวส่วนกันความร้อน 100 มิลลิเมตร และความยาวส่วนควบแน่น 200 มิลลิเมตร
5. อัตราการเติมสารทำงาน 50% ของปริมาตรส่วนทำระเหย
6. ขนาดท่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 16, 21 และ 26 มิลลิเมตรตามลำดับ และหนา 1.80 มิลลิเมตร
7. ความหนาของครีป 1, 1.5 และ 2 มิลลิเมตรตามลำดับ ความสูงของครีป 5, 10 และ 15 มิลลิเมตรตามลำดับ

8. ในงานวิจัยนี้ใช้ระยะห่างของครีป 10 มิลลิเมตรและความเร็วลมเย็น 1.5 เมตร/วินาที

1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น

ในงานวิจัยนี้จะนิยามโหมดความร้อนสูงคือ อุณหภูมิตั้งแต่ 100 – 200 องศาเซลเซียส

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงลักษณะการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนชนิดเทอร์โมไซฟอนในโหมดความร้อนสูง
2. ทราบถึงผลของเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อความร้อนชนิดเทอร์โมไซฟอนในโหมดความร้อนสูง
3. เป็นแนวทางในการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน
4. เป็นแนวทางในการออกแบบท่อเทอร์โมไซฟอน
5. เป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรมได้



มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

บทที่ 2

ทฤษฎีและเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยผลของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในที่มีผลต่อคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนชนิดเทอร์โมไซฟอนที่โหมดความร้อนสูง สามารถถ่ายเทความร้อนจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง ได้โดยไม่ต้องอาศัยพลังงานจากภายนอก และความแตกต่างของอุณหภูมิเพียงเล็กน้อยก็สามารถทำให้ท่อนำความร้อนทำงานได้ ลักษณะเด่นอย่างของท่อความร้อนเทอร์โมไซฟอน คือ สร้างขึ้นได้ง่ายไม่ซับซ้อนและประหยัดแต่สามารถถ่ายเทความร้อนได้สูงท่อนำความร้อนที่ได้รับการพัฒนานำมาใช้ประโยชน์ในลักษณะต่างๆ เช่น การลดความร้อนออกจากชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ การรักษาอุณหภูมิของยานอวกาศให้มีความสม่ำเสมอทุกจุด การนำความร้อนจากใต้ผิวโลกมาใช้ในการละลายหิมะ การระบายความร้อนออกจากเครื่องยนต์ และการนำความร้อนจากก๊าซที่เหลือทิ้งนำกลับมาใช้งานได้อีก ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงได้จำแนกทฤษฎีต่างๆ และส่วนประกอบต่างๆ ที่เกี่ยวกับท่อนำความร้อนเทอร์โมไซฟอนดังรายละเอียดต่อไปนี้

2.1 ท่อนำความร้อนเทอร์โมไซฟอน

ท่อนำความร้อนเทอร์โมไซฟอน (Thermosyphon heat pipe) เป็นอุปกรณ์อย่างหนึ่งที่มีค่าการนำความร้อนที่สูงมากโดย R.S. Gaugler เป็นคนแรกที่เสนอแนวคิดเกี่ยวกับท่อนำความร้อนในปี ค.ศ. 1942 แต่ผู้ที่ผลิตท่อนำความร้อนจนนำมาใช้งานได้จริงคือ G.M. Grover ซึ่งได้ประดิษฐ์ขึ้นในปี ค.ศ. 1960 ตั้งแต่นั้นเป็นต้นมา ท่อนำความร้อนก็เป็นที่รู้จักและได้รับการพัฒนาขึ้นมาเป็นลำดับ ท่อนำความร้อนเทอร์โมไซฟอนมักทำจากท่อโลหะ ท่อนำความร้อนได้ดี เช่น ทองแดง อลูมิเนียม เหล็ก และ สแตนเลสสตีล โดยมีฝาปิดทั้งสองข้าง ภายในบรรจุด้วยของไหลทำงานที่เหมาะสม เช่น น้ำ และสารทำความเย็น

เทอร์โมไซฟอนเป็นอุปกรณ์อย่างหนึ่งที่นำมาประยุกต์ใช้แลกเปลี่ยนความร้อนได้ เพราะเทอร์โมไซฟอนสามารถส่งผ่านความร้อนได้สูงมาก โดยอาศัยกระบวนการระเหย การควบแน่นของสารทำงานและแรงโน้มถ่วงของโลกในการดึงเอาของเหลวควบแน่นจากปลายที่เย็นกลับมาสู่ปลายที่ร้อน ลักษณะทั่วไปเป็นท่อปลายปิดสองข้างมีส่วนประกอบและหลักการทำงานดังแสดง **ดังรูปที่ 2.1** โดยส่วนประกอบที่สำคัญของเทอร์โมไซฟอนมีสองส่วนคือท่อบรรจุ (Container) และสารทำงาน

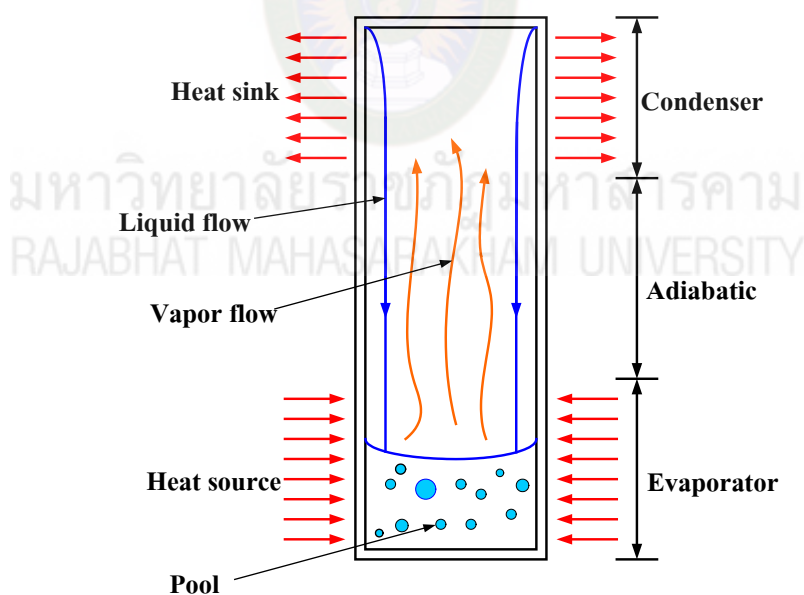
(Working fluid) ซึ่งภายในท่อบรรจุจะประกอบไปด้วยโครงสร้างที่สำคัญแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนทำระเหย (Evaporator section) เป็นส่วนที่สารทำงานได้รับความร้อนจาก แหล่งให้ความร้อน และระเหยกลายเป็นไอ ส่วนกันความร้อน (Adiabatic section) เป็นส่วนที่ไม่มีการถ่ายเทความร้อน ซึ่งในส่วนนี้อาจจะมีหรือไม่มีก็ได้ และส่วนควบแน่น (Condenser section) เป็นส่วนที่สารทำงานคายความร้อนให้กับแหล่งรับความร้อนแล้ว สารทำงานจะกลับตัวเป็นของเหลวและส่วนประกอบที่เป็นสารทำงานนั้นมีหน้าที่เป็นตัวกลางในการรับความร้อนจากส่วนทำระเหยและไปคายความร้อนที่ส่วนควบแน่น โดยสารทำงานที่ควบแน่นนี้ไหลกลับสู่ส่วนทำระเหย โดยอาศัยแรงดึงดูดของโลก เนื่องจากการทำงานของเทอร์โมไซฟอนอาศัยความร้อนแฝงในสารทำงานทำให้เทอร์โมไซฟอนมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนสูงถึงประมาณ 200 เท่าของโลหะทองแดงในมิติที่เท่ากัน และสามารถส่งผ่านความร้อนได้ที่ ความแตกต่างของส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นเพียงเล็กน้อยอุณหภูมิต่ำ

การทำงานของท่อนำความร้อนเกิดขึ้นจากการได้รับความร้อนจากแหล่งจ่ายความร้อน (Heat source) ที่ส่วนทำระเหย ของไหลทำงานที่อยู่ในสภาวะของเหลวจะเดือด และเปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอ ไอของของไหลทำงานจะพาความร้อนผ่านส่วนกันความร้อน (ขณะที่ผ่านส่วนกันความร้อนจะไม่มีการรับความร้อนหรือคายความร้อน) ไประบายความร้อนออกไปยังแหล่งรับความร้อน (Heat sink) ที่ส่วนควบแน่นแล้วเปลี่ยนสถานะกลายเป็นของเหลวอีกครั้ง จากนั้นไหลลงสู่ด้านล่างด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก (Gravity) เป็นวิธีการส่งของเหลวกลับสู่ส่วนทำระเหย แสดงได้ **ดังตารางที่ 2.1** ดังนั้น เพื่อให้ท่อความร้อนทำงานได้อย่างต่อเนื่อง จึงจำเป็นต้องจัดวางท่อนำความร้อนให้ส่วนทำระเหยอยู่ด้านล่าง และส่วนควบแน่นอยู่ด้านบนเสมอ วิธีการส่งของเหลวจากส่วนควบแน่น กลับสู่ส่วนทำระเหย แสดงได้ **ดังรูปที่ 2.1**

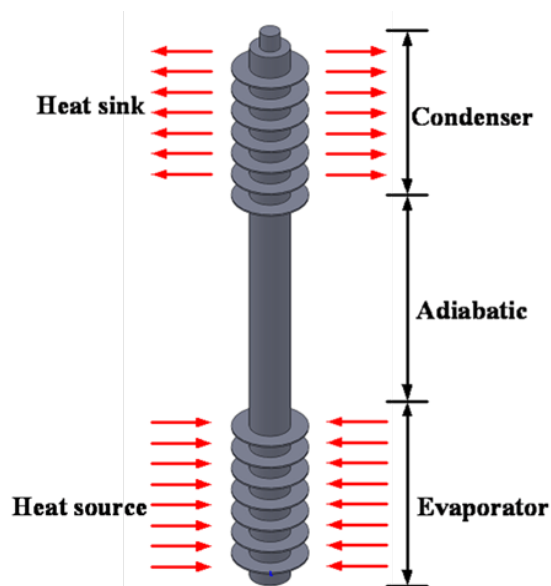
ตารางที่ 2.1 วิธีการส่งของเหลวกลับสู่ส่วนทำระเหยของท่อนำความร้อน

ลักษณะแรง (Force)	ชนิด (Type)
แรงโน้มถ่วง (Gravity)	เทอร์โมไซฟอน (Thermosyphon)
แรงคาпилลารี (Capillary force)	ท่อนำความร้อนธรรมดา (Standard heat pipe)
แรงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal force)	ท่อนำความร้อนแบบหมุน (Rotating heat pipe)
แรงจากไฟฟ้าสถิต (Electrostatic volume forces)	ท่อนำความร้อนแบบอิเล็กโตรไฮโดไดนามิก (Electro hydrodynamic heat pipe)
แรงแม่เหล็ก (Magnetic volume forces)	ท่อนำความร้อนแบบแมกเนโตรไฮโตรไดนามิก (Magneto hydrodynamic heat pipe)
แรงออสโมติก (Osmotic forces)	ท่อนำความร้อนออสโมติก (Osmotic heat pipe)

ที่มา (นิพน ภูวเกียรติกรำจร, 2552)



รูปที่ 2.1 โครงสร้างและการทำงานของท่อนำความร้อนเทอร์โมไซฟอน
ที่มา (นิพน ภูวเกียรติกรำจร, 2552)



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของท่อเทอร์โมไซฟอล
ที่มา (วสันต์ ปินะเต, 2556)

ในการหาค่าการถ่ายเทความร้อนไปยังส่วนควบแน่นเราสามารถคำนวณจากวิธีการแคลอริฟิค (Calorific method) โดยการวัดค่าอุณหภูมิทั้งขาเข้า และขาออกของสารรับความร้อนที่ส่วนควบแน่นจากนั้นนำค่าที่ได้มาคำนวณโดยใช้สมการ

$$Q = \dot{m} c_p (T_{out} - T_{in}) \dots\dots\dots (2.1)$$

- | | | | |
|-------|-----------|-----|--|
| เมื่อ | Q | คือ | ค่าการถ่ายเทความร้อน หน่วย Watt |
| | \dot{m} | คือ | อัตราการไหลเชิงมวลหน่วย kg/s |
| | c_p | คือ | ค่าความจุความร้อนจำเพาะ หน่วย J/ kg-°C |
| | T_{out} | คือ | อุณหภูมิของสารรับความร้อนขาออกที่ส่วนควบแน่น หน่วย°C |
| | T_{in} | คือ | อุณหภูมิของสารรับความร้อนขาเข้าส่วนควบแน่น หน่วย °C |

โดยอัตราการการไหลเชิงมวล หาได้จากสมการ

$$\dot{m} = \rho VA \dots\dots\dots (2.2)$$

เมื่อ	\dot{m}	คือ	อัตราการไหลเชิงมวลหน่วย kg/s
	ρ	คือ	ความหนาแน่น หน่วย kg/ m ³
	V	คือ	ความเร็ว หน่วย m/s
	A	คือ	พื้นที่หน้าตัดของส่วนควบแน่น หน่วย m ²

โดยอัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ หาได้จากสมการ

$$q = \frac{Q}{A_c + A_{fin}} \dots\dots\dots (2.3)$$

เมื่อ	q	คือ	อัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ หน่วย W/m ²
	Q	คือ	ค่าการถ่ายเทความร้อน หน่วย Watt
	A_c	คือ	พื้นที่ส่วนควบแน่น หน่วย m ²
	A_{fin}	คือ	พื้นที่ผิวครีบ หน่วย m ²

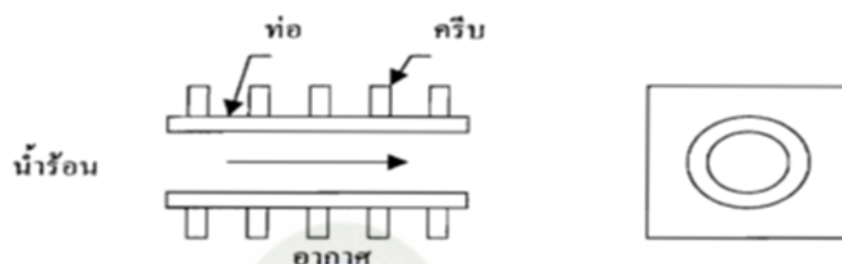
พื้นที่ผิวครีบที่สัมผัสกับของไหลหาได้จากสมการ

$$A_{fin} = [2\pi(r_o^2 - r_i^2) + 2\pi r_o t] \dots\dots\dots (2.4)$$

เมื่อ	A_{fin}	คือ	พื้นที่ผิวครีบที่สัมผัสกับของไหล หน่วย m ²
	r_i	คือ	รัศมีภายในของครีบ หน่วย m
	r_o	คือ	รัศมีภายนอกของครีบ หน่วย m
	t	คือ	ความหนาของครีบ หน่วย m

2.2 ครีบบระบายความร้อน (Fin)

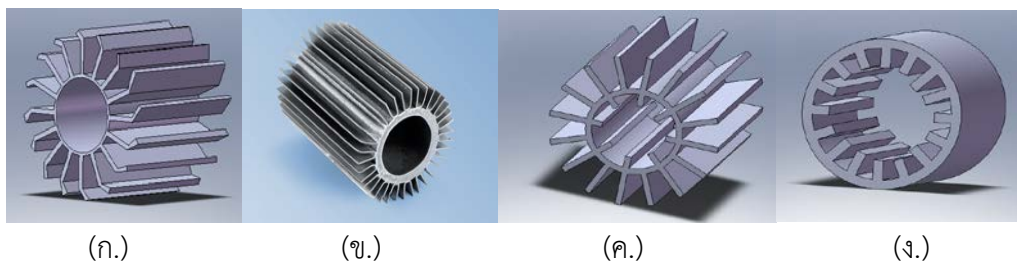
การเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนทำได้โดยการเพิ่มหรือการขยายพื้นที่ผิวในการแลกเปลี่ยนเปลี่ยนความร้อนซึ่งส่วนใหญ่มักถูกนำมาใช้สำหรับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนครีบบจะ ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการถ่ายเทความร้อน ดังนั้นการพิจารณาถึงประสิทธิภาพของครีบบจึงมีความจำเป็นในการพิจารณาแสดง ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงท่อที่ติดครีบบ
ที่มา (เลอชาย ยอดรัก, 2554)

ในกรณีที่ของไหลที่ไหลภายในท่อเป็นของไหลร้อน (Heating Fluid) ความร้อนจะถ่ายเทจากโคนครีบบ (Root of Fin) ไปสู่ปลายของครีบบ (Top of Fin) เนื่องจากความต้านทานความร้อนของครีบบ จะทำให้เกิดการลดลงของอุณหภูมิ (Temperature Drop) จากส่วนโคนไปสู่ปลายของครีบบ ซึ่งความแตกต่างของอุณหภูมิที่ส่วนโคนของครีบบกับของไหลที่อยู่รอบๆ ฉะนั้นการหาอัตราการถ่ายเทความร้อนของครีบบจึงกำหนดได้ด้วยเทอมที่เรียกว่า “ประสิทธิภาพของครีบบ” ซึ่งก็คือ การระบายความร้อนให้กับท่อความร้อนซึ่งครีบบที่นิยมนำมาใช้กันมี 2 ลักษณะ ดังต่อไปนี้

1. การติดครีบบตามยาวจะติดครีบบขนานกับแกนกลางของท่อที่ต้องการติดตั้ง ซึ่งของไหลด้านมีครีบบจะไหลขนานกลับแกนกลางของท่อไปตามแผ่นครีบบ การติดครีบบลักษณะตามยาวชนิดนี้เหมาะที่จะใช้กับก๊าซ, ของเหลวที่มีความหนืดสูง หรือของเหลวที่ไหลแบบราบเรียบ (Laminar, Flow) และมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ผ่านแผ่นฟิล์มต่ำกว่าการติดครีบบตามยาว แสดงได้ดังรูปที่ 2.4

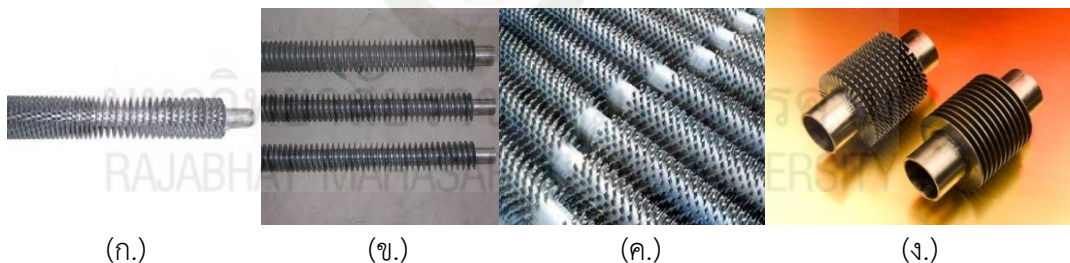


รูปที่ 2.4 ลักษณะการติดครีบทามยาว

- (ก.) ครีบทามยาวปลายจอ (ข.) ครีบทามยาว
(ค.) ครีบทามยาวที่ติดตั้งทั้งภายใน และภายนอก
(ง.) ครีบทามยาวที่ติดตั้งภายใน

ที่มา (นักสิทธิ์ คูวัฒนาชัย, 2533)

2. การติดครีบทามแนวขวางจะติดครีบไว้ในทิศทางตั้งฉากกับแกนกลางของท่อที่ต้องการติดตั้งส่วนใหญ่ใช้ระบายความร้อน หรือเพิ่มความร้อนให้กับก๊าซที่ไหลตั้งฉากกับท่อถ่ายเทความร้อน การติดครีบทามแนวขวางมีหลายแบบ แสดงได้ ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ลักษณะการติดครีบทามแนวขวาง

- (ก.) ครีบเป็นหยักเดี่ยวๆ (ข.) ครีบขดเป็นเกลียว
(ค.) ครีบกกลม (ง.) ครีบรูปแบ่งทรงกระบอก

ที่มา (นักสิทธิ์ คูวัฒนาชัย, 2533)

จากลักษณะการติดครีบที่ได้กล่าวมาข้างต้นพบว่า การติดครีบทามแนวขวางโดยใช้ครีบกกลมมีความเหมาะสมที่สุดที่จะนำมาติดเข้ากับท่อความร้อนชนิดเทอร์โมไซฟอน สำหรับเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน เนื่องจากท่อความร้อนชนิดเทอร์โมไซฟอน มีลักษณะเป็นแบบกกลม

และขดเป็นโคงกล้วย การใช้ครีบบรูปแบบกลมจะติดตั้งได้ง่าย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้เลือกครีบบรูปแบบกลมมาติดตั้งกับท่อความร้อนชนิดเทอร์โมไซฟอน

2.3 ประสิทธิภาพทางความร้อน

ประสิทธิภาพทางความร้อน คือ การถ่ายเทความร้อนที่ได้จริงต่อการถ่ายเทความร้อน เป็นไปได้สูงสุดหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\varepsilon = \left(\frac{Q_c}{Q_{\max}} \right) \dots\dots\dots (2.5)$$

หาค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ทำได้จริง หาได้จากสมการ ดังต่อไปนี้

$$Q_c = m C_p (T_{c_o} - T_{c_i}) \dots\dots\dots (2.6)$$

และหาค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนที่เป็นไปได้สูงสุด หาได้จากสมการ ดังต่อไปนี้

$$Q_{\max} = m C_{p_h} (T_{h_i} - T_{c_o}) \dots\dots\dots (2.7)$$

โดย	ε	คือ	ประสิทธิภาพของครีบบ
	Q_{\max}	คือ	อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุด W
	Q_c	คือ	อัตราการถ่ายเทความร้อนจริง W
	C_{p_h}	คือ	ความจุความร้อนของส่วนทำระเหย $J / kg.^{\circ}C$
	C_{p_c}	คือ	ความจุความร้อนของส่วนควบแน่น $J / kg.^{\circ}C$
	$(T_{h_i} - T_{c_o})$	คือ	ผลต่างของอุณหภูมิขาเข้าส่วนทำระเหยกับอุณหภูมิขาออกส่วนควบแน่น $^{\circ}C$
	$(T_{c_o} - T_{c_i})$	คือ	ผลต่างของอุณหภูมิขาออกส่วนควบแน่นกับอุณหภูมิขาเข้าส่วนควบแน่น $^{\circ}C$

2.4 อุปกรณ์ถ่ายเทความร้อนเทอร์โมไซฟอนแบบมีครีบ

จากการศึกษาลักษณะและพฤติกรรมของการนำความร้อนที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิศวกรรมด้านความร้อนที่ผ่านมาจะพบว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อนของวัตถุในระบบพิกัดฉาก (ผนังราบ) ระบบทรงกระบอกและระบบทรงกลมนั้นในบางกรณีไม่สามารถถ่ายเทความร้อนได้ตามต้องการของวิศวกรผู้ออกแบบ สาเหตุเนื่องจากข้อจำกัดของพื้นที่ผิวสำหรับการถ่ายเทความร้อนและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพาจากสาเหตุผลทั้งสองนี้การเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพานั้น สามารถกระทำให้ออกมาดีกว่าและมีค่าใช้จ่ายสูงแต่สำหรับเพิ่มพื้นที่ผิวสำหรับการถ่ายเทความร้อนในทางปฏิบัติสามารถทำได้ง่ายกว่าโดยการติดตั้งหรือเพิ่มเติมชิ้นส่วนยื่นออกมาสัมผัสกับของไหลและส่วนยื่นออกมานี้เราเรียกว่าครีบระบายความร้อน

