



สมรรถนะความร้อนของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ตัวรับรังสีแบบท่อสุญญากาศร่วมกับ
ท่อเทอร์โมไซโฟนและมีวัสดุเปลี่ยนสถานะ



โดย
นายเกียรติศักดิ์ บุญญารุณเนตร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

สมรรถนะความร้อนของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ตัวรับรังสีแบบท่อสุญญากาศร่วมกับ
ท่อเทอร์โมไซโฟนและมีวัสดุเปลี่ยนสถานะ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

**THERMAL PERFORMANCE OF SOLAR WATER HEATER INTEGRATED
VACUUM TUBE WITH THERMOSYPHON CONTAIN WITH PHASE CHANGE
MATERIAL**



**By
Mr. Giattisak Boonyaroonnate**

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree

Master of Engineering Program in Energy Engineering

Department of Mechanical Engineering

Graduate School, Silpakorn University

Academic Year 2015

Copyright of Graduate School, Silpakorn University

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร อนุมัติให้วิทยานิพนธ์เรื่อง “ สมรรถนะความร้อนของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ตัวรับรังสีแบบท่อสุญญากาศร่วมกับท่อเทอร์โมไซโฟน และมีวัสดุเปลี่ยนสถานะ ” เสนอโดย นายเกียรติศักดิ์ บุญญาอรุณเนตร เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.ปานใจ ชารทศนวงศ์)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....เดือน..... พ.ศ.....

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีระศักดิ์ หุตากร

คณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์

ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทศพล เขตเจนการ)

...../...../.....

กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ปิยะนันท์ เจริญสวรรค์)

...../...../.....

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิติพงษ์ โสภณพงศ์พิพัฒน์)

...../...../.....

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีระศักดิ์ หุตากร)

...../...../.....



54406203 : สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน

คำสำคัญ : เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศ / วัสดุเปลี่ยนสถานะ

เกียรติศักดิ์ บุญญาอรุณเนตร : สมรรถนะความร้อนของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ตัวรับรังสีแบบท่อสุญญากาศร่วมกับท่อเทอร์โมไซฟอนและมีวัสดุเปลี่ยนสถานะ. อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : ผศ.ดร.ธีระศักดิ์ หุตากร. 105 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมรรถนะทางความร้อนของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ตัวรับรังสีแบบท่อสุญญากาศร่วมกับท่อเทอร์โมไซฟอนและมีวัสดุเปลี่ยนสถานะ และสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายการถ่ายเทความร้อนของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ตัวรับรังสีแบบท่อสุญญากาศร่วมกับท่อเทอร์โมไซฟอนและมีวัสดุเปลี่ยนสถานะ สำหรับการทดลองได้ทำการแปรค่าอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ 3 ค่า คือ 0.25 0.5 และ 1.0 ลิตรต่อนาที และมุมเอียงของตัวรับรังสีอาทิตย์ 3 มุมเอียง คือ 14 30 และ 45 องศา วัดจากแนวระดับ โดยทำการทดลองในตั้งแต่เวลา 08.00 - 20.00 น. ตั้งแต่ 12 พ.ค. – 10 ต.ค. 2557 จากผลการทดลอง พบว่า เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ การถ่ายเทความร้อน และประสิทธิภาพสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้น และความต้านทานความร้อนมีค่าลดลง เมื่อเพิ่มมุมเอียงของตัวรับรังสีอาทิตย์ จาก 14 เป็น 30 องศาจากแนวระดับ ทำให้การถ่ายเทความร้อน และประสิทธิภาพสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้น หลังจากนั้นเมื่อเพิ่มมุมเอียงการทำงานจาก 30 เป็น 45 องศาจากแนวระดับ การถ่ายเทความร้อนและประสิทธิภาพสูงสุดจะมีค่าลดลง ซึ่งมุมเอียงการทำงานของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีการถ่ายเทความร้อนและประสิทธิภาพสูงสุด คือ มุมเอียงการทำงาน 30 องศาจากแนวระดับ เมื่อทำการเปรียบเทียบสมรรถนะทางความร้อนของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ตัวรับรังสีแบบท่อสุญญากาศร่วมกับท่อเทอร์โมไซฟอนและมีวัสดุเปลี่ยนสถานะ และแบบธรรมดา พบว่าเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีวัสดุเปลี่ยนสถานะ มีการถ่ายเทความร้อน ประสิทธิภาพสูงสุด และความต้านทานความร้อนสูงกว่าเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบธรรมดา ผลการทำนายการถ่ายเทความร้อนจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ใช้ตัวรับรังสีแบบท่อสุญญากาศร่วมกับท่อเทอร์โมไซฟอนและมีวัสดุเปลี่ยนสถานะ พบว่าการถ่ายเทความร้อนที่คำนวณได้มีความคลาดเคลื่อนจากผลการทดลอง 58.4%

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ลายมือชื่อนักศึกษา.....

ปีการศึกษา 2558

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

54406203 : MAJOR : (ENERGY ENGINEERING)

KEY WORD : SOLAR WATER HEATER / PHASE CHANGE MATERIAL

GIATTISAK BOONYAARONNATE : THERMAL PERFORMANCE OF SOLAR WATER HEATER INTEGRATED VACUUM TUBE WITH THERMOSYPHON CONTAIN WITH PHASE CHANGE MATERIAL. THESIS ADVISOR : ASST.PROF.TEERASAK HUDAKORN. 105 pp.

This research presents the thermal performance investigation and establish the mathematic model to predict the heat transfer of a solar water heater integrated vacuum tube with thermosyphon contain with phase change material (PCM). For the experiment, the mass flow rate water inlets were varied: 0.25, 0.5, and 1.0 liter per minute. The inclination angles of solar collector were varied: 14, 30, and 45 degrees from horizontal orientation. The experimental was start from 8.00 a.m. to 8.00 p.m. in 12 May to 10 October 2014. The results showed that when the water inlet mass flow rate increased; the heat transfer and maximum thermal efficiency increased, and the thermal resistance decreased. The inclination angles of solar collector increased from 14 degree to 30 degree, the heat transfer and maximum thermal efficiency increased. After that, the inclination angle of a solar collector increased from 30 degree to 45 degree, the heat transfer and maximum thermal efficiency decreased. It was found that the maximum heat transfer and efficiency was occurred at the inclination angle of 30 degree from horizontal. When the thermal performance of the solar water heater integrated vacuum tube with thermosyphon contain with phase change material (PCM) was compared to that of the conventional solar water heater integrated vacuum tube with thermosyphon, the heat transfer, maximum efficiency and thermal resistance of solar water heater with PCM was higher than the conventional solar water heater. The result of Mathematical model to predict the heat transfer of a solar water heater with PCM has average error from the result of experimental 58.4%



Department of Mechanical Engineering

Student's signature

Thesis Advisor's signature

Graduate School, Silpakorn University

Academic Year 2015

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ไปได้ด้วยดีจากการแนะนำและช่วยเหลือเป็นอย่างดีจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธีระศักดิ์ หุดากร อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาโท ที่คอยให้คำปรึกษาและข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ยิ่งต่อการวิจัย อีกทั้งขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทศพล เขตเจนการ ประธานกรรมการ รองศาสตราจารย์ ดร.ปิยะนันท์ เจริญสุวรรณ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิติงค์ โสภณพงศ์พิพัฒน์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำต่างๆ ที่เป็นประโยชน์แก่ปริญญาโทเป็นอย่างดีและให้ความรู้เพิ่มเติมในการสอบทำให้ผมมีความรู้ใหม่ ๆ เพิ่มมากขึ้น

ท้ายที่สุดนี้ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ครอบครัว และผู้เกี่ยวข้องอื่นๆอีกหลายท่านที่ไม่อาจเอ่ยนามได้ครบ ที่คอยรับฟังปัญหาและเป็นกำลังใจเสมอมา ความสำเร็จใด ๆ ที่เกิดขึ้นขอมอบให้แก่ผู้มีพระคุณที่กล่าวมาข้างต้น คณะผู้จัดทำคาดหวังเป็นอย่างยิ่งว่าปริญญาโทฉบับนี้จะเกิดประโยชน์แก่การพัฒนาทางด้านพลังงานในอนาคตต่อไป



บทที่ 1

บทนำ

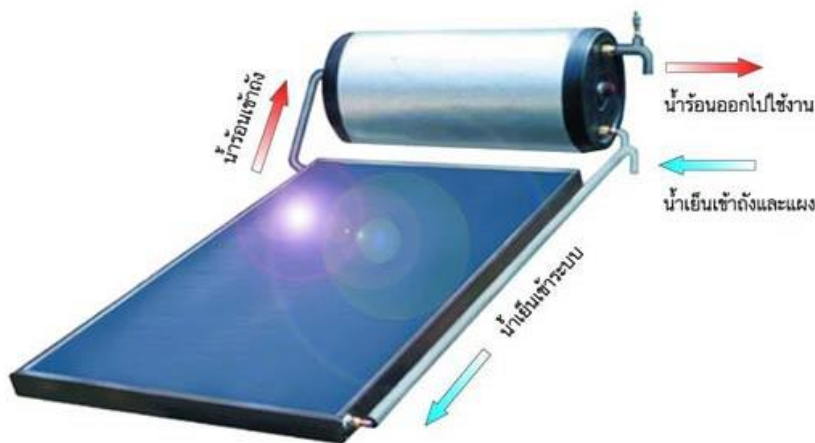
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในสภาวะปัจจุบัน สถานการณ์ด้านพลังงานของประเทศไทยนั้นกำลังอยู่ในช่วงวิกฤต เนื่องมาจากการขยายตัวของเศรษฐกิจที่มีแนวโน้มการใช้พลังงานเพิ่มมากขึ้น เป็นเหตุจูงใจให้นักวิจัยส่วนมากหันมาทำการค้นคว้าและวิจัยหาแหล่งพลังงานทดแทนและเทคโนโลยีด้านพลังงานที่เหมาะสมในประเทศไทย ประเทศไทยเป็นประเทศที่อยู่ใกล้เส้นศูนย์สูตร สามารถรับความร้อนจากแสงอาทิตย์ได้ตลอดทั้งปี ดังนั้นจึงมีแนวคิดที่จะนำพลังงานความร้อนจากดวงอาทิตย์มาใช้เป็นพลังงานทดแทน เนื่องจากพลังงานความร้อนจากดวงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานที่มีขนาดใหญ่ มีความสะอาดปลอดภัย และไม่ทำให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นพลังงานแสงอาทิตย์จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งของแหล่งพลังงานทดแทนที่น่าสนใจ นอกจากนี้ประเทศไทยซึ่งยังสามารถรับความร้อนจากแสงอาทิตย์ได้ตลอดทั้งปี และมีค่าเฉลี่ยของความเข้มแสงอาทิตย์เท่ากับ $18.2 \text{ MJ/m}^2/\text{day}$ [1] จะเห็นว่าประเทศไทยมีศักยภาพพอเพียงสำหรับการใช้พลังงานแสงอาทิตย์มาใช้งานอย่างยิ่ง ตัวอย่างของการนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้งาน ได้แก่ เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ และการผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ เป็นต้น

เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ [2,7] เป็นอุปกรณ์ทางความร้อนที่มีสามารถเปลี่ยนแปลงพลังงานแสงอาทิตย์ไปเป็นพลังงานความร้อนได้ดังแสดงในรูป 1.1 โดยพลังงานแสงอาทิตย์จะถูกดูดซับพลังงานโดยแผงรับรังสีอาทิตย์ จากนั้นก็จะส่งถ่ายพลังงานความร้อนไปน้ำ ซึ่งเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบนี้จะเป็นเครื่องทำน้ำร้อนที่มีตัวรับรังสีแบบแผ่นราบ เครื่องทำน้ำร้อนแบบนี้มีข้อจำกัดที่ไม่สามารถใช้งานได้ในวันที่มีแดดน้อย และประสิทธิภาพทางความร้อนต่ำ มีการสูญเสียความร้อนมาก ต่อมามีการพัฒนาเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์โดยการใช้ท่อแก้วสุญญากาศร่วมกับท่อความร้อนทำให้สามารถใช้งานได้ในวันที่มีแสงแดดน้อยเพราะสามารถรับรังสีอัลตราไวโอเล็ตและกักเก็บความร้อนได้ดี ทำให้มีประสิทธิภาพทางความร้อนสูงขึ้น แต่เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่กล่าวมานี้ยังประสบปัญหาเกี่ยวกับช่วงเวลากลางคืนหรือช่วงเวลาที่หลังจากที่พระอาทิตย์ตกดินคือ ไม่สามารถทำน้ำร้อนได้ จึงได้มีแนวคิดในการสะสมพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อนำความร้อนมาใช้ในช่วงเวลาที่ต้องการ

การสะสมพลังงานความร้อนเป็นแนวทางหนึ่งสำหรับการสะสมพลังงานแสงอาทิตย์ [3] สำหรับเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อใช้ในช่วงเวลาที่ต้องการโดยการเก็บสะสมพลังงานความร้อนสามารถแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะคือ การสะสมพลังงานความร้อนในรูปแบบพลังงานความร้อนสัมผัส (Sensible heat) และรูปแบบความร้อนแฝง (Latent heat)

การสะสมพลังงานความร้อนในรูปแบบของความร้อนแฝงนั้น วิธีการหนึ่งที่ได้รับคานินิยมคือ การใช้วัสดุเปลี่ยนสถานะ (Phase change material , PCM) [3,4] โดยที่วัสดุเปลี่ยนสถานะ



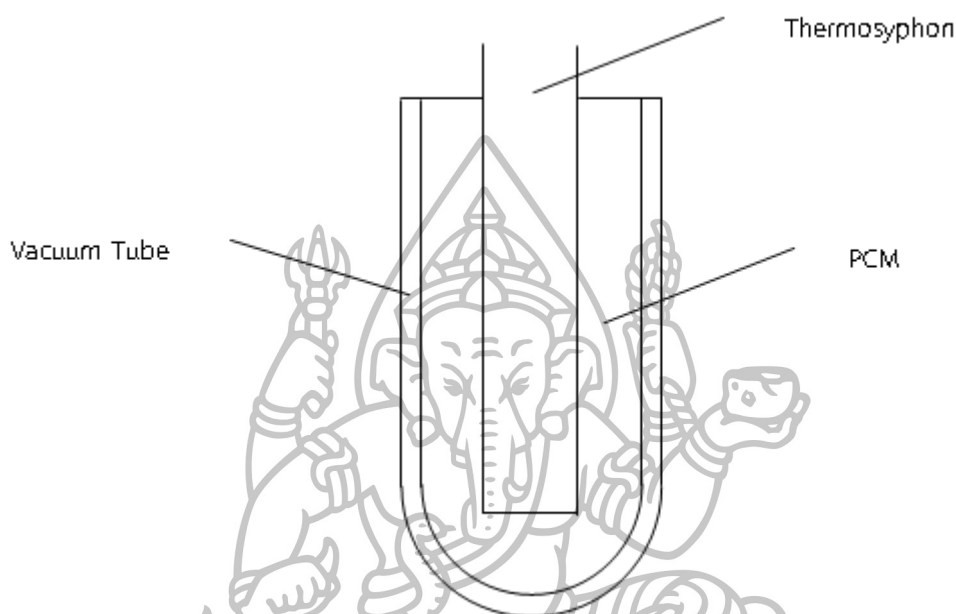
รูปที่ 1.1 แสดงเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ [2]

จะมีลักษณะเป็นของแข็งดูดซับพลังงานความร้อนเข้าไป อุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนเมื่ออุณหภูมิสูงถึงจุดหลอมเหลว อุณหภูมิจะไม่เพิ่มขึ้นไปอีกแต่พลังงานที่ดูดเข้าไปจะใช้ในการสลายแรงยึดเหนี่ยวออก ทำให้วัสดุเปลี่ยนสถานะกลายเป็นของเหลว ในทางตรงกันข้ามการเริ่มแข็งตัวของวัสดุเปลี่ยนสถานะเป็นการคายพลังงานความร้อนออกมา ซึ่งพลังงานที่คายออกอย่างช้าๆจะถูกนำไปสร้างแรงยึดเหนี่ยวซึ่งจะทำให้วัสดุเปลี่ยนสถานะเปลี่ยนเป็นของแข็งอีกครั้ง

การสะสมพลังงานความร้อนของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์โดยการใช้งานวัสดุเปลี่ยนสถานะในงานวิจัยก่อนหน้านี้ [4-6] จะเป็นการสะสมความร้อนจากน้ำร้อนที่ได้จากการทำน้ำร้อนจากแผงรับรังสีอาทิตย์ ความร้อนที่ถูกสะสมจะสะสมอยู่ที่ถังเก็บน้ำร้อน ซึ่งจะมีวัสดุเปลี่ยนสถานะอยู่ในถังเก็บน้ำร้อน วัสดุเปลี่ยนสถานะได้รับการถ่ายเทความร้อนจากน้ำร้อนที่อยู่ภายในถังเก็บน้ำร้อน อุณหภูมิของวัสดุเปลี่ยนสถานะจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งเท่ากับอุณหภูมิของน้ำร้อนที่อยู่ภายในถังน้ำร้อน ในช่วงเวลาหลังจากพระอาทิตย์ตกดินหรือช่วงเวลากลางคืน แผงรับรังสีอาทิตย์ไม่สามารถทำความร้อนได้ วัสดุเปลี่ยนสถานะที่อยู่ภายในถังเก็บน้ำร้อนจะคายความร้อนที่สะสมไว้ให้กับน้ำร้อน ทำให้น้ำที่อยู่ภายในถังเก็บน้ำร้อนยังมีอุณหภูมิที่สูงอยู่ และสามารถใช้งานน้ำร้อนในช่วงเวลาที่ไม่มีแสงอาทิตย์ได้ นอกจากนี้ ความร้อนที่สะสมไว้โดยวัสดุเปลี่ยนสถานะสามารถรักษาอุณหภูมิของน้ำที่อยู่ภายในถังเก็บน้ำร้อนให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นในช่วงเวลาตอนเช้าของวันถัดไป ทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์มีค่าสูงขึ้น

งานวิจัยนี้เป็นการนำข้อดีของการสะสมพลังงานความร้อนในรูปแบบของความร้อนแฝงมาประยุกต์ใช้งานร่วมกับเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งจะทำให้การบรรจวัสดุเปลี่ยนสถานะลงในท่อสุญญากาศดังแสดงในรูปที่ 1.2 โดยมีจุดประสงค์เพื่อใช้งานน้ำร้อนในช่วงเวลากลางคืนหรือช่วงเวลาที่ไม่มีแสงแดด เนื่องจากก่อนหน้านี้น้ำร้อนจะเก็บสะสมอยู่ที่ถังเก็บน้ำร้อนและจะถูกรักษา

อุณหภูมิให้คงที่ภายในถังเก็บน้ำร้อน แต่งานวิจัยนี้จะทำการประยุกต์วัสดุเปลี่ยนสถานะมาใส่ที่ท่อสุญญากาศร่วมกับท่อความร้อนเพื่อผลิตน้ำร้อนได้ในเวลาที่ต้องการ พาราฟินแวกซ์ (Paraffin Wax) ถูกใช้เป็นวัสดุเปลี่ยนสถานะในการทดลองนี้ ซึ่งจะมีการจำลองรูปแบบของการใช้น้ำร้อนให้เหมือนกับการใช้งานในชีวิตประจำวัน



รูปที่ 1.2 ภาพตัดขวางของท่อสุญญากาศร่วมกับท่อเทอร์โมไซฟอนและมีวัสดุเปลี่ยนสถานะ

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาเปรียบเทียบสมรรถนะทางความร้อนของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ ที่มีการสะสมพลังงานความร้อนโดยมีการใช้วัสดุเปลี่ยนสถานะและเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบทั่วไป

1.2.2 เพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีการสะสมพลังงานความร้อนโดยมีการใช้วัสดุเปลี่ยนสถานะ

1.3 สมมติฐานของการวิจัย

1.3.1 ทราบถึงประสิทธิภาพทางความร้อนของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ตัวรับรังสีชนิดท่อสุญญากาศร่วมกับท่อเทอร์โมไซฟอนแบบธรรมดาพร้อมบรรจุวัสดุเปลี่ยนสถานะ ในการสะสมพลังงานความร้อน

1.3.2 สามารถใช้งานเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ในช่วงเวลากลางคืนได้

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1.4.1 ตัวรับรังสีดวงอาทิตย์ทำจากท่อสุญญากาศขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 47 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 34 มิลลิเมตร ยาว 1500 มิลลิเมตร

1.4.2 ขนาดของถังเก็บน้ำร้อนมีขนาด 32 ลิตร

1.4.3 ท่อเทอร์โมไซโฟนทำจากท่อทองแดงเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 22.23 มิลลิเมตร

1.4.4 ความยาวส่วนทำระเหยและความยาวส่วนควบแน่นมีค่าเท่ากับ 1400 และ 200 มิลลิเมตร ตามลำดับ

1.4.5 สารทำงานที่ใช้คือน้ำโดยมีอัตราส่วนการเติมเท่ากับ 50 % โดยปริมาตรทั้งหมดของท่อ

1.4.6 ทำการเปลี่ยนอัตราการไหลของน้ำอย่างน้อย 3 ค่า เช่น 0.25 กิโลกรัมต่อนาที 0.5 กิโลกรัมต่อนาที และ 1.0 กิโลกรัมต่อนาที เป็นต้น

1.4.7 ทำการเปลี่ยนมุมเอียงของตัวรับรังสีดวงอาทิตย์อย่างเช่น 3 ค่า เช่น 14 องศา 30 องศา และ 45 องศา เป็นต้น

1.4.8 แต่ละการทดลองดำเนินการทดลองตั้งแต่วันที่ 8.00 น. ถึง 20.00 น. รวมการทดลองทั้งสิ้น 27 วัน

1.4.9 ทดลองภายใต้สภาพอากาศที่บริเวณลาดฟ้าชั้น 8 ของตึกคณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์ จังหวัดนครปฐม

1.5 ขั้นตอนของการวิจัย

1.5.1 ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ตัวรับรังสีชนิดท่อสุญญากาศร่วมกับท่อเทอร์โมไซโฟนและมีวัสดุเปลี่ยนสถานะ

1.5.2 ออกแบบและสร้างเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ตัวรับรังสีชนิดท่อสุญญากาศร่วมกับท่อเทอร์โมไซโฟนและมีวัสดุเปลี่ยนสถานะ

1.5.3 ดำเนินการทดลองเปรียบเทียบระหว่างเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ตัวรับรังสีชนิดท่อสุญญากาศร่วมกับท่อเทอร์โมไซโฟนและมีบรรจุวัสดุเปลี่ยนสถานะและเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ตัวรับรังสีชนิดท่อสุญญากาศร่วมกับท่อเทอร์โมไซโฟน

1.5.4 วิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ตัวรับรังสีชนิดท่อสุญญากาศร่วมกับท่อเทอร์โมไซโฟนและมีบรรจุวัสดุเปลี่ยนสถานะกับแบบที่ไม่มีวัสดุเปลี่ยนสถานะ

1.5.5 สรุปผลการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ตัวรับรังสีชนิดท่อสุญญากาศร่วมกับท่อเทอร์โมไซโฟนและมีบรรจุวัสดุเปลี่ยนสถานะกับแบบที่ไม่มีวัสดุเปลี่ยนสถานะพร้อมเขียนรายงานสรุปการวิจัย

1.6 ข้อตกลงเบื้องต้นของการวิจัย

1.6.1 ดำเนินการทดลองเปรียบเทียบสมรรถนะทางความร้อนระหว่างเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ตัวรับรังสีชนิดท่อสุญญากาศร่วมกับท่อเทอร์โมไซโฟนและมีวัสดุเปลี่ยนสถานะกับแบบที่ไม่มีวัสดุเปลี่ยนสถานะ

1.6.2 แต่ละการทดลองดำเนินการทดลองตั้งแต่วันที่ 8.00 น. ถึง 20.00 น. รวมการทดลองทั้งสิ้น 27 วัน

1.7 ความจำกัดของการวิจัย

เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่ถูกสร้างขึ้นนี้ตั้งอยู่ที่มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์ อ.เมืองนครปฐม จ.นครปฐม ประเทศไทย ซึ่งตั้งอยู่ที่ละติจูด 13.82014 องศาเหนือ และลองจิจูด 100.03761 องศาตะวันออก ดังนั้นสมรรถนะต่างๆ ของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานงานแสงอาทิตย์ของการวิจัยนี้อาจจะมีค่าเปลี่ยนแปลงเมื่อนำไปทดลองในที่อื่น

1.8 นิยามศัพท์เฉพาะ

1.8.1 วัสดุเปลี่ยนสถานะ (Phase Change Material, PCM) คือ วัสดุที่มีพลังงานที่ใช้ในการเปลี่ยนสถานะค่อนข้างสูง ซึ่งทำให้ PCM สามารถดูดสะสม พลังงานความร้อนได้ในปริมาณมากขณะเปลี่ยนสถานะจากของแข็ง เป็นของเหลว และสามารถปล่อยพลังงานที่สะสมนี้ออกมาได้ขณะเกิด การเปลี่ยนสถานะกลับเป็นสถานะเริ่มต้น

1.8.2 เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ คือ เครื่องผลิตน้ำร้อนโดยอาศัยหลักการเปลี่ยนพลังงานจากรังสีแสงอาทิตย์มาเพิ่มอุณหภูมิให้น้ำมีอุณหภูมิสูงขึ้น

1.8.3 ท่อแก้วสุญญากาศ คือ ท่อที่มีลักษณะเป็นหลอดแก้ว 2 ชั้นซ้อนกัน ระหว่างของท่อแก้วเป็นสุญญากาศ ความดันประมาณ 10^{-5} มิลลิบาร์

1.8.4 ท่อความร้อนแบบธรรมชาติหรือท่อความร้อนเทอร์โมไซโฟน คือ อุปกรณ์ที่มีสภาพการนำความร้อนสูง ท่อความร้อนใช้หลักการระเหยและกลั่นตัวของสารทำงาน ท่อความร้อนเป็นท่อปิดซึ่งภายในเป็นสุญญากาศและมีสารทำงานบรรจุอยู่

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์คือเครื่องผลิตน้ำร้อนโดยอาศัยหลักการเปลี่ยนพลังงานจากรังสีแสงอาทิตย์มาเพิ่มอุณหภูมิให้น้ำมีอุณหภูมิสูงขึ้นซึ่งสามารถนำมาทดแทนระบบผลิตน้ำร้อนจากฮีทเตอร์ไฟฟ้า ระบบผลิตน้ำร้อนจากบอยเลอร์ที่ใช้ น้ำมันดีเซล น้ำมันเตาหรือแก๊สธรรมชาติ

2.1.1 ส่วนประกอบและหลักการทำงานของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