2.5 สายเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple)

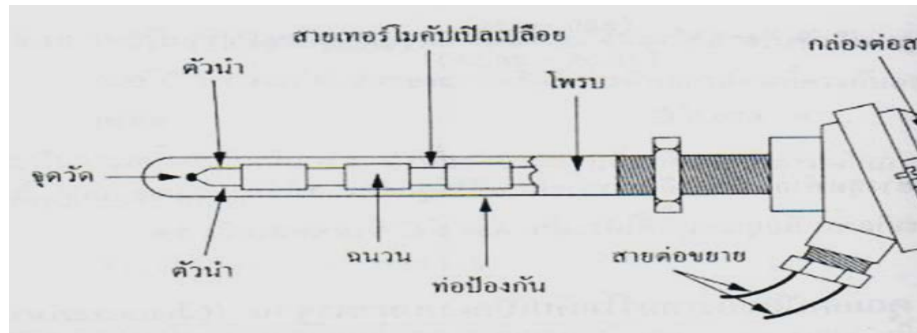
เทอร์โมคัปเปิล คืออุปกรณ์วัดอุณหภูมิโดยใช้หลักการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหรือความร้อนเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้า (emf) เทอร์โมคัปเปิลทำมาจากโลหะตัวนำที่ต่างชนิดกัน 2 ตัว (แตกต่างกันทางโครงสร้างของอะตอม) นำมาเชื่อมต่อปลายทั้งสองเข้าด้วยกันที่ปลายด้านหนึ่งเรียกว่าจุดวัดอุณหภูมิ ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งปล่อยให้เปิดไว้ เรียกว่าจุดอ้างอิง หากจุดวัดอุณหภูมิและจุดอ้างอิงมีอุณหภูมิต่างกันก็จะทำให้มีการนำกระแสในวงจรเทอร์โมคัปเปิลทั้งสองข้าง ปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้ค้นพบโดย Thomus Seebeck นักวิทยาศาสตร์ชาวเยอรมันในปี ค.ศ.1821

2.5.1 คุณสมบัติของเทอร์โมคัปเปิลแบบมาตรฐาน (Characteristic of Standard Thermocouples)

1. ความไว (Sensitivity) จากตารางแรงเคลื่อนของ NBS แสดงว่าย่านของแรงเคลื่อนจากเทอร์โมคัปเปิลจะมีค่าน้อยกว่า 100 mV แต่ความไวที่แท้จริงในการทำงานจะขึ้นอยู่กับการใช้งานจะขึ้นอยู่กับการใช้งานจะขึ้นอยู่กับสภาพสัญญาณและตัวเทอร์โมคัปเปิลเอง

2. โครงสร้าง (Construction) โครงสร้างของเทอร์โมคัปเปิลมีลักษณะ **ดังรูปที่ 2.6** โดยต้องมีลักษณะดังนี้ คือ มีความต้านทานต่ำ ให้สัมประสิทธิ์อุณหภูมิสูง ต้านทานต่อการเกิดออกไซด์ที่อุณหภูมิสูงๆ ทนต่อสภาวะแวดล้อมที่นำไปใช้วัดค่า และเป็นเชิงเส้นสูงที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ตัวฝักหรือท่อป้องกันส่วนมากจะทำจากสแตนเลส ความไวของเทอร์โมคัปเปิลขึ้นอยู่กับความหนาของท่อป้องกันทั้งเยอรมันเนียมและซิลิคอนจะทำให้คุณสมบัติการเกิดเทอร์โมอิเล็กทริกจึงใช้กันมากในอุปกรณ์ทำความเย็น (peltier element) มากกว่าที่จะใช้เป็นเทอร์โมคัปเปิลวัดอุณหภูมิ

ขนาดของสายเทอร์โมคัปเปิลกำหนดได้จากการใช้งานแต่ละอย่าง และมีขนาดจาก #10 ในสภาวะแวดล้อมที่ไม่คงที่ จนถึงขนาด # 30 หรือแม้กระทั่ง 0.02 mm ซึ่งเป็นสายแบบไมโครไวร์ (microwire) ที่ใช้กับการวัดอุณหภูมิการกลั่นในงานทางชีววิทยา



รูปที่ 2.6 แสดงโครงสร้างของเทอร์โมคัปเปิล
ที่มา (นวกัทรรา ทวีพล, 2555)

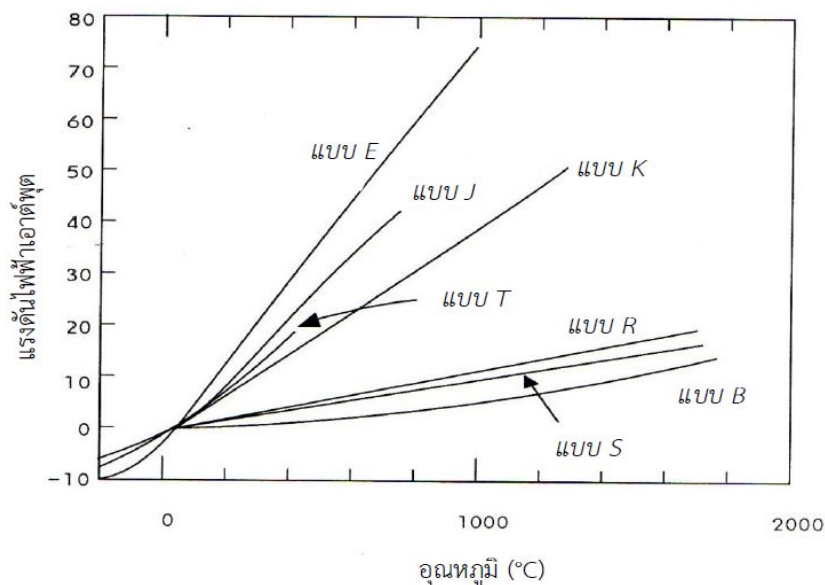
3. ย่านการใช้งาน (Range) ย่านอุณหภูมิการใช้งานและความไวในการวัดของเทอร์โมคัปเปิล แต่ละตัว จะแตกต่างกันตามแต่ละสมาคมจะกำหนด ในส่วนที่สำคัญคือค่าแรงเคลื่อนที่ออกมาจากแต่ละอุณหภูมิ จะต้องอ้างอิงกับตารางค่ามาตรฐานของแต่ละสมาคมที่ใช้ให้ถูกต้องเป็นเอกภาพเดียวกันหมดทั้งระบบ

4. เวลาตอบสนอง (Time Response) เวลาตอบสนองของเทอร์โมคัปเปิลขึ้นอยู่กับขนาดของสายและวัสดุที่นำมาทำท่อป้องกันตัวเทอร์โมคัปเปิล

5. การปรับสภาพสัญญาณ (Signal Conditioning) แรงเคลื่อนเทอร์โมคัปเปิลจะมีขนาดน้อยมากจึงจำเป็นต้องมีการขยายสัญญาณโดยใช้ออปแอมป์ขยายความแตกต่างที่มีอัตราขยายสูงๆ

2.5.2 การใช้งานเทอร์โมคัปเปิลมาตรฐาน (Characteristic in Application of Thermocouple Standard Type)

ในปัจจุบัน พบว่ามีเทอร์โมคัปเปิลมาตรฐานอยู่ 7 ชนิดตามมาตรฐานของ ANSI และ ASTM โดยการจำแนกตามประเภทของวัสดุที่ใช้ทำได้แก่เทอร์โมคัปเปิลแบบ S, R, B, J, K, T และ E ที่ 7 แบบมีอุณหภูมิ ต่างๆแสดง ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 อุณหภูมิเทอร์โมคัปเปิล ทั้ง 7 ชนิด
ที่มา (นวกัทรรา ทวีพล, 2555)

ชนิดของวัสดุที่ใช้ทำเทอร์โมคัปเปิลมาตรฐานแต่ละแบบแสดง ดังตารางที่ 2.2 โดยชื่อแรกของโลหะตัวนำหมายถึงขั้วไฟฟ้าที่มีศักย์เป็นบวก (+) และชื่อหลังมีศักย์เป็นลบ (-)

ตารางที่ 2.2 ชนิดของวัสดุที่ใช้ทำเทอร์โมคัปเปิลมาตรฐานแบบต่าง ๆ

มาตรฐาน	ชนิดของวัสดุตัวนำ
Type K	NickelChromium/NickelAluminium
Type J	Iron/Constantan
Type T	Copper/Constantan
Type E	Nickel Chromium/Constantan
Type N	Nicrosil/Nisil
Type R	Platinum 13%/Rhodium
Type S	Platinum 10%/Rhodium
Type B	Platinum 30%/Rhodium

ที่มา (นวกัทรรา ทวีพล, 2555)

ในงานวิจัยนี้เป็นสายเทอร์โมคัปเปิลแบบ K ที่เลือกใช้ในการวิจัยนี้

สายเทอร์โมคัปเปิลแบบ K ธาตุหนึ่งที่เป็นฐานสำหรับการสร้าง คือ นิกเกิล เทอร์โมคัปเปิลชนิดนี้เริ่มผลิตให้เป็นมาตรฐานตั้งแต่ปี ค.ศ. 1916 โดยพื้นฐานการผลิต ขั้วหนึ่งจะเป็นนิกเกิลที่เจือปนด้วยอะลูมิเนียมส่วนอีกด้านที่เจือปนด้วยโครเมียม เพราะว่าในปี ค.ศ. 1916 ยังไม่สามารถสร้างนิกเกิลบริสุทธิ์ได้จึงได้เติมสารไม่บริสุทธิ์ต่างๆ ในส่วนผสมของวัสดุชนิด K แต่ในปัจจุบันได้มีการระมัดระวังส่วนผสมที่จะทำให้เกิดความไม่บริสุทธิ์ดังกล่าวเพื่อเหตุผลในการบำรุงรักษาและสอบเทียบ

ด้วยเหตุนี้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K ที่กำหนดเป็นค่ามาตรฐานจะไม่ใช้โลหะผสมแต่โดยทั่วไปจะผสมธาตุพิเศษเข้าไปเพื่อปรับปรุงคุณภาพของแรงเคลื่อน อุณหภูมิของจุดหลอมละลายที่กำหนดไว้ชั่วคราวระวางในการใช้งานของชนิด K มีดังนี้

1. ขั้วลบของเทอร์โมคัปเปิลจะเป็นวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก (เหล็กที่เป็นสารแม่เหล็ก) ที่อุณหภูมิห้อง แต่ที่จุดคิวรีของมัน คือ อุณหภูมิที่มันเปลี่ยนจากคุณสมบัติเหล็กไปเป็นแม่เหล็ก อยู่ในช่วงที่ใช้งานพอดี ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงแรงเคลื่อนทางเอาต์พุตอย่างทันทีทันใด ยิ่งไปกว่านั้นพบว่าจุดคิวรีดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของโลหะผสม จุดคิวรีนี้จะเปลี่ยนคุณสมบัติจากเทอร์โมคัปเปิลตัวหนึ่งให้เป็นเทอร์โมคัปเปิลอีกตัวหนึ่ง ดังนั้นจึงต้องทดลองหาการเปลี่ยนแปลงแรงเคลื่อนที่ไม่ทราบค่า ณ อุณหภูมิที่เราไม่ทราบค่านี้

2. ที่อุณหภูมิสูง ๆ (ช่วง 200°C ถึง 600°C) เทอร์โมคัปเปิลชนิด K จะมีผลของฮีสเทอรีซิสเกิดขึ้นขณะที่มันอ่านค่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นและในช่วงที่อุณหภูมิลดลง ซึ่งเป็นช่วงที่ไม่สามารถจะคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงแรงเคลื่อนได้

3. ที่อุณหภูมิ 1000°C ขั้วของเทอร์โมคัปเปิลชนิด K จะเกิดออกไซด์ เป็นเหตุให้มีการเปลี่ยนแปลงแรงเคลื่อน

4. การใช้โคบอลต์เป็นโลหะผสมสำหรับเทอร์โมคัปเปิลชนิด K จะทำให้เกิดปัญหาในอุตสาหกรรมนิวเคลียร์ หรือในพื้นที่อื่น ๆ ที่มีฟลักซ์นิวตรอนสูง ๆ ธาตุบางตัวจะรับเอาการปลดปล่อยนิวเคลียร์ จึงทำให้เปลี่ยนแปลงแรงเคลื่อนทางด้านเอาต์พุตในการทำงานและความแน่นอนของเทอร์โมคัปเปิลในงานอุตสาหกรรม ที่กำหนดโดยมาตรฐาน IEC 584 (รหัสสำหรับการวัดอุณหภูมิโดยใช้เทอร์โมคัปเปิล) ช่วงการวัดอุณหภูมิต่อเนื่องของเทอร์โมคัปเปิลแบบนี้จะเป็น -270°C ถึง $+1,370^{\circ}\text{C}$

โดยมีระดับความแน่นอนซึ่งกำหนดโดยมาตรฐาน IEC 584 แสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 การใช้งาน และคุณลักษณะของเทอร์โมคัปเปิลชนิด K

ย่านอุณหภูมิ ใช้งาน (°C)	ย่านอุณหภูมิ (°C)	ค่าความผิดพลาด (°C)	ค่าความไวสูงสุด (โดยประมาณ) ($\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$)
-270 ถึง 1372	-270.0 ถึง 0.0	-0.02 ถึง 0.04	50
	0.0 ถึง 500.0	-0.05 ถึง 0.04	
	500.0 ถึง 1372.0	-0.05 ถึง 0.06	

ที่มา (นวกัทราก ทวีพล, 2555)

ข้อดีของแบบ K

1. เป็นแบบที่นิยมใช้แพร่หลายมากที่สุด
2. สำหรับการวัดอุณหภูมิช่วงสั้น ๆ จะวัดได้จาก -180°C ถึงประมาณ $1,350^{\circ}\text{C}$
3. สามารถใช้วัดในงานที่มีปฏิกิริยาออกซิไดซิ่ง หรือสภาวะแบบเฉื่อย (inert) ได้ดีกว่าแบบอื่น ๆ
4. สามารถใช้กับสภาพงานที่มีการแผ่รังสีความร้อนได้ดี
5. ให้อัตราการเปลี่ยนแรงเคลื่อนไฟฟ้าต่ออุณหภูมิดีกว่าแบบอื่น ๆ (ความชันเกือบเป็น 1) และมีความเป็นเชิงเส้นมากที่สุดในบรรดาเทอร์โมคัปเปิลด้วยกัน

ข้อเสียของแบบ K

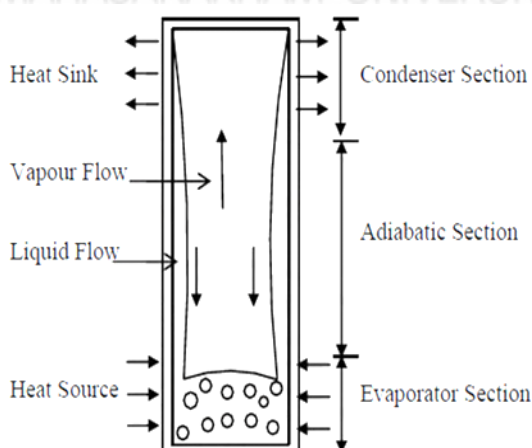
1. ไม่เหมาะกับการวัดที่ต้องสัมผัสกับปฏิกิริยารีดิวซิ่งและออกซิไดซิ่งโดยตรง
2. ไม่เหมาะกับงานที่มีไอของซัลเฟอร์
3. ไม่เหมาะกับสภาพงานที่เป็นสุญญากาศ (ยกเว้นจะใช้ในช่วงเวลาสั้นๆ)
4. หลังการใช้งานไป 30 ปี ทำให้ส่วนผสมทางเคมีเปลี่ยนไป เป็นผลทำให้คุณสมบัติของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเปลี่ยนไป

2.6 ชนิดเทอร์โมไซฟอน (Thermosyphon)

เทอร์โมไซฟอนเป็นอุปกรณ์ถ่ายเทความร้อนที่มีการทำงานโดยอาศัยหลักการเดือด และการกลั่นตัวของสารทำงานที่บรรจุอยู่ภายใน ซึ่งมีคุณสมบัติพิเศษคือ มีค่าการนำความร้อนสูงมาก เพราะค่าความร้อนแฝงของการระเหยของสารทำงานมีค่าสูงมาก จึงสามารถถ่ายเทความร้อนได้ปริมาณมากจากปลายด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่ง แม้ว่าจะมีค่าความแตกต่างของอุณหภูมิที่ปลายทั้งสองด้านเพียงเล็กน้อย (ประดิษฐ์ เทอดทูล, 2536) สามารถแบ่งออกได้เป็นสองชนิดคือ เทอร์โมไซฟอนแบบท่อปิดผนึกและเทอร์โมไซฟอนแบบวงรอบ

2.6.1 เทอร์โมไซฟอนแบบท่อปิดผนึก

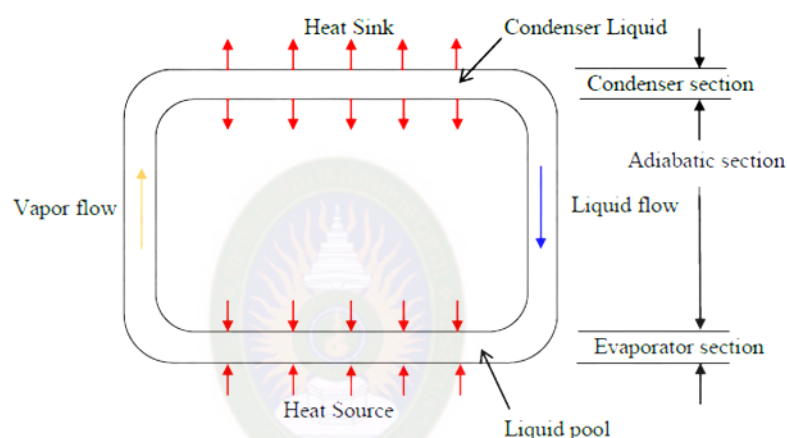
ลักษณะของเทอร์โมไซฟอนแบบท่อปิดผนึกสามารถอธิบายได้ คือ มีสารทำงานบรรจุอยู่ในภาชนะปิดซึ่งเป็นสุญญากาศและมีส่วนประกอบที่สำคัญอยู่ 3 ส่วน คือ ส่วนทำระเหย ส่วนกันความร้อน และส่วนควบแน่น หลักการทำงาน คือ เมื่อส่วนทำระเหยได้รับความร้อนจากแหล่งจ่ายความร้อน สารทำงานในสถานะของเหลวที่บรรจุอยู่ภายในจะร้อนขึ้นและเดือดระเหยกลายเป็นไอ ไหลผ่านส่วนคงที่ของความร้อนขึ้นไปยังส่วนควบแน่นที่จะคายความร้อนออกสู่แหล่งรับความร้อน สารทำงานในสถานะไอจะควบแน่นเป็นของเหลวแล้วไหลกลับสู่ส่วนทำระเหยเพื่อรับความร้อนอีกโดยอาศัยแรงโน้มถ่วงของโลก ความสามารถในการส่งผ่านความร้อนของเทอร์โมไซฟอน ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยด้วยกัน เช่น ขนาดท่อ ชนิดท่อ ลักษณะการติดตั้งท่อชนิดของสารทำงาน อุณหภูมิ แสดง ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แสดงลักษณะของเทอร์โมไซฟอนแบบท่อปิดผนึก
ที่มา (ประดิษฐ์ เทอดทูล, 2536)

2.6.2 เทอร์โมไซฟอนแบบวงรอบ

เทอร์โมไซฟอนแบบวงรอบ (Loop Thermosyphon) เป็นการพัฒนาสมรรถนะของเทอร์โมไซฟอนอีกรูปแบบหนึ่ง โดยมีการไหลของของไหลหรือสารทำงานในสถานะของเหลวและสถานะไอจะไม่ไหลสวนทางกันทำให้ช่วยลดปัญหาการเกิดการหลุดติดของหยดของเหลวไปบนกับไอที่กำลังลอยขึ้น (Entrainment) และเพิ่มความคล่องตัวในการวางตา ของส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นอุณหภูมิของแหล่งความร้อนกับแหล่งความเย็นและสัดส่วนการเติมสารทำงานเป็นต้น แสดง ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แสดงลักษณะของเทอร์โมไซฟอนแบบวงรอบ
ที่มา (ประดิษฐ์ เทอดทูล, 2536)

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Literature review)

Noie S.H. (2006) ได้ศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนของท่อเทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะ โดยได้ศึกษาอัตราการถ่ายเทความร้อนเข้าในช่วง 100W ถึง 900W อัตราส่วนการเติมสารทำงานที่ศึกษาอยู่ระหว่างร้อยละ 30 ถึง 90 ของส่วนทำระเหย กำหนดอัตราส่วนสนทัด (ความยาวส่วนทำระเหยต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง) 3 ค่า คือ 7.45, 9.8 และ 11.8 โดยใช้น้ำบริสุทธิ์เป็นสารทำงาน พบว่า อุณหภูมิกระจายตลอดพื้นผิวของท่อเทอร์โมไซฟอนในส่วนทำระเหยค่อนข้างสม่ำเสมอ วัดอุณหภูมิในส่วนควบแน่นจะแสดงค่าต่ำ ขณะที่อุณหภูมิต่ำลงเพราะเกิดจากการปะทะของไอน้ำกับน้ำในส่วนควบแน่น

Rashidian, B. et al. (2008) ได้ทำการตรวจสอบทฤษฎีพฤติกรรมของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนแบบสถานะชั่วครู่ โดยใช้ความได้เปรียบจากรูปแบบการวิเคราะห์แบบสถานะชั่วครู่เพื่อจำลองการตอบสนองของท่อความร้อน พฤติกรรมทางความร้อนแบบสถานะชั่วครู่ของท่อ

ความร้อนที่ถูกพัฒนาเพื่อวิเคราะห์ถึงการตอบสนองของระบบ ซึ่งถูกแก้ไขสมการโดยใช้โปรแกรม Matlab และแก้ไขสมการโดยใช้โปรแกรม Simulink ซึ่งเป็นแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ตามวิธี (Lumped method) ที่ได้รับการพัฒนาเพื่อประเมินอุณหภูมิของท่อความร้อน เช่นเดียวกับเวลาที่จำเป็น ต่อการเข้าถึงสถานะคงที่ โปรแกรมนี้ถือได้ว่าเป็นเครื่องมือที่ง่ายสำหรับการสร้างแบบจำลอง และการออกแบบท่อความร้อนในสถานะชั่วคราว ผลจากแบบจำลองนี้พบว่า สามารถยอมรับได้เมื่อเทียบกับการคำนวณแบบอื่นๆ

วรารกร ประทุมทอง และ กฤษฎากร สมบูรณ์พันธ์ (2557) งานวิจัยนี้ เป็นการศึกษา ลักษณะการโอนความร้อนของท่อและเปลี่ยนความร้อนชนิดเทอร์โมไซฟอนแบบติดครีป โดยใช้ท่อ แลกเปลี่ยนความร้อนเทอร์โมไซฟอนแบบติดครีปโดยจะศึกษาท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร ความสูงครีป 5, 10 และ 15 มิลลิเมตร ความหนาครีป 1, 1.5 และ 2 มิลลิเมตร ระยะห่าง ระหว่างครีป 10, 20 และ 30 มิลลิเมตร มีส่วนทำระเหย ของส่วนกันความร้อน และส่วนควบแน่น เป็น 200, 100 และ 200 มิลลิเมตรตามลำดับ โดยใช้น้ำกลั่น และ เอทานอล เป็นสารทำงานที่ อัตราการเติมสาร 50 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตรของส่วนทำระเหย ควบคุมอุณหภูมิในส่วนทำระเหยที่ 150, 160, 170, 180, 190 และ 200 องศาเซลเซียส และมุมเอียงของท่อเทอร์โมไซฟอนที่ใช้ในการ ทดสอบ 90 องศา กับแนวระดับ

จากผลการวิจัยพบว่า ท่อแลกเปลี่ยนความร้อนเทอร์โมไซฟอนแบบติดครีป ที่ความสูง ครีป 5, 10 และ 15 ความหนา 1, 1.5 และ 2 มิลลิเมตร ระยะห่างระหว่างครีป 30, 20 และ 10 มิลลิเมตร จะทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหน่วยพื้นที่เพิ่มขึ้นตามลำดับ ในส่วนอุณหภูมิ และ สารทำงาน พบว่าที่อุณหภูมิส่วนทำระเหย 150, 160, 170, 180, 190 และ 200 องศาเซลเซียส อุณหภูมิเพิ่มขึ้นตามลำดับจะได้ค่าการถ่ายเทความร้อนต่อหน่วยพื้นที่เพิ่มขึ้น และเมื่อมีการเปลี่ยน สารทำงานจากน้ำกลั่น เป็น เอทานอล พบว่าจะได้อัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหน่วยพื้นที่เพิ่มขึ้น ด้วย

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะศึกษาผลของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในที่มีผลต่อ คุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนชนิดเทอร์โมไซฟอนที่โหมดความร้อนสูง เพื่อนำไป ประยุกต์ใช้งานต่อไป

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในการดำเนินงานวิจัยผลของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในที่มีผลต่อคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนชนิดเทอร์โมไซฟอนที่โหมดความร้อนสูง จำเป็นต้องมีเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัยและขั้นตอนในการทำการวิจัย ซึ่งสามารถแจกแจงรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

สามารถจำแนกออกเป็นส่วนของเครื่องมือทดสอบ เครื่องมือเติมสารทำงาน เครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดสอบ ดังต่อไปนี้

3.1.1 เครื่องมือทดสอบ

1. ชุดทดสอบท่อความร้อนโดยออกแบบให้ด้านบนของชุดทดสอบเป็นส่วนควบแน่น ซึ่งจะใช้อากาศเย็นเป่าผ่านด้วยพัดลมระบายอากาศซึ่งควบคุมความเร็วลมให้เหมาะสมเพื่อทำการระบายความร้อนและศึกษาการถ่ายเทความร้อนในส่วนควบแน่น ในด้านล่างของชุดทดสอบเป็นส่วนทำระเหยซึ่งจะใช้อากาศร้อนจากขดลวดความร้อน (Heater) โดยบังคับลมร้อนด้วยพัดลมดูดอากาศ (Blower) เพื่อให้ความร้อนแก่ท่อความร้อนชนิดเทอร์โมไซฟอนในส่วนทำระเหย และเมื่ออากาศร้อนไหลผ่านท่อเทอร์โมไซฟอนในส่วนทำระเหยแล้ว ลมร้อนจะถูกบังคับให้ไหลวนเข้าสู่ขดลวดความร้อนใหม่อีกครั้งด้วยพัดลมดูดอากาศเพื่อความสะดวกในการควบคุมอุณหภูมิ และในด้านบนของชุดทดสอบจะมีช่องสำหรับใส่ชุดทดสอบที่นำความร้อนลงไป ซึ่งจะทำการหมุนวนกันความร้อนชุดทดสอบที่นำความร้อน แสดง **ดังรูปที่ 3.1**



รูปที่ 3.1 ชุดทดสอบต่อความร้อน

2. ชุดทดสอบต่อความร้อนเทอร์โมไซฟอน จำนวน 26 ชุด คือ ท่อนำความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนซึ่งเป็นท่อความร้อนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 16, 21 และ 26 มิลลิเมตร ตามลำดับ ท่อความร้อนชนิดเทอร์โมไซฟอนมีครีบน้ำขนาด 5, 1 และ 1.5 มิลลิเมตร ตามลำดับ ความสูงของครีบน้ำขนาด 5, 10 และ 15 มิลลิเมตร ตามลำดับ ระยะห่างครีบน้ำ 10 มิลลิเมตร แสดง ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ชุดทดสอบต่อความร้อนเทอร์โมไซฟอน

(ก.) ท่อทดสอบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 16 มิลลิเมตร

(ข.) ท่อทดสอบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 21 มิลลิเมตร

(ค.) ท่อทดสอบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 26 มิลลิเมตร

3.1.2 เครื่องมือเติมสารทำงาน และสารทำงาน

1. สารทำงาน คือ น้ำกลั่น และ เอทานอลถูกเลือกเป็นสารทำงานในกาทดสอบ

ครั้งนี้



รูปที่ 3.3 สารทำงานเอทานอล 95 เปอร์เซ็นต์ และ น้ำกลั่น

2. ชุดเติมสารทำงาน เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเติมสารทำงาน เข้าสู่ท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนซึ่งประกอบด้วย ปั๊มสุญญากาศ (Vacuum pump) วาล์ว เกจวัดความดัน (Pressure Gauge) สายเติมสารทำงาน และ Glass tube วัดปริมาณการเติมสารทำงานแสดง

ที่ 3.4

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY



รูปที่ 3.4 ชุดเติมสารทำงาน

3.1.3 เครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดสอบ

1. เครื่องบันทึกข้อมูล (Data Logger) ยี่ห้อ (Agilent Technologies รุ่น 34970A) มี 60 Channel มีช่วงการวัดอุณหภูมิที่ -200 องศาเซลเซียส ถึง 1,100 องศาเซลเซียส มีความละเอียด ± 0.1 องศาเซลเซียส แสดง ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 เครื่องบันทึกข้อมูล (Data Logger)

2. สายวัดอุณหภูมิ (Thermocouple) ยี่ห้อ OMEGA Type K ใช้ร่วมกับเครื่องบันทึกข้อมูลแสดง ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 สายวัดอุณหภูมิ (Thermocouple)

3. เครื่องวัดความเร็วลมแบบลวดความร้อน (Hot Wire) ยี่ห้อ TESTO Model 445 ค่าความผิดพลาด ± 0.2 m/s สำหรับวัดความเร็วลมส่วนควบแน่นแสดง ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 เครื่องมือวัดความเร็วลม

4. แผงควบคุม ซึ่งประกอบด้วย เครื่องควบคุมความเร็วมอเตอร์ (Inverter) และ เครื่องควบคุมความเร็วลม (Inverter) แสดง ดังรูปที่ 3.8

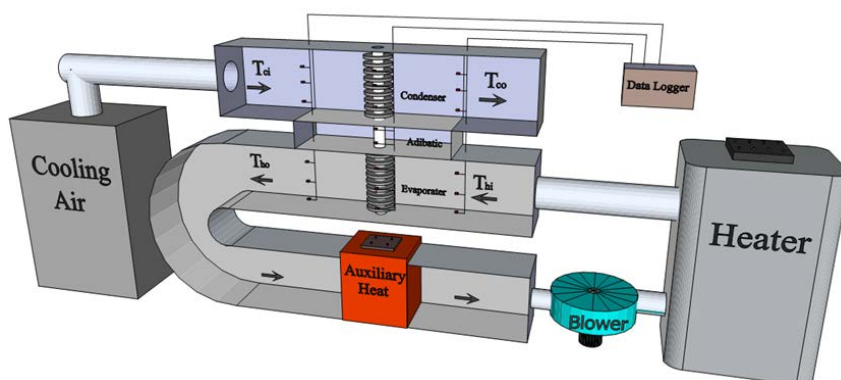


รูปที่ 3.8 แผงควบคุม

3.2 วิธีดำเนินงานวิจัย

ตอนที่ 1 ศึกษาศึกษาผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อความร้อนชนิดเทอร์โมไฟนอนในโหมดความร้อนสูง

1. ทำการดูดอากาศออกจากท่อความร้อนประมาณ 30 นาทีเพื่อให้เป็นสุญญากาศและทดสอบรอยรั่วของท่อความร้อน
2. บรรจุสารทำงานน้ำเข้าไปในท่อความร้อนโดยใช้ชุดเติมสารทำงาน จากนั้นทำการบีบปลายท่อ ในส่วนของท่อเติมสารทำงาน และทำการเชื่อมปิดปลายท่ออย่างรวดเร็ว
3. นำชุดทดสอบทั้ง 27 ชุด ที่มีขนาดท่อ 16, 21 และ 26 มิลลิเมตรตามลำดับ ความหนาครีป 1, 1.5 และ 2 มิลลิเมตรตามลำดับ ความสูงของครีป 5, 10 และ 15 มิลลิเมตรตามลำดับ ในการทดสอบแต่ละครั้งจะทดสอบได้ที่ละตัวเมื่อเติมสารทำงานเรียบร้อยแล้วประกอบเข้ากับชุดทดสอบท่อความร้อน
4. ติดตั้งชุดทดลองท่อความร้อนชนิดเทอร์โมไฟนอนเข้ากับเครื่องทดสอบเพื่อต่อกับอุปกรณ์และเครื่องมือวัดอุณหภูมิเข้ากับขาออก
5. ติดตั้งสายวัดอุณหภูมิ ที่ตำแหน่งอากาศทางเข้าและทางออกของแหล่งให้ความร้อน (Heater) และติดตั้งสายวัดอุณหภูมิ ที่ตำแหน่งอากาศทางเข้าและทางออกของชุดทดลองในส่วนระเหย และส่วนควบแน่นและติดตั้งสายวัดอุณหภูมิ ที่ผิวท่อและผิวครีปในส่วนส่วนระเหยและส่วนควบแน่น
6. ต่อสายวัดอุณหภูมิทั้งหมดเข้ากับเครื่องบันทึกข้อมูล (Data Logger) แสดงดังรูปที่ 3.10 เพื่อเก็บข้อมูลไว้นำไปวิเคราะห์ในขั้นต่อไป



รูปที่ 3.10 ลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์
ที่มา (วสันต์ ปินะเต, 2556)

7. ควบคุมอุณหภูมิของแหล่งให้ความร้อนโดยทำการปรับอุณหภูมิของเครื่องควบคุมอุณหภูมิ (Control temperature)

8. ควบคุมความเร็วมอเตอร์ โดยการปรับความเร็วจากเครื่องควบคุมความเร็วมอเตอร์

9. ควบคุมความเร็วลม โดยใช้ชุดวัดอัตราการไหล วัดอัตราการไหลของอากาศในส่วนควบแน่น แล้วใช้อินเวอร์เตอร์ในการควบคุมความเร็วลมเพื่ออุณหภูมิในส่วนกันความร้อนเข้าสู่สภาวะคงที่

10. เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่เริ่มบันทึกข้อมูลทุกจุด

11. ดำเนินการปรับเพิ่มอุณหภูมิของส่วนทำระเหยให้สูงขึ้นเรื่อยๆจนกว่าที่อุณหภูมิร้อนเข้าอุณหภูมิ 100 ถึง 200 องศาเซลเซียส และบันทึกผลการทดสอบ

12. ทำขั้นตอนการทดสอบจากข้อ 1 ถึง 11 จนครบตัวแปรตามที่กำหนด แล้วเปลี่ยนชุดทดสอบที่มีระยะห่างระหว่างครีป 10 มิลลิเมตร เปลี่ยนความหนาครีปเป็น 1.5 และ 2 มิลลิเมตรตามลำดับ ความสูงครีป 5, 10 และ 15 มิลลิเมตรตามลำดับ

13. ทำตามขั้นตอนที่ 1 ถึง 12 แล้วเปลี่ยนสารทำงานจาก น้ำ เป็น เอทานอล

14. นำค่าอุณหภูมิที่แตกต่าง ในส่วนที่ทางขาเข้าและทางขาออกของส่วนระเหย และส่วนควบแน่น ที่ได้ไปคำนวณหาค่าการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนชนิดเทอร์โมไซฟอน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 16, 21 และ 26 มิลลิเมตรตามลำดับ ระยะห่างครีปขนาดเดียว 10 มิลลิเมตร ความหนาของครีป 1, 1.5 และ 2 มิลลิเมตรตามลำดับ ความสูงครีป 5, 10 และ 15 มิลลิเมตรตามลำดับ ในแต่ละการทดสอบซึ่งจะทำการทดสอบการเก็บข้อมูล 3 ครั้งภายหลัง

15. คำนวณหาอัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนชนิดเทอร์โมไซฟอนที่สภาวะปกติตามขอบเขตการวิจัยได้จากสมการ 2.1 ดังนี้

$$Q = \dot{m} C_p (T_{out} - T_{in})$$

การวิเคราะห์ข้อมูลของอัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหน่วยพื้นที่คำนวณจากสมการ 2.3 ดังนี้

$$q = \frac{Q}{A_c + A_{fn}}$$

การคำนวณหาค่าประสิทธิผลได้จากสมการ 2.5 ดังนี้

$$\mathcal{E} = \left(\frac{Q_c}{Q_{max}} \right)$$

ตอนที่ 2 เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิผลของค่าการถ่ายโอนความร้อนที่ได้จากเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดต่างๆ

นำข้อมูลการถ่ายเทความร้อนที่ได้จากสารทำงาน เส้นผ่านศูนย์กลางขนาดภายในและลักษณะครีป มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิทำงาน และค่าอัตราการถ่ายเทความร้อน ที่ระยะห่างระหว่างครีป 10 มิลลิเมตร ความหนาครีป 1, 1.5 และ 2 มิลลิเมตร ตามลำดับ ความสูงครีป 5, 10 และ 15 มิลลิเมตรตามลำดับ



มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

บทที่ 4

ผลการวิจัย และวิเคราะห์ข้อมูล

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมาย เพื่อศึกษาผลของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อความร้อนชนิดเทอร์โมไซฟอน ที่มีผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนชนิดเทอร์โมไซฟอนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 16, 21 และ 26 มิลลิเมตรตามลำดับ โดยใช้ น้ำ และเอทานอล เป็นสารทำงาน อุณหภูมิทำงาน 100, 120, 140, 160, 180 และ 200 องศาเซลเซียส ผลการทดสอบ

4.1 ผลการศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน

จากการศึกษาผลของท่อความร้อนเทอร์โมไซฟอน ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 16, 21 และ 26 มิลลิเมตรตามลำดับ ความหนาครีป 1 มิลลิเมตร ความสูงของครีป 5, 10 และ 15 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิ 100, 120, 140, 160, 180 และ 200 องศาเซลเซียส โดยใช้ น้ำ และเอทานอล เป็นสารทำงาน แสดงได้ ดังตารางที่ 4.1 และเมื่อนำมาหาความสัมพันธ์จะได้ ดังรูปที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนใช้สารทำงาน น้ำ และ เอทานอล ความสูงของครีบ 5, 10 และ 15 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 16, 21 และ 26 มิลลิเมตร ความหนาครีบ 1 มิลลิเมตร

อัตราการถ่ายเทความร้อน q (W/m^2)							
ความสูง ครีบ	อุณหภูมิ	$D_i = 16$ mm		$D_i = 21$ mm		$D_i = 26$ mm	
		Water	Ethanal	Water	Ethanal	Water	Ethanal
5 mm	100	9.35	17.47	10.77	19.29	12.74	20.73
	120	9.97	17.97	11.86	19.63	13.72	21.16
	140	10.76	18.75	12.15	20.93	14.93	22.29
	160	11.77	19.32	13.45	21.41	15.25	23.37
	180	12.06	19.59	13.93	21.62	16.2	23.97
	200	12.33	20.79	14.89	22.93	17.24	24.33
10 mm	100	10.55	18.63	12.19	20.4	14.84	23.10
	120	11.50	19.34	13.03	21.71	15.92	23.78
	140	12.40	20.27	13.92	22.02	16.39	24.15
	160	13.11	21.73	15.70	23.19	17.79	25.44
	180	14.06	22.13	16.74	24.16	18.42	26.38
	200	15.03	23.04	17.83	24.94	19.16	27.00
15 mm	100	11.03	22.01	13.98	23.65	16.60	25.46
	120	12.17	22.81	15.15	24.66	17.30	26.77
	140	13.33	23.19	16.30	25.72	18.80	27.66
	160	14.54	24.11	17.70	26.78	19.52	28.29
	180	15.82	24.95	19.08	27.81	20.73	29.33
	200	16.36	25.82	19.60	28.76	20.89	30.16

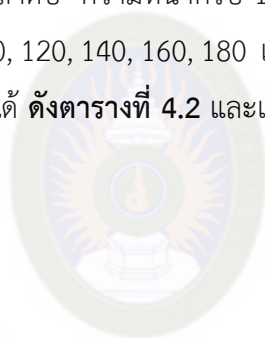
หมายเหตุ D_i คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน



มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

จากรูปที่ 4.1 ผลของท่อความร้อนเทอร์โมไซฟอน เมื่อใช้สารทำงานน้ำและ เอทานอล อุณหภูมิทำงานที่ 100, 120, 140, 160, 180 และ 200 องศาเซลเซียส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกท่อ 16, 21 และ 26 มิลลิเมตรตามลำดับ ความหนาครีป 1 มิลลิเมตร ที่มีความสูงครีป 5, 10 และ 15 มิลลิเมตร จากการทดสอบที่ใช้สารทำงานเอทานอลท่อที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 26 มิลลิเมตร และมีความสูงครีป 15 มิลลิเมตร จะให้ค่าการถ่ายเทแล้วร้อนได้สูงกว่าท่อขนาด 21 และ 16 มิลลิเมตรตามลำดับ ให้ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ 30.16 วัตต์ต่อตารางเมตร กรณีใช้น้ำเป็นสารทำงานท่อที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 26 มิลลิเมตร และมีความสูงครีป 15 มิลลิเมตร จะให้ค่าการถ่ายเทแล้วร้อนได้สูงกว่าท่อขนาด 21 และ 16 มิลลิเมตรตามลำดับ โดยให้อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงที่ 20.89 วัตต์ต่อตารางเมตร

จากการศึกษาผลของท่อความร้อนเทอร์โมไซฟอน ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 16, 21 และ 26 มิลลิเมตรตามลำดับ ความหนาครีป 1.5 มิลลิเมตร ความสูงของครีป 5, 10 และ 15 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิ 100, 120, 140, 160, 180 และ 200 องศาเซลเซียส โดยใช้น้ำและเอทานอลเป็นสารทำงาน แสดงได้ ดังตารางที่ 4.2 และเมื่อนำมาหาความสัมพันธ์จะได้ ดังรูปที่ 4.2



มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

ตารางที่ 4.2 ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนใช้สารทำงาน น้ำ และ เอทานอล ความสูงของครีป 5, 10 และ 15 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 16, 21 และ 26 มิลลิเมตร ความหนาครีป 1.5 มิลลิเมตร

อัตราการถ่ายเทความร้อน q (W/m^2)							
ความสูง ครีป	อุณหภูมิ	$D_i = 16$ mm		$D_i = 21$ mm		$D_i = 26$ mm	
		Water	Ethanal	Water	Ethanal	Water	Ethanal
5 mm	100	7.19	14.37	8.67	15.69	10.62	17.48
	120	8.03	15.41	9.81	16.76	11.33	18.1
	140	8.77	15.94	10.75	17.57	12.09	19.53
	160	9.39	16.33	11.19	17.77	12.79	19.87
	180	10.25	17.29	11.57	18.83	13.13	20.64
	200	11.16	17.57	12.11	18.92	13.69	21.05
10 mm	100	8.81	15.14	10.36	17.74	12.41	19.45
	120	8.97	16.42	10.78	18.2	13.24	20.59
	140	9.06	16.39	11.23	18.78	13.68	21.31
	160	10.21	17.56	12.67	19.32	14.21	21.66
	180	11.35	18.25	13.49	19.51	15.12	22.37
	200	11.77	19.08	14.32	20.02	16.14	23.17
15 mm	100	8.89	15.98	11.03	17.55	12.79	19.10
	120	9.53	17.67	11.87	18.98	13.87	20.57
	140	9.89	18.34	12.48	19.59	14.92	21.16
	160	10.59	18.82	13.29	19.99	15.56	22.65
	180	11.85	19.62	14.30	20.67	16.47	23.03
	200	12.58	20.59	15.23	21.78	16.84	24.49

หมายเหตุ D_i คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน



มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

จากรูปที่ 4.2 ผลของท่อความร้อนเทอร์โมไซฟอน เมื่อใช้สารทำงานน้ำและ เอทานอล อุณหภูมิทำงานที่ 100, 120, 140, 160, 180 และ 200 องศาเซลเซียส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกท่อ 16, 21 และ 26 มิลลิเมตรตามลำดับ ความหนาครีป 1 มิลลิเมตร ที่มีความสูงครีป 5, 10 และ 15 มิลลิเมตร จากการทดสอบที่ใช้สารทำงานเอทานอลท่อที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 26 มิลลิเมตร และมีความสูงครีป 15 มิลลิเมตร จะให้ค่าการถ่ายเทแล้วร้อนได้สูงกว่าท่อขนาด 21 และ 16 มิลลิเมตรตามลำดับ ให้ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ 24.49 วัตต์ต่อตารางเมตร กรณีใช้น้ำเป็นสารทำงานท่อที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 26 มิลลิเมตร และมีความสูงครีป 15 มิลลิเมตร จะให้ค่าการถ่ายเทแล้วร้อนได้สูงกว่าท่อขนาด 21 และ 16 มิลลิเมตรตามลำดับ โดยให้อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงที่ 16.84 วัตต์ต่อตารางเมตร

จากการศึกษาผลของท่อความร้อนเทอร์โมไซฟอน ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 16, 21 และ 26 มิลลิเมตรตามลำดับ ความหนาครีป 2 มิลลิเมตร ความสูงของครีป 5, 10 และ 15 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิ 100, 120, 140, 160, 180 และ 200 องศาเซลเซียส โดยใช้น้ำ และเอทานอล เป็นสารทำงาน แสดงได้ **ตั้งตารางที่ 4.3** และเมื่อนำมาหาความสัมพันธ์จะได้ **ตั้งรูปที่ 4.3**

ตารางที่ 4.3 ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนใช้สารทำงาน น้ำ และเอทานอล ความสูงของครีบ 5, 10 และ 15 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 16, 21 และ 26 มิลลิเมตร ความหนาครีบ 2 มิลลิเมตร

อัตราการถ่ายเทความร้อน q (W/m^2)							
ความสูง ครีบ	อุณหภูมิ	Di = 16 mm		Di = 21 mm		Di = 26 mm	
		Water	Ethanal	Water	Ethanal	Water	Ethanal
5 mm	100	6.12	12.30	8.25	14.43	10.07	16.26
	120	6.44	13.44	9.23	15.30	10.54	16.58
	140	7.84	14.34	9.84	16.17	11.49	17.35
	160	8.87	14.87	10.69	16.71	12.85	18.65
	180	9.20	15.27	11.21	17.38	13.14	19.34
	200	9.74	16.61	12.47	17.55	14.04	19.91
10 mm	100	6.95	14.41	8.82	16.58	10.26	18.08
	120	7.44	14.65	9.92	16.62	11.48	18.34
	140	8.21	15.87	10.93	17.58	12.65	19.33
	160	8.53	16.55	11.25	18.58	13.48	20.17
	180	9.25	16.82	12.64	18.70	14.30	21.60
	200	10.73	17.85	12.87	19.35	15.24	21.62
15 mm	100	7.69	14.73	9.58	16.48	11.69	18.53
	120	7.77	15.09	9.99	17.04	12.33	19.81
	140	8.79	15.61	10.72	18.36	12.46	20.97
	160	9.22	16.45	10.86	19.04	13.07	21.45
	180	9.99	16.74	11.45	19.11	13.60	22.60
	200	10.17	18.02	11.59	20.57	14.08	23.46