เครื่องทำน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์เป็นการใช้รังสีจากดวงอาทิตย์เพื่อทำน้ำร้อนโดยมีส่วนประกอบสำคัญคือมีตัวกักเก็บความร้อน (Collectors) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ถังกักเก็บน้ำร้อน (Storage Tanks) และอาจจะมีปั๊มน้ำซึ่งขึ้นอยู่กับระบบว่าเป็นระบบแบบใด สำหรับในการอธิบายหลักการทำงานนั้น จะอธิบายจากส่วนประกอบของตัวกักเก็บความร้อน ซึ่งอาจจะมีรูปร่างลักษณะเป็น กล่อง กรอบ หรืออาจเป็นห้องๆ หนึ่ง โดยตัวกักเก็บความร้อนจะมีส่วนประกอบหลัก ๆ ดังนี้



รูปที่ 2.1 ตัวกักเก็บความร้อน (Solar Collector) [7]

2.1.1.1 ผิวด้านที่รับพลังงานจากแสงอาทิตย์

สามารถใช้วัสดุโปร่งใสใดๆ ก็ได้ในการทำผิวด้านนี้ แต่โดยทั่วไปแล้วกระจกจะเป็นที่นิยมมากที่สุด เนื่องจากกระจกสามารถผลิตและหาซื้อได้ง่ายในการทำเครื่องทำน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์นั้นควร เลือกกระจกที่มีความแข็งแรง ทนต่อการแตกกร้าวและการขีดข่วนได้พอสมควร เมื่อแสงอาทิตย์ผ่านกระจกและตกกระทบผิวภายในเครื่องทำน้ำร้อนแสงอาทิตย์ และก่อให้เกิดความร้อนขึ้นซึ่งคุณสมบัติเด่นของกระจกคือ ยอมให้แสงผ่านได้ง่ายแต่เป็นฉนวนความร้อนที่ดี ทำให้ความร้อนที่เกิดขึ้นในเครื่องทำน้ำร้อนจะถูกกักเก็บไว้

2.1.1.2 ตัวดูดซับรังสี

ตัวดูดซับรังสีหรือแผ่นรับรังสีอาทิตย์ส่วนมากทำมาจากวัสดุประเภทโลหะ เช่น แผ่นเหล็ก สังกะสีหรือทองแดงที่จะต้องมีการทาสีดำด้าน วัสดุโลหะที่ถูกทาสีดำด้านนี้จะทำหน้าที่ดูดซับพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ ความร้อนที่เกิดขึ้นในเครื่องทำน้ำร้อนจะถูกดูดซับไว้โดยวัตถุภายในเครื่องไม่ว่าวัตถุนั้น จะเป็นแผ่นโลหะ ถังเก็บน้ำ ท่อน้ำ ก้อนอิฐหรือก้อนหิน ซึ่งวัตถุเหล่านี้ (อาจเรียกรวมๆ ว่า มวลกักเก็บความร้อนหรือ Thermal Mass) ควรทาสีดำหรือสีทึบ เนื่องจากวัตถุสีดำหรือสีทึบจะมีความสามารถในการดูดความร้อนสูง วัตถุที่เป็นตัวดูดซับมีความจำเป็นมากในเครื่องทำน้ำร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์เนื่องจากหากปราศจากตัวดูดซับจะทำให้ระบบการทำความร้อนไม่สามารถผลิตความร้อนมาให้เพียงพอต่อการทำน้ำร้อนได้

2.1.1.3 ฉนวนกันความร้อน

ธรรมชาติของความร้อนจะมีการเคลื่อนที่จากที่ร้อนไปยังที่ที่เย็นกว่าหรือที่เรียกกันว่า การถ่ายเทความร้อนนั่นเอง ฉนวนกันความร้อนจะเป็นสิ่งป้องกันความร้อนรั่วไหลหรือเป็นการชะลอการรั่วไหลของความร้อน เนื่องจากฉนวนกันความร้อนเป็นอุปกรณ์ที่ป้องกันไม่ให้ความร้อนภายในเครื่องทำน้ำร้อนรั่วไหลออกมาภายนอก ซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่าจึงถือว่าฉนวนกันความร้อนเป็นอุปกรณ์สำคัญในทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ทุกๆแบบ

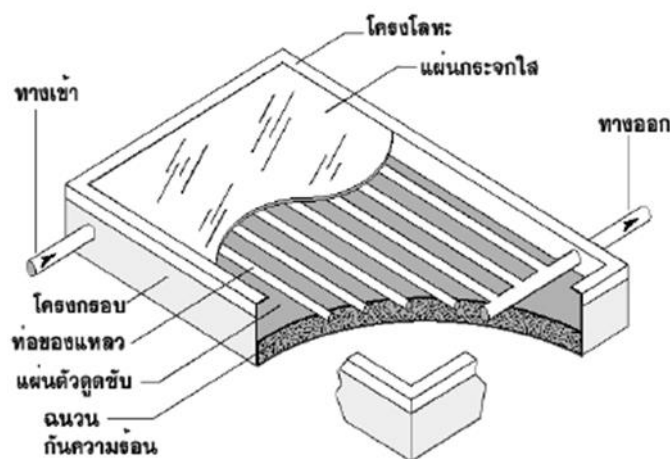
2.1.1.4 ท่อหรือทางออกของน้ำร้อน

เมื่อแสงอาทิตย์ส่องผ่านกระจกใสเข้ามาในเครื่องทำน้ำร้อน พลังงานแสงอาทิตย์โดยมีตัวดูดซับความร้อนทำหน้าที่ให้ความร้อนและมีฉนวนกันความร้อนในการป้องกันความร้อนรั่วไหลแล้ว อุปกรณ์ที่สำคัญอีกอุปกรณ์หนึ่ง คือ อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ถ่ายเทความร้อนจากเครื่องทำน้ำร้อนไปยังถังเก็บน้ำร้อน

2.1.2 ประเภทของตัวกักเก็บความร้อน

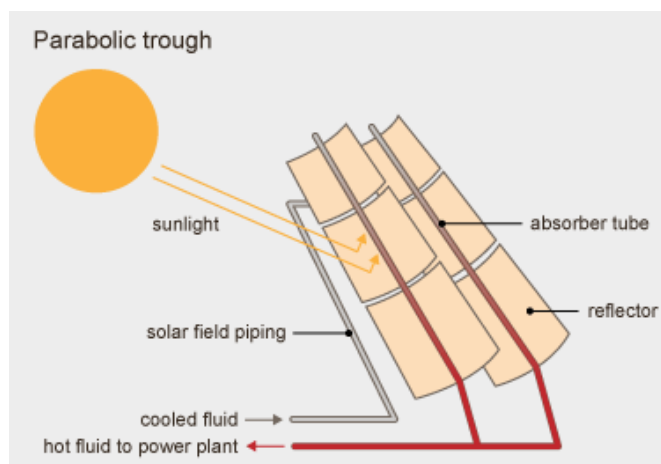
โดยทั่ว ๆ ไป ตัวกักเก็บความร้อนแยกได้เป็น 3 ประเภท คือ แบบแผ่นราบ (Flat-plate collector) แบบท่อสุญญากาศ (Evacuated-tube collector) และแบบความร้อนรวมศูนย์ (Concentrating collector)

2.1.2.1 ตัวกักเก็บความร้อนแบบแผ่นราบ (รูป 2.2) เป็นแบบที่ได้รับความนิยมมากที่สุด ซึ่งจะมีลักษณะเป็นกล่องที่หุ้มฉนวนไว้ ภายในบรรจุตัวดูดซับ ซึ่งจะเป็นแผ่นที่มีสีทึบหรือสีดำ และมีผนังโปร่งแสงหรือโปร่งใส เพื่อใช้รับ พลังงานจากแสงอาทิตย์

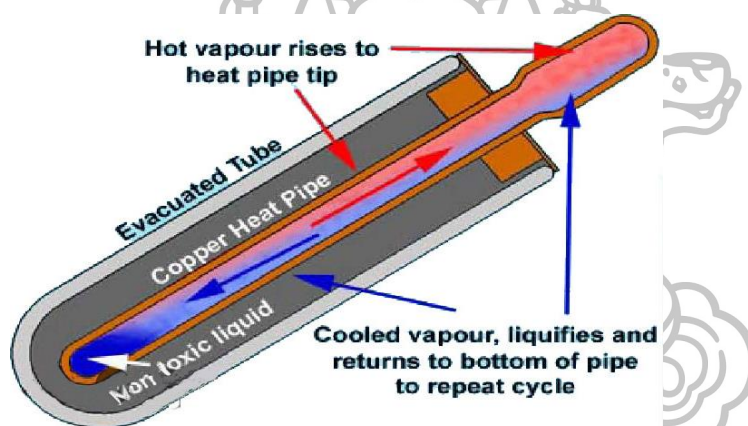


รูปที่ 2.2 ตัวกักเก็บความร้อนแบบแผ่นแบน เป็นกล่องที่ถูกหุ้มฉนวนและกันน้ำได้ ภายในมีแผ่นตัวดูดซับสีทึบ ทำหน้าที่ทำความร้อนและถ่ายเทให้กับของเหลวที่ไหลอยู่ในท่อ [7]

2.1.2.2 ตัวกักเก็บความร้อนแบบความร้อนรวมศูนย์ (รูปที่ 2.3) จะมีลักษณะเป็นกระจก ที่มีรูปทรงโค้งแบบพาราโบลา เพื่อทำหน้าที่สะท้อนรังสีจากดวงอาทิตย์ให้มารวมที่ท่อ ซึ่งท่อจะทำหน้าที่เป็นทั้งตัวดูดซับและเป็นท่อที่บรรจุสารสำหรับแลกเปลี่ยนความร้อน เพื่อถ่ายเทไปยังอุปกรณ์อื่นต่อไป

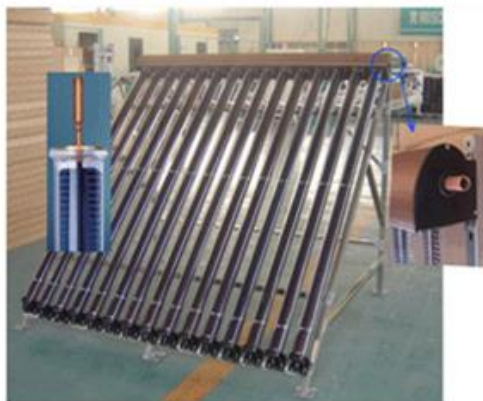


รูปที่ 2.3 ตัวกักเก็บความร้อนแบบรวมศูนย์ ที่มีการแสดงทิศทางการไหลของของไหล [7]

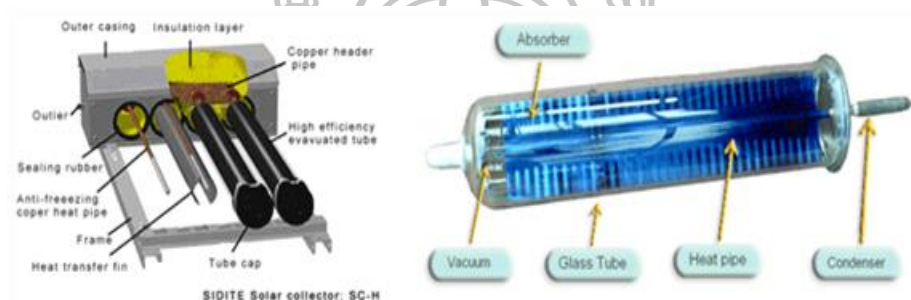


รูปที่ 2.4 แสดงส่วนต่างๆของท่อสุญญากาศร่วมกับท่อความร้อน [8]

2.1.2.3 ตัวกักเก็บความร้อนแบบท่อสุญญากาศ ประกอบด้วยท่อแก้วใสเรียงเป็นแถวหลายๆ แถว ภายในท่อแก้วใสจะมีท่ออีกท่อหนึ่งทำหน้าที่เป็นตัวดูดซับ ซึ่งจะถูกเคลือบด้วยวัสดุพิเศษ ที่มีคุณลักษณะดูดซับพลังงานแสงอาทิตย์ได้ดี และมีการสูญเสียความร้อนจากการแผ่รังสีน้อย สำหรับช่องว่างระหว่างท่อชั้นในกับท่อชั้นนอก จะมีลักษณะเป็นสุญญากาศ โดยในกระบวนการผลิต จะทำการกำจัดอากาศออกไป นอกจากนี้จะมีการใช้งานร่วมกับท่อความร้อน (Heat pipe) เพื่อใช้ในการถ่ายเทความร้อนที่ได้จากแสงอาทิตย์ ดังแสดงในรูป 2.4 ทั้งนี้เพราะจะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของตัวกักเก็บความร้อน เนื่องจากท่อชั้นนอกจะทำหน้าที่เป็นผนังโปร่งใสที่รับพลังงานจากแสงอาทิตย์ ส่วนสุญญากาศจะทำหน้าที่เป็นฉนวนป้องกันการสูญเสียความร้อน จากการนำความร้อนและการพาความร้อนและท่อชั้นในจะทำหน้าที่เป็นตัวดูดซับ และเป็นท่อสำหรับถ่ายเทความร้อนจากตัวกักเก็บความร้อนไปยังส่วนอื่นๆ ของระบบการทำความร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์



รูปที่ 2.5 ระบบผลิตน้ำร้อนด้วยหลอดสุญญากาศแบบท่อความร้อน [7]



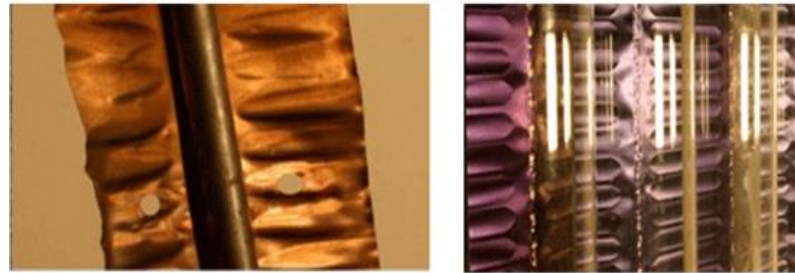
รูปที่ 2.6 หลอดสุญญากาศร่วมกับท่อความร้อน [7]

การผลิตน้ำร้อนด้วยตัวกักเก็บความร้อนแบบหลอดสุญญากาศ (Solar water heater with vacuum tube solar collector) ดังแสดงในรูปที่ 2.5 เป็นเทคโนโลยีที่ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อทดแทนเครื่องทำน้ำร้อนแบบเดิม การผลิตน้ำร้อนด้วยวิธีนี้จะมีประสิทธิภาพสูงแม้ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ต่ำ และสามารถทำอุณหภูมิได้สูงถึง 200 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ส่วนประกอบของเครื่องทำน้ำร้อนแบบหลอดสุญญากาศประกอบด้วย

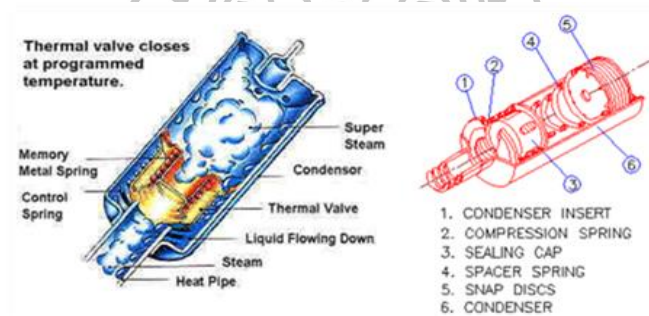
1. หลอดสุญญากาศและท่อความร้อน (Vacuum-tube solar collector with heat pipe) ซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่สุดของระบบทำน้ำร้อน ส่วนประกอบต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 2.6 หลอดสุญญากาศประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วน คือ

- ตัวดูดซับพลังงานแสงอาทิตย์ (Absorber) ที่ผ่านกรรมวิธี เคลือบผิวพิเศษด้วย Aluminum Nitride ซึ่งทำให้มีประสิทธิภาพในการดูดซับแสงอาทิตย์ และเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน ได้สูงเกินกว่า 92% เมื่อเทียบกับอุปกรณ์ Solar Collector ทั่ว ๆ แสดงในรูปที่ 2.7
- ท่อแก้วสุญญากาศ (Evacuated glass tube) จะมีลักษณะเป็นหลอดแก้วสองชั้น ด้านในเป็นสุญญากาศ ความดันประมาณ 10^{-5} มิลลิบาร์

- คอนเดนเซอร์ (Condenser) เป็นส่วนถ่ายเทความร้อนของสารทำงานหลังจากรับพลังงานความร้อนจนกลายเป็นไอให้กับน้ำและกลั่นตัวกลับเป็นของเหลวตกลงไปด้านล่างของท่อทองแดง ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.7 ตัวดูดซับพลังงานแสงอาทิตย์ (Absorber) [7]



รูปที่ 2.8 คอนเดนเซอร์ (Condenser) ของท่อความร้อน [7]

2. แมนิโฟลด์ (Manifold) เป็นอุปกรณ์ที่ส่วนเชื่อมต่อคอนเดนเซอร์ของหลอดสุญญากาศกับท่อน้ำเพื่อถ่ายเทความร้อน ดังแสดงในรูปที่ 2.9 แมนิโฟลด์ จะถูกออกแบบมาให้มีจำนวนตามพื้นที่รับพลังงานความร้อน หรือโหลดการใช้งานเช่น สามารถใช้กับหลอดได้ 20 หรือ 30 หลอด



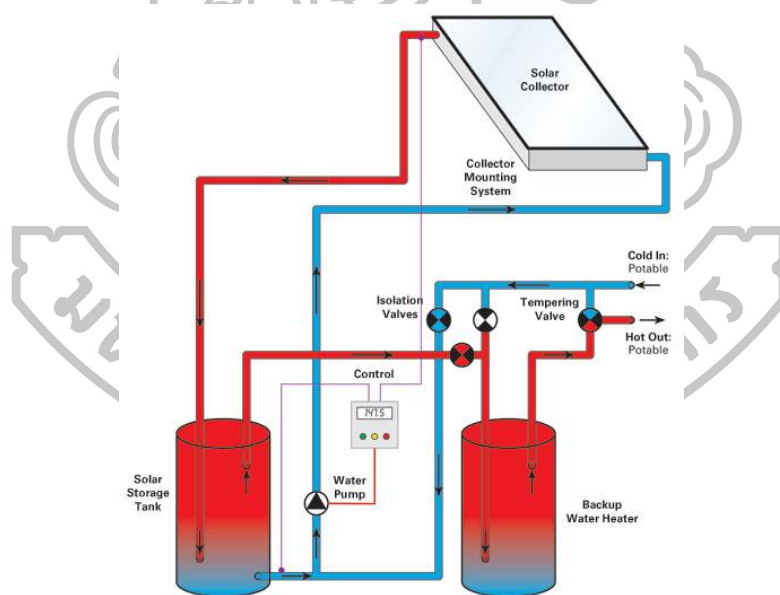
รูปที่ 2.9 แมนิโฟลด์ (Manifold) ของเครื่องทำน้ำร้อน [7]

3. ถังเก็บน้ำร้อน (รูปที่ 2.10) มีหน้าที่เก็บน้ำร้อนที่ได้รับการถ่ายเทความร้อนจากแมนิโฟลด์ ซึ่งจะมีช่องทางเข้าและทางออกของน้ำร้อนเพื่อนำไปใช้งาน ถังเก็บน้ำร้อนจะมีการหุ้มฉนวนเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนสู่สิ่งแวดล้อม



รูปที่ 2.10 ถังเก็บน้ำร้อนของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ [7]

4. ระบบปั้มน้ำและชุดควบคุม (รูปที่ 2.1) มีหน้าที่ควบคุมทิศทางการไหลของน้ำร้อนที่เข้าและออกจากถังเก็บน้ำร้อนและแผงรับรังสีอาทิตย์ ซึ่งปั้มน้ำจะมีหน้าที่หมุนเวียนน้ำภายในระบบ ส่วนชุดควบคุมคือ วาล์วน้ำซึ่งทำหน้าที่กำหนดทิศทางการไหลของน้ำภายในระบบ



รูปที่ 2.11 ตัวอย่างระบบปั้มน้ำและชุดควบคุม [7]

จากการศึกษาประเภทของตัวกักเก็บความร้อนทั้ง 3 ประเภท อันได้แก่ ตัวกักเก็บความร้อนแบบแผ่นราบ ตัวกักเก็บความร้อนแบบรวมศูนย์และตัวกักเก็บความร้อนแบบท่อสูญญากาศจะเห็นว่า ตัวกักเก็บความร้อนแบบท่อสูญญากาศมีประสิทธิภาพมากกว่าตัวกักเก็บความร้อนแบบแผ่น

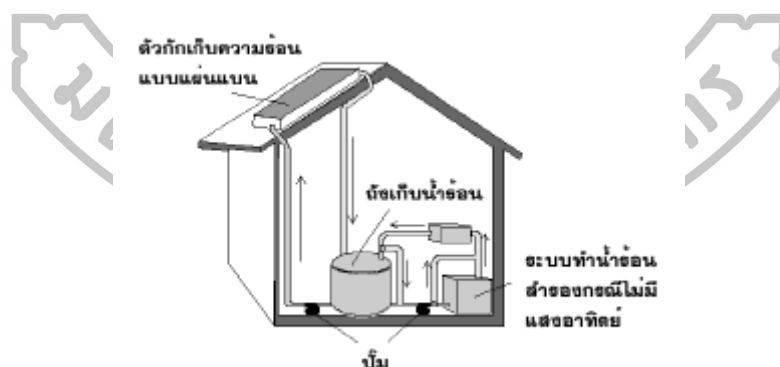
ราบ และมีลักษณะการทำงานและการติดตั้งที่ง่ายกว่าตัวกักเก็บความร้อนแบบรวมศูนย์ ดังนั้น เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีการใช้ตัวกักเก็บความร้อนแบบท่อสุญญากาศเหมาะที่จะนำมาใช้สำหรับงานวิจัยในครั้งนี้

2.1.3 ประเภทของระบบการทำน้ำร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ [2]

ในการทำน้ำร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์นั้น มีทั้งระบบแอคทีฟ (Active solar heater) และระบบพาสซีฟ (Passive solar heater) ระบบแอคทีฟนั้นจะมีการใช้ปั๊มน้ำในการบังคับการไหลหมุนเวียนของของเหลวที่ใช้ในการถ่ายเทความร้อน ส่วนระบบพาสซีฟนั้น จะไม่มีปั๊มแต่จะใช้การเคลื่อนที่ตามธรรมชาติของของเหลวเนื่องจากแรงลอยตัวแทน สำหรับปริมาณน้ำร้อนที่จะผลิตได้ จะขึ้นอยู่กับชนิดและขนาดของระบบ นอกจากนี้ ปริมาณแสงอาทิตย์ ลักษณะการ ติดตั้งมุมเอียงและทิศทางที่ติดตั้งตัวกักเก็บความร้อนก็มีผลต่อปริมาณน้ำร้อนที่ผลิตได้ด้วย

2.1.3.1 ระบบแอคทีฟ (Active systems)

ระบบแอคทีฟ (รูปที่ 2.12) เป็นระบบที่มีการใช้ปั๊มน้ำไฟฟ้า วาล์ว และตัวควบคุม เพื่อบังคับให้น้ำหรือของเหลวที่ใช้ถ่ายเทความร้อนหมุนเวียนในระบบผ่านตัวกักเก็บความร้อน โดยทั่วไปแล้ว จะมีราคาแพงกว่าระบบพาสซีฟแต่ระบบแอคทีฟนั้น มีประสิทธิภาพสูงกว่าระบบพาสซีฟ นอกจากนี้ ในด้านการติดตั้งระบบแอคทีฟ ยังติดตั้งง่ายกว่าระบบพาสซีฟ เนื่องจากถังกักเก็บน้ำร้อนในระบบพาสซีฟ จำเป็นต้องติดตั้งให้อยู่สูงกว่าตัวกักเก็บความร้อนและต้องอยู่ใกล้กันด้วย แต่ระบบแอคทีฟนั้น ต้องใช้ไฟฟ้าทำให้เสียค่าใช้จ่ายด้านพลังงานมากกว่าระบบพาสซีฟ



รูปที่ 2.12 ระบบแอคทีฟ เป็นการใช้ปั๊มในการหมุนเวียนของเหลวในระบบทำน้ำร้อน [7]

ลักษณะของเครื่องทำน้ำร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ในระบบแอคทีฟ อาจแยกเป็นแบบ ระบบเปิด หรือที่บางครั้งเรียกว่า แบบส่งน้ำร้อนโดยตรง (“Open loop” or “Direct”) และแบบระบบปิด หรือบางครั้งเรียกว่าแบบส่งน้ำร้อน ทางอ้อม (“Closed loop” or “Indirect”)

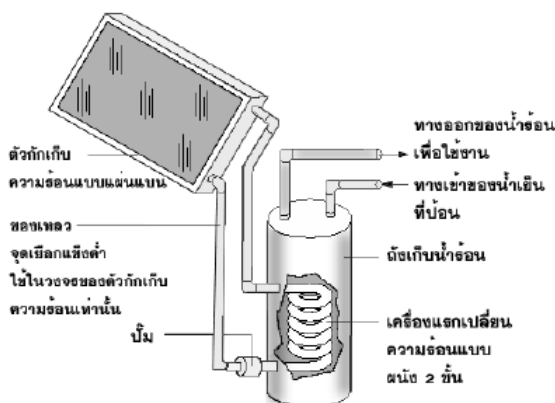
1. ระบบแอคทีฟแบบเปิด (Open-loop active systems)

ระบบนี้ จะใช้ปั๊มในการหมุนเวียนน้ำที่ต้องการนำไปใช้ให้ผ่านตัวกักเก็บความร้อน ลักษณะการออกแบบเช่นนี้ จะทำให้มีประสิทธิภาพสูงและค่าใช้จ่ายในการทำน้ำร้อนต่ำ แต่ไม่เหมาะสมกับกรณีที่น้ำที่นำไปใช้มีความ กระด้าง หรือมีความเป็นกรดมาก ตัวอย่างเช่น น้ำบาดาล หรือน้ำประปาในบางพื้นที่ ซึ่งลักษณะของน้ำดังกล่าว จะเป็นสาเหตุทำให้เกิดตะกรัน หรือสนิมขึ้น ซึ่งจะ ทำให้ เครื่องทำน้ำร้อนมีอายุการใช้งานสั้นลง

2. ระบบแอคทีฟแบบปิด (Closed-loop active Systems)

ระบบนี้ จะใช้ปั๊มในการหมุนเวียนของเหลวที่ใช้แลกเปลี่ยนความร้อนให้ผ่านตัวกักเก็บความร้อน ซึ่งโดยทั่วไป จะใช้ของผสมระหว่างไกลคอลกับน้ำ (Glycol-water antifreeze mixture) ซึ่งเป็นของผสมที่มีจุดเยือกแข็งต่ำ นอกจากนั้น ระบบนี้จะใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ในการถ่ายเทความร้อนจากของเหลวที่ใช้ถ่ายเทความร้อนกับน้ำที่ต้องการไปใช้ประโยชน์ ซึ่งจะถูกนำ

ระบบแอคทีฟแบบปิด



รูปที่ 2.13 ระบบแอคทีฟแบบปิดจะใช้ของเหลว เช่น น้ำ หรือ ของเหลวจุดเยือกแข็งต่ำในวงจรของ ตัวกักเก็บความร้อน และใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำที่ต้องการ นำไปใช้งาน [7]

ไปเก็บไว้ในถังกักเก็บน้ำร้อนต่อไป เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบผนัง 2 ชั้น (Double-walled heat exchangers) จะเป็นสิ่งป้องกันไม่ให้เกิดการปนเปื้อนในน้ำที่ต้องการใช้ ดังนั้นเครื่อง แลกเปลี่ยนความร้อนประเภทนี้ จะนิยมใช้ในกรณีที่ของเหลวที่ใช้ถ่ายเทความร้อนไม่ใช่ น้ำดังแสดงใน รูปที่ 2.13 ระบบไกลคอลแบบปิด (Closed-loop glycol systems) เป็นที่นิยมในประเทศเมือง หนาวมาก เนื่องจากสามารถป้องกันปัญหาเครื่องทำงานไม่ได้ในกรณีที่น้ำกลายเป็นน้ำแข็งได้ แต่ ระบบนี้ ก็มีราคาสูง นอกจากนั้น ของผสมไกลคอล ต้องทำการตรวจสอบทุกปี และทำการเปลี่ยนทุกๆ 3-10 ปี ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับคุณภาพของ ของผสมไกลคอลและอุณหภูมิของระบบ ระบบไหลกลับ (Drainback Systems) ก็เป็นระบบหนึ่งในระบบแอคทีฟแบบปิด ซึ่งใช้น้ำเป็นของเหลวที่ใช้ถ่ายเท

ความร้อนในระบบ โดยหลักการทำงานของระบบนี้ จะใช้ปั๊มในการทำให้น้ำหมุนเวียนผ่านตัวกักเก็บความร้อน โดยหลังจากที่น้ำผ่านตัวกักเก็บความร้อน (Collectors) ติดตั้งบริเวณหลังคาแล้ว น้ำจะไหลกลับเข้าสู่ถังกักเก็บ (Storage Tank) หรือตัวแลกเปลี่ยนความร้อนเอง โดยแรงดึงดูดของโลก ซึ่งจะไม่มีการปิดกั้น เพราะฉะนั้น เมื่อปั๊มหยุดทำงานจะทำให้น้ำไหลออกจากตัวกักเก็บความร้อนหมด ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในประเทศเมืองหนาว เพราะจะไม่มีน้ำตกค้างอยู่ในท่อที่ติดตั้ง อยู่ภายนอกอาคาร ซึ่งอาจมีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง ทำให้ขจัดปัญหาน้ำที่ค้างอยู่ในท่อเป็นน้ำแข็งได้ นอกจากนี้ ประโยชน์อีกประการของระบบนี้ คือ ในกรณีที่น้ำร้อนเกินไป ก็สามารถหยุดการทำงานของปั๊มทำให้ไม่มีน้ำไหลผ่านตัวกักเก็บความร้อน ทำให้อุณหภูมิของน้ำเย็นลงได้

เนื่องจากในระบบแอคทีฟ ต้องใช้ปั๊มเพียงเพื่อต้องการหมุนเวียนของเหลวผ่านตัวกักเก็บความร้อน ซึ่งเป็นระบบที่ต้องการกำลังงานไม่มาก บริษัทที่จำหน่ายเครื่องทำน้ำร้อนบางบริษัทจึงได้นำปั๊มไฟฟ้ากระแสตรง (DC) ที่ใช้พลังงานไฟฟ้าที่ได้จากแสงอาทิตย์ โดยใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ เป็นแหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้า ซึ่งจะเกิดผลดีคือ จะไม่มีค่าใช้จ่ายในระหว่างอายุการใช้งาน และเนื่องจากเมื่อมีแสงอาทิตย์ ปั๊มจึงจะทำงานได้ ซึ่งสอดคล้องกับระบบทำน้ำร้อน คือ เมื่อมีแสงแดด จึงจะสามารถทำน้ำร้อนได้ จึงไม่ต้องกังวลเรื่องปัญหาในกรณีไฟฟ้าดับแล้วจะทำให้ระบบทำน้ำร้อนใช้งานไม่ได้ เพราะหากยังมีแสงอาทิตย์ ปั๊มก็จะทำงานได้และเครื่องทำน้ำร้อนก็ยังทำงานได้เช่นกัน

3. ระบบพาสซีฟ (Passive systems)

ระบบนี้จะไม่ใช้ปั๊มในการทำให้ของเหลวที่ใช้ระบบเคลื่อนที่ ซึ่งผลดีคือ ไม่มีเครื่องใช้ไฟฟ้าที่อาจเสียได้ ทำให้อายุการใช้งานนานและมีการบำรุงรักษาง่ายกว่าระบบแอคทีฟ นอกจากนี้ ระบบพาสซีฟยังมีราคาถูกกว่าระบบแอคทีฟ แต่มีข้อเสียตรงที่มีประสิทธิภาพน้อยกว่าระบบแอคทีฟนั่นเองสำหรับเครื่องทำน้ำร้อนในระบบนี้ มี 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ แบบแผ่นราบและแบบท่อสุญญากาศร่วมกับท่อเทอร์โมไซฟอน

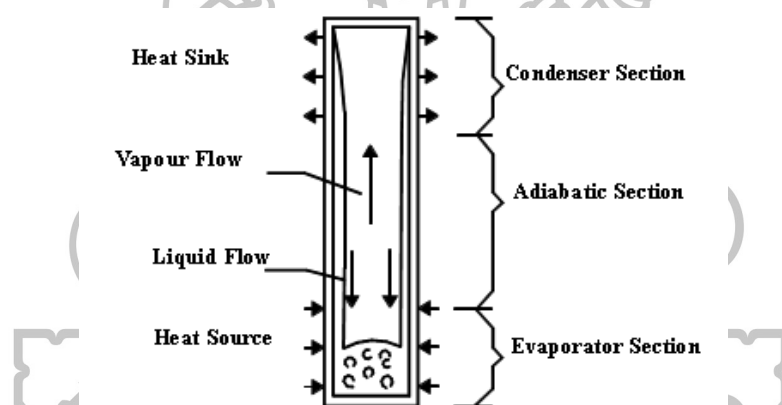
จากการศึกษาประเภทของระบบการทำน้ำร้อนทั้ง 3 ประเภท อันได้แก่ ระบบแอคทีฟแบบเปิด ระบบแอคทีฟแบบปิดและระบบพาสซีฟจะเห็นว่า ระบบแอคทีฟแบบเปิดซึ่งเป็นการใช้งานน้ำร้อนที่ได้จากเครื่องทำน้ำร้อนโดยตรงไม่เหมือนกับระบบแอคทีฟแบบปิดที่น้ำร้อนหรือสารทำงานที่ได้จะมีการแลกเปลี่ยนความร้อนแก่อีกครั้งหนึ่ง ทำให้เกิดความความยุ่งยากในการติดตั้งอุปกรณ์และการใช้งาน นอกจากนี้ระบบแอคทีฟแบบเปิดมีประสิทธิภาพในการทำงานที่มากกว่าระบบพาสซีฟ เนื่องจากสามารถควบคุมอัตราการไหลและการทำงานของระบบการทำน้ำร้อนได้ ดังนั้นระบบแอคทีฟแบบเปิดจะถูกเลือกมาใช้งานสำหรับการวิจัยในครั้งนี้

2.2 ท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน

ท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนนั้น จัดเป็นอุปกรณ์ถ่ายเทความร้อนชนิดหนึ่ง ที่สามารถถ่ายเทความร้อนได้ดี โดยไม่ต้องอาศัยพลังงานจากภายนอก สามารถทำงานได้โดยใช้หลักการของการถ่ายเทความร้อนจากความร้อนแฝงของสารทำงานภายในท่อความร้อน ซึ่งสารทำงานจะระเหยตัวโดยการรับความร้อนจากแหล่งความร้อนที่มีอุณหภูมิสูงและถ่ายเทความร้อนโดยการ

ควบแน่นโดยการถ่ายเทความร้อนให้กับแหล่งความร้อนที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า โดยรูป 2.14 ได้แสดงถึง ส่วนประกอบของท่อความร้อน ซึ่งมีลักษณะเป็นท่อสุญญากาศที่มีสารทำงานอยู่ภายใน มีลักษณะเป็น ท่อระบบปิด ประกอบด้วย 3 ส่วนดังนี้

1. ส่วนทำระเหย (Evaporator section) เป็นส่วนที่อยู่ล่างสุดของท่อ ภายใน บรรจุสารทำงาน เมื่อให้ความร้อนแก่ส่วนนี้โดยน้ำหรือก๊าซที่มีอุณหภูมิสูง สารทำงานภายในท่อจะ เดือดและระเหยกลายเป็นไอลอยขึ้นไปเรียกว่า ส่วนทำระเหยหรือส่วนรับความร้อน
2. ส่วนไม่มีการส่งถ่ายความร้อน (Adiabatic section) เป็นส่วนที่สารทำงาน จากส่วนรับความร้อนเคลื่อนที่ผ่านขึ้นไป โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงความร้อนและไม่มีการรั่วไหลของ สารทำงาน เรียกว่า ส่วนกันความร้อนหนือฉนวนความร้อน
3. ส่วนควบแน่น (Condenser section) เป็นส่วนที่สารทำงานสถานะไอจาก ส่วนรับความร้อนเคลื่อนที่ผ่านขึ้นไปส่วนบนสุดของท่อซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่า ทำให้เกิดการส่งผ่านความ ร้อน สารทำงานสถานะไอเกิดการกลายเป็นของเหลวย้อนกลับลงมาโดยอาศัยแรงโน้มถ่วงของโลก เรียกว่า ส่วนควบแน่น



รูปที่ 2.14 ลักษณะส่วนประกอบของเทอร์โมไซฟอน [9]

2.2.1 หลักการทำงานของท่อเทอร์โมไซฟอน [11]

หลักการทำงานของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนคือ เมื่อท่อความร้อนได้รับความร้อนจากส่วนทำระเหย จะทำให้สารทำงานภายในท่อความร้อนซึ่งมีสถานะเป็นของเหลวอิ่มตัว เปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอและลอยขึ้นสู่ส่วนควบแน่นด้านบน ซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่า เมื่อสารทำงาน ถ่ายเทความร้อนออก จะทำให้เกิดการควบแน่นของสารทำงาน และไหลกลับลงสู่ส่วนทำระเหยด้วย แรงโน้มถ่วง เพื่อกลับมารับความร้อนในส่วนทำระเหยอีกครั้งหนึ่ง และจะทำงานเป็นวัฏจักรแบบนี้ เรื่อยไป เนื่องจากความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของสารทำงานภายในท่อความร้อนมีค่าสูงมาก ดังนั้นสารทำงานจึงสามารถถ่ายเทความร้อนจากปลายด้านหนึ่งไปสู่ปลายอีกด้านหนึ่งได้ โดยที่

อุณหภูมิระหว่างส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นของท่อความร้อนนั้น มีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย

โดยทั่วไปแล้วความสามารถในการส่งถ่ายความร้อนของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนนั้น ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยด้วยกัน สามารถแยกออกได้ดังนี้ เช่น ขนาดและความยาวของท่อความร้อน วัสดุที่ใช้ทำท่อความร้อน ลักษณะการติดตั้งท่อความร้อน ชนิดของสารทำงาน อุณหภูมิของแหล่งความร้อนและแหล่งความเย็น รวมถึงขีดจำกัดการทำงานต่างๆของท่อความร้อน เป็นต้น

2.2.2 การออกแบบท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน

การนำท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนไปใช้งานให้ได้ประสิทธิภาพดีนั้นต้องคำนึงปัจจัยต่างๆ ดังนี้

2.2.2.1 ท่อบรรจุสารทำงาน ต้องป้องกันการรั่วไหลของสารทำงาน สามารถส่งถ่ายความร้อนทั้งเข้าและออกสารทำงาน และสามารถควบคุมความแตกต่างของความดันระหว่างผนังได้ ซึ่งปัจจัยในการเลือกวัสดุเพื่อผลิตท่อต้องคำนึงถึงปัจจัยหลายอย่าง ดังนี้

- (1) การนำความร้อน
- (2) ง่ายในการติดตั้งและขึ้นรูป
- (3) ความสามารถในการใช้ร่วมกับสารทำงาน
- (4) มีความพรุนต่ำ
- (5) อัตราส่วนความแข็งแรงต่อน้ำหนัก
- (6) ความเปียกได้

2.2.2.2 สารทำงาน เป็นสารที่บรรจุไว้ในท่อเทอร์โมไซฟอน ควรเลือกสารทำงานที่ใช้ในช่วงอุณหภูมิไอที่ต้องการ ซึ่งเลือกใช้สารทำงาน ควรพิจารณาถึงสิ่งต่างๆ ดังนี้

- (1) ต้องเข้ากันได้กับผนัง
- (2) ความดันไอที่เกิดขึ้นขณะทำงานต้องไม่สูงเกินไป
- (3) มีความเสถียรภาพทางความร้อนดี
- (4) สามารถเปียกกับผนังท่อได้
- (5) มีความร้อนแฝงสูง
- (6) มีแรงตึงผิวสูง
- (7) การนำความร้อนสูง
- (8) มีความหนืดในสถานะของเหลวและไอต่ำ
- (9) มีจุดเทและจุดแข็งตัวที่ใช้งานได้

2.2.3 อัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน

การถ่ายเทความร้อนจริงที่เกิดขึ้นนั้น (Q) สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ของผลต่างของอุณหภูมิของแหล่งให้ความร้อนกับแหล่งที่ต้องการระบายความร้อน (ΔT) กับค่าความร้อนต้านทานความร้อนรวม (Z_{total}) ดังนี้

$$Q_{total} = \frac{\Delta T}{Z_{total}} \quad (2.1)$$

โดยสามารถหาค่าผลต่างระหว่างอุณหภูมิแหล่งให้ความร้อนกับอุณหภูมิแหล่งระบายความร้อนได้จาก

$$\Delta T = T_{so} - T_{si} - \Delta T_h \quad (2.2)$$

โดยที่ T_{so} คืออุณหภูมิของส่วนรับความร้อน หน่วยเป็น (K)

T_{si} คืออุณหภูมิของส่วนควบแน่น หน่วยเป็น (K)

ΔT_h คือผลต่างอุณหภูมิจากความดันสถิตของสารทำงาน หน่วยเป็น (K)

เมื่อ

$$\Delta T_h = \frac{T_p - T_v}{2} F \quad (2.3)$$

โดยที่ T_p คืออุณหภูมิส่วนล่างสุดของส่วนรับความร้อน หน่วยเป็น (K)

T_v คืออุณหภูมิส่วนล่างสุดของส่วนควบแน่น หน่วยเป็น (K)

F คืออัตราส่วนการเติม

ซึ่งอัตราส่วนการเติมหาจาก

$$F = \frac{V_l}{Al_e} \quad (2.4)$$

โดยที่ V_l คือปริมาตรสารทำงานที่เติม หน่วยเป็น (m^3)

A คือพื้นที่หน้าตัดของท่อเทอร์โมไซฟอน หน่วยเป็น (m^2)

l_e คือความสูงในส่วนทำระเหย หน่วยเป็น (m)

2.2.4 ขีดจำกัดการส่งถ่ายความร้อน

สมรรถนะในการส่งผ่านความร้อนของท่อความร้อนเทอร์โมไซฟอนขึ้นอยู่กับตัวแปรต่างๆ เช่น ชนิดสารทำงาน ปริมาณการเติมสารทำงาน มุมเอียงของท่อ เป็นต้น หากการกำหนดหรือควบคุมตัวแปรต่างๆ ในการสร้างเทอร์โมไซฟอนหรือนำไปใช้งานอย่างไม่เหมาะสม จะทำให้เทอร์โมไซฟอนส่งถ่ายความร้อนได้ต่ำ หรือไม่สามารส่งถ่ายความร้อนได้ การควบคุมตัวแปรที่เหมาะสมจะลดการเกิดขีดจำกัดจากกลไกการถ่ายเทความร้อนในเทอร์โมไซฟอนได้ โดยขีดจำกัดการถ่ายเทความร้อนที่สำคัญ ได้แก่ ขีดจำกัดความดันไอ ความเร็วเสียง การแห้ง การเดือดและการท่วม ดังรายละเอียดต่อไปนี้

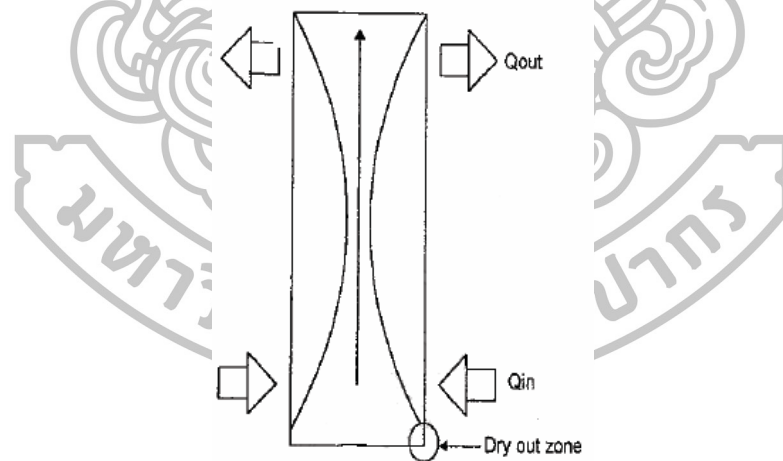
1. ขีดจำกัดความดันไอ (Vapor Limit)

เมื่อใช้เทอร์โมไซฟอนที่ความดันต่ำกว่าบรรยากาศ ความดันตกของไอจะมีผลต่อการถ่ายเทความร้อนเทียบเท่ากับความดันในส่วนที่ระเหย วิธีที่จะหาขีดจำกัดความดันไอคำนวณจากสมการ

$$\dot{Q}_M = A_v D_{Ev}^2 L p_v \rho_v / (64 \mu_v l_{eff}) \quad (2.5)$$

เมื่อ

$$l_{eff} = l_e / 2 + l_a + l_e / 2 \quad (2.6)$$



รูปที่ 2.15 ลักษณะการเกิดขีดจำกัดการแห้ง [11]

2. ขีดจำกัดเสียง (Sonic Limit)

การใช้งานที่ความดันต่ำ ภายใต้เงื่อนไขการใช้งานนี้ความเร็วไอจะมีค่าสูงมาก เมื่อเทียบกับความเร็วเสียงในไอ ซึ่งการส่งผ่านความร้อนจะไม่ขึ้นกับอัตราการไหลเมื่อความเร็วไอมีค่า

เข้าใกล้ความเร็วเสียง ดังนั้นอัตราการส่งผ่านความร้อนจึงถูกจำกัดที่ความเร็วไอค่าหนึ่งซึ่งไม่เกินความเร็วเสียง ซึ่งพิจารณาได้ดังนี้

$$\frac{Q_{\max}}{Al} = 0.5(P_v \rho_v)^{0.5} \quad (2.7)$$

3. ขีดจำกัดการแห้ง (Dry Out Limit)

ขีดจำกัดนี้เกิดขึ้นเมื่อเต็มสารทำงานน้อยเกินไป และหากมีการให้ความร้อนในส่วนทำระเหยสูงจะทำให้ของเหลวส่วนล่างเริ่มแห้ง อุณหภูมิของผนังจะค่อยๆเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.15

ผลกระทบคือ จะมีแรงเฉือนระหว่างความเร็วของไอกับของเหลวที่ควบแน่นสูงขึ้น ทำให้เกิดการสะสมของของเหลวในช่วงการควบแน่นมากขึ้น และให้เกิดการแห้งเหนียวของเหลว อุณหภูมิของผนังที่จะสูงขึ้น เมื่อน้ำหนักของของเหลวที่ควบแน่นมากกว่าแรงของไอ ของเหลวจะตกลงสู่ช่วงการระเหย และจะทำให้อุณหภูมิผนังแกว่งไปมา ปัญหาการแห้งของผนังท่อสามารถลดได้โดยคลื่นอุลตราโซนิก คือ คลื่นอุลตราโซนิกจะทำให้ของไหลทำงานในท่อสั่นกระเพื่อม และเร่งการเกิดฟองไอของของไหล เมื่อขนาดฟองไอใหญ่จะแตกกระเด็นไปยังบริเวณที่แห้ง ผนังบริเวณดังกล่าวจะเปียก จึงทำให้ความร้อนสามารถถ่ายเทได้อย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้ยังสามารถตรวจสอบปริมาตรของสารทำงานได้จากสมการอัตราส่วนการเติม คือ

$$F = \frac{V_l}{Al_e} \quad (2.8)$$

เมื่อ F คืออัตราส่วนการเติม และ V_l คือปริมาตรของส่วนทำระเหย ซึ่งค่า V_l สามารถหาได้จาก

$$V_l \geq 0.001D(l_e + l_a + l_c) \quad (2.9)$$

เมื่อ l_e , l_a และ l_c คือความยาวของส่วนทำระเหย ส่วนที่ไม่มีการส่งถ่ายความร้อนและส่วนควบแน่นตามลำดับ

4. ขีดจำกัดความเดือด (Boiling Limit)

ขีดจำกัดความเดือดจะเกิดขึ้นเมื่อแผ่นฟิล์มของไอ เกิดระหว่างของเหลวและผนังภายในท่อที่ถูกให้ความร้อนของส่วนรับความร้อน ซึ่งการถ่ายเทความร้อนสูงสุดต่อพื้นที่ คำนวณจากสมการ

$$\frac{Q_{\max}}{S_e} = 0.12 \rho_v^{0.25} [\rho g (\rho_l - \rho_v)]^{0.25} \quad (2.10)$$

5. ขีดจำกัดการท่วม (Entrainment limit)

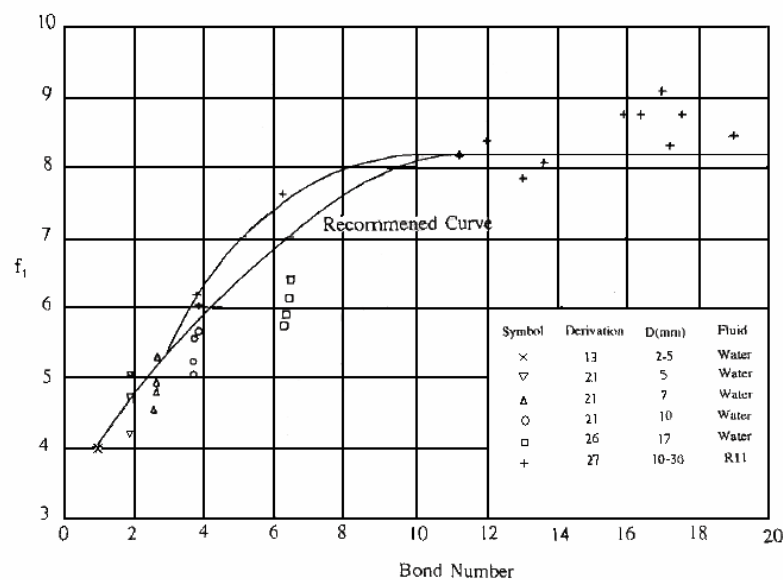
เมื่อเติมสารทำงานในปริมาณพอเหมาะจะไม่ทำให้เกิดการแห้งขึ้น ขีดจำกัดอัตราการถ่ายเทความร้อนขึ้นอยู่กับขีดจำกัดอื่นๆ คือขีดจำกัดการหลุดลอยของของเหลวโดยไอของสารทำงานที่ไหลสวนทางกับฟิล์มของเหลวซึ่งมักเรียกปรากฏการณ์นี้ว่าการท่วม (Flooding) ซึ่งอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดที่เกิดขีดจำกัดนี้ขึ้น หาได้จากสมการที่ 2.11

$$\frac{\dot{Q}_{\max}}{AL} = f_1 f_2 f_3 (\rho_v)^{0.5} [g (\rho_l - \rho_v) \sigma]^{0.25} \quad (2.11)$$

โดยที่ f_1 = ฟังก์ชันของค่า เลขบอนด์ (Bond number) ซึ่งนิยามจากสมการที่ 2.12

$$Bo = D \left[\frac{g (\rho_l - \rho_v)}{\sigma} \right]^{0.5} \quad (2.12)$$

ค่า f_1 สามารถหาได้จากรูปที่ 2.16 ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Bo กับ f_1 แต่ถ้าเมื่อ $Bo > 11$ แล้ว $f_1 = 8.2$



รูปที่ 2.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขบอนด์กับ f_1

$f_2 =$ ฟังก์ชันของตัวแปรไร้มิติของความดัน K_p ซึ่งนิยามจากสมการที่ 2.13 [11]

$$K_p = \frac{P_v}{[g(\rho_l - \rho_v)\sigma]^{0.5}} \quad (2.13)$$

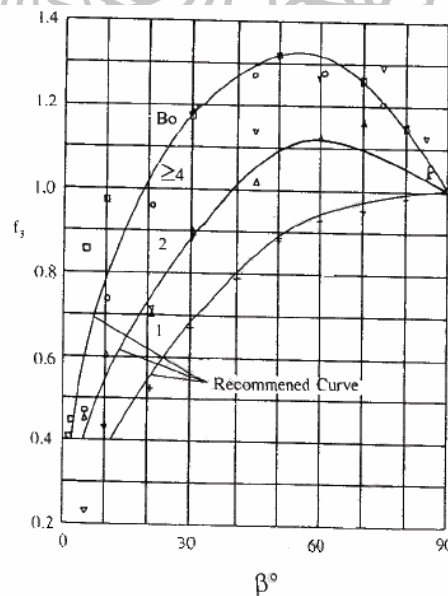
โดย $f_2 = K_p^{-0.17}$ ถ้า $K_p \leq 4 \times 10^4$ และ $f_2 = 0.165$ ถ้า $K_p > 4 \times 10^4$

$f_3 =$ ฟังก์ชันของการเอียงท่อ เมื่อท่ออยู่ในแนวตั้ง $f_3 = 1$ เมื่อท่อเอียง ค่า f_3 สามารถหาได้จากรูปที่ ค.2 ในภาคผนวก ค. ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมเอียงกับ f_3 ที่ค่า Bo ต่างๆ ผลคูณของ $f_1 f_2 f_3$ เรียกว่า ตัวเลขคุตาเทลาดเซ (Kutateladze number)

2.2.5 อัตราการเติมสารทำงานที่สำคัญสำหรับท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน

เป็นอัตราส่วนที่รับรองได้ว่าฟิล์มของเหลวเคลือบผนังท่อเทอร์โมไซฟอนตลอดเวลาโดยยังมีของเหลวในแอ่งของเหลวอยู่ในขณะที่เทอร์โมไซฟอนทำงาน โดยมีเงื่อนไขในการเติมสาร ดังนี้