หมายเหตุ Di คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน



มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

จากรูปที่ 4.3 ผลของท่อความร้อนเทอร์โมไซฟอน เมื่อใช้สารทำงานน้ำและ เอทานอล อุณหภูมิทำงานที่ 100, 120, 140, 160, 180 และ 200 องศาเซลเซียส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกท่อ 16, 21 และ 26 มิลลิเมตรตามลำดับ ความหนาครีป 1 มิลลิเมตร ที่มีความสูงครีป 5, 10 และ 15 มิลลิเมตร จากการทดสอบที่ใช้สารทำงานเอทานอลท่อที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 26 มิลลิเมตร และมีความสูงครีป 15 มิลลิเมตร จะให้ค่าการถ่ายเทแล้วร้อนได้สูงกว่าท่อขนาด 21 และ 16 มิลลิเมตรตามลำดับ ให้ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ 23.46 วัตต์ต่อตารางเมตร กรณีใช้น้ำเป็นสารทำงานท่อที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 26 มิลลิเมตร และมีความสูงครีป 15 มิลลิเมตร จะให้ค่าการถ่ายเทแล้วร้อนได้สูงกว่าท่อขนาด 21 และ 16 มิลลิเมตรตามลำดับ โดยให้อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงที่ 14.08 วัตต์ต่อตารางเมตร

4.2 ค่าประสิทธิผลของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 16, 21 และ 26 มิลลิเมตร ตามลำดับ

1. ประสิทธิภาพของท่อความร้อน ที่ใช้สารทำงานน้ำ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 16, 21 และ 26 มิลลิเมตร ความสูงครีป 5, 10 และ 15 มิลลิเมตร ความหนาครีป 1, 1.5 และ 2 มิลลิเมตร แสดงได้ ดังรูปที่ 4.4



มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

จากรูปที่ 4.4 พบว่าท่อที่มีความสูงครึ่ง 15 มิลลิเมตร ความหนาครึ่ง 1 มิลลิเมตร ให้ค่าประสิทธิผลสูงสุด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 26 มิลลิเมตร ที่ท่อเทอร์โมไซฟอนที่ติดครึ่ง มีค่าประสิทธิผลทางความร้อนเพิ่มขึ้น เนื่องจากการติดครึ่งที่ผิวภายนอกท่อเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวในการรับความร้อนจึงทำให้มีการถ่ายเทความร้อนได้สูงขึ้น

2. ประสิทธิภาพของท่อความร้อน ที่ใช้สารทำงานเอทานอล ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 16, 21 และ 26 มิลลิเมตร ความสูงครึ่ง 5, 10 และ 15 มิลลิเมตร ความหนาครึ่ง 1, 1.5 และ 2 มิลลิเมตร แสดงได้ดังรูปที่ 4.5



มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY



มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

จากรูปที่ 4.5 พบว่าท่อที่มีความสูงครึ่ง 15 มิลลิเมตร ความหนาครึ่ง 1 มิลลิเมตร ให้ค่าประสิทธิผลสูงสุด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 26 มิลลิเมตร ที่ท่อเทอร์โมไซฟอนที่ติดครึ่งมีค่าประสิทธิผลทางความร้อนเพิ่มขึ้น เนื่องจากการติดครึ่งที่ผิวภายนอกท่อเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวในการรับความร้อนจึงทำให้มีการถ่ายเทความร้อนได้สูงขึ้น



มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย วิเคราะห์ผล และข้อเสนอแนะ

การศึกษาต่อความร้อนเทอร์โมไซฟอน ผลของสารทำงาน อุณหภูมิทำงาน ความหนาของครีป ระยะห่างระหว่างครีป และความสูงครีป ที่ใช้สารทำงาน น้ำ และเอทานอล มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 16, 21 และ 26 มิลลิเมตรตามลำดับ อุณหภูมิทำงานที่ 100, 120, 140, 160, 180 และ 200 องศาเซลเซียส มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

5.2 สรุปการวิจัย

1. ผลของสารทำงานเอทานอล ที่เส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อขนาด 26 มิลลิเมตร ให้ค่าการถ่ายโอนแล้วร้อนได้สูงที่สุด โดยมีลักษณะครีปหนา 1 มิลลิเมตร และความสูงครีป 15 มิลลิเมตร ให้อัตราการถ่ายโอนความร้อนที่ 30.16 วัตต์ต่อตารางเมตร เป็นค่าสูงที่สุด
2. ผลของค่าประสิทธิภาพ ที่ใช้สารทำงานเอทานอล เส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อขนาด 26 มิลลิเมตร มีลักษณะครีปหนา 1 มิลลิเมตร และความสูงครีป 15 มิลลิเมตร ให้ค่าประสิทธิภาพสูงที่สุดเป็น 0.98

5.2 วิเคราะห์ผล

1. ในการเก็บข้อมูลอุณหภูมิที่ผิวท่อในส่วนทำระเหย เพื่อมาเฉลี่ยให้ได้ 200 องศาเซลเซียส แต่จะไม่ได้ค่าอุณหภูมิตรงตามที่ตรงการจึงมีผลต่อค่าอัตราการถ่ายโอนความร้อน
2. ในการสร้างชุดทดสอบที่ทำจากเหล็ก ทำให้เกิดสนิมจึงมีผลต่อค่าอัตราการถ่ายโอนความร้อน
3. น้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ใช้ทาผิวท่อทดสอบภายนอกของท่อทดสอบ มีผลต่ออัตราการถ่ายโอนความร้อน ดังนั้นควรทดสอบชุดทดสอบให้เสร็จทั้งหมดจึงทำการทาผิวท่อทดสอบ
4. ในการใช้สารทำงานที่เป็นน้ำ ทำให้ชุดทดสอบเกิดสนิมและมีผลต่อค่าอัตราการถ่ายโอนความร้อน

5.3 ข้อเสนอแนะ

1. ควรสร้างชุดทดสอบทำจากวัสดุไร้สนิม
2. ในการศึกษาครั้งต่อไปควรศึกษาสารทำงานนอกเหนือจาก น้ำ และ เอทานอล
3. ควรศึกษาสารทำงานน้ำเป็นอันดับสุดท้าย เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดสนิมของเหล็ก
4. ในการศึกษาครั้งต่อไปควรศึกษามุมเอียงที่นอกเหนือจาก 90 องศา



มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

บรรณานุกรม

- ถนัด เกษประดิษฐ์. (2549). **เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน แบบเทอร์โมไซฟอน**. วิทยานิพนธ์
วศ.ม. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- ธวัช พยัคฆรักษ์. (2540). **การศึกษาผลของตัวแปรไร้มิติที่มีต่อลักษณะทางการถ่ายเทความร้อน
ของเทอร์โมไซฟอนแบบเอียง**. วิทยานิพนธ์ วศ.ม. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- ธัญญา ประเมษฐานวัฒน์. (2552). **การประยุกต์ใช้เทอร์โมไซฟอนสำหรับประหยัดพลังงานใน
เตาอบรมควันไส้กรอกปลา**. วิทยานิพนธ์ วศ.ม. มหาวิทยาลัยมหาสารคาม.
- นวกัทรာ หนูนาค. (2555). **การวัดและเครื่องมือวัด ประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร**.
(พิมพ์ครั้งที่) 1. กรุงเทพฯ: คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้า
คุณทหารลาดกระบัง.
- นักสิทธิ์ คูวัฒนาชัย. (2533) **การถ่ายเทความร้อน**. (พิมพ์ครั้งที่) 3. กรุงเทพฯ: พิสิษฐ์เซ็นเตอร์.
- นิพน ภูวเกียรติกรำจร. (2552). **เครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเทอร์โมไซฟอนสำหรับประหยัดพลังงานใน
กระบวนการผลิตน้ำมันไบโอดีเซล**. วิทยานิพนธ์ วศ.ม. มหาวิทยาลัยมหาสารคาม.
- ประดิษฐ์ เทอดทูล. (2536). **การค้นคว้าทฤษฎีพื้นฐานและการประยุกต์ใช้งานท่อความร้อนใน
วงการอุตสาหกรรมเพื่อหาแนวทางที่ดีกว่าในการใช้งานท่อความร้อน รวมถึงคิดค้น
การประยุกต์ใช้งานท่อความร้อนในอุปกรณ์ชนิดอื่น**. วิทยานิพนธ์ วศ.ม.
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- ประภัสสร อนุชิตชาญชัย. (2546). **การศึกษาขีดจำกัดสมรรถนะของท่อความร้อนแบบสั้น
ปลายปิด**. วิทยานิพนธ์ วศ.ม. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- เลอชาย ยอดรัก. (2554). **การประยุกต์ใช้เครื่องอุ่นอากาศแบบเทอร์โมไซฟอนเพื่อประหยัด
พลังงานจากเตาเผาในกระบวนการป้อนขึ้นรูปร้อน**. วิทยานิพนธ์ ปร.ด.
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม.
- วรากร ประทุมทอง และกฤษฎากร สมบูรณ์พันธ์. (2557). **งานวิจัยเรื่องการศึกษาลักษณะการ
ถ่ายโอนความร้อน ของท่อและเปลี่ยนความร้อนชนิดเทอร์โมไซฟอนแบบติดครีบ**.
มหาสารคาม. มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม.

- วสันต์ ปิ่นเต. (2556). **ลักษณะการถ่ายเทความร้อนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนชนิดเทอร์โมไซฟอนแบบติดครีปที่สภาวะวิกฤติ**. ปัญหาพิเศษ ปร.ด. มหาวิทยาลัยมหาสารคาม.
- .สัมพันธ์ ฤทธิเดช. (2554). **เทคโนโลยีที่ความร้อน**. (พิมพ์ครั้งที่ 3). มหาสารคาม : มหาวิทยาลัยมหาสารคาม.
- Faghri, A. (1995). **Heat Pipe Science and Technology**. Taylor & Francis, Washington DC, USA.
- Imura, H., Sasaguchi, K. and Kozai, H. (1983). **Critical heat flux in a closed two-phase thermosyphon**. Int. J.Heat Mass Transfer.
- Lukito udi, A., Akbarzadeh, A. and Hendy, P. (1995). **Design, construction and testing of a thermosyphon heat exchanger for medium temperature heat recovery in bakeries**. Heat Recovery System.
- Noie, S.H. (2006). **Heat Transfer Characteristics of a Two-Phase Closed Thermosyphon**. Applied Thermal Engineering.
- Rashidian, B., Amidpour, M. and Jafari, M.R. (2008). **Modeling the Transient Response of the Thermosyphon Heat Pipe**. Proceeding of the World Congress on Engineering.
- Skupinski, E.S.,Tortel, J. and Vautrey, L. (1965). **Int. J. Heat Mass Transfer**, 8, 937, 196
- มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY



มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY



รายงานการวิจัยนักศึกษาระดับปริญญาตรี

เรื่อง

ผลของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในที่มีผลต่อคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อน
ชนิดเทอร์โมไซฟอนที่โหมดความร้อนสูง

Effect of Internal Diameters on Heat transfer Characteristics
of Thermosyphon at High Temperature



มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
อาทิตยา พัฒนโชติ
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY
กมล ใจงาม

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม

พ.ศ. 2558

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม

(งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม ปีงบประมาณ 2558)

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ นายกมล ใจงาม

วัน เดือน ปีเกิด วันที่ 16 มีนาคม พ.ศ. 3535

ภูมิลำเนา 308 หมู่ 15 ต. เหนือเมือง อ. เมือง จ. ร้อยเอ็ด

ประวัติการศึกษา พ.ศ. 2550 มัธยมศึกษาตอนต้นโรงเรียนร้อยเอ็ดวิทยาลัย
ต. ในเมือง อ. เมือง จ. ร้อยเอ็ด
พ.ศ. 2553 มัธยมศึกษาตอนปลายโรงเรียนร้อยเอ็ดวิทยาลัย
ต. ในเมือง อ. เมือง จ. ร้อยเอ็ด
พ.ศ. 2558 ปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
จังหวัดมหาสารคาม



ชื่อ นางสาวอาทิตย์ยา พัฒนโชติ

วัน เดือน ปีเกิด วันที่ 18 เมษายน พ.ศ. 2536

ภูมิลำเนา 104 หมู่ 5 ต. เชียงใหม่ อ. โพนชัย จ. ร้อยเอ็ด

ประวัติการศึกษา พ.ศ. 2551 มัธยมศึกษาตอนต้นโรงเรียนร่องคำ
ต. ร่องคำ อ. ร่องคำ จ. กาฬสินธุ์
พ.ศ. 2554 มัธยมศึกษาตอนปลายโรงเรียนร่องคำ
ต. ร่องคำ อ. ร่องคำ จ. กาฬสินธุ์
พ.ศ. 2558 ปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
จังหวัดมหาสารคาม



ภาคผนวก ก.

ผลการวิจัย

ผลการวิจัยได้แสดง ดังตารางที่ ก-1 ถึง ก-3 และนำข้อมูลมาเขียนกราฟได้ ดังรูปที่ ก-1 ถึง ก-5 ต่อไปนี้

ตารางที่ ก-1 ค่าอัตราการถ่ายโอนความร้อนใช้สารทำงาน น้ำ และเอทานอล ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง
กลางภายในท่อ 16, 21 และ 26 มิลลิเมตร ความสูงของครีป 5, 10 และ 15
มิลลิเมตร ความหนาครีป 1 มิลลิเมตร

อัตราการถ่ายโอนความร้อน q (W/m ²)							
ความสูง ครีป	อุณหภูมิ	Di = 16 mm		Di = 21 mm		Di = 26 mm	
		Water	Ethanal	Water	Ethanal	Water	Ethanal
5 mm	100	9.35	17.47	10.77	19.29	12.74	20.73
	120	9.97	17.97	11.86	19.63	13.72	21.16
	140	10.76	18.75	12.15	20.93	14.93	22.29
	160	11.77	19.32	13.45	21.41	15.25	23.37
	180	12.06	19.59	13.93	21.62	16.2	23.97
	200	12.33	20.79	14.89	22.93	17.24	24.33
10 mm	100	10.55	18.63	12.19	20.4	14.84	23.10
	120	11.50	19.34	13.03	21.71	15.92	23.78
	140	12.40	20.27	13.92	22.02	16.39	24.15
	160	13.11	21.73	15.70	23.19	17.79	25.44
	180	14.06	22.13	16.74	24.16	18.42	26.38
	200	15.03	23.04	17.83	24.94	19.16	27.00
15 mm	100	11.03	22.01	13.98	23.65	16.60	25.46
	120	12.17	22.81	15.15	24.66	17.30	26.77
	140	13.33	23.19	16.30	25.72	18.80	27.66
	160	14.54	24.11	17.70	26.78	19.52	28.29
	180	15.82	24.95	19.08	27.81	20.73	29.33
	200	16.36	25.82	19.60	28.76	20.89	30.16

หมายเหตุ Di คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน



มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

ตารางที่ ก-2 ค่าอัตราการถ่ายโอนความร้อนใช้สารทำงาน น้ำ และ เอทานอล ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง
กลางภายในท่อ 16, 21 และ 26 มิลลิเมตร ความสูงของครีป 5, 10 และ 15 มิลลิเมตร
ความหนาครีป 1.5 มิลลิเมตร

อัตราการถ่ายโอนความร้อน q (W/m^2)							
ความสูง ครีป	อุณหภูมิ	Di = 16 mm		Di = 21 mm		Di = 26 mm	
		Water	Ethanal	Water	Ethanal	Water	Ethanal
5 mm	100	7.19	14.37	8.67	15.69	10.62	17.48
	120	8.03	15.41	9.81	16.76	11.33	18.1
	140	8.77	15.94	10.75	17.57	12.09	19.53
	160	9.39	16.33	11.19	17.77	12.79	19.87
	180	10.25	17.29	11.57	18.83	13.13	20.64
	200	11.16	17.57	12.11	18.92	13.69	21.05
10 mm	100	8.81	15.14	10.36	17.74	12.41	19.45
	120	8.97	16.42	10.78	18.2	13.24	20.59
	140	9.06	16.39	11.23	18.78	13.68	21.31
	160	10.21	17.56	12.67	19.32	14.21	21.66
	180	11.35	18.25	13.49	19.51	15.12	22.37
	200	11.77	19.08	14.32	20.02	16.14	23.17
15 mm	100	8.89	15.98	11.03	17.55	12.79	19.10
	120	9.53	17.67	11.87	18.98	13.87	20.57
	140	9.89	18.34	12.48	19.59	14.92	21.16
	160	10.59	18.82	13.29	19.99	15.56	22.65
	180	11.85	19.62	14.3	20.67	16.47	23.03
	200	12.58	20.59	15.23	21.78	16.84	24.49

หมายเหตุ Di คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน



มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

ตารางที่ ก-3 ค่าอัตราการถ่ายโอนความร้อน ใช้สารทำงาน น้ำ และ เอทานอล ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง
กลางภายในท่อ 16, 21 และ 26 มิลลิเมตร ความสูงของครีป 5, 10 และ 15 มิลลิเมตร
ความหนาครีป 2 มิลลิเมตร

อัตราการถ่ายโอนความร้อน q (W/m^2)							
ความสูง ครีป	อุณหภูมิ	Di = 16 mm		Di = 21 mm		Di = 26 mm	
		Water	Ethanal	Water	Ethanal	Water	Ethanal
5 mm	100	6.12	12.30	8.25	14.43	10.07	16.26
	120	6.44	13.44	9.23	15.30	10.54	16.58
	140	7.84	14.34	9.84	16.17	11.49	17.35
	160	8.87	14.87	10.69	16.71	12.85	18.65
	180	9.20	15.27	11.21	17.38	13.14	19.34
	200	9.74	16.61	12.47	17.55	14.04	19.91
10 mm	100	6.95	14.41	8.82	16.58	10.26	18.08
	120	7.44	14.65	9.92	16.62	11.48	18.34
	140	8.21	15.87	10.93	17.58	12.65	19.33
	160	8.53	16.55	11.25	18.58	13.48	20.17
	180	9.25	16.82	12.64	18.70	14.30	21.60
	200	10.73	17.85	12.87	19.35	15.24	21.62
15 mm	100	7.69	14.73	9.58	16.48	11.69	18.53
	120	7.77	15.09	9.99	17.04	12.33	19.81
	140	8.79	15.61	10.72	18.36	12.46	20.97
	160	9.22	16.45	10.86	19.04	13.07	21.45
	180	9.99	16.74	11.45	19.11	13.60	22.60
	200	10.17	18.02	11.59	20.57	14.08	23.46

หมายเหตุ Di คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน



มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY



มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY



มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

ตารางที่ ก-4 ผลต่างอุณหภูมิของสารทำงานน้ำ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 16 มิลลิเมตร
ความหนาครีป 1 มิลลิเมตร ความสูงครีป 5 มิลลิเมตร

อุณหภูมิ(°C)	ครั้งที่ 1(°C)	ครั้งที่ 2(°C)	ครั้งที่ 3(°C)	เฉลี่ย(°C)
100	6.69	12.25	7.80	8.91
120	7.28	12.84	8.39	9.50
140	8.03	13.59	9.14	10.25
160	8.99	14.55	10.10	11.22
180	9.27	14.83	10.38	11.49
200	9.53	15.09	10.64	11.75

ตารางที่ ก-5 ผลต่างอุณหภูมิของ สารทำงานน้ำ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 16 มิลลิเมตร
ความหนาครีป 1 มิลลิเมตร ความสูงครีป 10 มิลลิเมตร

อุณหภูมิ(°C)	ครั้งที่ 1(°C)	ครั้งที่ 2(°C)	ครั้งที่ 3(°C)	เฉลี่ย(°C)
100	17.40	21.85	16.29	18.52
120	19.07	23.52	17.96	20.18
140	20.65	25.10	19.54	21.76
160	21.90	26.35	20.79	23.01
180	23.57	28.01	22.45	24.68
200	25.27	29.72	24.16	26.38

ตารางที่ ก-6 ผลต่างอุณหภูมิของ สารทำงานน้ำ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 16 มิลลิเมตร
ความหนาครีป 1 มิลลิเมตร ความสูงครีป 15 มิลลิเมตร

อุณหภูมิ(°C)	ครั้งที่ 1(°C)	ครั้งที่ 2(°C)	ครั้งที่ 3(°C)	เฉลี่ย(°C)
100	34.31	29.86	28.75	30.97
120	37.51	33.06	31.95	34.18
140	40.77	36.32	35.21	37.43
160	44.17	39.72	38.61	40.83
180	47.76	43.31	42.20	44.42
200	49.28	44.83	43.72	45.94

ตารางที่ ก-7 ผลต่างอุณหภูมิของ สารทำงานน้ำ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 16 มิลลิเมตร
ความหนาครีป 1.5 มิลลิเมตร ความสูงครีป 5 มิลลิเมตร

อุณหภูมิ(°C)	ครั้งที่ 1(°C)	ครั้งที่ 2(°C)	ครั้งที่ 3(°C)	เฉลี่ย(°C)
100	6.08	4.97	10.53	7.19
120	6.80	5.69	11.25	7.91
140	7.53	6.42	11.98	8.64
160	8.14	7.03	12.59	9.25
180	8.99	7.88	13.44	10.10
200	9.89	8.77	14.33	11.00

ตารางที่ ก-8 ผลต่างอุณหภูมิของ สารทำงานน้ำ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 16 มิลลิเมตร
ความหนาครีป 1.5 มิลลิเมตร ความสูงครีป 10 มิลลิเมตร

อุณหภูมิ(°C)	ครั้งที่ 1(°C)	ครั้งที่ 2(°C)	ครั้งที่ 3(°C)	เฉลี่ย(°C)
100	14.75	19.20	13.64	15.86
120	15.04	19.49	13.93	16.15
140	15.20	19.65	14.09	16.31
160	17.27	21.72	16.16	18.38
180	19.32	23.77	18.21	20.43
200	20.08	24.53	18.97	21.19

ตารางที่ ก-9 ผลต่างอุณหภูมิของ สารทำงานน้ำ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 16 มิลลิเมตร
ความหนาครีป 1.5 มิลลิเมตร ความสูงครีป 15 มิลลิเมตร

อุณหภูมิ(°C)	ครั้งที่ 1(°C)	ครั้งที่ 2(°C)	ครั้งที่ 3(°C)	เฉลี่ย(°C)
100	28.81	24.37	23.25	25.48
120	30.65	26.20	25.09	27.31
140	31.68	27.23	26.12	28.34
160	33.69	29.24	28.13	30.35
180	37.30	32.85	31.74	33.96
200	39.39	34.94	33.83	36.05

ตารางที่ ก-10 ผลต่างอุณหภูมิของ สารทำงานน้ำ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 16 มิลลิเมตร
ความหนาครีป 2 มิลลิเมตร ความสูงครีป 5 มิลลิเมตร