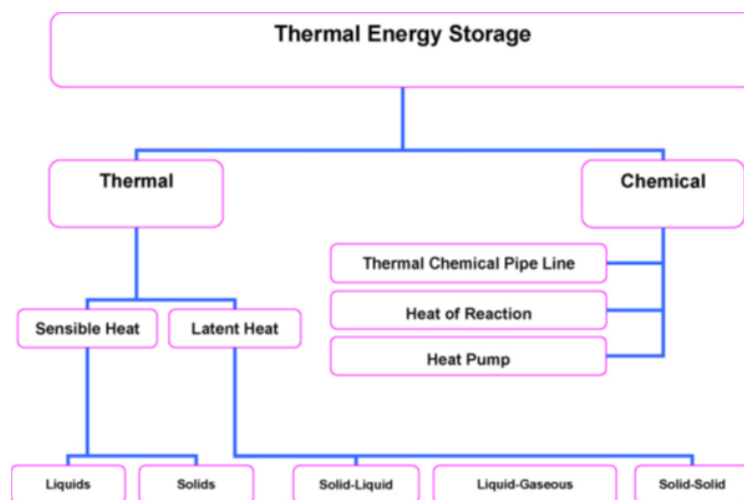
1. อัตราการเติมสารต้องมากกว่าร้อยละ 50 โดยสามารถตรวจสอบได้โดยการชั่งน้ำหนักเทียบกับท่อเปล่า
2. $V_f \geq 0.001D(l_e + l_a + l_c)$ เมื่อ l_e, l_a และ l_c คือความยาวของส่วนทำระเหย ส่วนที่ไม่มีการส่งถ่ายความร้อนและส่วนควบแน่น ตามลำดับ



รูปที่ 2.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมเอียงของท่อกับค่า f_3 [11]

2.3 วิธีการสะสมพลังงานความร้อน [3]

การสะสมพลังงานความร้อนสามารถสะสมโดยการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในของวัสดุ เช่น ความร้อนสัมผัส ความร้อนแฝงและเคมีความร้อนหรือการรวมตัวกันของเหล่านี้ ภาพรวมของเทคนิคที่สำคัญของการจัดเก็บพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์จะแสดงในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.18 ลักษณะของการจัดเก็บความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ จากรูป 2.17 จะแสดงให้เห็นว่ารูปแบบการสะสมพลังงานความร้อนสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบใหญ่ๆ คือ รูปแบบทางความร้อนและรูปแบบทางเคมี ซึ่งรูปแบบทางความร้อนสามารถแบ่งได้ออกเป็น 2 ประเภทคือ ประเภทความร้อนสัมผัสและความร้อนแฝง การสะสมพลังงานความร้อนในรูปแบบของความร้อนแฝงนั้นได้รับความนิยมเป็นอย่างมากเนื่องจากง่ายต่อการใช้งานและมีประสิทธิภาพในการทำงานที่ดี

2.3.1 การสะสมความร้อนสัมผัส

ในการสะสมความร้อนสัมผัส พลังงานความร้อนจะถูกเก็บไว้โดยการเพิ่มอุณหภูมิของของแข็งหรือของเหลว ระบบการสะสมความร้อนสัมผัสใช้ความจุความร้อนและการเปลี่ยนแปลงในอุณหภูมิของวัสดุในระหว่างกระบวนการของการสะสมความร้อนและการคายความร้อน ปริมาณของความร้อนที่เก็บไว้ขึ้นอยู่กับความร้อนจำเพาะของตัวกลาง การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและปริมาณของวัสดุที่สะสม

$$Q = \int_{T_i}^{T_f} mC_p dT \quad (2.7)$$

$$Q = mC_{ap}(T_f - T_i) \quad (2.8)$$

ความจุการสะสมความร้อนสัมผัสของวัสดุของเหลว ของแข็งแสดงในตารางที่ 2.1 น้ำเป็นของเหลวของระบบการสะสมความร้อนสัมผัสที่ดีที่สุด เพราะวราคาราคาไม่แพงมีค่าความร้อนจำเพาะสูง อย่างไรก็ตาม ที่อุณหภูมิสูงกว่า 100 องศาเซลเซียส น้ำมัน สารละลายเกลือและโลหะเหลวจะถูกใช้งาน

ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงคุณสมบัติวัสดุของแข็ง ของเหลวสำหรับการสะสมความร้อนสัมผัส

Table 1
A list of selected solid-liquid materials for sensible heat storage

| Medium | Fluid type | Temperature range (°C) | Density (kg/m ³) | Specific heat (J/kg K) |
|--------------|----------------|------------------------|------------------------------|------------------------|
| Rock | | 20 | 2560 | 879 |
| Brick | | 20 | 1600 | 840 |
| Concrete | | 20 | 1900-2300 | 880 |
| Water | | 0-100 | 1000 | 4190 |
| Caloria HT43 | Oil | 12-260 | 867 | 2200 |
| Engine oil | Oil | Up to 160 | 888 | 1880 |
| Ethanol | Organic liquid | Up to 78 | 790 | 2400 |
| Propanol | Organic liquid | Up to 97 | 800 | 2500 |
| Butanol | Organic liquid | Up to 118 | 809 | 2400 |
| Isotnmaol | Organic liquid | Up to 100 | 808 | 3000 |
| Isopentanol | Organic liquid | Up to 148 | 831 | 2200 |
| Octane | Organic liquid | Up to 126 | 704 | 2400 |

2.3.2 การสะสมความร้อนแฝง

การสะสมความร้อนแฝงอยู่บนพื้นฐานของการดูดซับความร้อนเมื่อวัสดุเปลี่ยนสถานะมีการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งไปเป็นของเหลวหรือของเหลวไปเป็นแก๊สหรือในทางกลับกัน เมื่อวัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะจากแก๊สไปเป็นของเหลวหรือของเหลวไปเป็นของแข็ง จะเกิดการคายความร้อนจากวัสดุ ความจุของการสะสมของระบบการสะสมความร้อนแฝงด้วยวัสดุเปลี่ยนสถานะ คำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$Q = \int_{T_i}^{T_m} mC_p dT + ma_m \Delta h_m + \int_{T_m}^{T_f} mC_p dT \quad (2.9)$$

$$Q = m[C_{sp}(T_m - T_i) + a_m \Delta h_m + C_{ip}(T_f - T_m)] \quad (2.10)$$

2.4 วัสดุสะสมความร้อนแฝง

วัสดุเปลี่ยนสถานะ (Phase Change Material, PCM) คือวัสดุสะสมความร้อนแฝง การส่งถ่ายพลังงานความร้อนเกิดขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงวัสดุจากของแข็งเป็นของเหลวหรือของเหลวเป็นของแข็ง ซึ่งจะถูกเรียกว่าการเปลี่ยนแปลงสถานะ ในขั้นเริ่มต้น วัสดุเปลี่ยนสถานะ

ของแข็ง-ของเหลวมีรูปแบบเหมือนกับวัสดุสะสมความร้อนทั่วไป อุณหภูมิเพิ่มขึ้นโดยการดูดซับความร้อน แต่มันไม่เหมือนกับการสะสมความร้อนสัมผัสเนื่องวัสดุเปลี่ยนสถานะดูดซับความร้อนและคายความร้อนที่อุณหภูมิคงที่ การสะสมความร้อนแฝงสามารถสะสมความร้อนได้มากกว่า 5-14 เท่าของการสะสมความร้อนสัมผัสเมื่อเปรียบเทียบในปริมาตรที่เท่ากัน วัสดุเปลี่ยนสถานะจำนวนมากจะหลอมละลายด้วยความร้อนของการฟิวชั่น อย่างไรก็ตาม สำหรับการใช้งานเป็นวัสดุเปลี่ยนสถานะวัสดุเหล่านี้ต้องแสดงคุณสมบัติเป็นที่ต้องการในทางอุณหพลศาสตร์ จลนพลศาสตร์และทางเคมี

วัสดุเปลี่ยนสถานะถูกใช้งานในการออกแบบระบบการสะสมพลังงานความร้อน ควรมีคุณสมบัติที่เป็นที่ต้องการในทางอุณหพลศาสตร์ จลนพลศาสตร์และทางเคมี ดังนี้

2.3.1 คุณสมบัติทางความร้อน

2.3.1.1 อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะที่เหมาะสม

2.3.1.2 ความร้อนแฝงของการเปลี่ยนสถานะสูง

2.3.1.3 ถ่ายเทความร้อนได้ดี

การเลือกใช้งานวัสดุเปลี่ยนสถานะสำหรับการประยุกต์ อุณหภูมิการทำงานของการให้ความร้อนและการเย็นตัวลงต้องมีความเหมาะสมกับอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะของวัสดุเปลี่ยนสถานะ ความร้อนแฝงควรสูงที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ในปริมาตรที่เท่ากัน เพื่อลดขนาดทางกายภาพของการจัดเก็บความร้อน การนำความร้อนสูงจะช่วยสะสมความร้อนและคายความร้อนของการจัดเก็บพลังงาน

2.3.2 คุณสมบัติทางกายภาพ

2.3.2.1 สถานะมีความสมดุลที่ดี

2.3.2.2 ความหนาแน่นสูง

2.3.2.3 การเปลี่ยนแปลงปริมาตรต่ำ

2.3.2.4 ความดันไอต่ำ

ความเสถียรของสถานะระหว่างการแข็งตัว และหลอมละลายจะช่วยต่อการกำหนดการปริมาณของวัสดุเปลี่ยนสถานะสำหรับการสะสมความร้อนและปริมาตรของภาชนะที่บรรจุวัสดุเปลี่ยนสถานะที่เหมาะสมกับระบบการสะสมความร้อน การเปลี่ยนแปลงปริมาตรต่ำของการเปลี่ยนแปลงสถานะและความดันไอต่ำที่อุณหภูมิทำงานจะช่วยลดปัญหาเกี่ยวกับการบรรจุของวัสดุเปลี่ยนสถานะ

2.3.4 คุณสมบัติทางเคมี

2.3.4.1 ความคงตัวทางเคมีในระยะยาว

2.3.4.2 ความเข้ากันได้กับวัสดุ

2.3.4.3 ไม่มีความเป็นพิษ

2.3.4.4 ไม่ติดไฟ

วัสดุเปลี่ยนสถานะที่สามารถย่อยสลายได้โดยน้ำและการสลายตัวทางเคมีหรือความเข้ากันไม่ได้ของวัสดุโครงสร้าง วัสดุเปลี่ยนสถานะจะต้องไม่มีความเป็นพิษ ไม่ติดไฟ ไม่ระเบิดและจะต้องมีความปลอดภัยความปลอดภัยสูง

2.3.5 ทางเศรษฐศาสตร์

2.3.5.1 มีจำนวนมาก

2.3.5.2 หาได้ง่าย

2.3.5.3 ราคาไม่แพง



บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการออกแบบและสร้างเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ ที่ใช้ตัวรับรังสีชนิดท่อสุญญากาศร่วมกับท่อเทอร์โมไซฟอนแบบธรรมดาพร้อมบรรจุวัสดุเปลี่ยนสถานะ รายละเอียดการดำเนินการทดลอง เพื่อนำข้อมูลผลการทดลองที่ได้มาคำนวณหาสมรรถนะ อัตราการถ่ายเทความร้อน และแนวโน้มต่างๆที่มีผลต่อการทดลอง มีรายละเอียดเกี่ยวกับการดำเนินการวิจัย ดังนี้

3.1 ระยะเวลาการวิจัย

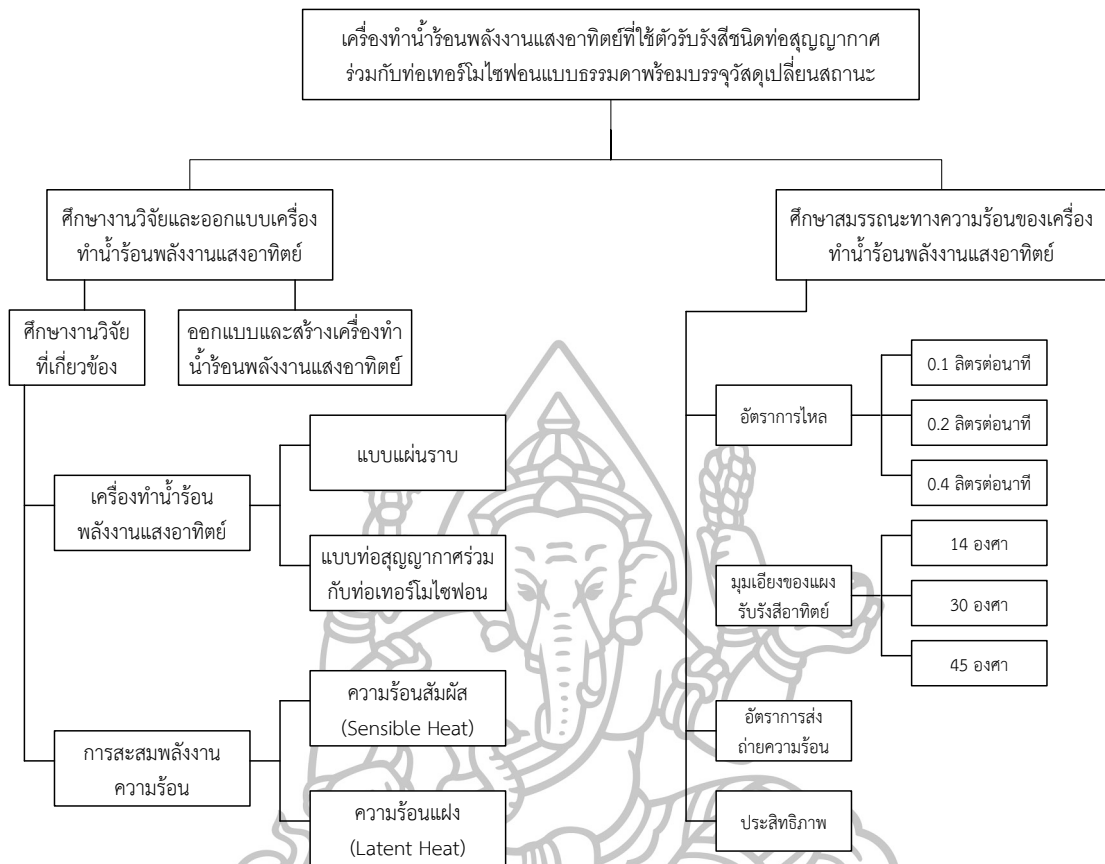
เริ่มการทดลองเก็บข้อมูลสำหรับการวิจัยตั้งแต่เดือนมิถุนายน 2555 ถึงเดือนธันวาคม 2556 และการสรุปผลการทดลองพร้อมเขียนรายงานการวิจัยจะแล้วเสร็จภายในเดือนมกราคม 2556 ซึ่งการดำเนินการตลอดระยะเวลาการวิจัยสามารถเขียนเป็นตารางสรุปได้ดังนี้

ตารางที่ 3.1 ระยะเวลาของการดำเนินการวิจัย

| รายการการดำเนินการวิจัย | ระยะเวลาของการดำเนินการวิจัย |
|--|------------------------------|
| 1. รวบรวมและศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | ก.ค.-ก.ย. 2555 |
| 2. ออกแบบเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ | ต.ค. 2555 |
| 3. สร้างเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ | พ.ย.-ธ.ค. 2555 |
| 4. ดำเนินการทดลองเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ | ธ.ค.-ม.ค. 2556 |
| 5. วิเคราะห์และสรุปผลการวิจัย | ก.พ. 2556 |
| 6. เขียนรายงานการวิจัย | ก.พ. 2556 |
| 7. เขียนบทความวิจัย (research paper) เพื่อตีพิมพ์วารสารวิชาการ | มี.ค. 2556 |

3.2 แผนการดำเนินงาน

แผนการดำเนินการวิจัยสามารถแบ่งออกเป็นแผนการดำเนินการโดยรวมของงานวิจัยและแผนการทดลอง โดยมีรายละเอียดดังแสดงในรูป 3.1



รูปที่ 3.1 แผนผังการดำเนินงานวิจัย

จากรูปที่ 3.1 แสดงถึงแผนผังการดำเนินการงานวิจัยในหัวข้อ การออกแบบและสร้างเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ ที่ใช้ตัวรับรังสีชนิดท่อสุญญากาศร่วมกับท่อเทอร์โมไซฟอนแบบธรรมดาพร้อมบรรจุวัสดุเปลี่ยนสถานะ ซึ่งจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนด้วยกัน ส่วนแรกจะเป็นการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ออกแบบและจัดสร้างเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ ส่วนที่สองจะเป็นการศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อสมรรถนะทางความร้อนของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ คือ อัตราการไหลของน้ำ มุมเอียงของแผงรับรังสีอาทิตย์ อัตราการส่งถ่ายความร้อนและประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ ที่ใช้ตัวรับรังสีชนิดท่อสุญญากาศร่วมกับท่อเทอร์โมไซฟอนแบบธรรมดาพร้อมบรรจุวัสดุเปลี่ยนสถานะ

3.3 แผนการทดลอง

การวางแผนการทดลองสามารถดำเนินการตามการทดลองตามตารางดังแสดงต่อไปนี้

ตารางที่ 3.2 ตารางแสดงรูปแบบการทดลอง

| ตัวแปร | การทดลอง | | | | | | | | |
|------------------------------|----------|----|----|-----|----|----|-----|----|----|
| | 0.25 | | | 0.5 | | | 1.0 | | |
| อัตราการไหล(กิโลกรัมต่อนาที) | | | | | | | | | |
| มุมเอียง(องศา) | 14 | 30 | 45 | 14 | 30 | 45 | 14 | 30 | 45 |
| จำนวนซ้ำ(ครั้ง;การทดลอง) | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| รวม(ครั้ง;การทดลอง) | 27 | | | | | | | | |

จากตารางที่ 3.1 จะแสดงถึงแผนการทดลองในการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสมรรถนะทางความร้อนของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ ที่ใช้ตัวรับรังสีชนิดท่อสุญญากาศร่วมกับท่อเทอร์โมไซฟอนและมีเปลี่ยนสถานะ ตัวแปรที่ทำการศึกษา คือ มุมเอียงของแผงรับรังสี 3 ค่า คือ มุมเอียง 14 30 และ 45 องศาจากแนวระดับ และอัตราการไหลของน้ำ 3 ค่า คือ 0.25 0.5 และ 1.0 กิโลกรัมต่อนาที การทดลองแต่ละค่าตัวแปร จะทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง เพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ยเพื่อเป็นตัวแทนของในแต่ละอัตราการไหลและมุมเอียงของแผงรับรังสีอาทิตย์

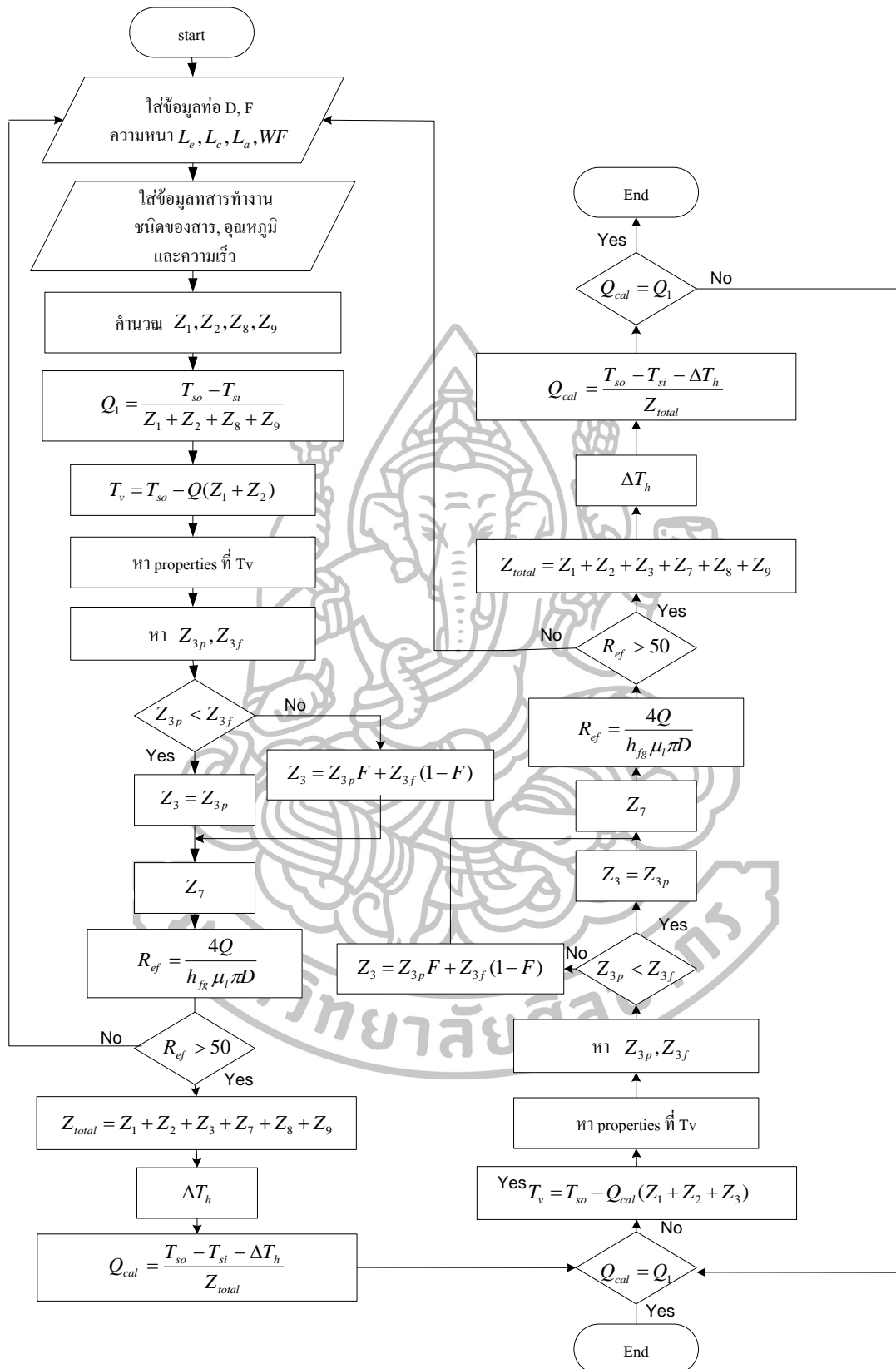
3.4 การออกแบบท่อความร้อน

3.4.1 หาอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ต้องให้ระบบทำได้ (มองว่าระบบเป็น Heat Exchanger) เพื่อให้ได้อุณหภูมิอากาศออกตามที่ต้องการ

3.4.2 ใช้อัตราการถ่ายเทความร้อนของระบบที่คำนวณได้ ไปใช้แทนในสมการอัตราการถ่ายเทความร้อนของเทอร์โมไซฟอน เพื่อหาขนาดต่างๆ ของท่อความร้อน เช่น ระยะของส่วนทำระเหย (L_e) ส่วนควบแน่น (L_c)

3.4.3 คำนวณหาค่าสมรรถนะทางความร้อนของระบบ

3.4.4 ตรวจสอบขีดจำกัดการส่งถ่ายความร้อน



รูปที่ 3.2 แผนผังแสดงการออกแบบท่อเทอร์โมไซโฟน

3.5 อุปกรณ์และเครื่องมือวัด

3.5.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการประกอบเครื่อง

3.5.1.1 ท่อแก้วสุญญากาศขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 34 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก ขนาด 47 มิลลิเมตร ความยาวตลอดท่อ 1500 มิลลิเมตร จำนวน 16 ท่อ

3.5.1.2 ท่อทองแดง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 22.23 มิลลิเมตร ยาวท่อละ 1400 มิลลิเมตรจำนวน 16 ท่อ

3.5.1.3 ชุดเติมสาร

3.5.1.4 ชุดเชื่อมภาคสนามชุดเล็กและลวดเชื่อมเงิน

3.5.1.5 แผ่นสังกะสีขนาด 2 เมตร x 1 เมตร

3.5.1.6 ปัมสุญญากาศ (รูป 3.4) เกจวัดความดันและสายเติมน้ำยา (รูป 3.3)

3.5.1.7 น้ำกลั่น

3.5.1.8 เรซิน

3.5.1.9 ชุดเชื่อมภาคสนามชุดเล็กและลวดเชื่อมเงิน

3.5.1.10 ถังน้ำสแตนเลสทรงกระบอกขนาด 32 ลิตร ขนาด เมตร 122 x 25 x

10.5 ลูกบาศก์เซนติเมตร

3.5.1.11 ปัมน้ำ 2 ตัว

3.5.1.12 ซิลิโคน



รูปที่ 3.3 เกจวัดความดันและสายเติมน้ำยา



รูปที่ 3.4 ป้่มสูญญากาศ

3.5.2 เครื่องมือวัด

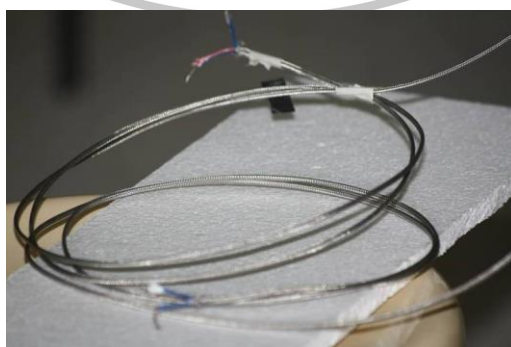
3.5.2.1 สายเทอร์โมคัปเปิล (รูป 3.6) Type - K มีความละเอียด ± 0.5 องศาเซลเซียส, อุณหภูมิในช่วงการวัด -185 องศาเซลเซียส ถึง 1,260 องศาเซลเซียส

3.5.2.2 เกจวัดความดัน

3.5.2.3 เครื่องบันทึกข้อมูล (รูป 3.4) Data Logger ยี่ห้อ YOKOGAWA รุ่น MW-100 มีความละเอียด ± 0.5 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.5 แสดงภาพเครื่องบันทึกข้อมูล



รูปที่ 3.6 แสดงภาพสายเทอร์โมคัปเปิล

3.6 ขั้นตอนการสร้างเครื่องทำความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อใช้ในการทดลอง

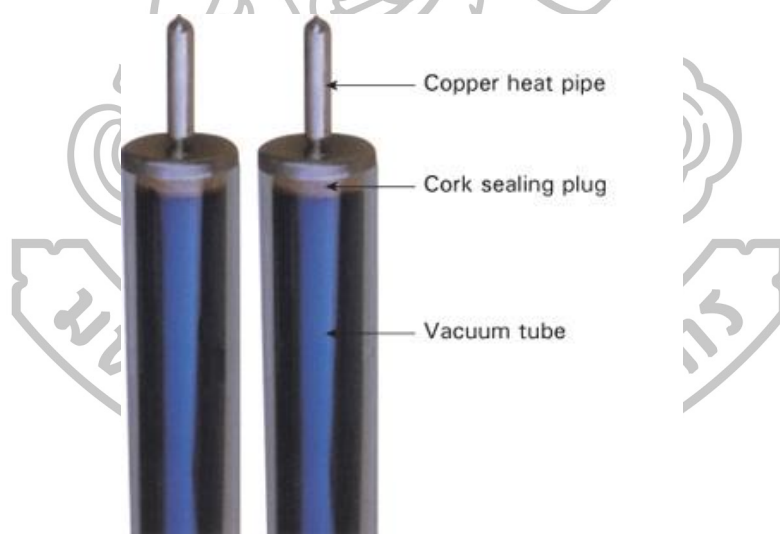
3.6.1 การสร้างท่อเทอร์โมไซฟอนแบบวงรอบ

ตัดท่อทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 7.94 มิลลิเมตร ให้มีความยาวเส้นละ 1600 มิลลิเมตร จำนวน 16 ท่อน โดยส่วนทำระเหย (Evaporator, L_e) มีความยาว 1.4 เมตร เป็นส่วนควบแน่น (Condenser, L_c) มีความยาว 0.2 เมตร เชื่อมหัวท่อ ท้ายท่อ และหัวเติมสารทำงานเข้าด้วยกัน