อุณหภูมิ(°C)	ครั้งที่ 1(°C)	ครั้งที่ 2(°C)	ครั้งที่ 3(°C)	เฉลี่ย(°C)
100	5.12	9.57	4.01	6.23
120	5.44	9.89	4.33	6.56
140	6.87	11.32	5.76	7.98
160	7.92	12.37	6.81	9.03
180	8.25	12.70	7.14	9.37
200	8.80	13.25	7.69	9.92

ตารางที่ ก-11 ผลต่างอุณหภูมิของ สารทำงานน้ำ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 16 มิลลิเมตร
ความหนาครีป 2 มิลลิเมตร ความสูงครีป 10 มิลลิเมตร

อุณหภูมิ(°C)	ครั้งที่ 1(°C)	ครั้งที่ 2(°C)	ครั้งที่ 3(°C)	เฉลี่ย(°C)
100	11.71	16.16	10.60	12.83
120	12.62	17.07	11.51	13.73
140	14.04	18.49	12.93	15.15
160	14.63	19.08	13.52	15.74
180	15.96	20.41	14.85	17.07
200	18.69	23.14	17.58	19.80

ตารางที่ ก-12 ผลต่างอุณหภูมิของ สารทำงานน้ำ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 16 มิลลิเมตร
ความหนาครีป 2 มิลลิเมตร ความสูงครีป 15 มิลลิเมตร

อุณหภูมิ(°C)	ครั้งที่ 1(°C)	ครั้งที่ 2(°C)	ครั้งที่ 3(°C)	เฉลี่ย(°C)
100	21.37	25.82	20.26	22.48
120	21.60	26.05	20.49	22.72
140	24.59	29.03	23.47	25.70
160	25.84	30.29	24.73	26.95
180	28.09	32.54	26.98	29.21
200	28.62	33.07	27.51	29.73

ตารางที่ ก-13 ผลต่างอุณหภูมิของสารทำงานน้ำ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 21 มิลลิเมตร
ความหนาครีป 1 มิลลิเมตร ความสูงครีป 5 มิลลิเมตร

อุณหภูมิ(°C)	ครั้งที่ 1(°C)	ครั้งที่ 2(°C)	ครั้งที่ 3(°C)	เฉลี่ย(°C)
100	16.02	11.57	10.46	12.68
120	17.30	12.85	11.74	13.96
140	17.64	13.19	12.08	14.30
160	19.17	14.72	13.61	15.83
180	19.74	15.29	14.18	16.40
200	20.87	16.42	15.31	17.53

ตารางที่ ก-14 ผลต่างอุณหภูมิของสารทำงานน้ำ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 21 มิลลิเมตร
ความหนาครีป 1 มิลลิเมตร ความสูงครีป 10 มิลลิเมตร

อุณหภูมิ(°C)	ครั้งที่ 1(°C)	ครั้งที่ 2(°C)	ครั้งที่ 3(°C)	เฉลี่ย(°C)
100	23.44	29.00	24.55	25.66
120	25.20	30.76	26.31	27.43
140	27.08	32.64	28.19	29.30
160	30.82	36.38	31.93	33.05
180	33.01	38.57	34.12	35.24
200	35.31	40.87	36.42	37.53

ตารางที่ ก-15 ผลต่างอุณหภูมิของสารทำงานน้ำ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 21 มิลลิเมตร
ความหนาครีป 1 มิลลิเมตร ความสูงครีป 15 มิลลิเมตร

อุณหภูมิ(°C)	ครั้งที่ 1(°C)	ครั้งที่ 2(°C)	ครั้งที่ 3(°C)	เฉลี่ย(°C)
100	44.79	43.68	49.24	45.90
120	48.63	47.52	53.08	49.74
140	52.40	51.29	56.85	53.52
160	57.00	55.89	61.45	58.11
180	61.53	60.42	65.98	62.64
200	63.24	62.13	67.69	64.35

ตารางที่ ก-16 ผลต่างอุณหภูมิของ สารทำงานน้ำ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 21 มิลลิเมตร
ความหนาครีป 1.5 มิลลิเมตร ความสูงครีป 5 มิลลิเมตร

อุณหภูมิ(°C)	ครั้งที่ 1(°C)	ครั้งที่ 2(°C)	ครั้งที่ 3(°C)	เฉลี่ย(°C)
100	13.88	9.43	8.32	10.54
120	15.27	10.82	9.71	11.93
140	16.41	11.96	10.85	13.07
160	16.95	12.50	11.39	13.61
180	17.41	12.96	11.85	14.07
200	18.06	13.62	12.50	14.73

ตารางที่ ก-17 ผลต่างอุณหภูมิของสารทำงานน้ำ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 21 มิลลิเมตร
ความหนาครีป 1.5 มิลลิเมตร ความสูงครีป 10 มิลลิเมตร

อุณหภูมิ(°C)	ครั้งที่ 1(°C)	ครั้งที่ 2(°C)	ครั้งที่ 3(°C)	เฉลี่ย(°C)
100	21.23	20.12	25.68	22.34
120	22.13	21.02	26.58	23.25
140	23.10	21.99	27.55	24.22
160	26.21	25.10	30.66	27.32
180	27.98	26.87	32.43	29.09
200	29.77	28.65	34.21	30.88

ตารางที่ ก-18 ผลต่างอุณหภูมิของสารทำงานน้ำ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 21 มิลลิเมตร
ความหนาครีป 1.5 มิลลิเมตร ความสูงครีป 15 มิลลิเมตร

อุณหภูมิ(°C)	ครั้งที่ 1(°C)	ครั้งที่ 2(°C)	ครั้งที่ 3(°C)	เฉลี่ย(°C)
100	35.81	34.70	40.26	36.92
120	38.62	37.51	43.07	39.73
140	40.66	39.55	45.11	41.77
160	43.37	42.26	47.82	44.48
180	46.75	45.64	51.20	47.87
200	49.87	48.75	54.31	50.98

ตารางที่ ก-19 ผลต่างอุณหภูมิของ สารทำงานน้ำ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 21 มิลลิเมตร
ความหนาครีป 2 มิลลิเมตร ความสูงครีป 5 มิลลิเมตร

อุณหภูมิ(°C)	ครั้งที่ 1(°C)	ครั้งที่ 2(°C)	ครั้งที่ 3(°C)	เฉลี่ย(°C)
100	9.24	8.13	13.69	10.35
120	10.47	9.36	14.92	11.58
140	11.24	10.13	15.69	12.35
160	12.30	11.19	16.75	13.42
180	12.96	11.85	17.41	14.07
200	14.54	13.43	18.99	15.65

ตารางที่ ก-20 ผลต่างอุณหภูมิของ สารทำงานน้ำ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 21 มิลลิเมตร
ความหนาครีป 2 มิลลิเมตร ความสูงครีป 10 มิลลิเมตร

อุณหภูมิ(°C)	ครั้งที่ 1(°C)	ครั้งที่ 2(°C)	ครั้งที่ 3(°C)	เฉลี่ย(°C)
100	18.36	22.81	17.25	19.47
120	20.79	25.24	19.68	21.90
140	23.02	27.47	21.91	24.13
160	23.72	28.17	22.61	24.84
180	26.79	31.24	25.68	27.91
200	27.30	31.75	26.19	28.41

ตารางที่ ก-21 ผลต่างอุณหภูมิของ สารทำงานน้ำ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 21 มิลลิเมตร
ความหนาครีป 2 มิลลิเมตร ความสูงครีป 15 มิลลิเมตร

อุณหภูมิ(°C)	ครั้งที่ 1(°C)	ครั้งที่ 2(°C)	ครั้งที่ 3(°C)	เฉลี่ย(°C)
100	36.02	31.57	30.46	32.68
120	37.41	32.97	31.85	34.08
140	39.90	35.46	34.34	36.57
160	40.38	35.93	34.82	37.05
180	42.39	37.95	36.83	39.06
200	42.87	38.42	37.31	39.54

ตารางที่ ก-22 ผลต่างอุณหภูมิของ สารทำงานน้ำ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 26 มิลลิเมตร
ความหนาครีป 1 มิลลิเมตร ความสูงครีป 5 มิลลิเมตร

อุณหภูมิ(°C)	ครั้งที่ 1(°C)	ครั้งที่ 2(°C)	ครั้งที่ 3(°C)	เฉลี่ย(°C)
100	16.59	21.03	15.47	17.70
120	17.95	22.40	16.84	19.06
140	19.63	24.08	18.52	20.74
160	20.07	24.52	18.96	21.18
180	21.39	25.84	20.28	22.50
200	22.84	27.29	21.73	23.95

ตารางที่ ก-23 ผลต่างอุณหภูมิของ สารทำงานน้ำ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 26 มิลลิเมตร
ความหนาครีป 1 มิลลิเมตร ความสูงครีป 10 มิลลิเมตร

อุณหภูมิ(°C)	ครั้งที่ 1(°C)	ครั้งที่ 2(°C)	ครั้งที่ 3(°C)	เฉลี่ย(°C)
100	34.02	35.13	39.58	36.24
120	36.66	37.77	42.22	38.88
140	37.80	38.91	43.36	40.03
160	41.22	42.33	46.78	43.45
180	42.76	43.87	48.32	44.98
200	44.57	45.68	50.13	46.79

ตารางที่ ก-24 ผลต่างอุณหภูมิของ สารทำงานน้ำ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 26 มิลลิเมตร
ความหนาครีป 1 มิลลิเมตร ความสูงครีป 15 มิลลิเมตร

อุณหภูมิ(°C)	ครั้งที่ 1(°C)	ครั้งที่ 2(°C)	ครั้งที่ 3(°C)	เฉลี่ย(°C)
100	61.07	59.96	65.52	62.18
120	63.69	62.58	68.14	64.80
140	69.31	68.20	73.76	70.42
160	72.01	70.89	76.45	73.12
180	76.54	75.43	80.99	77.65
200	77.14	76.03	81.59	78.25

ตารางที่ ก-25 ผลต่างอุณหภูมิของ สารทำงานน้ำ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 26 มิลลิเมตร
ความหนาครีป 1.5 มิลลิเมตร ความสูงครีป 5 มิลลิเมตร

อุณหภูมิ(°C)	ครั้งที่ 1(°C)	ครั้งที่ 2(°C)	ครั้งที่ 3(°C)	เฉลี่ย(°C)
100	14.12	18.57	13.01	15.23
120	15.14	19.59	14.03	16.25
140	16.23	20.68	15.12	17.34
160	17.23	21.68	16.12	18.34
180	17.72	22.17	16.61	18.83
200	18.52	22.97	17.41	19.64

ตารางที่ ก-26 ผลต่างอุณหภูมิของ สารทำงานน้ำ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 26 มิลลิเมตร
ความหนาครีป 1.5 มิลลิเมตร ความสูงครีป 10 มิลลิเมตร

อุณหภูมิ(°C)	ครั้งที่ 1(°C)	ครั้งที่ 2(°C)	ครั้งที่ 3(°C)	เฉลี่ย(°C)
100	34.36	29.91	28.80	31.02
120	36.43	31.99	30.87	33.10
140	37.53	33.09	31.97	34.20
160	38.86	34.41	33.30	35.52
180	41.13	36.68	35.57	37.80
200	43.68	39.23	38.12	40.35

ตารางที่ ก-27 ผลต่างอุณหภูมิของ สารทำงานน้ำ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 26 มิลลิเมตร
ความหนาครีป 1.5 มิลลิเมตร ความสูงครีป 15 มิลลิเมตร

อุณหภูมิ(°C)	ครั้งที่ 1(°C)	ครั้งที่ 2(°C)	ครั้งที่ 3(°C)	เฉลี่ย(°C)
100	46.58	52.14	47.69	48.81
120	50.71	56.26	51.82	52.93
140	54.71	60.27	55.82	56.94
160	57.15	62.71	58.27	59.38
180	60.63	66.19	61.74	62.85
200	62.04	67.60	63.15	64.26

ตารางที่ ก-28 ผลต่างอุณหภูมิของ สารทำงานน้ำ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 26 มิลลิเมตร
ความหนาครีป 2 มิลลิเมตร ความสูงครีป 5 มิลลิเมตร

อุณหภูมิ(°C)	ครั้งที่ 1(°C)	ครั้งที่ 2(°C)	ครั้งที่ 3(°C)	เฉลี่ย(°C)
100	12.67	13.79	18.23	14.90
120	13.37	14.48	18.93	15.59
140	14.78	15.89	20.34	17.00
160	16.79	17.90	22.35	19.01
180	17.22	18.33	22.78	19.44
200	18.55	19.66	24.11	20.77

ตารางที่ ก-29 ผลต่างอุณหภูมิของ สารทำงานน้ำ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 26 มิลลิเมตร
ความหนาครีป 2 มิลลิเมตร ความสูงครีป 10 มิลลิเมตร

อุณหภูมิ(°C)	ครั้งที่ 1(°C)	ครั้งที่ 2(°C)	ครั้งที่ 3(°C)	เฉลี่ย(°C)
100	25.13	24.02	29.58	26.24
120	28.25	27.14	32.70	29.36
140	31.24	30.13	35.69	32.35
160	33.36	32.25	37.81	34.47
180	35.46	34.35	39.91	36.57
200	37.86	36.75	42.31	38.98

ตารางที่ ก-30 ผลต่างอุณหภูมิของ สารทำงานน้ำ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 26 มิลลิเมตร
ความหนาครีป 2 มิลลิเมตร ความสูงครีป 15 มิลลิเมตร

อุณหภูมิ(°C)	ครั้งที่ 1(°C)	ครั้งที่ 2(°C)	ครั้งที่ 3(°C)	เฉลี่ย(°C)
100	43.21	48.77	44.32	45.43
120	45.69	51.25	46.81	47.92
140	46.20	51.76	47.31	48.42
160	48.57	54.13	49.68	50.79
180	50.63	56.19	51.74	52.85
200	52.49	58.05	53.61	54.72

ตารางที่ ก-31 ผลต่างอุณหภูมิของสารทำงาน เอทานอล ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 16 มิลลิเมตร ความหนาครีป 1 มิลลิเมตร ความสูงครีป 5 มิลลิเมตร

อุณหภูมิ(°C)	ครั้งที่ 1(°C)	ครั้งที่ 2(°C)	ครั้งที่ 3(°C)	เฉลี่ย(°C)
100	14.42	19.98	15.53	16.65
120	14.90	20.46	16.01	17.12
140	15.64	21.20	16.75	17.87
160	16.19	21.75	17.30	18.41
180	16.44	22.00	17.55	18.67
200	17.59	23.15	18.70	19.81

ตารางที่ ก-32 ผลต่างอุณหภูมิของสารทำงานเอทานอล ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 16 มิลลิเมตร ความหนาครีป 1 มิลลิเมตร ความสูงครีป 10 มิลลิเมตร

อุณหภูมิ(°C)	ครั้งที่ 1(°C)	ครั้งที่ 2(°C)	ครั้งที่ 3(°C)	เฉลี่ย(°C)
100	31.59	36.03	30.47	32.70
120	32.83	37.28	31.72	33.94
140	34.46	38.91	33.35	35.58
160	37.03	41.48	35.92	38.14
180	37.73	42.18	36.62	38.84
200	39.33	43.77	38.21	40.44

ตารางที่ ก-33 ผลต่างอุณหภูมิของสารทำงาน เอทานอล ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 16 มิลลิเมตร ความหนาครีป 1 มิลลิเมตร ความสูงครีป 15 มิลลิเมตร

อุณหภูมิ(°C)	ครั้งที่ 1(°C)	ครั้งที่ 2(°C)	ครั้งที่ 3(°C)	เฉลี่ย(°C)
100	65.14	60.69	59.58	61.81
120	67.39	62.94	61.83	64.05
140	68.46	64.01	62.90	65.12
160	71.04	66.59	65.48	67.70
180	73.40	68.95	67.84	70.06
200	75.84	71.39	70.28	72.51

ตารางที่ ก-34 ผลต่างอุณหภูมิของ สารทำงานเอทานอล ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 16 มิลลิเมตร ความหนาครีป 1.5 มิลลิเมตร ความสูงครีป 5 มิลลิเมตร

อุณหภูมิ(°C)	ครั้งที่ 1(°C)	ครั้งที่ 2(°C)	ครั้งที่ 3(°C)	เฉลี่ย(°C)
100	13.05	11.94	17.50	14.16
120	14.07	12.96	18.52	15.19
140	14.60	13.48	19.04	15.71
160	14.98	13.87	19.43	16.09
180	15.93	14.82	20.38	17.04
200	16.20	15.09	20.65	17.31

ตารางที่ ก-35 ผลต่างอุณหภูมิของ สารทำงานเอทานอล ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 16 มิลลิเมตร ความหนาครีป 1.5 มิลลิเมตร ความสูงครีป 10 มิลลิเมตร

อุณหภูมิ(°C)	ครั้งที่ 1(°C)	ครั้งที่ 2(°C)	ครั้งที่ 3(°C)	เฉลี่ย(°C)
100	26.14	30.59	25.03	27.26
120	28.45	32.90	27.34	29.56
140	28.39	32.84	27.28	29.51
160	30.50	34.95	29.39	31.61
180	31.74	36.19	30.63	32.86
200	33.24	37.69	32.13	34.35

ตารางที่ ก-36 ผลต่างอุณหภูมิของ สารทำงานเอทานอล ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 16 มิลลิเมตร ความหนาครีป 1.5 มิลลิเมตร ความสูงครีป 15 มิลลิเมตร

อุณหภูมิ(°C)	ครั้งที่ 1(°C)	ครั้งที่ 2(°C)	ครั้งที่ 3(°C)	เฉลี่ย(°C)
100	49.13	44.68	43.57	45.80
120	53.97	49.53	48.41	50.64
140	55.89	51.45	50.34	52.56
160	57.27	52.82	51.71	53.93
180	59.56	55.11	54.00	56.23
200	62.34	57.89	56.78	59.01

ตารางที่ ก-37 ผลต่างอุณหภูมิของ สารทำงานเอทานอล ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ
16 มิลลิเมตร ความหนาครีป 2 มิลลิเมตร ความสูงครีป 5 มิลลิเมตร

อุณหภูมิ(°C)	ครั้งที่ 1(°C)	ครั้งที่ 2(°C)	ครั้งที่ 3(°C)	เฉลี่ย(°C)
100	11.41	15.86	10.30	12.52
120	12.57	17.02	11.46	13.68
140	13.49	17.94	12.38	14.60
160	14.03	18.48	12.92	15.14
180	14.43	18.88	13.32	15.55
200	15.80	20.25	14.69	16.91

ตารางที่ ก-38 ผลต่างอุณหภูมิของ สารทำงานเอทานอล ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ
16 มิลลิเมตร ความหนาครีป 2 มิลลิเมตร ความสูงครีป 10 มิลลิเมตร

อุณหภูมิ(°C)	ครั้งที่ 1(°C)	ครั้งที่ 2(°C)	ครั้งที่ 3(°C)	เฉลี่ย(°C)
100	25.48	29.93	24.37	26.59
120	25.92	30.37	24.81	27.04
140	28.17	32.62	27.06	29.29
160	29.43	33.88	28.32	30.54
180	29.93	34.38	28.82	31.04
200	31.83	36.28	30.72	32.94

ตารางที่ ก-39 ผลต่างอุณหภูมิของ สารทำงานเอทานอล ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ
16 มิลลิเมตร ความหนาครีป 2 มิลลิเมตร ความสูงครีป 15 มิลลิเมตร

อุณหภูมิ(°C)	ครั้งที่ 1(°C)	ครั้งที่ 2(°C)	ครั้งที่ 3(°C)	เฉลี่ย(°C)
100	41.95	46.40	40.84	43.06
120	43.00	47.45	41.89	44.12
140	44.52	48.97	43.41	45.64
160	46.98	51.43	45.87	48.09
180	47.83	52.27	46.72	48.94
200	51.57	56.02	50.46	52.68

ตารางที่ ก-40 ผลต่างอุณหภูมิของ สารทำงานเอทานอล ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ
21 มิลลิเมตร ความหนาครีป 1 มิลลิเมตร ความสูงครีป 5 มิลลิเมตร

อุณหภูมิ(°C)	ครั้งที่ 1(°C)	ครั้งที่ 2(°C)	ครั้งที่ 3(°C)	เฉลี่ย(°C)
100	26.05	21.60	20.49	22.71
120	26.45	22.00	20.89	23.11
140	27.98	23.53	22.42	24.64
160	28.54	24.09	22.98	25.21
180	28.79	24.34	23.23	25.45
200	30.33	25.88	24.77	26.99

ตารางที่ ก-41 ผลต่างอุณหภูมิของ สารทำงานเอทานอล ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ
21 มิลลิเมตร ความหนาครีป 1 มิลลิเมตร ความสูงครีป 10 มิลลิเมตร

อุณหภูมิ(°C)	ครั้งที่ 1(°C)	ครั้งที่ 2(°C)	ครั้งที่ 3(°C)	เฉลี่ย(°C)
100	40.72	46.28	41.83	42.94
120	43.47	49.03	44.58	45.70
140	44.13	49.69	45.24	46.35
160	46.59	52.15	47.70	48.81
180	48.63	54.19	49.74	50.85
200	50.27	55.83	51.38	52.50

ตารางที่ ก-42 ผลต่างอุณหภูมิของ สารทำงานเอทานอล ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ
21 มิลลิเมตร ความหนาครีป 1 มิลลิเมตร ความสูงครีป 15 มิลลิเมตร

อุณหภูมิ(°C)	ครั้งที่ 1(°C)	ครั้งที่ 2(°C)	ครั้งที่ 3(°C)	เฉลี่ย(°C)
100	76.54	75.42	80.98	77.65
120	79.85	78.74	84.30	80.96
140	83.33	82.22	87.78	84.44
160	86.81	85.70	91.26	87.92
180	90.19	89.08	94.64	91.31
200	93.31	92.20	97.76	94.43

ตารางที่ ก-43 ผลต่างอุณหภูมิของ สารทำงานเอทานอล ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 21 มิลลิเมตร ความหนาครีป 1.5 มิลลิเมตร ความสูงครีป 5 มิลลิเมตร

อุณหภูมิ(°C)	ครั้งที่ 1(°C)	ครั้งที่ 2(°C)	ครั้งที่ 3(°C)	เฉลี่ย(°C)
100	22.42	17.97	16.86	19.08
120	23.72	19.27	18.16	20.38
140	24.70	20.26	19.14	21.37
160	24.95	20.50	19.39	21.61
180	26.24	21.79	20.68	22.90
200	26.35	21.90	20.79	23.01

ตารางที่ ก-44 ผลต่างอุณหภูมิของ สารทำงานเอทานอล ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 21 มิลลิเมตร ความหนาครีป 1.5 มิลลิเมตร ความสูงครีป 10 มิลลิเมตร

อุณหภูมิ(°C)	ครั้งที่ 1(°C)	ครั้งที่ 2(°C)	ครั้งที่ 3(°C)	เฉลี่ย(°C)
100	37.14	36.03	41.59	38.25
120	38.13	37.02	42.58	39.24
140	39.38	38.27	43.83	40.50
160	40.55	39.44	45.00	41.66
180	40.96	39.85	45.41	42.07
200	42.06	40.95	46.51	43.17

ตารางที่ ก-45 ผลต่างอุณหภูมิของ สารทำงานเอทานอล ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 21 มิลลิเมตร ความหนาครีป 1.5 มิลลิเมตร ความสูงครีป 15 มิลลิเมตร

อุณหภูมิ(°C)	ครั้งที่ 1(°C)	ครั้งที่ 2(°C)	ครั้งที่ 3(°C)	เฉลี่ย(°C)
100	57.63	56.52	62.08	58.74
120	62.42	61.31	66.87	63.53
140	64.46	63.35	68.91	65.57
160	65.80	64.69	70.25	66.91
180	68.07	66.96	72.52	69.19
200	71.79	70.68	76.24	72.90