ทำภายในท่อให้เป็นสุญญากาศ โดยใช้ปั๊มสุญญากาศดูดอากาศออกแล้วปิดวาล์วทั้งหมดเพื่อกันอากาศเข้า สังเกตดูที่เกจวัดความดันหากเข็มที่เกจวัดความดันมีการเคลื่อนที่หลังดูดอากาศออกท่ออาจจะมีรูรั่ว จากนั้นเติมสารทำงานเป็นน้ำกลั่นโดยเติม 50 % ของปริมาตรท่อตามที่ได้คำนวณไว้ โดยใช้เครื่องช่วยเติมสารทำงาน

3.6.2 การประกอบท่อความร้อนเข้ากับท่อสุญญากาศ

นำท่อเทอร์โมไซฟอนที่สร้างใส่เข้าไปในท่อสุญญากาศ จะเห็นว่าส่วนควบแน่น (Condenser, L_c) โผล่พ้นออกมานอกท่อ แสดงในรูป 3.7



รูปที่ 3.7 แสดงภาพท่อเทอร์โมไซฟอนกับท่อสุญญากาศ

3.6.3 การเติมวัสดุเปลี่ยนสถานะลงในท่อสุญญากาศ

หลังจากที่นำท่อทองแดงที่เติมสารทำงานบรรจุเข้าไปในท่อสุญญากาศเรียบร้อยแล้ว จากนั้นจะทำการเติมวัสดุเปลี่ยนสถานะลงไป สถานะของวัสดุเปลี่ยนสถานะที่เติมเข้าจะเป็นของเหลวเพื่อให้ง่ายต่อการเติม โดยที่วัสดุเปลี่ยนสถานะจะถูกให้ความร้อนจนสถานะเปลี่ยนเป็นของเหลว

3.6.3 การสร้างสภาวะสุญญากาศกับท่อสุญญากาศ

เมื่อเติมวัสดุเปลี่ยนสถานะแข็งตัวเรียบร้อยแล้ว จากนั้นทำบล็อกเรซินครอบส่วนที่เป็นส่วนควบแน่นโดยใส่ท่อสำหรับดูดอากาศออกขณะเทเรซินในบล็อกด้วย จากนั้นรอให้เรซินแห้งนำไปประกอบเข้ากับท่อสุญญากาศ ใช้ซิลิโคนเหลวทาปิดปากท่อกับเรซินที่ปิดปากท่อเพื่อกันอากาศรั่วไหล นำท่อที่ไปทำให้เป็นสุญญากาศโดยต่อ Pressure Gage เข้ากับท่อดูดอากาศออกเพื่อดูว่าเมื่อทำท่อเป็นสุญญากาศแล้วมีรอยรั่วหรือไม่ และสังเกตว่าเมื่อใช้งานท่อไปสักระยะเวลาภายในท่อจะมีอากาศรั่วไหลเข้าไปภายในท่อหรือไม่

3.6.4 การประกอบท่อเข้ากับแผงยึดเพื่อทำเป็นแผงรับรังสี

นำท่อสุญญากาศที่ประกอบเสร็จแล้วประกอบเข้ากับแผงยึด ดังรูปที่ 3.9 บริเวณใต้ท่อแต่ละท่อจะมีแผ่นพาราโบลิคทำหน้าที่รวมแสงอาทิตย์และสะท้อนให้ท่อสุญญากาศบริเวณด้านล่าง

3.6.5 ทำการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลที่ตำแหน่งต่าง ๆ บนเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อวัดค่าอุณหภูมิ ดังรูปที่ 3.8 โดยแต่ละจุดที่ติดตั้งมีรายละเอียดดังนี้

จุดที่ 1 คืออุณหภูมิของน้ำขาเข้า 1 ของชุดทดลองท่อเทอร์โมไซฟอนพร้อมบรรจุวัสดุเปลี่ยนสถานะ ($T_{w,in1}$)

จุดที่ 2 คืออุณหภูมิของน้ำขาเข้า 2 ของชุดทดลองท่อเทอร์โมไซฟอนพร้อมบรรจุวัสดุเปลี่ยนสถานะ ($T_{w,in2}$)

จุดที่ 3 คืออุณหภูมิของน้ำขาออก 1 ของชุดทดลองท่อเทอร์โมไซฟอนพร้อมบรรจุวัสดุเปลี่ยนสถานะ ($T_{w,out1}$)

จุดที่ 4 คืออุณหภูมิของน้ำขาออก 2 ของชุดทดลองท่อเทอร์โมไซฟอนพร้อมบรรจุวัสดุเปลี่ยนสถานะ ($T_{w,out2}$)

จุดที่ 5 คืออุณหภูมิผิวท่อของส่วนควบแน่นของท่อเทอร์โมไซฟอนพร้อมบรรจุวัสดุเปลี่ยนสถานะ 1 ($T_{c,Loop1}$)

จุดที่ 6 คืออุณหภูมิผิวท่อของส่วนควบแน่นของท่อเทอร์โมไซฟอนพร้อมบรรจุวัสดุเปลี่ยนสถานะ 2 ($T_{c,Loop2}$)

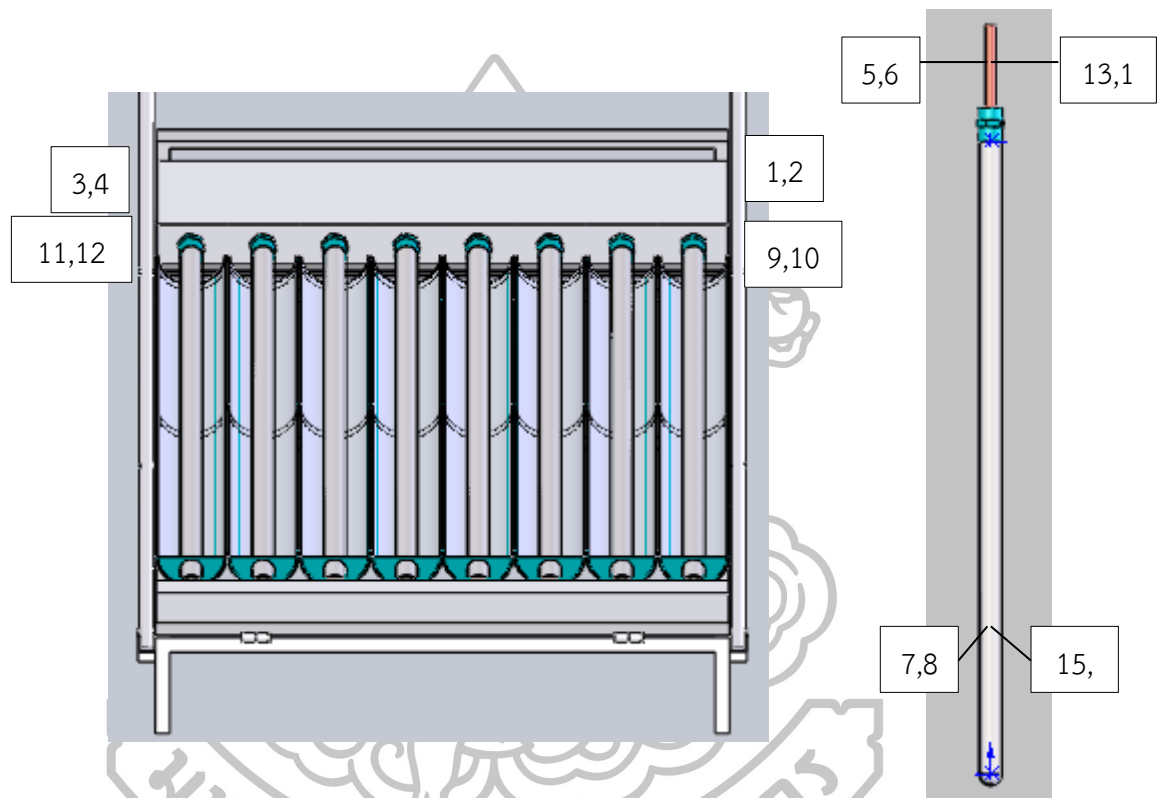
จุดที่ 7 คืออุณหภูมิผิวท่อของส่วนทำระเหยของท่อเทอร์โมไซฟอนพร้อมบรรจุวัสดุเปลี่ยนสถานะ 1 ($T_{e,Loop1}$)

จุดที่ 8 คืออุณหภูมิผิวท่อของส่วนทำระเหยของท่อเทอร์โมไซฟอนพร้อมบรรจุวัสดุเปลี่ยนสถานะ 2 ($T_{e,Loop2}$)

จุดที่ 9 คืออุณหภูมิของน้ำขาเข้า 1 ของชุดทดลองท่อเทอร์โมไซฟอน ($T_{w,in1}$)

จุดที่ 10 คืออุณหภูมิของน้ำขาเข้า 2 ของชุดทดลองท่อเทอร์โมไซฟอน ($T_{w,in2}$)

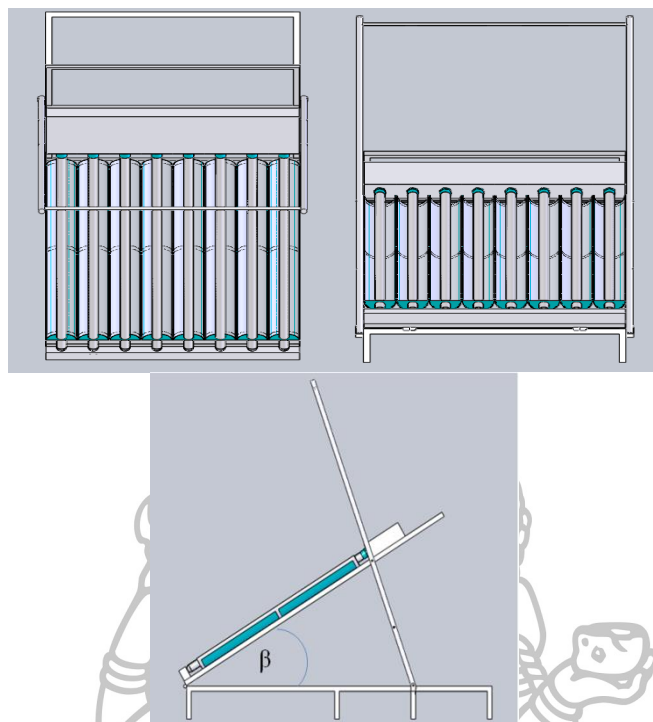
- จุดที่ 11 คืออุณหภูมิของน้ำขาออก 1 ของชุดทดลองท่อเทอร์โมไซฟอน ($T_{w,out1}$)
 จุดที่ 12 คืออุณหภูมิของน้ำขาออก 2 ของชุดทดลองท่อเทอร์โมไซฟอน ($T_{w,out2}$)
 จุดที่ 13 คืออุณหภูมิที่ผิวท่อของส่วนควบแน่นของท่อเทอร์โมไซฟอน 1 ($T_c, 1$)
 จุดที่ 14 คืออุณหภูมิที่ผิวท่อของส่วนควบแน่นของท่อเทอร์โมไซฟอน 2 ($T_c, 2$)
 จุดที่ 15 คืออุณหภูมิที่ผิวท่อของส่วนทำระเหยของท่อเทอร์โมไซฟอน 1 ($T_c, 1$)
 จุดที่ 16 คืออุณหภูมิที่ผิวท่อของส่วนทำระเหยของท่อเทอร์โมไซฟอน 2 ($T_c, 2$)



รูปที่ 3.8 ตำแหน่งที่ติดเทอร์โมคัปเปิลเพื่อวัดอุณหภูมิ

3.6.7 การประกอบแผงรับรังสีเข้ากับส่วนถังน้ำ

โดยถังน้ำมีขนาด 32 ลิตร เจาะรูถังด้านยาวด้านหนึ่งให้ตรงกับส่วนควบแน่น เพื่อให้ส่วนควบแน่นสามารถสัมผัสกับน้ำที่เย็นที่ไหลเข้ามาในถังดังแสดงในรูป 3.8 โดยที่น้ำที่ไหลจากถังเก็บน้ำก่อนที่จะเข้ามาที่ถัง ต้องผ่านปั๊มซึ่งเราจะวัดอัตราการไหลของน้ำโดยวัดที่น้ำขาออกโดยจับเวลาแล้วนำน้ำที่ได้มาทำการชั่งด้วยตราชั่งดิจิตอล



รูปที่ 3.9 เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ ที่ใช้ตัวรับรังสีชนิดท่อสุญญากาศร่วมกับท่อเทอร์โมไซฟอนและมีวัสดุเปลี่ยนสถานะ

3.7 ขั้นตอนการทดสอบเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

3.7.1 ดำเนินการทดลอง 24 ชั่วโมง โดยที่เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ทั้ง 2 เครื่อง ดำเนินการพร้อมกัน

3.7.2 ทำการแปรอัตราการไหลทั้งหมด 3 ค่าคือ 0.1 0.2 และ 0.4 กิโลกรัมต่อนาที และแปรมุมเอียง 3 ค่าคือ 14 30 และ 45 องศา โดยแต่ละชุดของการทดลองทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

3.7.3 นำข้อมูลทั้งหมดที่ได้จากการทดลองมาบันทึกผล และแสดงผลการทดลองแบบกราฟในรูปแบบต่างๆ เพื่อสังเกตแนวโน้มของอุณหภูมิของสารทำงานและสังเกตหาปัจจัยที่มีอิทธิต่อการทำความร้อนของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

3.7.4 ทำการวิเคราะห์ข้อมูลและสรุปผล

3.8 การวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

3.8.1 การวิเคราะห์หาค่าอัตราการส่งถ่ายความร้อน

เป็นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของอัตราการไหลของน้ำร้อนที่มีผลต่ออัตราการส่งถ่ายความร้อน ซึ่งอัตราการไหลที่มีการทำการลองของน้ำอย่างเช่น 3 ค่า เช่น 0.1 กิโลกรัมต่อนาที 0.2 กิโลกรัมต่อนาที และ 0.4 กิโลกรัมต่อนาที แต่ละอัตราการไหลจะทำการทดลองที่มีมุมเอียงของตัวรับรังสีดวงอาทิตย์เอียงแตกต่างกันออกไปอย่างเช่น 3 ค่า เช่น มุม 14 องศา มุม 30 องศา และมุม 45 องศา เนื่องจากอัตราการไหลจะมีผลต่ออัตราการส่งถ่ายความร้อนเพราะจากสมการอัตราการส่งถ่ายความร้อนพบว่า อัตราการไหลนั้นมีความแปรผันตรงกับอัตราการส่งถ่ายความร้อน ซึ่งเมื่อพิจารณาแล้วพบว่ายิ่งเพิ่มอัตราการไหลของน้ำจะทำให้ค่าอัตราการส่งถ่ายความร้อนมีค่าสูงขึ้น ซึ่งการคำนวณหาค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนสามารถคำนวณได้ดังนี้

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

เมื่อ

\dot{Q} คือ อัตราการถ่ายเทความร้อน, วัตต์

\dot{m} คือ อัตราการไหลของของไหล, กิโลกรัมต่อวินาที

C_p คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของสารทำงาน, กิโลจูลต่อกิโลกรัม . วินาที

T_{out} คือ อุณหภูมิที่ทางออกของถึงน้ำ, องศาเซลเซียส

T_{in} คือ อุณหภูมิที่ทางเข้าของถึงน้ำ, องศาเซลเซียส

ซึ่งอัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงานสามารถหาได้จากการนำที่ไหลออกมาแล้วนำภาชนะมารองที่ทางออกของถึงแล้วทำการจับเวลา แล้วนำภาชนะนั้นมาชั่งน้ำหนัก ทำการหาอัตราการไหลได้เป็น ลิตรต่อนาที จากนั้นเปลี่ยนหน่วยให้เป็น กิโลกรัมต่อวินาที

3.8.2 การคำนวณหาประสิทธิภาพตัวรับรังสี

หาคำนวณหาค่าประสิทธิภาพของแผงรับรังสีจะเป็นการคำนวณค่าความเข้มแสงอาทิตย์ที่มีผลค่าประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งเมื่อพิจารณาจากสมการที่ 3.2 พบว่าค่าความเข้มแสงของรังสีอาทิตย์จะแปรผันต่อประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำร้อน ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$\eta = \frac{Q}{IA} \quad (3.5)$$

เมื่อ

η คือ ประสิทธิภาพ, เปอร์เซนต์

I คือ ความเข้มแสงอาทิตย์, วัตต์ต่อตารางเมตร

A คือ พื้นที่ของตัวรับรังสี, ตารางเมตร



บทที่ 4 ผลการวิจัย

การศึกษาสมรรถนะทางความร้อนของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ตัวรับรังสีแบบท่อสุญญากาศร่วมกับท่อเทอร์โมไซฟอนและมีวัสดุเปลี่ยนสถานะ จะทำการศึกษาตามขอบเขตงานวิจัย สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนด้วยกัน โดยมีรายละเอียดดังนี้

4.1 สมรรถนะทางความร้อนของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

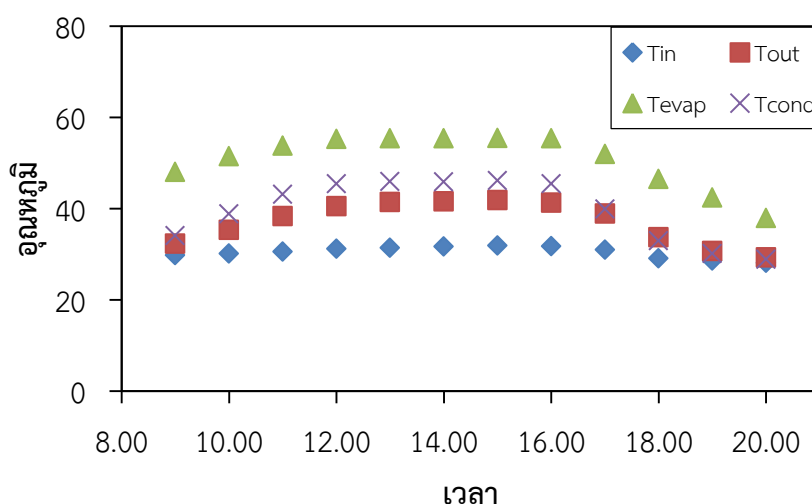
เป็นการศึกษาเปรียบเทียบสมรรถนะทางความร้อนของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้ตัวรับรังสีแบบท่อสุญญากาศร่วมกับท่อเทอร์โมไซฟอนแบบธรรมดาและแบบมีวัสดุเปลี่ยนสถานะ (พาราฟิน) ซึ่งชุดการทดลองทั้งสองจะถูกทดสอบที่สภาวะอากาศวันและเวลาเดียวกัน โดยทำการทดลองในตั้งแต่เวลา 08.00 - 20.00 น. ตั้งแต่ 12 พ.ค. - 10 ต.ค. 2557 ซึ่งแปรอัตราการไหลของน้ำ 0.25 0.5 และ 1 กิโลกรัมต่อนาที และมุมเอียงการทำงาน 14 30 และ 45 องศาจากแนวระดับ โดยผลการทดลองมีดังนี้

4.1.1 อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

รูปที่ 4.1 และ 4.2 แสดงอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้ตัวรับรังสีแบบท่อสุญญากาศร่วมกับท่อเทอร์โมไซฟอนแบบธรรมดาและแบบมีวัสดุเปลี่ยนสถานะ (พาราฟิน) ที่อัตราการไหล 0.50 กิโลกรัมต่อนาที มุมเอียงการทำงาน 30 องศา วัดจากแนวราบ พบว่าอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้ตัวรับรังสีแบบท่อสุญญากาศร่วมกับท่อเทอร์โมไซฟอน อุณหภูมิผิวที่ส่วนทำระเหย และส่วนควบแน่น มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตั้งแต่เวลา 9.00 น. จนถึงช่วงเวลา 12.00 น. ตามค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ที่เพิ่มขึ้น จากนั้นช่วงเวลา 12.00 น. ถึง 16.00 น. อุณหภูมิค่อนข้างคงที่ แล้วจะลดลงอย่างช้าๆ ตามความเข้มรังสีอาทิตย์ที่ลดลง โดยอุณหภูมิผิวที่ส่วนทำระเหย และส่วนควบแน่นของท่อเทอร์โมไซฟอนสูงสุดมีค่าสูงสุดเท่ากับ 55.5 และ 45.9 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ณ เวลา 15.00 น. และมีอุณหภูมิผิวเฉลี่ยที่ส่วนทำระเหย และส่วนควบแน่นตลอดทั้งวันเท่ากับ 51.6 และ 39.7 องศาเซลเซียส และมีความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของน้ำขาเข้าและอุณหภูมิน้ำขาออกเฉลี่ยตลอดทั้งวันเท่ากับ 6.02 องศาเซลเซียส

สำหรับอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้ตัวรับรังสีแบบท่อสุญญากาศร่วมกับท่อเทอร์โมไซฟอนแบบมีวัสดุเปลี่ยนสถานะ (พาราฟิน) มีแนวโน้มอุณหภูมิกว้างคล้ายคลึงกับเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้ตัวรับรังสีแบบท่อ

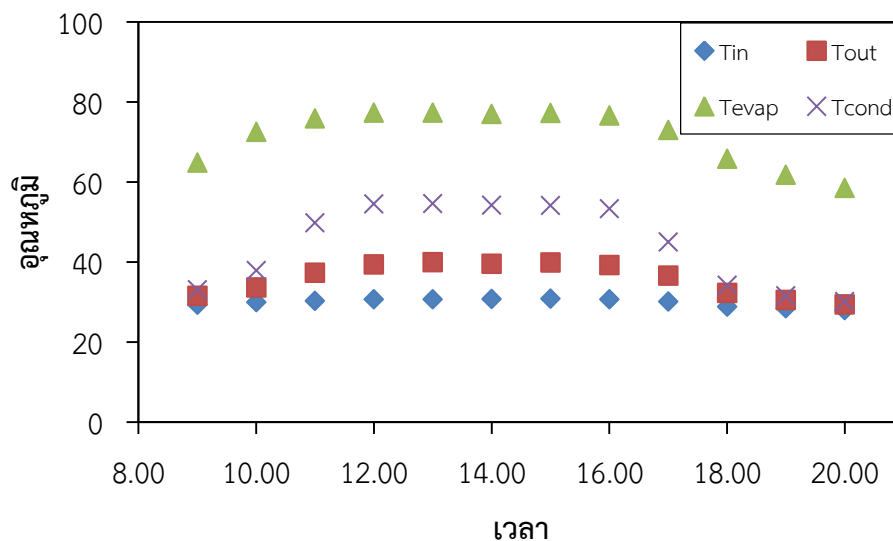
สูญญากาศร่วมกับท่อเทอร์โมไซฟอนแบบธรรมดา แต่จะมีอุณหภูมิผิวที่ส่วนทำระเหย ส่วนควบแน่น และอุณหภูมิน้ำขาออกสูงกว่า เนื่องจากเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ตัวรับรังสีแบบท่อสูญญากาศร่วมกับท่อเทอร์โมไซฟอนแบบมีวัสดุเปลี่ยนสถานะ (พาราฟิน) มีการสะสมพลังงานแสงอาทิตย์รูปแบบของความร้อนแฝง (Latent Heat) ของพาราฟินจากการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวไปเป็นของแข็ง ซึ่งการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวไปเป็นของแข็งจะเป็นการบวนการคายความร้อนของพาราฟิน เมื่อพาราฟินคายความร้อนออกมาก็จะส่งถ่ายไปยังท่อเทอร์โมไซฟอนที่บรรจุอยู่ในท่อแก้วสูญญากาศ การที่มีพาราฟินบรรจุอยู่ในท่อแก้วสูญญากาศนั้นจะทำให้อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีการบรรจุวัสดุเปลี่ยนสถานะยังมีค่าที่สูงกว่า ถึงแม้ว่าค่าความเข้มแสงอาทิตย์จะลดลงไปแล้วก็ตาม [15] โดยมีอุณหภูมิผิวที่ส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นสูงสุดเท่ากับ 77.3 และ 54.6 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ณ เวลา 15.00 น. และมีอุณหภูมิผิวที่ส่วนทำระเหย และส่วนควบแน่นตลอดทั้งวันเท่ากับ 71.5 และ 44.3 องศาเซลเซียส และมีความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของน้ำขาเข้าและอุณหภูมิน้ำขาออกตลอดทั้งวันเท่ากับ 5.81 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ตัวรับรังสี แบบท่อสูญญากาศร่วมกับท่อเทอร์โมไซฟอนแบบธรรมดา ที่อัตราการไหล 0.50 กิโลกรัมต่อวินาที มุมเอียงการทำงาน 30 องศาจากแนวระดับ ทดลองในวันที่ 29 มิถุนายน 2557

จากผลที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่า อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์มีอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากมาจากความเข้มรังสีอาทิตย์ที่มากจนกระทั่งหลอดแก้วสูญญากาศ ซึ่งทำหน้าที่ดูดซับความร้อนจากรังสีอาทิตย์ส่งความร้อนที่ได้ไปยังส่วนทำระเหยของเทอร์โมไซฟอนที่บรรจุภายในท่อแก้วสูญญากาศ เมื่อส่วนทำระเหยของเทอร์โมไซฟอนได้รับความร้อน สารทำงานที่บรรจุอยู่ภายในท่อซึ่งมีสถานะเป็นของเหลวอ้อมตัวจะเปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอ จากนั้นจะ

ลอยสู่ด้านบนไปยังส่วนควบแน่นที่ติดตั้งอยู่ภายในถังน้ำที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า และถ่ายเทความร้อนจากส่วนควบแน่นไปยังน้ำที่บรรจุอยู่ภายในถัง เมื่อสารทำงานที่มีสถานะเป็นไอแลกเปลี่ยนความร้อนแล้ว จะเกิดการควบแน่นเป็นของเหลวควบแน่นและไหลกลับไปยังส่วนทำระเหยด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้ตัวรับรังสี แบบท่อสุญญากาศร่วมกับท่อเทอร์โมไซฟอนแบบมีวัสดุเปลี่ยนสถานะ ที่อัตราการไหล 0.50 กิโลกรัมต่อวินาที มุมเอียงการทำงาน 30 องศาจากแนวระดับ ทดลองในวันที่ 29 มิถุนายน 2557

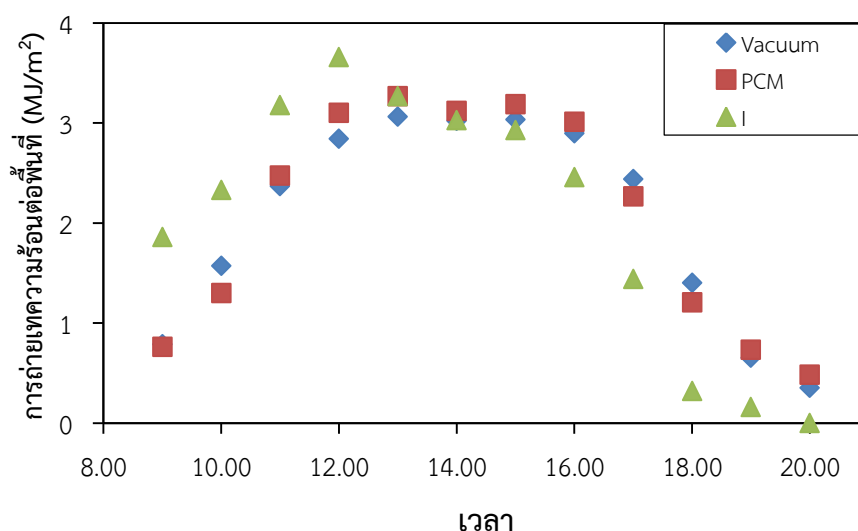
4.1.2 สมรรถนะทางความร้อนของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