ตารางที่ ก-46 ผลต่างอุณหภูมิของ สารทำงานเอทานอล ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ
21 มิลลิเมตร ความหนาครีป 2 มิลลิเมตร ความสูงครีป 5 มิลลิเมตร

อุณหภูมิ(°C)	ครั้งที่ 1(°C)	ครั้งที่ 2(°C)	ครั้งที่ 3(°C)	เฉลี่ย(°C)
100	17.00	15.89	21.45	18.11
120	18.09	16.98	22.54	19.20
140	19.18	18.07	23.63	20.29
160	19.86	18.75	24.31	20.97
180	20.70	19.59	25.15	21.81
200	20.91	19.80	25.36	22.03

ตารางที่ ก-47 ผลต่างอุณหภูมิของ สารทำงานเอทานอล ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ
21 มิลลิเมตร ความหนาครีป 2 มิลลิเมตร ความสูงครีป 10 มิลลิเมตร

อุณหภูมิ(°C)	ครั้งที่ 1(°C)	ครั้งที่ 2(°C)	ครั้งที่ 3(°C)	เฉลี่ย(°C)
100	35.49	39.94	34.38	36.60
120	35.58	40.03	34.47	36.69
140	37.70	42.15	36.59	38.81
160	39.91	44.36	38.80	41.02
180	40.17	44.62	39.06	41.28
200	41.61	46.06	40.50	42.72

ตารางที่ ก-48 ผลต่างอุณหภูมิของ สารทำงานเอทานอล ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ
21 มิลลิเมตร ความหนาครีป 2 มิลลิเมตร ความสูงครีป 15 มิลลิเมตร

อุณหภูมิ(°C)	ครั้งที่ 1(°C)	ครั้งที่ 2(°C)	ครั้งที่ 3(°C)	เฉลี่ย(°C)
100	59.55	55.10	53.99	56.22
120	61.46	57.01	55.90	58.13
140	65.96	61.52	60.40	62.63
160	68.28	63.83	62.72	64.95
180	68.52	64.07	62.96	65.19
200	73.50	69.05	67.94	70.17

ตารางที่ ก-49 ผลต่างอุณหภูมิของ สารทำงานเอทานอล ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 26 มิลลิเมตร ความหนาครีป 1 มิลลิเมตร ความสูงครีป 5 มิลลิเมตร

อุณหภูมิ(°C)	ครั้งที่ 1(°C)	ครั้งที่ 2(°C)	ครั้งที่ 3(°C)	เฉลี่ย(°C)
100	27.68	32.13	26.57	28.80
120	28.28	32.73	27.17	29.39
140	29.85	34.30	28.74	30.96
160	31.35	35.80	30.24	32.46
180	32.19	36.63	31.07	33.30
200	32.69	37.13	31.57	33.80

ตารางที่ ก-50 ผลต่างอุณหภูมิของ สารทำงานเอทานอล ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 26 มิลลิเมตร ความหนาครีป 1 มิลลิเมตร ความสูงครีป 10 มิลลิเมตร

อุณหภูมิ(°C)	ครั้งที่ 1(°C)	ครั้งที่ 2(°C)	ครั้งที่ 3(°C)	เฉลี่ย(°C)
100	54.19	55.30	59.75	56.41
120	55.85	56.96	61.41	58.07
140	56.75	57.86	62.31	58.98
160	59.90	61.01	65.46	62.13
180	62.20	63.31	67.76	64.42
200	63.71	64.82	69.27	65.94

ตารางที่ ก-51 ผลต่างอุณหภูมิของ สารทำงานเอทานอล ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 26 มิลลิเมตร ความหนาครีป 1 มิลลิเมตร ความสูงครีป 15 มิลลิเมตร

อุณหภูมิ(°C)	ครั้งที่ 1(°C)	ครั้งที่ 2(°C)	ครั้งที่ 3(°C)	เฉลี่ย(°C)
100	94.26	93.14	98.70	95.37
120	99.16	98.05	103.61	100.28
140	102.50	101.39	106.95	103.61
160	104.86	103.75	109.30	105.97
180	108.75	107.64	113.20	109.86
200	109.01	107.90	113.46	110.13

ตารางที่ ก-52 ผลต่างอุณหภูมิของ สารทำงานเอทานอล ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 26 มิลลิเมตร ความหนาครีป 1.5 มิลลิเมตร ความสูงครีป 5 มิลลิเมตร

อุณหภูมิ(°C)	ครั้งที่ 1(°C)	ครั้งที่ 2(°C)	ครั้งที่ 3(°C)	เฉลี่ย(°C)
100	23.96	28.41	22.85	25.07
120	24.85	29.30	23.74	25.96
140	26.90	31.35	25.79	28.01
160	27.39	31.84	26.28	28.50
180	28.49	32.94	27.38	29.60
200	29.08	33.53	27.97	30.19

ตารางที่ ก-53 ผลต่างอุณหภูมิของ สารทำงานเอทานอล ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 26 มิลลิเมตร ความหนาครีป 1.5 มิลลิเมตร ความสูงครีป 10 มิลลิเมตร

อุณหภูมิ(°C)	ครั้งที่ 1(°C)	ครั้งที่ 2(°C)	ครั้งที่ 3(°C)	เฉลี่ย(°C)
100	51.96	47.51	46.40	48.62
120	54.81	50.36	49.25	51.47
140	56.62	52.17	51.06	53.28
160	57.48	53.03	51.92	54.15
180	59.26	54.81	53.70	55.92
200	61.26	56.81	55.70	57.92

ตารางที่ ก-54 ผลต่างอุณหภูมิของ สารทำงานเอทานอล ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 26 มิลลิเมตร ความหนาครีป 1.5 มิลลิเมตร ความสูงครีป 15 มิลลิเมตร

อุณหภูมิ(°C)	ครั้งที่ 1(°C)	ครั้งที่ 2(°C)	ครั้งที่ 3(°C)	เฉลี่ย(°C)
100	70.66	76.22	71.77	72.89
120	76.27	81.83	77.38	78.50
140	78.52	84.08	79.63	80.75
160	84.21	89.77	85.32	86.43
180	85.66	91.22	86.77	87.88
200	91.23	96.79	92.34	93.45

ตารางที่ ก-55 ผลต่างอุณหภูมิของ สารทำงานเอทานอล ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 26 มิลลิเมตร ความหนาครีป 2 มิลลิเมตร ความสูงครีป 5 มิลลิเมตร

อุณหภูมิ(°C)	ครั้งที่ 1(°C)	ครั้งที่ 2(°C)	ครั้งที่ 3(°C)	เฉลี่ย(°C)
100	21.83	22.94	27.39	24.06
120	22.31	23.42	27.86	24.53
140	23.44	24.56	29.00	25.67
160	25.37	26.48	30.93	27.59
180	26.39	27.50	31.95	28.61
200	27.23	28.34	32.79	29.45

ตารางที่ ก-56 ผลต่างอุณหภูมิของ สารทำงานเอทานอล ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 26 มิลลิเมตร ความหนาครีป 2 มิลลิเมตร ความสูงครีป 10 มิลลิเมตร

อุณหภูมิ(°C)	ครั้งที่ 1(°C)	ครั้งที่ 2(°C)	ครั้งที่ 3(°C)	เฉลี่ย(°C)
100	45.13	44.02	49.58	46.24
120	45.79	44.68	50.24	46.90
140	48.32	47.21	52.77	49.44
160	50.47	49.36	54.92	51.58
180	54.13	53.02	58.58	55.24
200	54.18	53.07	58.63	55.29

ตารางที่ ก-57 ผลต่างอุณหภูมิของ สารทำงานเอทานอล ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 26 มิลลิเมตร ความหนาครีป 2 มิลลิเมตร ความสูงครีป 15 มิลลิเมตร

อุณหภูมิ(°C)	ครั้งที่ 1(°C)	ครั้งที่ 2(°C)	ครั้งที่ 3(°C)	เฉลี่ย(°C)
100	69.79	75.35	70.90	72.01
120	74.76	80.32	75.87	76.99
140	79.27	84.83	80.38	81.49
160	81.14	86.70	82.25	83.36
180	85.60	91.16	86.72	87.83
200	88.95	94.51	90.06	91.17

ตารางที่ ก-58 คุณสมบัติของน้ำ

Temp*(°C)	Pressure(Mpa)	Density(kg/m ³)	Volume(m ³ /kg)	Enthalpy kJ / kg		Entropy kJ / (kg.K)		Specific Heat,Cp kJ / (kg.K)		Surface Tension
		Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	(10 ⁻³ N/m)
0.01	0.0006	999.8	205.98	0.0	2500	0.000	9.1541	4.229	1.868	75.65
5.00	0.0008	999.9	147.02	21.0	2509	0.076	9.0236	4.200	1.871	74.95
10.00	0.0012	999.7	106.32	42.0	2518	0.151	8.8986	4.188	1.874	74.22
15.00	0.0017	999.1	77.900	62.9	2528	0.224	8.7792	4.184	1.878	73.49
20.00	0.0023	998.2	57.777	83.8	2537	0.296	8.6651	4.183	1.882	72.74
25.00	0.0031	997.0	43.356	104.8	2546	0.367	8.5558	4.183	1.887	71.98
30.00	0.0042	995.6	32.896	125.7	2555	0.436	8.4513	4.183	1.892	71.20
35.00	0.0056	994.0	25.221	146.6	2564	0.505	8.3511	4.183	1.898	70.41
40.00	0.0073	992.2	19.528	167.5	2573	0.572	8.2550	4.182	1.905	69.60
45.00	0.0095	990.2	15.263	188.4	2582	0.638	8.1629	4.182	1.912	68.78
50.00	0.0123	988.0	12.037	209.3	2591	0.703	8.0745	4.182	1.919	67.95
55.00	0.0157	985.6	9.5730	230.2	2600	0.768	7.9896	4.182	1.928	67.10
60.00	0.0199	983.2	7.6746	251.2	2608	0.831	7.9080	4.183	1.937	66.24
65.00	0.0250	980.5	6.1996	272.1	2617	0.893	7.8295	4.184	1.947	65.37
70.00	0.0311	977.8	5.0447	293.0	2626	0.954	7.7540	4.187	1.958	64.49
75.00	0.0385	974.8	4.1333	314.0	2634	1.015	7.6813	4.190	1.970	63.59
80.00	0.0473	971.8	3.4088	334.9	2643	1.075	7.6112	4.194	1.983	62.68
85.00	0.0578	968.6	2.8289	355.9	2651	1.134	7.5436	4.199	1.996	61.76
90.00	0.0701	965.3	2.3617	376.9	2659	1.192	7.4784	4.204	2.011	60.82
95.00	0.0845	961.9	1.9828	398.0	2667	1.250	7.4154	4.210	2.027	59.88
100.0	0.1013	958.4	1.6736	419.1	2675	1.306	7.3545	4.217	2.044	58.92
105.0	0.1207	954.8	1.4200	440.2	2683	1.363	7.2956	4.224	2.062	57.95
110.0	0.1432	951.0	1.2106	461.3	2691	1.418	7.2386	4.232	2.082	56.97
115.0	0.1690	947.1	1.0370	482.5	2698	1.473	7.1833	4.240	2.103	55.98
120.0	0.1984	943.2	0.8922	503.8	2706	1.527	7.1297	4.249	2.126	54.97

ตารางที่ ก-58 คุณสมบัติของน้ำ (ต่อ)

Temp*(°C)	Pressure(Mpa)	Density(kg/m ³)	Volume(m ³ /kg)	Enthalpy kJ / kg		Entropy kJ / (kg.K)		SpecificHeat,Cp kJ / (kg.K)		SurfaceTension (10 ⁻³ N/m)
		Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	
125.0	0.2320	939.1	0.7708	525.1	2713	1.581	7.0777	4.258	2.150	53.96
130.0	0.2700	934.9	0.6687	546.4	2720	1.634	7.0272	4.268	2.176	52.94
135.0	0.3129	930.6	0.5823	567.8	2727	1.687	6.9780	4.278	2.203	51.91
140.0	0.3611	926.2	0.5089	589.2	2733	1.739	6.9302	4.288	2.233	50.86

ตารางที่ ก-59 สมบัติของอากาศที่ความดันบรรยากาศ

T,(K)	Density, ρ (kg/m ³)	SpecificHeat,c kJ/(kg.K)	μ , (kg/m.s) x 10 ⁵	Viscosity, ν (m ² /s) x 10 ⁶	Conductivity,k (w/m.K)	α , (m ² /s) x 10 ⁴	Prandtl number ,Pr
100	3.6010	1.0266	0.6924	1.923	0.009246	0.02501	0.770
150	2.3675	1.0099	1.0283	4.343	0.013735	0.05745	0.753
200	1.7684	1.0061	1.3289	7.490	0.01809	0.10165	0.739
250	1.4128	1.0053	1.5990	11.31	0.02227	0.15675	0.722
300	1.1774	1.0057	1.8462	15.69	0.02624	0.22160	0.708
350	0.9980	1.0090	2.075	20.76	0.03003	0.2983	0.697
400	0.8826	1.0140	2.286	25.90	0.03365	0.3760	0.689
450	0.7833	1.0207	2.484	31.71	0.03707	0.4222	0.683
500	0.7048	1.0295	2.671	37.90	0.04038	0.5564	0.680
550	0.6423	1.0392	2.848	44.34	0.04360	0.6532	0.680
600	0.5879	1.0551	3.018	51.34	0.04659	0.7512	0.680
650	0.5430	1.0635	3.177	58.51	0.04953	0.8578	0.682

ตารางที่ ก-59 สมบัติของอากาศที่ความดันบรรยากาศ (ต่อ)

T,(K)	Density, ρ (kg/m ³)	Specific Heat, c_p kJ/(kg.K)	μ , (kg/m.s) $\times 10^5$	Viscosity, ν (m ² /s) $\times 10^6$	Conductivity, k (w/m.K)	α , (m ² /s) $\times 10^4$	Prandtl number,Pr
700	0.5030	1.0752	3.332	66.25	0.05230	0.9672	0.684
750	0.4709	1.0856	3.481	73.91	0.05509	1.0774	0.686
800	0.4405	1.0978	3.625	82.29	0.05779	1.1951	0.689
850	0.4149	1.1095	3.765	90.75	0.06028	1.3097	0.692
900	0.3925	1.1212	3.899	99.3	0.06279	1.4271	0.696
950	0.3716	1.1321	4.023	108.2	0.06525	1.5510	0.699
1000	0.3524	1.1417	4.152	117.8	0.06752	1.6779	0.702
1100	0.3204	1.160	4.44	138.6	0.0732	1.969	0.704
1200	0.2947	1.179	4.69	159.1	0.0782	2.251	0.707
1300	0.2707	1.197	4.93	182.1	0.0837	2.583	0.705
1400	0.2515	1.214	5.17	205.5	0.0891	2.920	0.705
1500	0.2355	1.230	5.40	229.1	0.0946	3.262	0.705
1600	0.2211	1.248	5.63	254.5	0.100	3.609	0.705
1700	0.2082	1.267	5.58	280.5	0.105	3.977	0.705
1800	0.1970	1.287	6.07	308.1	0.111	4.379	0.704
1900	0.1858	1.309	6.29	338.5	0.117	4.811	0.704
2000	0.1762	1.338	6.50	369.0	0.124	5.260	0.702
2100	0.1682	1.372	6.72	399.6	0.131	5.715	0.700
2200	0.1602	1.419	6.93	432.6	0.139	6.120	0.707
2300	0.1538	1.482	7.14	464.0	0.149	6.540	0.710
2400	0.1458	1.574	7.35	504.0	0.161	7.020	0.718
2500	0.1394	1.688	7.57	543.5	0.175	7.441	0.730

ตารางที่ ก-60 คุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำงาน Ethanol

TTemp. °C	P_V Press 10^5 Pa	h_{fg} Latent kJ/kg	ρ_L Liquid 10^3 kg/m ³	ρ_V Vapor kg/m ³	μ Liquid 10^{-3} N.s/m ²	μ_V Vapor 10^{-5} N.s/m ²	K_L Liquid W/m.K	K_V Vapor W/m.K	α Liquid 10^{-3} N/m	C_p Liquid kJ/kg.K	C_p Vapor
0	0.012	1048.4	0.901	0.036	1.7990	0.774	0.183	0.0117	24.4	0.541	1.34
20	0.058	1030.0	0.800	0.085	1.1980	0.835	0.179	0.0139	22.8	0.574	1.40
40	0.180	1011.9	0.789	0.316	0.8190	0.900	0.175	0.160	21.0	0.615	1.48
60	0.472	988.9	0.770	0.748	0.5880	0.959	0.171	0.0179	19.2	0.665	1.54
80	1.086	960.0	0.757	1.430	0.4320	1.030	0.169	0.0199	17.3	0.723	1.61
100	2.260	927.0	0.730	3.410	0.3180	1.092	0.167	0.0219	15.5	0.789	1.68
120	4.290	885.5	0.710	6.010	0.2430	1.157	0.165	0.0238	13.4	0.863	1.75
140	7.530	834.0	0.680	10.670	0.1900	1.219	0.163	0.0256	11.2	0.945	
160	12.756	772.9	0.650	17.450	0.1500	1.293	0.161	0.0272	9.0		
180	19.600	698.8	0.610	27.650	0.1200	1.369	0.159	0.0288	6.7		
200	29.400	598.3	0.564	44.480	0.0950	1.464	0.157	0.0395	4.3		
220	42.800	468.5	0.510	74.350	0.0725	1.618	0.155	0.0321	2.2		
240	60.200	280.5	0.415	135.500	0.0488	1.948	0.153		0.1		

ตารางที่ ก-61 ประสิทธิภาพของ สารทำงานน้ำ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 16 มิลลิเมตร ความสูงครีป 5, 10 และ 15 มิลลิเมตร ความหนาครีป 1, 1.5 และ 2 มิลลิเมตร

ความสูงครีป	ความหนาครีป 1 mm	ความหนาครีป 1.5 mm	ความหนาครีป 2 mm
5 mm.	0.105	0.098	0.088
10 mm.	0.235	0.189	0.176
15 mm.	0.409	0.321	0.265

ตารางที่ ก-62 ประสิทธิภาพของ สารทำงานน้ำ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน ท่อ 21 มิลลิเมตร
ความสูงครีป 5, 10 และ 15 มิลลิเมตร ความหนาครีป 1, 1.5 และ 2 มิลลิเมตร

ความสูงครีป	ความหนาครีป 1 mm	ความหนาครีป 1.5 mm	ความหนาครีป 2 mm
5 mm	0.156	0.131	0.139
10 mm	0.334	0.275	0.253
15 mm	0.573	0.454	0.352

ตารางที่ ก-63 ประสิทธิภาพของ สารทำงานน้ำ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 26 มิลลิเมตร
ความสูงครีป 5, 10 และ 15 มิลลิเมตร ความหนาครีป 1, 1.5 และ 2 มิลลิเมตร

ความสูงครีป	ความหนาครีป 1 mm	ความหนาครีป 1.5 mm	ความหนาครีป 2 mm
5 mm	0.213	0.175	0.185
10 mm	0.417	0.359	0.359
15 mm	0.697	0.572	0.487

ตารางที่ ก-64 ประสิทธิภาพของ สารทำงานเอทานอล ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 16
มิลลิเมตร ความสูงครีป 5, 10 และ 15 มิลลิเมตร ความหนาครีป 1, 1.5 และ
2 มิลลิเมตร

ความสูงครีป	ความหนาครีป 1 mm	ความหนาครีป 1.5 mm	ความหนาครีป 2 mm
5 mm	0.176	0.154	0.151
10 mm	0.360	0.306	0.293
15 mm	0.646	0.526	0.469

ตารางที่ ก-65 ประสิทธิภาพของ สารทำงานเอทานอล ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 21 มิลลิเมตร ความสูงครีป 5, 10 และ 15 มิลลิเมตร ความหนาครีป 1, 1.5 และ 2 มิลลิเมตร

ความสูงครีป	ความหนาครีป 1 mm	ความหนาครีป 1.5 mm	ความหนาครีป 2 mm
5 mm	0.240	0.205	0.196
10 mm	0.468	0.385	0.381
15 mm	0.841	0.649	0.625

ตารางที่ ก-66 ประสิทธิภาพของ สารทำงานเอทานอล ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 26 มิลลิเมตร ความสูงครีป 5, 10 และ 15 มิลลิเมตร ความหนาครีป 1, 1.5 และ 2 มิลลิเมตร

ความสูงครีป	ความหนาครีป 1 mm	ความหนาครีป 1.5 mm	ความหนาครีป 2 mm
5 mm.	0.301	0.269	0.262
10 mm.	0.587	0.516	0.493
15 mm.	0.981	0.832	0.812

ภาคผนวก ข.

แสดงการคำนวณ

แสดงตัวอย่างการคำนวณหาค่าอัตราการถ่ายโอนความร้อน

1. การหาค่าอัตราการไหลเชิงมวล

ความหนาแน่น $\rho = 1.186816 \text{ kg} / \text{m}^3$

$$\dot{m} = \rho VA$$

$$\dot{m} = 1.186816 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 1.5 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times 0.014 \text{m}^2$$

$$\dot{m} = 0.024923136 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

ดังนั้น ค่าอัตราการไหลเชิงมวล 0.0248 กิโลกรัมต่อวินาที

2. ค่าการถ่ายโอนความร้อน

ค่าความจุความร้อนจำเพาะ $C_p = 1.0057 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}$

$$Q = \dot{m} C_p (T_{out} - T_{in})$$

$$Q = 0.024923136 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 1.0057 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \times 8.91 ^\circ\text{C}$$

$$Q = 0.22 \text{W}$$

ดังนั้น ค่าการถ่ายโอนความร้อน 0.22 วัตต์

3. การหาพื้นที่ท่อ

จาก $A_c = \pi D_o L_c$

$$A_c = 3.142857143 \times 0.016m \times 0.18m$$

$$A_c = 0.009051429m^2$$

ดังนั้น พื้นที่ท่อ 0.00905 ตารางเมตร

4. การหาพื้นที่ครีป

จาก $A_{fin} = [2\pi(r_o^2 - r_i^2) + 2\pi r_o t] \times n$

$$A_{fin} = [2 \times 3.142(0.013^2 m - 0.008^2 m) + 2 \times 3.142 \times 0.013m \times 0.001m] \times 20$$

$$A_{fin} = 0.01483024m^2$$

ดังนั้น พื้นที่ครีป 0.0148 ตารางเมตร

5. การหาค่าอัตราการถ่ายโอนความร้อน

จาก $q = \frac{Q}{A_c + A_{fin}}$

$$q = \frac{0.22W}{(0.01m^2 + 0.01m^2)}$$

$$q = 9.35W / m^2$$

ดังนั้น อัตราการถ่ายโอนความร้อน 9.35 วัตต์ต่อตารางเมตร

แสดงตัวอย่างการคำนวณหาประสิทธิภาพทางความร้อน

1. การหาค่าอัตราการถ่ายโอนความร้อนสูงสุด

$$\text{ค่า } C_{\min} = 0.016079311$$

$$Q_{\max} = C_{\min} (T_{hi} - T_{co})$$

$$Q_{\max} = 0.016079311 \frac{kg}{s} \times (200^{\circ}C - 25^{\circ}C)$$

$$Q_{\max} = 2.813879359W$$

ดังนั้น ค่าอัตราการถ่ายโอนความร้อนสูงสุด 2.813879359 วัตต์

2. การหาค่าประสิทธิภาพ

$$\varepsilon = \left(\frac{Q_c}{Q_{\max}} \right)$$

$$\varepsilon = 0.29W / 2.813879359W$$

$$\varepsilon = 0.105W$$

ดังนั้น ค่าประสิทธิภาพ 0.051 วัตต์

แสดงตัวอย่างการคำนวณหาอัตราการเติมสารทำงาน 50 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตรของส่วนทำระเหย

1. คำนวณหาอัตราการเติมสารทำงาน 50 เปอร์เซ็นต์

$$fr = \frac{\pi r^2 L}{2}$$

$$fr = (3.142 \times (0.62cm)^2 \times 20cm) / 2$$

$$fr = 12.07cm^3$$



มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

ภาคผนวก ค
ภาพประกอบงานวิจัย

ในส่วนของภาคผนวกนี้จะเป็นภาพประกอบของงานวิจัยและอุปกรณ์ต่างๆดังต่อไปนี้



รูปที่ ค-1 ครีบน้ำขนาดต่างที่ใช้ติดในการทดสอบ
(ก.) ความสูงครีบน้ำ 5 มิลลิเมตร
(ข.) ความสูงครีบน้ำ 10 มิลลิเมตร
(ค.) ความสูงครีบน้ำ 15 มิลลิเมตร



รูปที่ ค-2 ตรวจสอบรอยรั่ว



(ก.)

(ข.)

(ค.)

รูปที่ ค-3 ชุดทดสอบต่อความร้อนเทอร์โมไซฟอน

(ก.) ท่อทดสอบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 16 มิลลิเมตร

(ข.) ท่อทดสอบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 21 มิลลิเมตร

(ค.) ท่อทดสอบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 26 มิลลิเมตร



(ก.)

(ข.)

รูปที่ ค-4 การตัดและปิดหัวท่อที่เต็มสารเสร็จ

(ก.) การตัดหัวท่อที่เต็มสารทำงานเสร็จ

(ข.) การเชื่อมปิดหัวท่อที่เต็มสารทำงานเสร็จ



รูปที่ ค-5 ชุดควบคุมอุณหภูมิ



รูปที่ ค-6 เครื่องควบคุมความเร็วมอเตอร์



รูปที่ ค-7 การเชื่อมโครงเหล็กเพื่อสร้างชุดเติมสารทำงาน

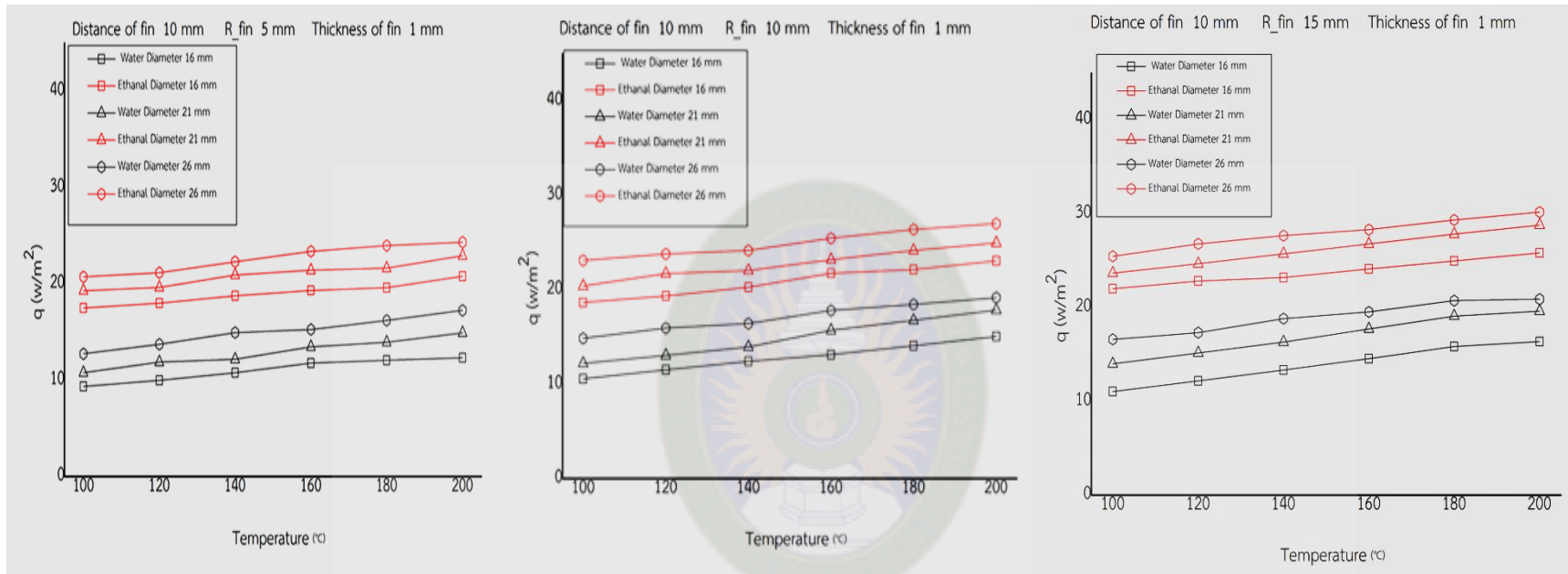


รูปที่ ค-8 การเชื่อมต่อทองแดงกับชุดวาล์วควบคุมการเติมสารทำงาน



ภาคผนวก

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY



(ก.)

(ข.)

(ค.)

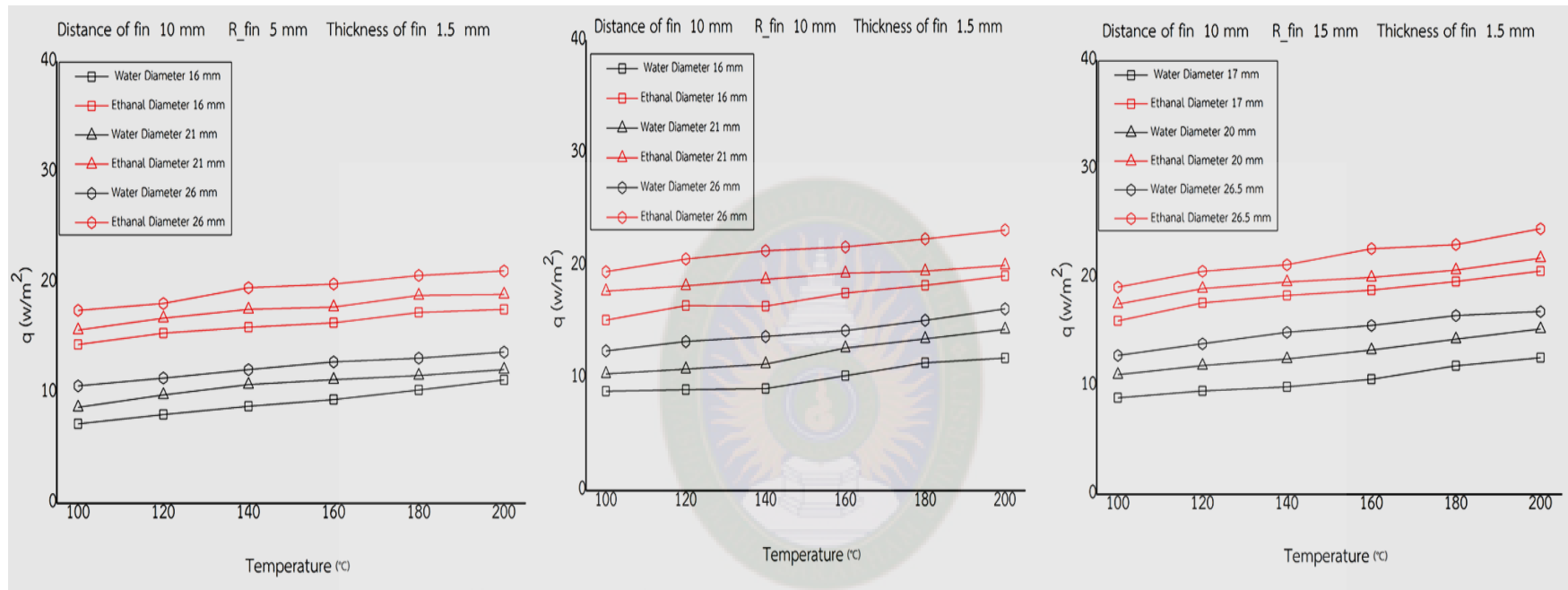
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิทำงาน และค่าอัตราการถ่ายโอนความร้อน ความสูงของครีบ 5, 10 และ 15 มิลลิเมตร ความหนาครีบ 1 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 16, 21 และ 26 มิลลิเมตรตามลำดับ

(ก.) ความสูงครีบ 5 มิลลิเมตร

(ข.) ความสูงครีบ 10 มิลลิเมตร

(ค.) ความสูงครีบ 15 มิลลิเมตร



(ก.)

(ข.)

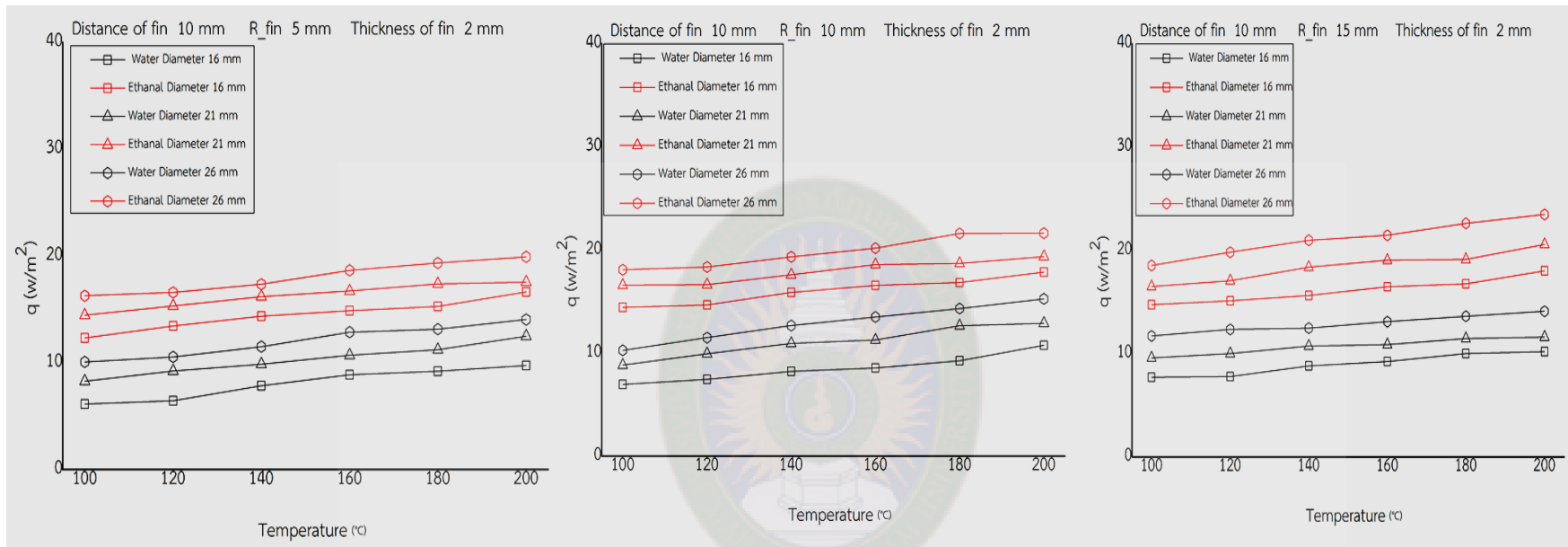
(ค.)

รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิทำงาน และค่าอัตราการถ่ายโอนความร้อน ความสูงของครีป 5, 10 และ 15 มิลลิเมตร ความหนาครีป 1.5 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 16, 21 และ 26 มิลลิเมตรตามลำดับ

(ก.) ความสูงครีป 5 มิลลิเมตร

(ข.) ความสูงครีป 10 มิลลิเมตร

(ค.) ความสูงครีป 15 มิลลิเมตร



(ก.)

(ข.)

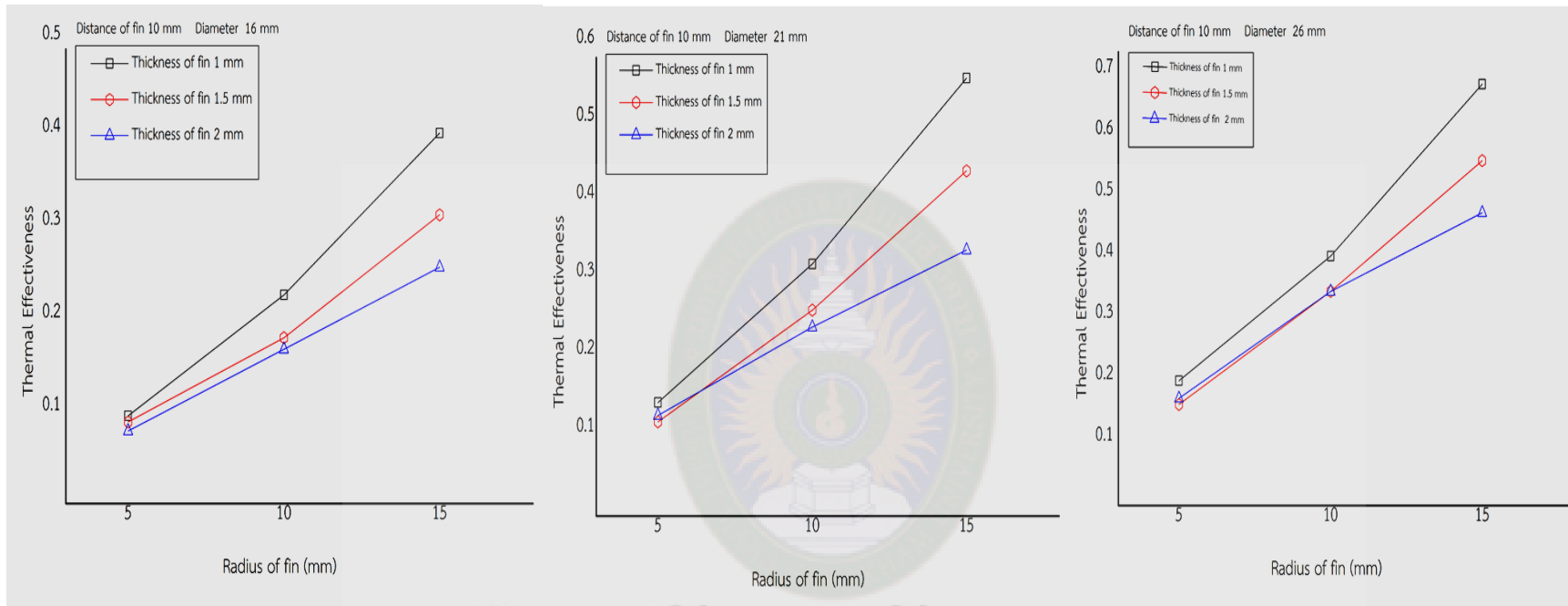
(ค.)

รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิทำงาน และค่าอัตราการถ่ายโอนความร้อน ความสูงของครีบ 5, 10 และ 15 มิลลิเมตร ความหนาครีบ 2 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 16, 21 และ 26 มิลลิเมตรตามลำดับ

(ก.) ความสูงครีบ 5 มิลลิเมตร

(ข.) ความสูงครีบ 10 มิลลิเมตร

(ค.) ความสูงครีบ 15 มิลลิเมตร



(ก.)

(ข.)

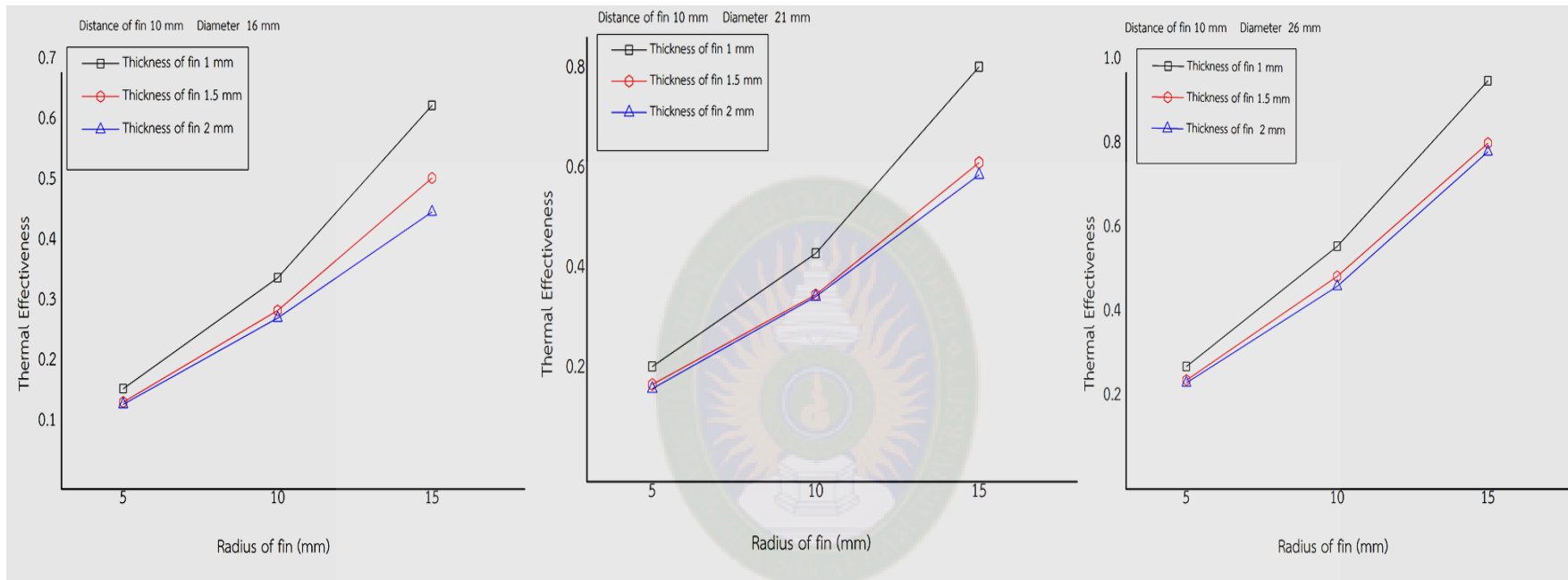
(ค.)

รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของความสูงครีบและค่าประสิทธิผลของท่อ ที่ใช้สารทำงานน้ำ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 26, 21 และ 26 มิลลิเมตร ความสูงครีบ 5, 10 และ 15 มิลลิเมตร ความหนาครีบ 1, 1.5 และ 2 มิลลิเมตร

(ก.) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 16 มิลลิเมตร

(ข.) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 21 มิลลิเมตร

(ค.) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 26 มิลลิเมตร



(ก.)

(ข.)

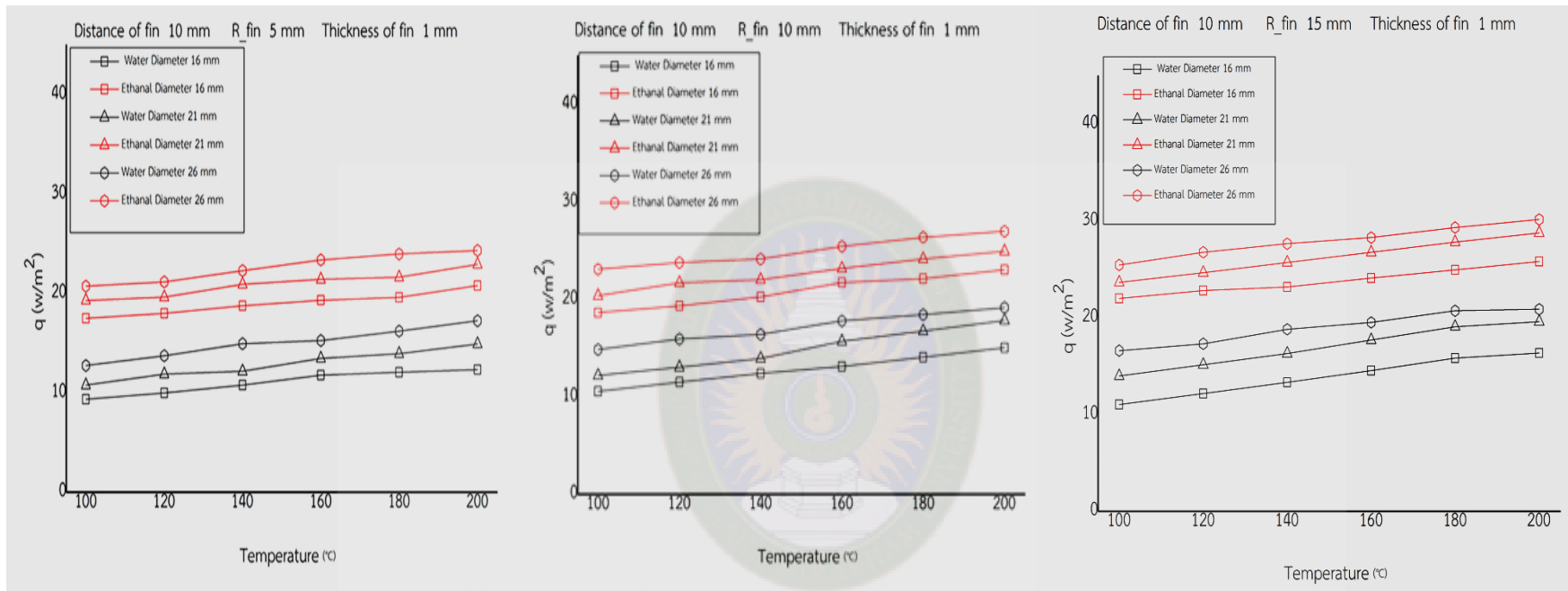
(ค.)

รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของความสูงครีบและค่าประสิทธิผลของท่อ ที่ใช้สารทำงานเอทานอล ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 26, 21 และ 26 มิลลิเมตร ความสูงครีบ 5, 10 และ 15 มิลลิเมตร ความหนาครีบ 1, 1.5 และ 2 มิลลิเมตร

(ก.) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 16 มิลลิเมตร

(ข.) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 21 มิลลิเมตร

(ค.) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 26 มิลลิเมตร



(ก.)

(ข.)