สำหรับการศึกษาสมรรถนะทางความร้อนของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ จะพิจารณาในรูปของการถ่ายเทความร้อน และประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ โดยมีรายละเอียดดังนี้

4.1.2.1 การถ่ายเทความร้อนของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

จากผลต่างของอุณหภูมิน้ำขาเข้าและขาออกเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ จะถูกนำมาคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ โดยวิธีคาลอริฟิก (Calorific Method) แสดงดังรูปที่ 4.3 พบว่า ช่วงเวลา 9.00-13.00 น. ค่าการถ่ายเทความร้อนของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ทั้งสองแบบมีค่าเพิ่มขึ้น ตามความเข้มรังสีอาทิตย์ที่เพิ่มขึ้น หลังจากนั้นจะมีค่าลดลง ตามค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ที่ลดลง โดยในช่วงเวลา 9.00-11.00 น. ค่าการถ่ายเทความร้อนของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้ตัวรับรังสีแบบท่อสุญญากาศร่วมกับท่อเทอร์โมไซฟอนแบบธรรมดา และแบบมีการบรรจุวัสดุเปลี่ยน

สถานะ (พาราฟิน) มีค่าการถ่ายเทความร้อนใกล้เคียงกัน จากนั้นตั้งแต่เวลา 11.00-13.00 น. จะเห็นได้ว่าค่าการถ่ายเทความร้อนของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้ตัวรับรังสีแบบท่อสุญญากาศร่วมกับท่อเทอร์โมไซโฟนแบบมีการบรรจุวัสดุเปลี่ยนสถานะมีค่าการถ่ายเทความร้อนมากกว่า เนื่องจากพาราฟินที่บรรจุในท่อแก้วนั้นมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน 0.22 W/m.K ซึ่งมีความมากกว่าค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอากาศ 0.02 W/m.K ซึ่งทำให้เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้ตัวรับรังสีแบบท่อสุญญากาศร่วมกับท่อเทอร์โมไซโฟนแบบมีวัสดุเปลี่ยนสถานะ (พาราฟิน) มีการถ่ายเทความร้อนดีกว่าจึงทำให้อุณหภูมิของส่วนทำระเหย ส่วนควบแน่น และอุณหภูมิน้ำขาออกสูงกว่า [15] หลังจากเวลา 13.00 น. ค่าการถ่ายเทความร้อนของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ทั้งสองแบบ ค่อยข้างมีค่าใกล้เคียงกัน โดยค่าการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้ตัวรับรังสีแบบท่อสุญญากาศร่วมกับท่อเทอร์โมไซโฟนแบบธรรมดา และแบบมีการบรรจุวัสดุเปลี่ยนสถานะ (พาราฟิน) มีค่าเท่ากับ 2.04 เมกะจูลต่อตารางเมตร และ 2.08 เมกะจูลต่อตารางเมตร ตามลำดับ



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงการถ่ายเทความร้อนของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้ตัวรับรังสีแบบท่อสุญญากาศร่วมกับท่อเทอร์โมไซโฟนแบบธรรมดา และแบบมีวัสดุเปลี่ยนสถานะ (พาราฟิน) และค่าความเข้มแสงอาทิตย์ ที่อัตราการใช้ 0.50 กิโลกรัมต่ออนาที มุมเอียงการทำงาน 30 องศาจากแนวระดับ

4.1.2.2 ประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

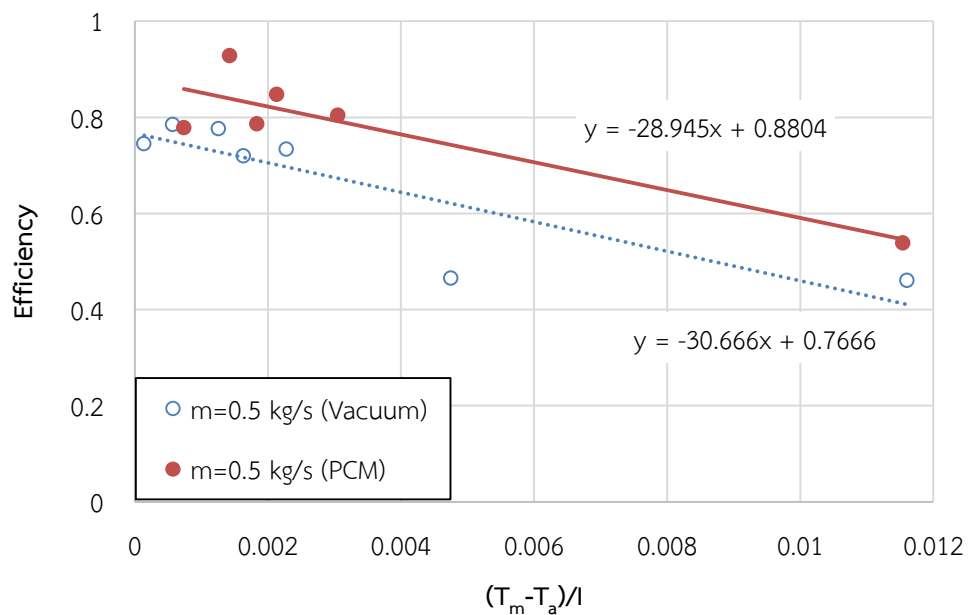
สำหรับการศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่สภาวะคงที่ โดยใช้สมการของ Hottel-Whillier-Bliss ซึ่งมีความสัมพันธ์ของสมการดังนี้

$$\eta = F_R (\tau\alpha) - F_R U_L \left(\frac{T_m - T_a}{I_T} \right) \quad (4.1)$$

เมื่อ

- F_R = ค่าแฟกเตอร์การดึงความร้อน (collector heat removal factor)
- τ = ค่าสภาพส่งผ่าน (transmittance of glass cover)
- α = ค่าสภาพดูดกลืน (absorptance of absorber plate)
- U_L = สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนรวมของตัวรับรังสีอาทิตย์ ($W/m^2 \cdot K$)
- T_m = อุณหภูมิน้ำเฉลี่ย (K)
- T_a = อุณหภูมิบรรยากาศ (K)

จากสมการข้างต้น ค่า $F_R (\tau\alpha)$ แสดงค่าสมรรถนะเชิงแสงหรือแสดงถึงค่าประสิทธิภาพสูงสุดของตัวรับรังสีอาทิตย์ ถ้ามีค่าสูงแสดงว่าการส่งผ่านค่าดูดกลืนรังสีอาทิตย์ของตัวรับรังสีอาทิตย์มีค่าสูง และค่า $-F_R U_L$ แสดงค่าการสูญเสียความร้อน ถ้ามีค่าสูงแสดงว่าตัวรับรังสีอาทิตย์ดังกล่าวป้องกันความร้อนสูญเสียได้ไม่ดีพอ



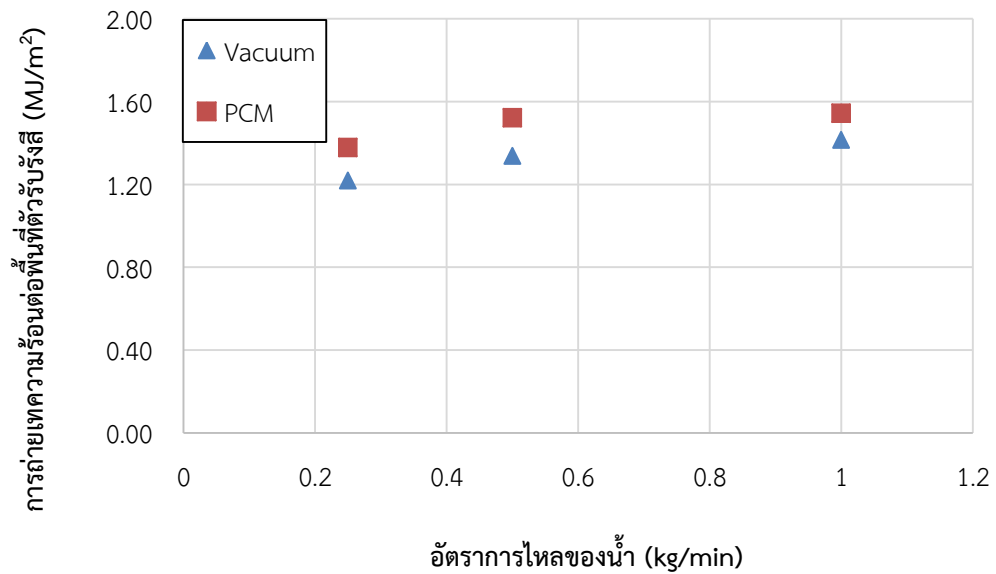
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้ตัวรับรังสีแบบท่อสุญญากาศร่วมกับท่อเทอร์โมไซฟอนแบบธรรมดา และแบบมีวัสดุเปลี่ยนสถานะ (พาราฟิน) กับ $(T_m - T_a)/I$ ที่อัตราการไหล 0.50 กิโลกรัมต่อวินาที มุมเอียงการทำงาน 30 องศา จากแนวระดับ

เมื่อทำการพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์กับผลต่างของอุณหภูมิน้ำเฉลี่ยกับอุณหภูมิบรรยากาศต่อความเข้มรังสีอาทิตย์ $[(T_m - T_a)/I]$ ดังรูปที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าค่าประสิทธิภาพสูงสุดของตัวรับรังสีอาทิตย์ของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้ตัวรับรังสีแบบท่อสุญญากาศร่วมกับท่อเทอร์โมไซฟอนแบบธรรมดา และแบบมีวัสดุเปลี่ยนสถานะ (พาราฟิน) มีค่าเท่ากับ 76.67% และ 88.04% และมีค่าการสูญเสียความร้อนเท่ากับ -30.67 และ -28.95 ($W/m^2 \cdot K$)

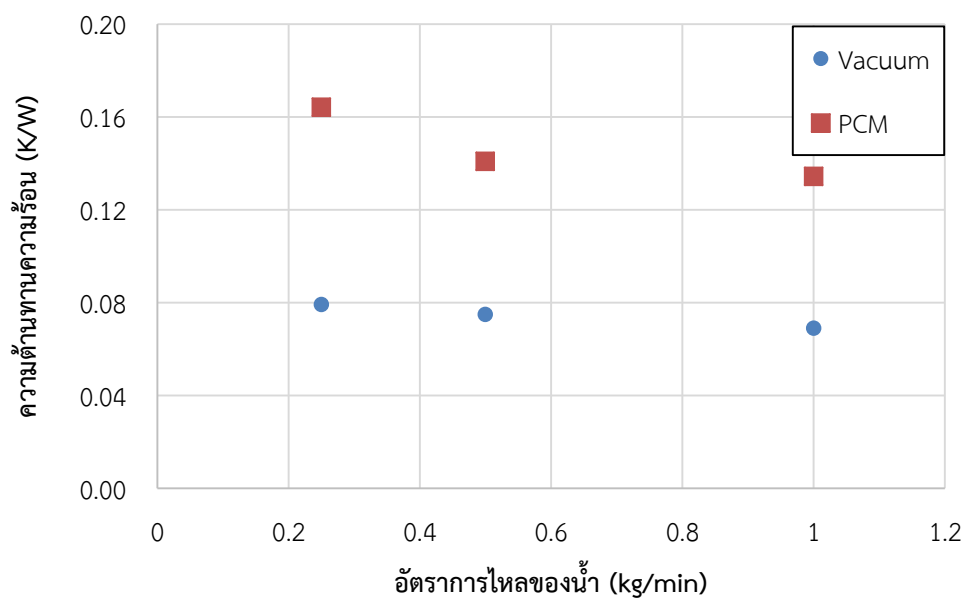
นั่นแสดงว่าประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้ตัวรับรังสีแบบท่อสุญญากาศร่วมกับท่อเทอร์โมไซฟอนแบบมีวัสดุเปลี่ยนสถานะ (พาราฟิน) มีประสิทธิภาพสูงกว่าแบบธรรมดา เนื่องจากเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้ตัวรับรังสีแบบท่อสุญญากาศร่วมกับท่อเทอร์โมไซฟอนแบบมีวัสดุเปลี่ยนสถานะ (พาราฟิน) มีการส่งผ่านค่าดูดกลืนรังสีอาทิตย์ และมีการป้องกันความร้อนสูญเสียได้ดีกว่าเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้ตัวรับรังสีแบบท่อสุญญากาศร่วมกับท่อเทอร์โมไซฟอนแบบธรรมดา

4.1.3 ผลของอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

จากรูปที่ 4.5 แสดงผลของการถ่ายเทความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ของตัวรับรังสีอาทิตย์ที่อัตราการไหลต่างๆ จากกราฟจะเห็นว่าเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของน้ำขาเข้าเพิ่มขึ้น ทำให้การถ่ายเทความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ตัวรับรังสีอาทิตย์ของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์มีค่าเพิ่มขึ้น โดยอัตราการไหลของน้ำขาเข้ามีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.25 เป็น 1.0 ลิตรต่อนาที ทำให้การถ่ายเทความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ตัวรับรังสีอาทิตย์มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 1.22 MJ/m^2 เป็น 1.42 MJ/m^2 และทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ตัวรับรังสีอาทิตย์มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 1.38 MJ/m^2 เป็น 1.54 MJ/m^2 สำหรับเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้ตัวรับรังสีแบบท่อสุญญากาศร่วมกับท่อเทอร์โมไซฟอนแบบธรรมดา และแบบมีวัสดุเปลี่ยนสถานะ (พาราฟิน) ตามลำดับ



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการถ่ายเทความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ของตัวรับรังสีอาทิตย์กับอัตราการไหล ที่มีตัวรับรังสีอาทิตย์ 14 องศา กับแนวระดับ



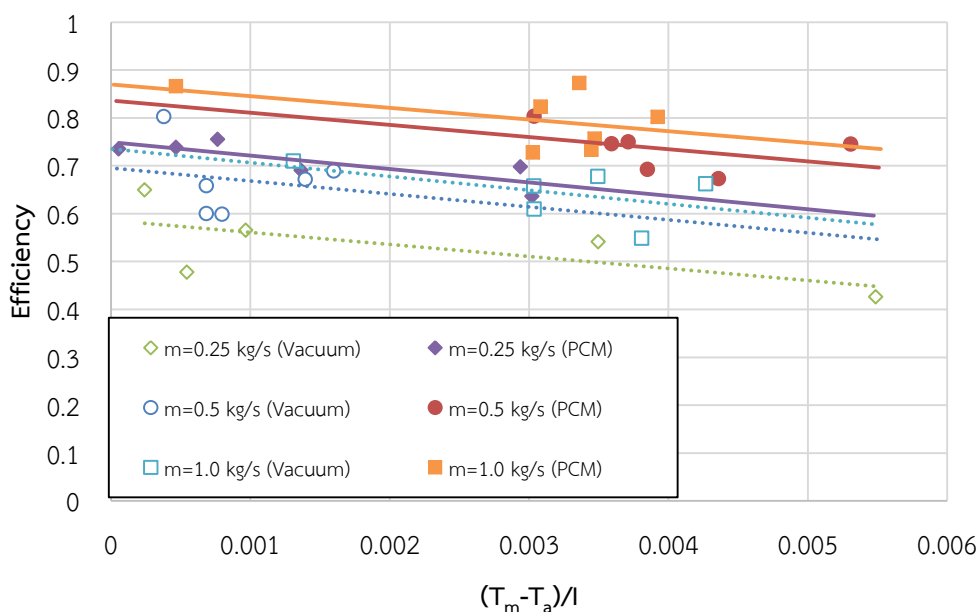
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานความร้อนของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์กับอัตราการไหล ที่มีตัวรับรังสีอาทิตย์ 14 องศา กับแนวระดับ

ผลของการเพิ่มอัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ ส่งผลให้การระบายความร้อนที่ส่วนควบแน่นของเทอร์โมไซฟอนดีขึ้น จึงส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนต่อ

หน่วยพื้นที่ตัวรับรังสีอาทิตย์มีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราการไหลของน้ำขาเข้าเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่เพิ่มขึ้น

จากรูปที่ 4.6 พบว่า เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของน้ำขาเข้าทำให้ความต้านทานความร้อนของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์มีค่าลดลง โดยอัตราการไหลมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.25 เป็น 1.0 ลิตรต่อนาที ทำให้ความต้านทานความร้อนมีค่าลดลงจาก 0.08 เป็น 0.069 K/W และมีค่าลดลงจาก 0.16 เป็น 0.13 K/W สำหรับเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้ตัวรับรังสีแบบท่อสุญญากาศร่วมกับท่อเทอร์โมไซฟอนแบบธรรมดา และแบบมีวัสดุเปลี่ยนสถานะ (พาราฟิน) ตามลำดับ

ผลของการเพิ่มอัตราการไหลของน้ำขาเข้าเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ 0.25, 0.50 และ 1.0 ลิตรต่อนาที ของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้ตัวรับรังสีแบบท่อสุญญากาศร่วมกับท่อเทอร์โมไซฟอนแบบมีวัสดุเปลี่ยนสถานะ (พาราฟิน) มีค่าความต้านทานมากกว่าเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้ตัวรับรังสีแบบท่อสุญญากาศร่วมกับท่อเทอร์โมไซฟอนแบบธรรมดาอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากการบรรจุวัสดุเปลี่ยนสถานะตรงกลางระหว่างท่อสุญญากาศกับท่อเทอร์โมไซฟอน เพื่อกักเก็บความร้อนในรูปการเปลี่ยนสถานะของพาราฟิน กลับกลายเป็นการเพิ่มความต้านทานความร้อน จึงทำให้เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้ตัวรับรังสีแบบท่อสุญญากาศร่วมกับท่อเทอร์โมไซฟอนแบบมีวัสดุเปลี่ยนสถานะ (พาราฟิน) มีค่าความต้านทานสูงกว่า



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้ตัวรับรังสีแบบท่อสุญญากาศร่วมกับท่อเทอร์โมไซฟอนแบบธรรมดา และแบบมีวัสดุเปลี่ยนสถานะ (พาราฟิน) กับ $(T_m - T_a)/I$ ที่อัตราการไหลต่างๆ มุมเอียงการทำงาน 14 องศาจากแนวระดับ

เมื่อทำการพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์กับผลต่างของอุณหภูมิน้ำเฉลี่ยกับอุณหภูมิบรรยากาศต่อความเข้มรังสีอาทิตย์ $[(T_m - T_a)/I]$

ที่อัตราการไหลต่างๆ ดังรูปที่ 4.7 สามารถสรุปประสิทธิภาพสูงสุด และค่าการสูญเสียความร้อนของตัวรับรังสีอาทิตย์ของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ดังตารางที่ 1.

ตารางที่ 4.1 แสดงประสิทธิภาพสูงสุด และการสูญเสียความร้อนของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้ตัวรับรังสีแบบท่อสุญญากาศร่วมกับท่อเทอร์โมไซฟอนแบบธรรมดา และแบบมีวัสดุเปลี่ยนสถานะ (พาราฟิน)

| อัตราการไหล (kg/min) | เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ แบบธรรมดา | | เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ แบบมีวัสดุเปลี่ยนสถานะ (พาราฟิน) | |
|-------------------------|--|-------------------------------------|---|-------------------------------------|
| | $F_R(\tau\alpha)$ | $-F_R U_L$ (W/m ² -K) | $F_R(\tau\alpha)$ | $-F_R U_L$ (W/m ² -K) |
| 0.25 | 0.586 | -25.119 | 0.749 | -28.028 |
| 0.50 | 0.692 | -27.009 | 0.836 | -25.371 |
| 1.0 | 0.735 | -28.709 | 0.870 | -24.418 |

จากตารางที่ 4.1 จะเห็นว่าเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพสูงสุดของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์เพิ่มขึ้น โดยอัตราการไหลของน้ำเพิ่มขึ้นจาก 0.25 เป็น 1.0 กิโลกรัมต่อวินาที ประสิทธิภาพสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 58.6% เป็น 73.5% และค่าเพิ่มขึ้นจาก 74.9% เป็น 87.0% สำหรับเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้ตัวรับรังสีแบบท่อสุญญากาศร่วมกับท่อเทอร์โมไซฟอนแบบธรรมดา และแบบมีวัสดุเปลี่ยนสถานะ (พาราฟิน) อีกทั้งยังพบว่า ประสิทธิภาพสูงสุดของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้ตัวรับรังสีแบบท่อสุญญากาศร่วมกับท่อเทอร์โมไซฟอนแบบมีวัสดุเปลี่ยนสถานะ (พาราฟิน) มีประสิทธิภาพสูงกว่าแบบธรรมดา ทุกอัตราการไหลของน้ำที่ทำการแปรค่า

ผลของการเพิ่มอัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ ส่งผลให้ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มอัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ ทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนของเครื่องทำน้ำร้อนสูงขึ้น (สังเกตได้จากรูปที่ 4.5) จึงทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์สูงขึ้นตามไปด้วย โดยประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์สอดคล้องกับสมการ

$$\eta = \frac{Q}{AI} \quad (4.2)$$

เมื่อ

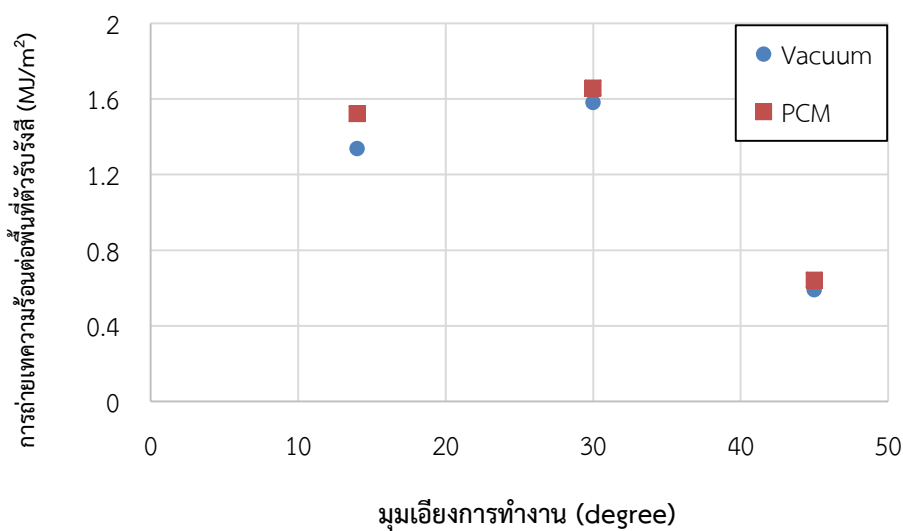
Q = อัตราการถ่ายเทความร้อนของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

I = ความเข้มรังสีแสงอาทิตย์

A = พื้นที่รับความร้อนของเครื่องทำน้ำร้อน

4.1.4 ผลของมุมเอียงการทำงานของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

จากรูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการถ่ายเทความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ตัวรับรังสีอาทิตย์กับมุมเอียง จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มมุมเอียงของตัวรับรังสีอาทิตย์ของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ จาก 14 เป็น 30 องศาจากแนวระดับ ทำให้การถ่ายเทความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ตัวรับรังสีอาทิตย์มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 1.34 เป็น 1.58 MJ/m² และมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 1.52 เป็น 1.66 MJ/m² หลังจากนั้นเมื่อเพิ่มมุมเอียงการทำงานจาก 30 เป็น 45 องศาจากแนวระดับ การถ่ายเทความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ตัวรับรังสีอาทิตย์กลับมีค่าลดลงจาก 1.58 เป็น 0.59 MJ/m² และมีค่าลดลงจาก 1.66 เป็น 0.64 MJ/m² สำหรับเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้ตัวรับรังสีแบบท่อสุญญากาศร่วมกับท่อเทอร์โมไซฟอนแบบธรรมดา และแบบมีวัสดุเปลี่ยนสถานะ (พาราฟิน) ซึ่งจะเห็นได้ว่ามุมเอียงการทำงาน 30 องศาจากแนวระดับ มีการถ่ายเทความร้อนมากที่สุด เนื่องจากมุมเอียงของตัวรับรังสีอาทิตย์ที่ดีที่สุดสำหรับจังหวัดนครปฐมคือมุม 14 องศา วัดจากแนวระดับ เพราะความเข้มแสงอาทิตย์ตกกระทบตั้งฉากกับตัวรับรังสีอาทิตย์ทำให้ได้รับพลังงานจากแสงอาทิตย์มากที่สุด เมื่อเพิ่มมุมเอียงของตัวรับรังสีอาทิตย์เพิ่มขึ้นไปเป็น 30 องศา วัดจากแนวระดับ จะทำให้ตัวรับรังสีอาทิตย์ได้



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการถ่ายเทความร้อนของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้ตัวรับรังสีแบบท่อสุญญากาศร่วมกับท่อเทอร์โมไซฟอนแบบธรรมดา และแบบมีวัสดุเปลี่ยนสถานะ (พาราฟิน) กับมุมเอียง ที่อัตราการไหลของน้ำขาเข้า 0.5 กิโลกรัมต่อนาที

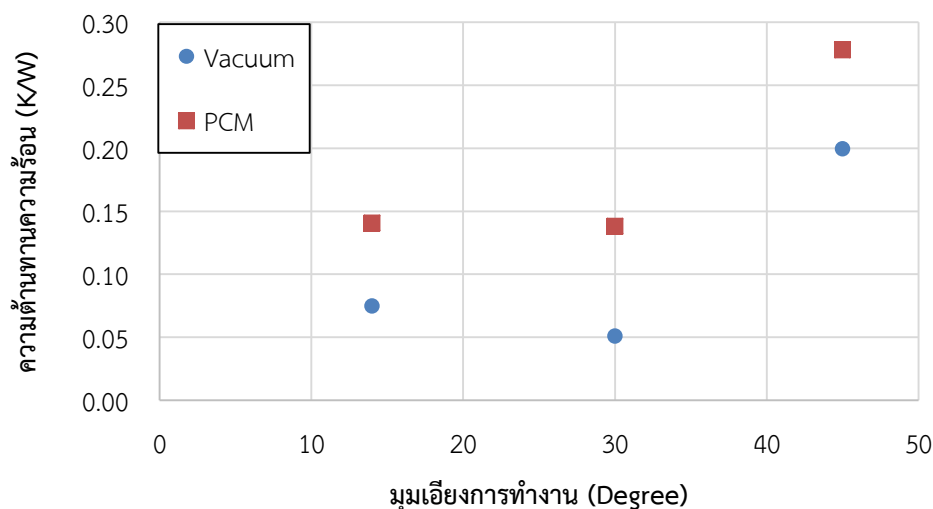
รับพลังงานแสงอาทิตย์ลดลงเพราะความเข้มแสงอาทิตย์ไม่มารตกกระทบตั้งฉาก แต่ที่มีการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นเพราะว่า การถ่ายเทความร้อนของท่อเทอร์โมไซฟอนที่บรรจุอยู่ในท่อแก้วสุญญากาศมีค่าเพิ่มขึ้นตามมุมเอียงของแผงรับรังสี ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของท่อเทอร์โมไซฟอนจะมีค่าสูงสุดเมื่อมีมุมการทำงานที่ 90 องศา วัดจากแนวระดับ แต่ถ้าเพิ่มมุมเอียงเพิ่มขึ้นเป็น

45 องศา วัดจากแนวระดับ นั้นจะทำให้ตัวรับรังสีอาทิตย์ได้รับความเข้มแสงอาทิตย์ลดน้อยลงไป ถึงแม้ว่าท่อเทอร์โมไซฟอนสามารถถ่ายเทความร้อนได้ดีก็ตาม

นอกจากนี้ยังเห็นได้ว่า เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้ตัวรับรังสีแบบท่อสุญญากาศร่วมกับท่อเทอร์โมไซฟอนแบบมีวัสดุเปลี่ยนสถานะ (พาราฟิน) มีการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าแบบธรรมดาที่ทุกๆ มุมเอียงที่แปรค่า เนื่องจากวัสดุเปลี่ยนสถานะ (พาราฟิน) ที่บรรจุระหว่างท่อสุญญากาศและท่อเทอร์โมไซฟอน สามารถกักเก็บความร้อนโดยการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลว จากนั้นเมื่อไม่มีความเข้มรังสีอาทิตย์หรือความเข้มรังสีอาทิตย์มีค่าน้อย วัสดุเปลี่ยนสถานะจะคายความร้อนที่กักเก็บ โดยการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวไปเป็นของแข็ง ซึ่งความร้อนนั้นจะถูกส่งถ่ายไปยังท่อเทอร์โมไซฟอน เพื่อส่งความร้อนไปยังน้ำอีกครั้งหนึ่ง

จากรูปที่ 4.9 จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มมุมเอียงตัวรับรังสีอาทิตย์ของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ ทำให้ความต้านทานความร้อนมีค่าลดลง โดยมุมเอียงของตัวรับรังสีอาทิตย์ของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 14 เป็น 30 องศาจากแนวระดับ ทำให้ความต้านทานความร้อนมีค่าลดลงจาก 0.07 เป็น 0.05 K/W และมีค่าลดลงจาก 0.141 เป็น 0.138 K/W หลังจากนั้นเมื่อเพิ่มมุมเอียงการทำงานจาก 30 เป็น 45 องศาจากแนวระดับ การถ่ายเทความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ตัวรับรังสีอาทิตย์กลับมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.05 เป็น 0.20 K/W และมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.138 เป็น 0.278 K/W สำหรับเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้ตัวรับรังสีแบบท่อสุญญากาศร่วมกับท่อเทอร์โมไซฟอนแบบธรรมดา และแบบมีวัสดุเปลี่ยนสถานะ (พาราฟิน) ซึ่งจะเห็นได้ว่ามุมเอียงการทำงาน 30 องศาจากแนวระดับ มีความต้านทานความร้อนน้อยที่สุด หรืออีกนัยหนึ่งแสดงว่า ที่มุมเอียงการทำงาน 30 องศาจากแนวระดับ มีการถ่ายเทความร้อนสูงที่สุด ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกันดังรูปที่ 4.8 และยังพบอีกว่าเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้ตัวรับรังสีแบบท่อสุญญากาศร่วมกับท่อเทอร์โมไซฟอนแบบมีวัสดุเปลี่ยนสถานะ (พาราฟิน) มีค่าความต้านทานความร้อนสูงกว่าเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้ตัวรับรังสีแบบท่อสุญญากาศร่วมกับท่อเทอร์โมไซฟอนแบบธรรมดาอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากการบรรจุวัสดุเปลี่ยนสถานะตรงกลางระหว่างท่อสุญญากาศกับท่อเทอร์โมไซฟอน เพื่อกักเก็บความร้อนในรูปการเปลี่ยนสถานะของพาราฟิน กลับกลายเป็นการเพิ่มความต้านทานความร้อน จึงทำให้เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้ตัวรับรังสีแบบท่อสุญญากาศร่วมกับท่อเทอร์โมไซฟอนแบบมีวัสดุเปลี่ยนสถานะ (พาราฟิน) มีค่าความต้านทานสูงกว่า

เมื่อทำการพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์กับผลต่างของอุณหภูมิน้ำเฉลี่ยกับอุณหภูมิบรรยากาศต่อความเข้มรังสีอาทิตย์ $[(T_m - T_a)/I]$ ที่มุมเอียงการทำงานต่างๆ ดังรูปที่ 4.10 สามารถสรุปประสิทธิภาพสูงสุด และค่าการสูญเสียความร้อนของตัวรับรังสีอาทิตย์ของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ดังตารางที่ 2



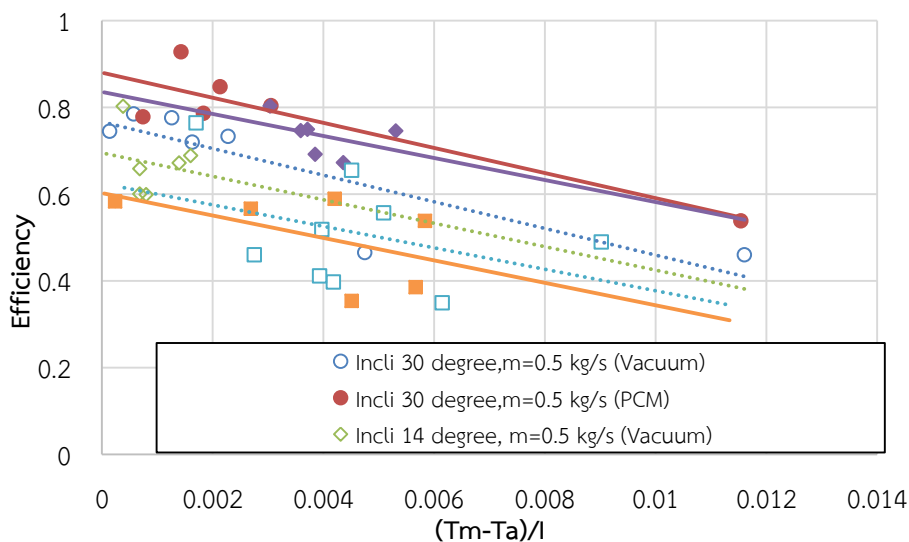
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานความร้อนของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์กับมุมเอียง ที่อัตราการไหลของน้ำเข้า 0.5 กิโลกรัมต่อวินาที

ตารางที่ 4.2 แสดงประสิทธิภาพสูงสุด และการสูญเสียความร้อนของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้ตัวรับรังสีแบบท่อสุญญากาศร่วมกับท่อเทอร์โมไซฟอนแบบธรรมดา และแบบมีวัสดุเปลี่ยนสถานะ (พาราฟิน)

| มุมเอียงการทำงาน (Degree) | เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ แบบธรรมดา | | เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ แบบมีวัสดุเปลี่ยนสถานะ (พาราฟิน) | |
|------------------------------|--|-------------------------------------|---|-------------------------------------|
| | $F_R(\tau\alpha)$ | $-F_R U_L$ (W/m ² -K) | $F_R(\tau\alpha)$ | $-F_R U_L$ (W/m ² -K) |
| 14 | 0.692 | -27.009 | 0.836 | -25.371 |
| 30 | 0.767 | -30.67 | 0.880 | -28.945 |
| 45 | 0.625 | -24.734 | 0.603 | -25.09 |

จากตารางที่ 2. จะเห็นว่าเมื่อมุมเอียงการทำงานเพิ่มขึ้น จาก 14 เป็น 30 องศาจากแนวระดับ ทำให้ประสิทธิภาพสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 69.2% เป็น 76.7% และมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 83.6% เป็น 88.0% หลังจากนั้นเมื่อเพิ่มมุมเอียงการทำงานจาก 30 เป็น 45 องศาจากแนวระดับ ประสิทธิภาพสูงสุดมีค่าลดลงจาก 76.7% เป็น 62.5% และมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 88.0% เป็น 60.3% สำหรับเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้ตัวรับรังสีแบบท่อสุญญากาศร่วมกับท่อเทอร์โมไซฟอนแบบธรรมดา และแบบมีวัสดุเปลี่ยนสถานะ (พาราฟิน) ซึ่งจะเห็นได้ว่ามุมเอียงการทำงาน 30

องศาจากแนวระดับ มีประสิทธิภาพสูงที่สุด ทั้งเครื่องน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้ตัวรับรังสีแบบท่อสุญญากาศร่วมกับท่อเทอร์โมไซฟอนแบบธรรมดา และแบบมีวัสดุเปลี่ยนสถานะ (พาราฟิน)



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้ตัวรับรังสีแบบท่อสุญญากาศร่วมกับท่อเทอร์โมไซฟอนแบบธรรมดา และแบบมีวัสดุเปลี่ยนสถานะ (พาราฟิน) กับ $(T_m - T_a)/I$ ที่มุมเอียงการทำงานต่างๆ อัตราการไหลของน้ำขาเข้า 0.5 กิโลกรัมต่อนาที

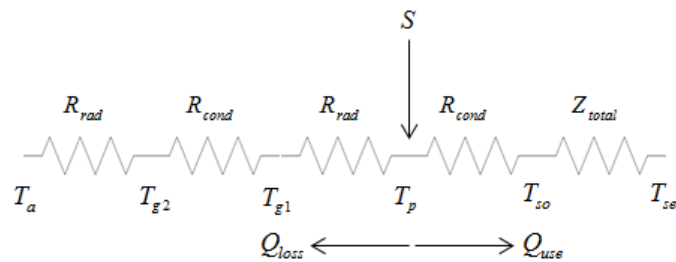
4.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีการสะสมพลังงานความร้อนโดยมีการใช้วัสดุเปลี่ยนสถานะ

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อคำนวณหาค่าความร้อนนั้นจะเป็นการรวบรวมสมการที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทความร้อนมาสร้างความสัมพันธ์กันต่อเนื่องกันไปเพื่อคำนวณหาค่าความร้อนที่ได้จากเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นได้มีข้อสมมติฐานดังต่อไปนี้

4.1.2.1 สถานะของพาราฟินอยู่ในสถานะของเหลวเท่านั้น

4.1.2.2 การถ่ายเทความร้อนจากผิวรับรังสีอาทิตย์ไปยังท่อเทอร์โมไซฟอนผ่านพาราฟินเป็นการถ่ายเทความร้อนแบบการนำความร้อน

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีการสะสมพลังงานความร้อนโดยมีการใช้วัสดุเปลี่ยนสถานะ สามารถเขียนแผนภาพความต้านทานความร้อนดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.11 แผนภาพแสดงความต้านทานความร้อนของเครื่องน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีการสะสมพลังงานความร้อนโดยมีการใช้วัสดุเปลี่ยนสถานะ

การคำนวณหาค่าความร้อนสูญเสีย (Q_{loss}) และค่าความร้อน (Q_{use}) จะเริ่มต้นการคำนวณโดยการสมมติค่า T_{amb}, T_p, T_g เพิ่มคำนวณความร้อนสูญเสีย โดยที่ทางด้านความร้อนสูญเสียจะต้องมีค่าเท่ากัน 3 ค่า คือ

$$A_c (h_{r,g-a} + h_{c,g2-a})(T_g - T_a) = \frac{T_{g1} - T_{g2}}{R} = A_c (h_{r,g-g})(T_p - T_{g1}) \quad (4.3)$$

โดยที่ $h_{r,g-a}$ คือค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีระหว่างผิวท่อแก้วไปยังสิ่งแวดล้อม สามารถหาได้จาก

$$h_{r,g-a} = \epsilon_g \sigma (T_g + T_a)(T_g^2 + T_a^2) \quad (4.4)$$

$h_{r,p-g}$ คือค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีระหว่างผิวรับรังสีอาทิตย์กับท่อแก้ว สามารถหาได้จาก

$$h_{r,p-g} = \frac{\sigma (T_p + T_g)(T_p^2 + T_g^2)}{\left(\frac{1}{\epsilon_p}\right) + \left(\frac{1}{\epsilon_g}\right) - 1} \quad (4.5)$$

$h_{c,p-g}$ คือค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างผิวรับรังสีอาทิตย์กับท่อแก้ว สามารถหาได้จาก

$$h_{c,p-g} = \frac{k}{L} \left(1 + 1.446 \left[1 - \frac{1708}{Ra \times \cos(\theta)} \right]^+ \left\{ 1 - \frac{1708 [\sin(1.8\theta)]^{1.6}}{Ra \times \cos(\theta)} \right\} + \left[\left[\frac{Ra \times \cos(\theta)}{5830} \right]^{0.333} - 1 \right]^+ \right) \quad (4.6)$$

ซึ่งค่า Ra สามารถหาได้จาก $Ra = \frac{g\beta' Pr}{\nu^2} (T_p - T_g) L^3$ โดยใช้ค่า Properties ที่อุณหภูมิ $\frac{1}{2}(T_p + T_g)$

$h_{c,g-a}$ คือค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างผิวท่อแก้วไปยังสิ่งแวดล้อม สามารถหาได้จาก

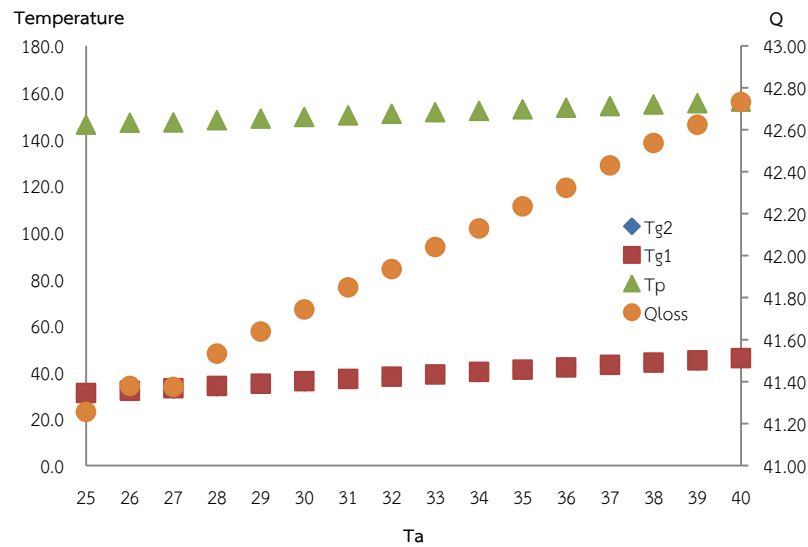
$$h_{c,g-a} = 8.6V^{0.6} / L^{0.4} \quad (4.7)$$

ในการคำนวณหาค่าความร้อนสูญเสียจะต้องทำการสุ่มค่า T_{amb} , T_p และ T_g เพื่อคำนวณหาค่าความร้อนสูญเสียแต่ละช่วงการถ่ายเทความร้อน และเมื่อสุ่มค่า T_{amb} , T_p และ T_g ที่เหมาะสมจะทำให้ได้ค่าความร้อนสูญเสียในแต่ละการถ่ายเทความร้อนมีค่าเท่ากัน และเมื่อทดลองใส่ค่าอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมตั้งแต่ 25 องศาเซลเซียส จนถึง 40 องศาเซลเซียสจะได้ค่าความร้อนสูญเสีย และ T_p และ T_g ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณ

| อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม | อุณหภูมิผิวแก้วชั้นนอก | อุณหภูมิผิวแก้วชั้นใน | อุณหภูมิผิวรับรังสี | ความร้อนสูญเสีย |
|---------------------|------------------------|-----------------------|---------------------|-----------------|
| T_a | T_{g2} | T_{g1} | T_p | Q_{loss} |
| 25 | 31.0 | 31.1 | 146.2 | 41.26 |
| 26 | 32.0 | 32.1 | 147.0 | 41.38 |
| 27 | 33.0 | 33.1 | 147.1 | 41.37 |
| 28 | 34.0 | 34.1 | 148.1 | 41.53 |
| 29 | 35.0 | 35.1 | 148.8 | 41.64 |
| 30 | 36.0 | 36.1 | 149.5 | 41.74 |
| 31 | 37.0 | 37.1 | 150.2 | 41.85 |
| 32 | 38.0 | 38.1 | 150.8 | 41.94 |
| 33 | 39.0 | 39.1 | 151.5 | 42.04 |
| 34 | 40.0 | 40.1 | 152.1 | 42.13 |
| 35 | 41.0 | 41.1 | 152.8 | 42.24 |
| 36 | 42.0 | 42.1 | 153.4 | 42.32 |
| 37 | 43.0 | 43.1 | 154.1 | 42.43 |
| 38 | 44.0 | 44.1 | 154.8 | 42.54 |
| 39 | 45.0 | 45.1 | 155.4 | 42.62 |
| 40 | 46.0 | 46.1 | 156.1 | 42.73 |

ซึ่งสามารถนำมาเขียนเป็นกราฟเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมกับค่าความร้อนสูญเสียและอุณหภูมิที่ผิวท่อแก้วและอุณหภูมิผิวรับรังสีอาทิตย์



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมกับค่าความร้อนสูญเสียและอุณหภูมิที่ผิวท่อแก้วและอุณหภูมิผิวรับรังสีอาทิตย์

จากรูปที่ 4.12 ที่ได้แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมกับค่าความร้อนสูญเสียและอุณหภูมิที่ผิวท่อแก้วและอุณหภูมิผิวรับรังสีอาทิตย์ สามารถสร้างสมการความสัมพันธ์ได้ดังต่อไปนี้

$$Q_{loss} = 0.0991T_{amb} + 38.764 \quad (4.8)$$

$$T_p = 0.664T_{amb} + 129.54 \quad (4.9)$$

$$T_{g1} = T_{amb} + 6 \quad (4.10)$$

$$T_{g2} = T_{amb} + 6.1 \quad (4.11)$$

เมื่อคำนวณหาค่า Q_{loss} ได้แล้วก็สามารถหาค่า Q_{use} ได้เนื่องจาก

$$Q_{use} = S - Q_{loss} \quad (4.12)$$

เมื่อได้ค่าความร้อน Q_{use} แล้วก็สามารถการถ่ายเทความร้อนไปยังท่อเทอร์โมไซฟอนได้เพื่อคำนวณอุณหภูมิของส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นได้

$$Q_{use} = \frac{T_p - T_{so}}{R_{cond, pcm}} \quad (4.13)$$

โดยที่ $R_{cond,pcm}$ คือค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนระหว่างผิวตัวรับรังสีอาทิตย์กับส่วนทำระเหยผ่านวัสดุเปลี่ยนสถานะ ซึ่งสามารถหาได้จาก

$$R_{cond,pcm} = \frac{\ln\left(\frac{D_i}{D_{r/s}}\right)}{2\pi L k_{pcm}} \quad (4.14)$$

ดังนั้น จะได้

$$T_{so} = T_p - Q_{use} R_{cond,pcm} \quad (4.15)$$

เมื่อได้ค่าความร้อน Q_{use} และอุณหภูมิส่วนทำระเหย T_{so} จะนำไปคำนวณหาอุณหภูมิส่วนควบแน่นของท่อเทอร์โมไซฟอนดังต่อไปนี้ โดยเริ่มจากการหาค่าส่วนควบแน่นอย่างง่ายก่อนจากสมการต่อไปนี้

$$Q_{use} = \frac{T_{so} - T_{se}}{Z_{total}} \quad (4.16)$$

โดยที่ Z_{total} คือค่าความต้านทานรวมของท่อเทอร์โมไซฟอน สามารถหาได้จาก

$$Z_{total} = Z_2 + Z_8 + Z_9 \quad (4.17)$$

$$Z_2 = \frac{\ln\left(\frac{D_o}{D_i}\right)}{2\pi L_e K} \quad (4.18)$$

$$Z_8 = \frac{\ln\left(\frac{D_o}{D_i}\right)}{2\pi L_c K} \quad (4.19)$$

$$Z_9 = \frac{1}{h_{co} S_{co}} \quad (4.20)$$

เมื่อได้ค่า Z_{total} ค่าความร้อน Q_{use} และ T_{so} ก็สามารถหาค่าอุณหภูมิส่วนควบแน่นอย่างง่ายได้

$$T_{se} = T_{so} - Q_{use} Z_{total} \quad (4.21)$$

ค่าอุณหภูมิส่วนควบแน่นที่ได้ จะถูกไปใช้ในการคำนวณหาความต้านทานความร้อนส่วนอื่นต่อไป โดยที่จะต้องเริ่มต้นหาค่าคุณสมบัติต่างๆ เพื่อใช้ในการคำนวณต่อไป โดยที่อุณหภูมิที่ใช้ในการหาค่าคุณสมบัติสามารถหาได้จาก

$$T_v = T_{si} + \frac{(Z_8 + Z_9)}{Z_{total}} \Delta T \quad (4.22)$$

จากอุณหภูมิ T_v จะได้ค่า Vapour pressure , Density of vapour , Density of liquid , Latent heat , Surface tension , Dynamic viscosity , Figure of Merit for condensation และ Figure of Merit for nucleate boiling เพื่อนำไปคำนวณต่อไป

$$T_p = T_v + \frac{dT_s}{dH} L_e F \quad (4.23)$$

$$\Delta T_h = \frac{T_p - T_v}{2} F \quad (4.24)$$

$$\Delta T = T_{so} - T_{se} - \Delta T_h \quad (4.25)$$

เมื่อได้ค่าอุณหภูมิ ΔT ก็นำไปคำนวณหาค่าความร้อนใหม่ได้จาก

$$Q = \frac{\Delta T}{Z_{total}} \quad (4.26)$$

จากนั้นนำค่าความร้อนไปหาค่า liquid-film Reynold number จาก

$$Re_f = \frac{4\dot{Q}}{L\mu\pi D} \quad (4.27)$$

คำนวณหาค่าความต้านทานความร้อน Z_3, Z_7 จาก

$$Z_7 = \frac{C\dot{Q}^{1/3}}{D^{4/3} g^{1/3} L_c \Phi_2^{4/3}} \quad (4.28)$$

$$Z_{3f} = \frac{C\dot{Q}^{1/3}}{D^{4/3} g^{1/3} L_e \Phi_2^{4/3}} \quad (4.29)$$

$$Z_{3p} = \frac{1}{\Phi_2 g^{0.2} \dot{Q}^{0.4} (\pi D L_e)^{0.6}} \quad (4.30)$$

$$Z_3 = Z_{3p}F + Z_{3f}(1 - F) \quad (4.31)$$

เมื่อได้ค่าความต้านทานความร้อนเรียบร้อยแล้ว นำมาคำนวณค่าความต้านทานความร้อนรวมจาก

$$Z_{total,new} = Z_2 + Z_3 + Z_7 + Z_8 + Z_9 \quad (4.32)$$

จากนั้นนำไปหาค่าความร้อนของท่อเทอร์โมไซฟอนได้จาก

$$Q_{new} = \frac{\Delta T}{Z_{total,new}} \quad (4.33)$$

ดังนั้น อุณหภูมิส่วนควบแน่นของท่อเทอร์โมไซฟอน สามารถได้จาก

$$T_{se,new} = T_{so} - Q_{new} Z_{total,new} \quad (4.34)$$

จากการสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์เพื่อหาค่าความร้อนโดยการแปรค่าความเข้มแสงอาทิตย์ตั้งแต่ 0.4 เมกะจูลต่อตารางเมตร ถึง 4.0 เมกะจูลต่อตารางเมตร ที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมคงที่ 30 องศาเซลเซียส จะได้ผลการคำนวณดังต่อไปนี้

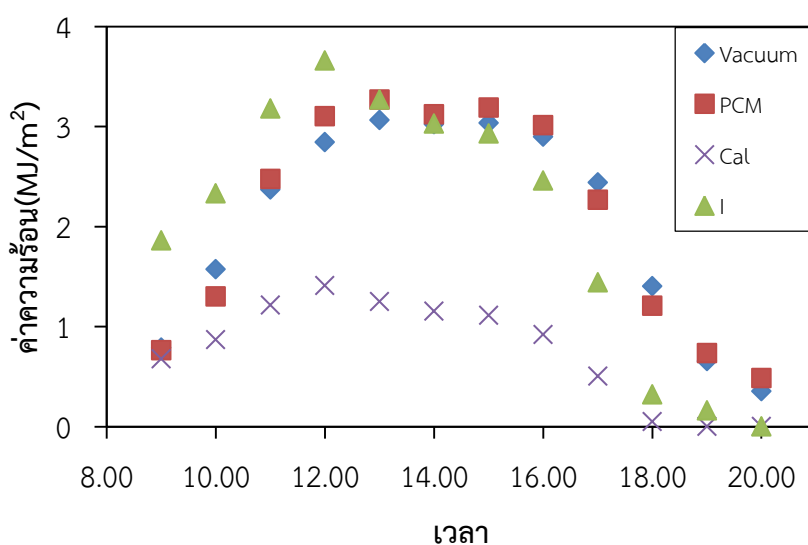
ตารางที่ 4.4 ผลการคำนวณหาค่าความร้อนจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

| ค่าความเข้มแสง (MJ) | ความร้อนสูญเสีย (W) | ค่าความร้อน (W) |
|------------------------|------------------------|--------------------|
| 0.40 | 41.74 | 3.15 |
| 0.60 | 41.74 | 6.37 |
| 0.80 | 41.74 | 9.61 |
| 1.00 | 41.74 | 12.84 |
| 1.20 | 41.74 | 16.08 |
| 1.40 | 41.74 | 19.31 |
| 1.60 | 41.74 | 22.55 |
| 1.80 | 41.74 | 25.79 |
| 2.00 | 41.74 | 29.03 |
| 2.20 | 41.74 | 32.27 |
| 2.40 | 41.74 | 35.51 |
| 2.60 | 41.74 | 38.75 |
| 2.80 | 41.74 | 41.99 |

ตารางที่ 4.4 ผลการคำนวณหาค่าความร้อนจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์(ต่อ)

| ค่าความเข้มแสง (MJ) | ความร้อนสูญเสีย (W) | ค่าความร้อน (W) |
|------------------------|------------------------|--------------------|
| 3.00 | 41.74 | 45.23 |
| 3.20 | 41.74 | 48.47 |
| 3.40 | 41.74 | 51.71 |
| 3.60 | 41.74 | 54.95 |
| 3.80 | 41.74 | 58.19 |
| 4.00 | 41.74 | 61.43 |

จากการคำนวณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์พบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มแสงอาทิตย์ขึ้นตั้งแต่ 0.4 เมกะจูลต่อตารางเมตร ถึง 4.0 เมกะจูลต่อตารางเมตร มีผลทำให้ค่าความร้อนของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์มีค่าเพิ่มขึ้น การที่ค่าความร้อนสูญเสียมีค่าเท่าเดิม เนื่องจากการคงที่ค่าอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมที่ 30 องศาเซลเซียส การคำนวณความร้อนสูญเสียจะเป็นเริ่มต้นการคำนวณจากอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีการสะสมพลังงานความร้อนโดยมีการใช้วัสดุเปลี่ยนสถานะกับช่วงเวลาของวันที่ 29 มิถุนายน 2557

จากรูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีการสะสมพลังงานความร้อนโดยมีการใช้วัสดุ

เปลี่ยนสถานะกับช่วงเวลาของวันที่ 29 มิถุนายน 2557 ค่าความร้อนที่คำนวณได้จากแบบจำลองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตั้งแต่ช่วงเวลา 9.00 น. จนถึงช่วงเวลา 12.00 น. ตามการเพิ่มขึ้นของความเข้มแสงอาทิตย์ และหลังจากช่วงเวลา 12.00 น. ก็มีค่าลดลงตามแนวโน้มการลดลงของค่าความเข้มแสงอาทิตย์ ค่าความร้อนที่ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีค่าสูงสุดที่เวลา 12.00 น. คือ 1.41 MJ/m² และมีความคาดเคลื่อนจากค่าความร้อนที่ได้จากการทดลองเฉลี่ยที่ 58.4%



บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาผลของมุมเอียงและอัตราการไหลที่มีผลต่อสมรรถนะทางความร้อนของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศร่วมกับท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน และแบบท่อท่อสุญญากาศร่วมกับท่อเทอร์โมไซฟอนที่บรรจุสารเปลี่ยนสถานะ (พาราฟิน) โดยมีการแปรค่ามุมเอียงการทำงานของตัวรับรังสีคือมุม 14 30 และ 45 องศา วัดจากแนวราบ และแปรค่าอัตราการไหลที่ 0.25 0.5 และ 1.0 ลิตรต่อนาที ทำการทดลองตั้งแต่เวลา 8.00 น. ถึงเวลา 20.00 น. ตั้งแต่ 12 พ.ค. 2557 ถึง 10 ต.ค. 2557 ซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

5.1.1 สมรรถนะทางความร้อนของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

5.1.1.1 การถ่ายเทความร้อนของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

ค่าการถ่ายเทความร้อนของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ โดยใช้ตัวรับรังสีแบบท่อสุญญากาศร่วมกับท่อเทอร์โมไซฟอนแบบธรรมดา และแบบมีการบรรจุวัสดุเปลี่ยนสถานะ (พาราฟิน) ที่ถูกคำนวณโดยวิธีการคาลอริฟิก (Calorific Method) สามารถสรุปได้ว่าเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ตัวรับรังสีแบบท่อสุญญากาศร่วมกับท่อเทอร์โมไซฟอนแบบธรรมดามีการถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่าในช่วงแรก ประมาณช่วงเวลา 9.00 น. ถึงช่วงเวลาประมาณ 12.00 น. หลังจากนั้นเมื่อความเข้มแสงมีค่าลดน้อยลงไป หลังช่วงเวลา 13.00 น. เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบมีการบรรจุวัสดุเปลี่ยนสถานะ (พาราฟิน) จะมีการถ่ายเทความร้อนที่ดีกว่าเนื่องจากได้รับความร้อนจากการคายความร้อนของวัสดุเปลี่ยนสถานะ (พาราฟิน)

5.1.1.2 ประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

ประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ตัวรับรังสีแบบท่อสุญญากาศร่วมกับท่อเทอร์โมไซฟอนแบบธรรมดา และเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบมีการบรรจุวัสดุเปลี่ยนสถานะ (พาราฟิน) ที่ถูกคำนวณโดยใช้สมการของ Hottel-Whillier-Bliss ค่าประสิทธิภาพสูงสุดของตัวรับรังสีอาทิตย์ของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ โดยใช้ตัวรับรังสีแบบท่อสุญญากาศร่วมกับท่อเทอร์โมไซฟอนแบบธรรมดา และแบบมีวัสดุเปลี่ยนสถานะ (พาราฟิน) ที่อัตราการไหล 0.25 ลิตรต่อนาที มีค่าเท่ากับ 58.6% และ 74.9% ตามลำดับ ที่อัตราการไหล 0.5 ลิตรต่อนาที มีค่าเท่ากับ 69.2% และ 83.6% ตามลำดับ และที่อัตราการไหล 1.0

ลิตรต่อนาที มีค่าเท่ากับ 73.5% และ 87.0% ตามลำดับ จึงสามารถสรุปได้ว่าเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบที่มีการบรรจุวัสดุเปลี่ยนสถานะ (พาราฟิน) มีประสิทธิภาพมากกว่าเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบธรรมดาทั้ง 3 อัตราการไหล

5.1.1.3 ผลของอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

จากการแปรค่าอัตราการไหลที่ 0.25 0.5 และ 1.0 ลิตรต่อนาที ที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ ค่าประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ตัวรับรังสีแบบท่อสุญญากาศร่วมกับท่อเทอร์โมไซฟอนแบบธรรมดา มีค่าเท่ากับ 58.6% 69.2% และ 73.5% ตามลำดับ และมีค่า 74.9% 83.6% และ 87% ตามลำดับ สำหรับเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบที่มีการบรรจุวัสดุเปลี่ยนสถานะ (พาราฟิน) ซึ่งที่ถูกคำนวณโดยใช้สมการของ Hottel-Whillier-Bliss จากผลการไหลของน้ำหล่อเย็นสามารถสรุปได้ว่า เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นเพิ่มขึ้น ทำให้การถ่ายเทความร้อนเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้ตัวรับรังสีแบบท่อสุญญากาศร่วมกับท่อเทอร์โมไซฟอนแบบธรรมดา และแบบที่มีการบรรจุวัสดุเปลี่ยนสถานะ (พาราฟิน) มีค่าเพิ่มขึ้นทั้งสองแบบ ทำให้ค่าประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ทั้งสองแบบมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

5.1.1.4 ผลของมุมเอียงการทำงานของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

มุมเอียงการทำงานของตัวรับรังสีที่ใช้ในการแปรค่าเพื่อหาผลของมุมเอียงของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้ตัวรับรังสีแบบท่อสุญญากาศร่วมกับท่อเทอร์โมไซฟอนแบบธรรมดา และแบบมีการบรรจุวัสดุเปลี่ยนสถานะ (พาราฟิน) คือมุม 14 30 และ 45 องศา วัดจากแนวราบ จากทดลองพบว่า ค่าประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ตัวรับรังสีแบบท่อสุญญากาศร่วมกับท่อเทอร์โมไซฟอนแบบธรรมดา มีค่าเท่ากับ 69.2% 76.7% และ 62.5% ตามลำดับ และมีค่า 83.6% 88.0% และ 60.3% ตามลำดับ สำหรับเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบที่มีการบรรจุวัสดุเปลี่ยนสถานะ (พาราฟิน) ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า ค่าประสิทธิภาพเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ทั้งสองแบบจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมุมเอียงการทำงานของตัวรับรังสีอาทิตย์เพิ่มขึ้นจากมุม 14 องศา ไปเป็น 30 องศา และจะมีประสิทธิภาพลดลงเมื่อเพิ่มมุมเอียงการทำงานของตัวรับรังสีอาทิตย์จาก 30 องศา ไปเป็น 45 องศา ดังนั้นมุมเอียงการทำงานที่ดีที่สุดของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ทั้งสองแบบคือมุม 30 องศา วัดจากแนวระดับ นอกจากนี้ยังพบว่า ค่าประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีการบรรจุวัสดุเปลี่ยนสถานะในทุกมุมเอียงการทำงานจะมีค่าประสิทธิภาพสูงกว่าเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้ตัวรับรังสีแบบท่อสุญญากาศร่วมกับท่อเทอร์โมไซฟอนแบบธรรมดา

5.1.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีการสะสมพลังงานความร้อนโดยมีการใช้วัสดุเปลี่ยนสถานะ

จากการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อคำนวณหาค่าความร้อนของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีการบรรจุวัสดุเปลี่ยนสถานะ เริ่มต้นด้วยการคำนวณความร้อนสูญเสียจากการกำหนดค่าอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม เมื่อได้ค่าความร้อนสูญเสียแล้วจะนำไปคำนวณหาค่าความร้อนของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ โดยอาศัยสมการการนำความร้อนในการถ่ายเทความร้อน ค่าความร้อนที่ได้จากการคำนวณจากแบบจำลองมีค่าความคาดเคลื่อนจากค่าความร้อนที่ได้จากการทดลองเฉลี่ยที่ 58.4%

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ต้องสามารถคำนวณค่าความร้อนได้ในแต่ละสถานะของวัสดุเปลี่ยนสถานะ เพื่อให้มีความใกล้เคียงกับการทดลองมากที่สุด

5.2.2 ต้องการค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของวัสดุเปลี่ยนสถานะ เพื่อนำมาใช้ในการคำนวณเวลาที่ใช้ในการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งไปเป็นของเหลว และจากของเหลวไปเป็นของแข็ง

5.2.3 สามารถพัฒนาเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ให้สะสมพลังงานความร้อนในรูปการเปลี่ยนสถานะให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น โดยการเพิ่มปริมาณวัสดุเปลี่ยนในถังเก็บน้ำร้อน

5.2.4 สามารถนำหลักการเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อนแฝงของวัสดุเปลี่ยนสถานะไปประยุกต์ใช้กับแผงรับรังสีประเภทอื่นๆ เช่น แผงรับรังสีอาทิตย์สำหรับการผลิตอากาศร้อนเพื่อนการอบแห้ง

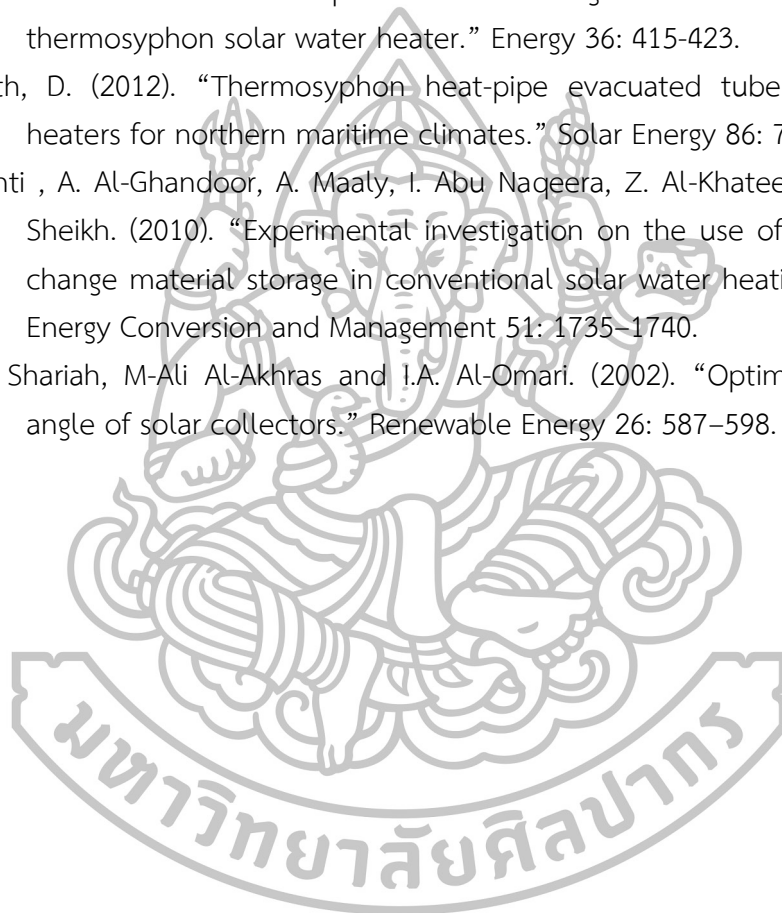
5.2.5 เพื่อเป็นเพิ่มประสิทธิภาพได้สูงสุด สามารถพัฒนาให้ตัวรับรังสีอาทิตย์ให้ปรับทิศทางรับแสงได้โดยตรงตลอดทั้งวัน

5.2.6 ควรมีการหุ้มฉนวนที่ท่อต่างๆ เพื่อป้องกันความร้อนสูญเสียความร้อนสู่สิ่งแวดล้อม

รายการอ้างอิง

- [1] Janchai, S. and Laksanaboonsong. (1999). "Solar potential map from satellite data for Thailand.", Jirangratchata Printing. Bangkok.
- [2] M.S. Hossain, R. Saidur, H. Fayaz, N.A. Rahim, M.R. Islam, J.U. Ahamed, M.M. Rahman. (2012). "Review on solar water heater collector and thermal energy performance of circulating pipe." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15: 3801–3812.
- [3] Atul Sharma , V.V. Tyagi , C.R. Chen , D. Buddhi. (2009). "Review on thermal energy storage with phase change materials and applications." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13: 318–345.
- [4] Francis Agyenim, Neil Hewitt, Philip Eames and Mervyn Smyth. (2010). "A review of materials, heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems (LHTESS)." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14: 615–628.
- [5] Ahmet Kurklu , Aziz Ozmerzi and Sefai Bilgin. (2002). "Thermal performance of a water-phase change material solar collector." *Renewable Energy* 26: 391–399.
- [6] M. Smyth, P.C. Eames and B. Norton. (2006). "Integrated collector storage solar water heaters." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 10: 503–538.
- [7] การทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ [Online]. Accessed 16 September 2009. Available from <http://www.eren.doe.gov/consumerinfo/factsheet.html>
1.Solar Heating and You 2.Solar Water Heating 3.Sonspace Heating
- [8] กระทรวงอุตสาหกรรม. (2009). Vacuum Tube Solar Collector. Accessed September 16. Available from [http://www.thailandindustry.com/home/FeatureStory_](http://www.thailandindustry.com/home/FeatureStory_preview.php?id=12158§ion=9&rcount=Y)
[preview.php?id=12158§ion=9&rcount=Y](http://www.thailandindustry.com/home/FeatureStory_preview.php?id=12158§ion=9&rcount=Y)
- [9] Glenn Reserch Center. (2009). Thermosyphon. Accessed September 12. Available from <http://www.grc.nasa.gov/www/rt/2003/5000/5870plactha.html>
- [10] The Institution of Mechanical Engineers. (1983). ESDU 81083 Heat pipes - performance of two-phase closed thermosyphons. London.

- [11] Huseyin Benli , Aydin Durmus.(2009). “Performance analysis of a latent heat storage system with phase change material for new designed solar collectors in greenhouse heating.” *Solar Energy* 83: 2109–2119.
- [12] Hussein, H. (2002). “Transient investigation of a two phase closed thermosyphon flat plate solar water heater.” *Energy Conversion and Management* 43: 2479-2492.
- [13] Chien, C.C., Kung, C.K., Chang, C.C., Lee, W.S., Jwo, C.H. and Chen, S.L., (2011). “Theoretical and experimental investigations of a two-phase thermosyphon solar water heater.” *Energy* 36: 415-423.
- [14] Redpath, D. (2012). “Thermosyphon heat-pipe evacuated tube solar water heaters for northern maritime climates.” *Solar Energy* 86: 705–715.
- [15] I. Al-Hinti , A. Al-Ghandoor, A. Maaly, I. Abu Naqera, Z. Al-Khateeb and O. Al-Sheikh. (2010). “Experimental investigation on the use of water-phase change material storage in conventional solar water heating systems.” *Energy Conversion and Management* 51: 1735–1740.
- [16] Adnan Shariah, M-Ali Al-Akhras and I.A. Al-Omari. (2002). “Optimizing the tilt angle of solar collectors.” *Renewable Energy* 26: 587–598.





ตารางที่ ก.1 ตารางแสดงผลการทดลองอัตราการไหล 0.25 ลิตรต่อนาที มุมเอียง 14 องศา วัดจากแนวราบ ครั้งที่ 1

| Time | l | T _{amb} | Vacuum | | | | | | |
|-------|------|------------------|-----------------|-------------------|-------------------|------------------|-------|----------|-----------------------|
| | | | T _{in} | T _{evap} | T _{cond} | T _{out} | ΔT | Q(J) | Q(MJ/m ²) |
| 9.00 | 1.11 | 31.46 | 27.20 | 45.35 | 32.47 | 31.02 | 1.91 | 4908.90 | 0.29 |
| 10.00 | 1.80 | 34.14 | 27.74 | 48.29 | 36.23 | 32.92 | 5.18 | 13319.87 | 0.80 |
| 11.00 | 2.17 | 35.42 | 28.36 | 51.01 | 39.97 | 36.02 | 7.67 | 19732.11 | 1.18 |
| 12.00 | 1.90 | 34.64 | 28.43 | 50.23 | 38.93 | 37.01 | 8.58 | 22080.40 | 1.32 |
| 13.00 | 2.78 | 37.92 | 29.20 | 53.31 | 43.29 | 38.15 | 8.96 | 23047.60 | 1.38 |
| 14.00 | 2.02 | 36.47 | 29.13 | 52.04 | 42.08 | 39.86 | 10.74 | 27634.81 | 1.66 |
| 15.00 | 1.62 | 34.80 | 28.88 | 50.06 | 39.21 | 38.06 | 9.18 | 23633.06 | 1.42 |
| 16.00 | 1.17 | 33.85 | 28.42 | 47.94 | 36.35 | 36.22 | 7.81 | 20090.25 | 1.21 |
| 17.00 | 0.79 | 33.35 | 28.07 | 45.88 | 33.62 | 34.25 | 6.18 | 15906.21 | 0.95 |
| 18.00 | 0.39 | 31.77 | 27.75 | 43.22 | 31.01 | 32.05 | 4.30 | 11076.66 | 0.66 |
| 19.00 | 0.06 | 30.25 | 27.23 | 39.83 | 28.80 | 29.79 | 2.56 | 6594.53 | 0.40 |
| 20.00 | 0.00 | 29.74 | 26.91 | 36.51 | 27.75 | 28.29 | 1.38 | 3550.13 | 0.21 |

| Time | l | T _{amb} | PCM | | | | | | |
|-------|------|------------------|-----------------|-------------------|-------------------|------------------|-------|----------|-----------------------|
| | | | T _{in} | T _{evap} | T _{cond} | T _{out} | ΔT | Q(J) | Q(MJ/m ²) |
| 9.00 | 1.11 | 31.46 | 29.43 | 61.07 | 32.38 | 31.04 | 1.61 | 4145.44 | 0.25 |
| 10.00 | 1.80 | 34.14 | 28.32 | 68.58 | 34.83 | 32.24 | 3.92 | 10094.45 | 0.61 |
| 11.00 | 2.17 | 35.42 | 28.95 | 74.21 | 45.65 | 36.41 | 7.46 | 19191.68 | 1.15 |
| 12.00 | 1.90 | 34.64 | 28.88 | 74.34 | 50.24 | 39.04 | 10.15 | 26131.48 | 1.57 |
| 13.00 | 2.78 | 37.92 | 29.84 | 77.55 | 57.65 | 41.32 | 11.48 | 29537.04 | 1.77 |
| 14.00 | 2.02 | 36.47 | 29.75 | 76.76 | 56.86 | 43.51 | 13.76 | 35413.14 | 2.12 |
| 15.00 | 1.62 | 34.80 | 29.43 | 73.90 | 50.35 | 40.65 | 11.22 | 28880.80 | 1.73 |
| 16.00 | 1.17 | 33.85 | 28.92 | 71.33 | 43.84 | 38.14 | 9.22 | 23723.13 | 1.42 |
| 17.00 | 0.79 | 33.35 | 28.64 | 68.60 | 38.98 | 36.37 | 7.74 | 19905.81 | 1.19 |
| 18.00 | 0.39 | 31.77 | 28.21 | 65.25 | 35.24 | 33.94 | 5.73 | 14748.15 | 0.88 |
| 19.00 | 0.06 | 30.25 | 27.56 | 60.93 | 32.27 | 31.54 | 3.98 | 10233.84 | 0.61 |
| 20.00 | 0.00 | 29.74 | 27.22 | 58.35 | 30.47 | 29.81 | 2.59 | 6655.17 | 0.40 |

ตารางที่ ก.2 ตารางแสดงผลการทดลองอัตราการไหล 0.25 ลิตรต่อนาที มุมเอียง 14 องศา วัดจากแนวราบ ครั้งที่ 2

| Time | I | T _{amb} | Vacuum | | | | | | |
|-------|------|------------------|-----------------|-------------------|-------------------|------------------|-------|----------|-----------------------|
| | | | T _{in} | T _{evap} | T _{cond} | T _{out} | ΔT | Q(J) | Q(MJ/m ²) |
| 9.00 | 1.56 | 32.13 | 28.87 | 48.20 | 35.87 | 33.64 | 4.77 | 12269.03 | 0.74 |
| 10.00 | 2.63 | 33.37 | 28.90 | 52.36 | 41.93 | 37.05 | 8.14 | 20958.79 | 1.26 |
| 11.00 | 2.93 | 35.43 | 29.28 | 54.29 | 44.59 | 39.99 | 10.71 | 27568.33 | 1.65 |
| 12.00 | 1.89 | 35.10 | 28.94 | 51.93 | 41.47 | 38.65 | 9.70 | 24971.27 | 1.50 |
| 13.00 | 3.17 | 34.90 | 29.04 | 54.09 | 44.46 | 40.34 | 11.29 | 29065.23 | 1.74 |
| 14.00 | 1.47 | 33.70 | 28.46 | 49.91 | 38.97 | 37.43 | 8.97 | 23088.34 | 1.39 |
| 15.00 | 2.55 | 35.83 | 28.88 | 52.70 | 41.78 | 37.82 | 8.94 | 23013.28 | 1.38 |
| 16.00 | 2.22 | 38.13 | 29.36 | 54.04 | 44.20 | 39.50 | 10.14 | 26097.16 | 1.57 |
| 17.00 | 1.19 | 33.95 | 28.47 | 49.62 | 38.63 | 37.86 | 9.40 | 24179.93 | 1.45 |
| 18.00 | 0.49 | 32.22 | 27.85 | 44.76 | 32.77 | 33.45 | 5.59 | 14390.00 | 0.86 |
| 19.00 | 0.07 | 30.11 | 27.29 | 40.52 | 29.35 | 29.98 | 2.69 | 6920.50 | 0.42 |
| 20.00 | 0.00 | 29.30 | 26.83 | 36.70 | 27.84 | 28.21 | 1.38 | 3552.24 | 0.21 |

| Time | I | T _{amb} | PCM | | | | | | |
|-------|------|------------------|-----------------|-------------------|-------------------|------------------|-------|----------|-----------------------|
| | | | T _{in} | T _{evap} | T _{cond} | T _{out} | ΔT | Q(J) | Q(MJ/m ²) |
| 9.00 | 1.56 | 32.13 | 29.15 | 63.48 | 34.40 | 32.62 | 3.47 | 8917.08 | 0.54 |
| 10.00 | 2.63 | 33.37 | 29.47 | 74.36 | 44.47 | 36.60 | 7.13 | 18342.43 | 1.10 |
| 11.00 | 2.93 | 35.43 | 30.00 | 78.56 | 58.35 | 43.07 | 13.08 | 33652.45 | 2.02 |
| 12.00 | 1.89 | 35.10 | 29.67 | 76.13 | 55.50 | 41.92 | 12.25 | 31518.61 | 1.89 |
| 13.00 | 3.17 | 34.90 | 29.88 | 79.95 | 60.89 | 45.10 | 15.22 | 39170.41 | 2.35 |
| 14.00 | 1.47 | 33.70 | 29.09 | 74.34 | 51.45 | 40.61 | 11.53 | 29661.42 | 1.78 |
| 15.00 | 2.55 | 35.83 | 29.80 | 77.29 | 55.85 | 41.94 | 12.14 | 31252.69 | 1.88 |
| 16.00 | 2.22 | 38.13 | 30.20 | 79.34 | 59.58 | 44.14 | 13.94 | 35869.93 | 2.15 |
| 17.00 | 1.19 | 33.95 | 29.12 | 74.17 | 50.21 | 40.95 | 11.83 | 30437.75 | 1.83 |
| 18.00 | 0.49 | 32.22 | 28.32 | 67.36 | 37.78 | 35.42 | 7.10 | 18273.80 | 1.10 |
| 19.00 | 0.07 | 30.11 | 27.46 | 61.91 | 33.00 | 31.72 | 4.26 | 10967.28 | 0.66 |
| 20.00 | 0.00 | 29.30 | 27.04 | 58.44 | 30.66 | 29.79 | 2.76 | 7091.82 | 0.43 |

ตารางที่ ก.3 ตารางแสดงผลการทดลองอัตราการไหล 0.25 ลิตรต่อนาที มุมเอียง 14 องศา วัดจากแนวราบ ครั้งที่ 3

| Time | I | T _{amb} | Vacuum | | | | | | |
|-------|------|------------------|-----------------|-------------------|-------------------|------------------|-------|----------|-----------------------|
| | | | T _{in} | T _{evap} | T _{cond} | T _{out} | ΔT | Q(J) | Q(MJ/m ²) |
| 9.00 | 1.21 | 33.76 | 34.72 | 53.04 | 42.62 | 38.03 | 3.31 | 8522.49 | 0.51 |
| 10.00 | 1.59 | 35.88 | 33.42 | 57.70 | 49.48 | 44.18 | 10.76 | 27679.85 | 1.66 |
| 11.00 | 2.60 | 35.33 | 30.43 | 58.16 | 49.80 | 44.91 | 14.48 | 37266.04 | 2.24 |
| 12.00 | 1.94 | 36.29 | 30.09 | 55.64 | 46.94 | 44.01 | 13.93 | 35842.19 | 2.15 |
| 13.00 | 2.11 | 38.39 | 30.02 | 54.41 | 44.83 | 42.54 | 12.53 | 32239.19 | 1.93 |
| 14.00 | 2.02 | 37.80 | 30.30 | 55.17 | 45.63 | 42.14 | 11.83 | 30448.48 | 1.83 |
| 15.00 | 2.12 | 37.58 | 30.47 | 55.15 | 45.67 | 42.16 | 11.69 | 30083.90 | 1.81 |
| 16.00 | 1.72 | 36.78 | 30.73 | 54.30 | 45.56 | 42.42 | 11.69 | 30083.90 | 1.81 |
| 17.00 | 0.16 | 32.76 | 29.11 | 50.84 | 40.65 | 40.42 | 11.31 | 29110.27 | 1.75 |
| 18.00 | 0.11 | 30.51 | 28.09 | 46.72 | 35.75 | 36.70 | 8.61 | 22149.03 | 1.33 |
| 19.00 | 0.02 | 28.78 | 27.45 | 41.43 | 31.52 | 32.62 | 5.17 | 13298.42 | 0.80 |
| 20.00 | 0.00 | 28.77 | 27.28 | 37.30 | 29.37 | 30.02 | 2.74 | 7053.85 | 0.42 |

| Time | I | T _{amb} | PCM | | | | | | |
|-------|------|------------------|-----------------|-------------------|-------------------|------------------|-------|----------|-----------------------|
| | | | T _{in} | T _{evap} | T _{cond} | T _{out} | ΔT | Q(J) | Q(MJ/m ²) |
| 9.00 | 1.21 | 33.76 | 34.49 | 67.08 | 38.01 | 36.95 | 2.46 | 6335.03 | 0.38 |
| 10.00 | 1.59 | 35.88 | 32.56 | 78.14 | 55.73 | 42.86