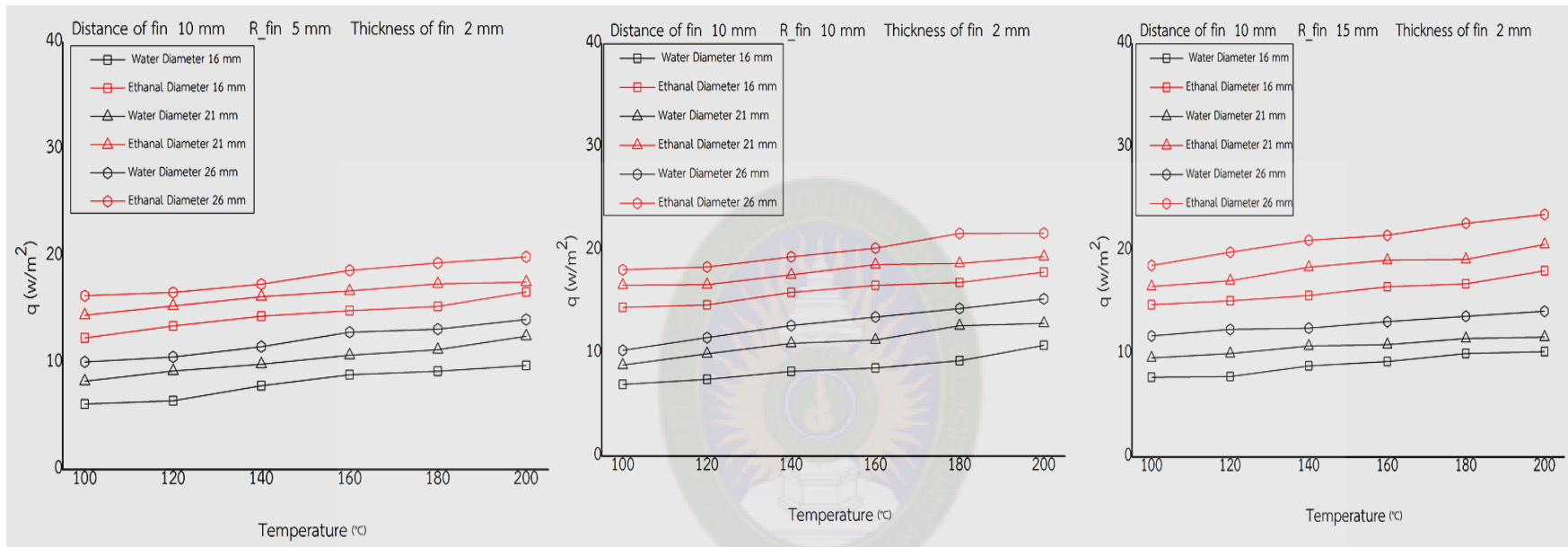
(ค.)

รูปที่ ก-1 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิทำงาน และค่าอัตราการถ่ายโอนความร้อน ความสูงของครีป 5, 10 และ 15 มิลลิเมตร ความหนาครีป 1 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 16, 21 และ 26 มิลลิเมตรตามลำดับ

(ก.) ความสูงครีป 5 มิลลิเมตร

(ข.) ความสูงครีป 10 มิลลิเมตร

(ค.) ความสูงครีป 15 มิลลิเมตร



(ก.)

(ข.)

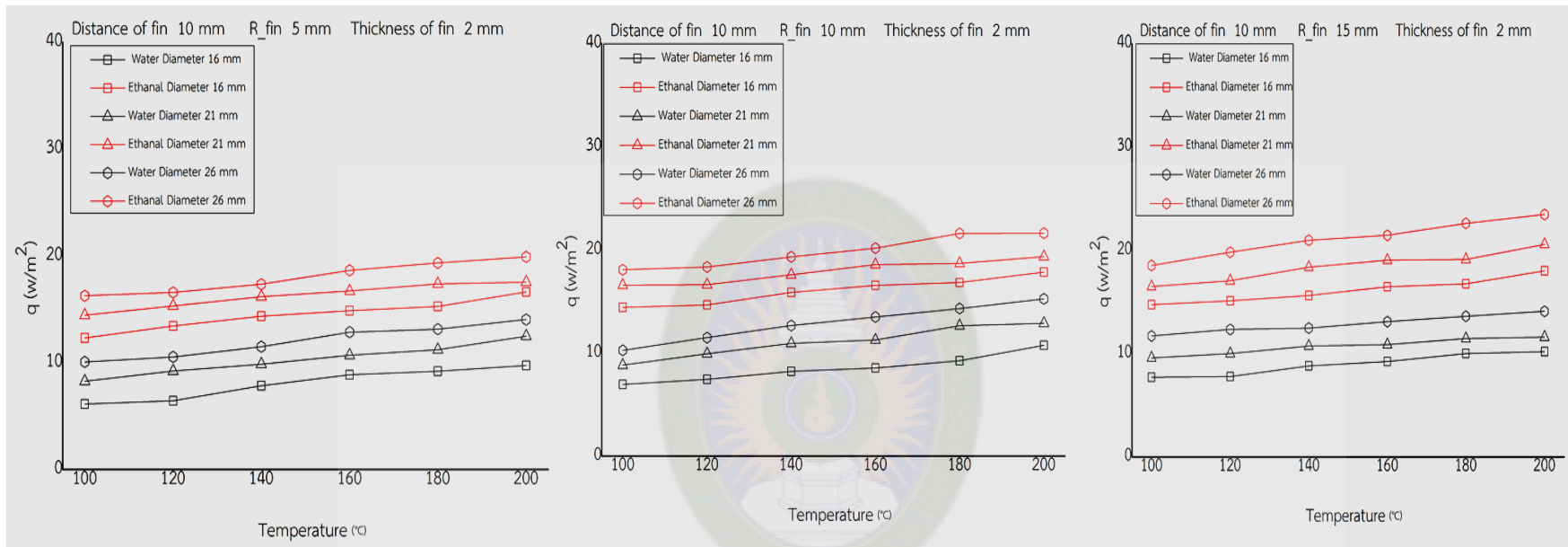
(ค.)

รูปที่ ก-2 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิทำงาน และค่าอัตราการถ่ายโอนความร้อน ความสูงของครีป 5, 10 และ 15 มิลลิเมตร ความหนาครีป 2 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 16, 21 และ 26 มิลลิเมตรตามลำดับ

(ก.) ความสูงครีป 5 มิลลิเมตร

(ข.) ความสูงครีป 10 มิลลิเมตร

(ค.) ความสูงครีป 15 มิลลิเมตร



(ก.)

(ข.)

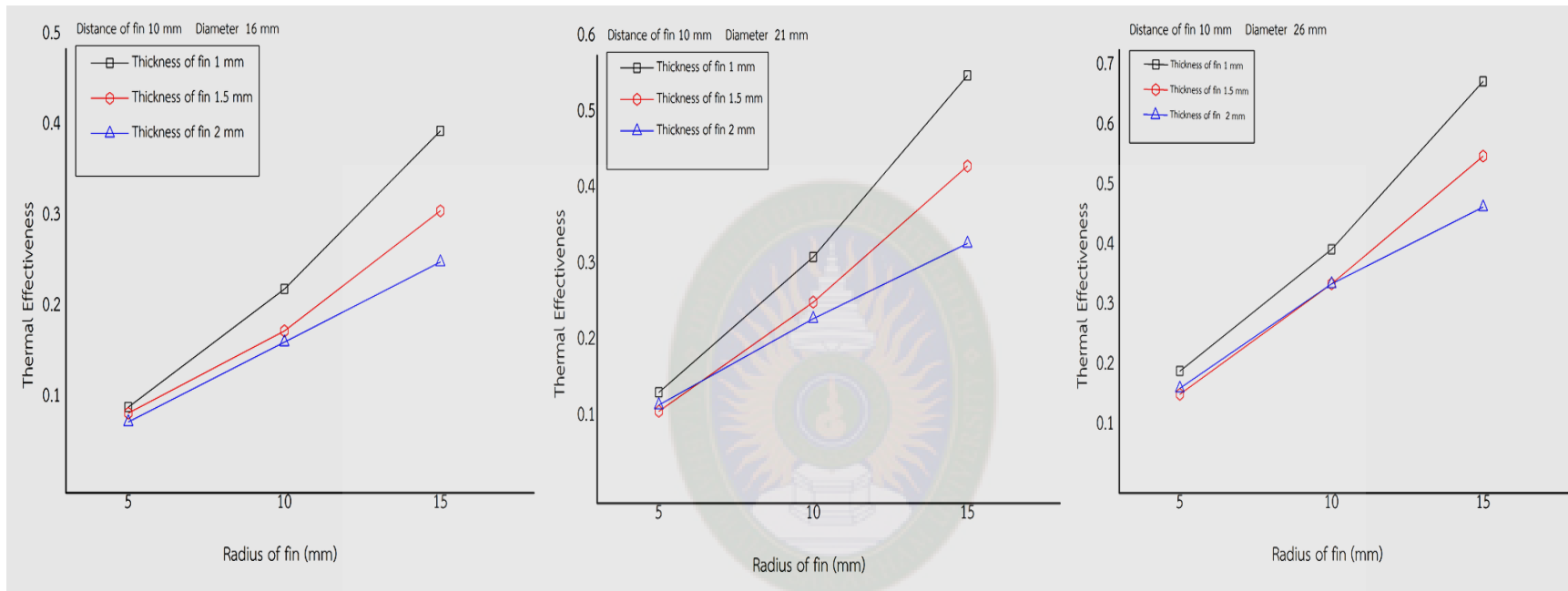
(ค.)

รูปที่ ก-3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิทำงาน และค่าอัตราการถ่ายโอนความร้อน ความสูงของครีป 5, 10 และ 15 มิลลิเมตร ความหนาครีป 2 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 16, 21 และ 26 มิลลิเมตรตามลำดับ

(ก.) ความสูงครีป 5 มิลลิเมตร

(ข.) ความสูงครีป 10 มิลลิเมตร

(ค.) ความสูงครีป 15 มิลลิเมตร



(ก.)

(ข.)

(ค.)

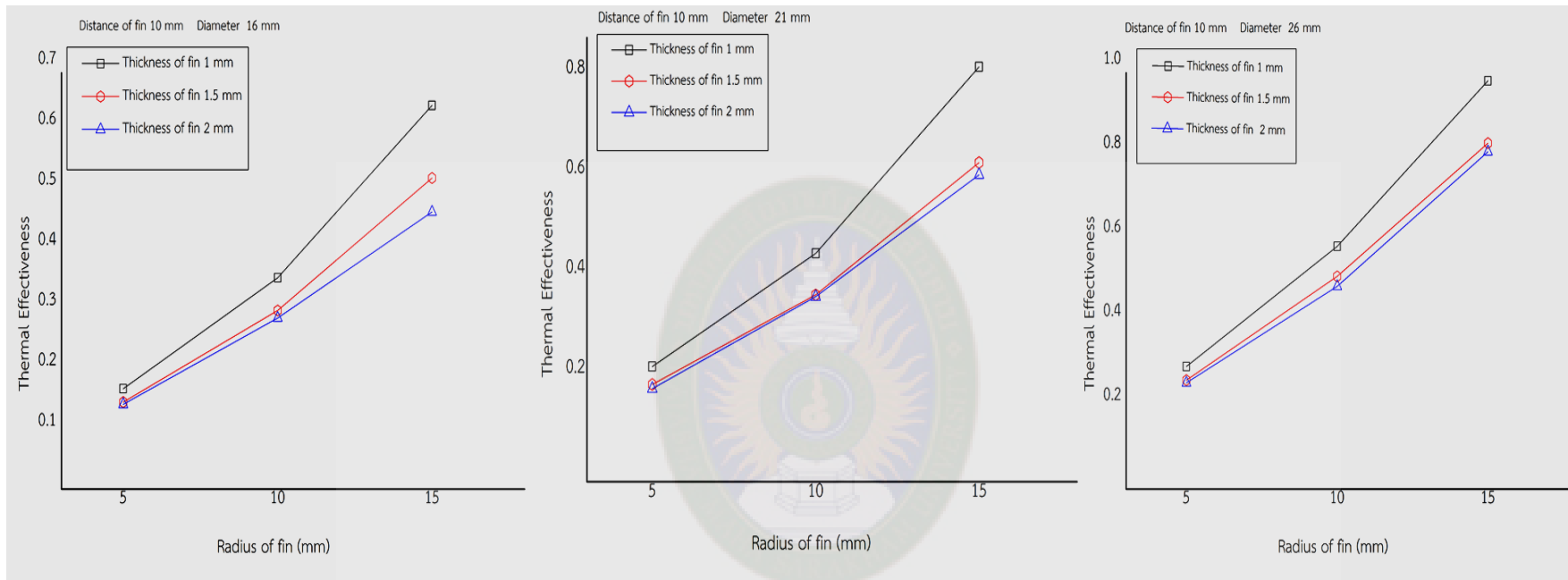
รูปที่ ก-4 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของความสูงครีปและค่าประสิทธิผลของท่อ ที่ใช้สารทำงานน้ำ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 26, 21 และ

26 มิลลิเมตร ความสูงครีป 5, 10 และ 15 มิลลิเมตร ความหนาครีป 1, 1.5 และ 2 มิลลิเมตร

(ก.) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 16 มิลลิเมตร

(ข.) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 21 มิลลิเมตร

(ค.) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 26 มิลลิเมตร



(ก.)

(ข.)

(ค.)

รูปที่ ก-5 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของความสูงครีปและค่าประสิทธิภาพของท่อ ที่ใช้สารทำงานเอทานอล ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 26, 21 และ 26 มิลลิเมตร ความสูงครีป 5, 10 และ 15 มิลลิเมตร ความหนาครีป 1, 1.5 และ 2 มิลลิเมตร

(ก.) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 16 มิลลิเมตร

(ข.) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 21 มิลลิเมตร

(ค.) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 26 มิลลิเมตร



ผลของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในที่มีผลต่อคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนชนิดเทอร์โมไซฟอนที่โหมดความร้อนสูง นางสาวอาทิตย์ยา พัฒโชติ และนายกมล ใจงาม พ.ศ. 2558

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูปภาพ	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย	2
1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ท่อนำความร้อนเทอร์โมไซฟอน	4
2.2 ครีระบายความร้อน	9
2.3 ประสิทธิภาพทางความร้อน	11
2.4 อุปกรณ์ถ่ายเทความร้อนเทอร์โมไซฟอนแบบมีครีบ	11
2.7 สายเทอร์โมคัปเปิล	12
2.8 ชนิดของเทอร์โมไซฟอน	17
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	18

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย	20
3.1.1 เครื่องมือทดสอบ	20
3.1.2 เครื่องมือเติมสารทำงาน และสารทำงาน	22
3.1.3 เครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดสอบ	23
3.2 วิธีดำเนินงานวิจัย	25
บทที่ 4 ผลการวิจัย และวิเคราะห์ข้อมูล	28
4.1 ผลการศึกษาลักษณะการถ่ายโอนความร้อนของสารทำงาน ขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลางภายในและลักษณะครีป	28
4.2 ค่าประสิทธิผลของสารทำงาน ความหนาครีป ความสูงครีปขนาดต่างๆ ที่มี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อขนาดต่างๆ	37
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย วิเคราะห์ผล และข้อเสนอแนะ	42
5.1 สรุปผลการวิจัย	42
5.2 วิเคราะห์ผล	43
บรรณานุกรม	44
ภาคผนวก	46
ภาคผนวก ก ผลการวิจัย	47
ภาคผนวก ข แสดงการคำนวณ	77
ภาคผนวก ค ภาพประกอบงานวิจัย	80
ประวัติผู้วิจัย	84

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 วิธีการส่งของเหลวกลับสู่ส่วนทำระเหยของท่อทำความร้อน	6
2.2 ชนิดของวัสดุที่ใช้ทำเทอร์โมคัปเปิลมาตรฐานแบบต่าง ๆ	14
2.3 การใช้งาน และคุณลักษณะของเทอร์โมคัปเปิลชนิด K	16
4.1 ค่าอัตราการถ่ายโอนความร้อนใช้สารทำงานน้ำ และเอทานอล ความสูงของครีป 5, 10 และ 15 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 16, 21 และ 26 มิลลิเมตร ความหนาครีป 1 มิลลิเมตร	29
4.2 ค่าอัตราการถ่ายโอนความร้อนใช้สารทำงานน้ำ และเอทานอล ความสูงของครีป 5, 10 และ 15 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 16, 21 และ 26 มิลลิเมตร ความหนาครีป 1.5 มิลลิเมตร	32
4.3 ค่าอัตราการถ่ายโอนความร้อนใช้สารทำงานน้ำ และเอทานอล ความสูงของครีป 5, 10 และ 15 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 16, 21 และ 26 มิลลิเมตร ความหนาครีป 2 มิลลิเมตร	35
ก-1 ค่าอัตราการถ่ายโอนความร้อนใช้สารทำงานน้ำ และเอทานอล ความสูงของครีป 5, 10 และ 15 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 16, 21 และ 26 มิลลิเมตร ความหนาครีป 1 มิลลิเมตร	47
ก-2 ค่าอัตราการถ่ายโอนความร้อนใช้สารทำงานน้ำ และเอทานอล ความสูงของครีป 5, 10 และ 15 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 16, 21 และ 26 มิลลิเมตร ความหนาครีป 1.5 มิลลิเมตร	49
ก-3 ค่าอัตราการถ่ายโอนความร้อนใช้สารทำงานน้ำ และเอทานอล ความสูงของครีป 5, 10 และ 15 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 16, 21 และ 26 มิลลิเมตร ความหนาครีป 2 มิลลิเมตร	51
ก-4 ผลต่างอุณหภูมิของสารทำงานน้ำ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 16 มิลลิเมตร ความหนาครีป 1 มิลลิเมตร ความสูงครีป 5 มิลลิเมตร	55

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก-57 ผลต่างอุณหภูมิของ สารทำงานเอทานอล ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 26 มิลลิเมตร ความหนาครีป 2 มิลลิเมตร ความสูงครีป 15 มิลลิเมตร	72
ก-58 คุณสมบัติของน้ำ	73
ก-59 สมบัติของอากาศที่ความดันบรรยากาศ	74
ก-60 คุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำงาน Ethanol	76
ก-61 ประสิทธิภาพของ สารทำงานน้ำ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน ท่อ 16 มิลลิเมตร ความสูงครีป 5, 10 และ 15 มิลลิเมตร ความหนาครีป 1, 1.5 และ 2 มิลลิเมตร	76
ก-62 ประสิทธิภาพของ สารทำงานน้ำ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน ท่อ 21 มิลลิเมตร ความสูงครีป 5, 10 และ 15 มิลลิเมตร ความหนาครีป 1, 1.5 และ 2 มิลลิเมตร	77
ก-63 ประสิทธิภาพของ สารทำงานน้ำ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน ท่อ 26 มิลลิเมตร ความสูงครีป 5, 10 และ 15 มิลลิเมตร ความหนาครีป 1, 1.5 และ 2 มิลลิเมตร	77
ก-64 ประสิทธิภาพของสารทำงานเอทานอล ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 16 มิลลิเมตร ความสูงครีป 5, 10 และ 15 มิลลิเมตร ความหนาครีป 1, 1.5 และ 2 มิลลิเมตร	77
ก-65 ประสิทธิภาพของสารทำงานเอทานอล ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 21 มิลลิเมตร ความสูงครีป 5, 10 และ 15 มิลลิเมตร ความหนาครีป 1, 1.5 และ 2 มิลลิเมตร	78
ก-66 ประสิทธิภาพของสารทำงานเอทานอล ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 26 มิลลิเมตร ความสูงครีป 5, 10 และ 15 มิลลิเมตร ความหนาครีป 1, 1.5 และ 2 มิลลิเมตร	78

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างและการทำงานของท่อนำความร้อนเทอร์โมไซฟอน	6
2.2 โครงสร้างของท่อเทอร์โมไซฟอล	7
2.3 แสดงท่อที่ติดครีป	9
2.4 ลักษณะการติดครีปตามยาว	10
2.5 ลักษณะการติดครีปตามแนวขวาง	10
2.6 แสดงโครงสร้างของเทอร์โมคัปเปิล	13
2.7 อุณหภูมิเทอร์โมคัปเปิล ทั้ง 7 ชนิด	14
2.8 แสดงลักษณะของเทอร์โมไซฟอนแบบท่อปิดผนัง	17
2.9 แสดงลักษณะของเทอร์โมไซฟอนแบบวงรอบ	18
3.1 ชุดทดสอบท่อความร้อน	21
3.2 ชุดทดสอบท่อความร้อนเทอร์โมไซฟอน	21
3.3 สารทำงานเอทานอล 95 เปอร์เซ็นต์ และ น้ำกลั่น	22
3.4 ชุดเพิ่มสารทำงาน	22
3.5 เครื่องบันทึกข้อมูล (Data Logger)	23
3.6 สายวัดอุณหภูมิ (Thermocouple)	23
3.7 เครื่องมือวัดความเร็วลม	24
3.8 แผงควบคุม	24
3.10 ลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์	25
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิทำงาน และค่าอัตราการถ่ายโอนความร้อน ความสูงของครีป 5, 10 และ 15 มิลลิเมตร ความหนาครีป 1 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 16, 21 และ 26 มิลลิเมตรตามลำดับ	30
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิทำงาน และค่าอัตราการถ่ายโอนความร้อน ความสูงของครีป 5, 10 และ 15 มิลลิเมตร ความหนาครีป 1.5 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 16, 21 และ 26 มิลลิเมตรตามลำดับ	33

สารบัญรูปร่างภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิทำงาน และค่าอัตราการถ่ายโอนความร้อน ความสูงของครีป 5, 10 และ 15 มิลลิเมตร ความหนาครีป 2 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 16, 21 และ 26 มิลลิเมตรตามลำดับ	36
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของความสูงครีปและค่าประสิทธิผลของท่อ ที่ใช้สารทำงานน้ำ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 26, 21 และ 26 มิลลิเมตร ความสูงครีป 5, 10 และ 15 มิลลิเมตร ความหนาครีป 1, 1.5 และ 2 มิลลิเมตร	38
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของความสูงครีปและค่าประสิทธิผลของท่อ ที่ใช้สารทำงานเอทานอล ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 26, 21 และ 26 มิลลิเมตร ความสูงครีป 5, 10 และ 15 มิลลิเมตร ความหนาครีป 1, 1.5 และ 2 มิลลิเมตร	40
ก-1 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิทำงาน และค่าอัตราการถ่ายโอนความร้อน ความสูงของครีป 5, 10 และ 15 มิลลิเมตร ความหนาครีป 1 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 16, 21 และ 26 มิลลิเมตรตามลำดับ	48
ก-2 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิทำงาน และค่าอัตราการถ่ายโอนความร้อน ความสูงของครีป 5, 10 และ 15 มิลลิเมตร ความหนาครีป 1.5 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 16, 21 และ 26 มิลลิเมตรตามลำดับ	50
ก-3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิทำงาน และค่าอัตราการถ่ายโอนความร้อน ความสูงของครีป 5, 10 และ 15 มิลลิเมตร ความหนาครีป 2 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 16, 21 และ 26 มิลลิเมตรตามลำดับ	52
ก-4 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของความสูงครีปและค่าประสิทธิผลของท่อ ที่ใช้สารทำงานน้ำ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 26, 21 และ 26 มิลลิเมตร ความสูงครีป 5, 10 และ 15 มิลลิเมตร ความหนาครีป 1, 1.5 และ 2 มิลลิเมตร	53
ก-5 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของความสูงครีปและค่าประสิทธิผลของท่อ ที่ใช้สารทำงานเอทานอล ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 26, 21 และ 26 มิลลิเมตร ความสูงครีป 5, 10 และ 15 มิลลิเมตร ความหนาครีป 1, 1.5 และ 2 มิลลิเมตร	54
ค-1 ครีปขนาดต่างที่ใช้ติดในการทดสอบ	82
ค-2 ตรวจสอบรอยรั่ว	82
ค-3 ชุดทดสอบท่อความร้อนเทอร์มิไซฟอน	83

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ค-4 การตัดและปิดหัวท่อที่เติมสารเสร็จ	83
ค-5 ชุดควบคุมอุณหภูมิ	84
ค-6 เครื่องควบคุมความเร็วมอเตอร์	84
ค-7 การเชื่อมโครงเหล็กเพื่อสร้างชุดเติมสารทำงาน	85
ค-8 การเชื่อมต่อทองแดงกับชุดวาล์วควบคุมการเติมสารทำงาน	85



มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY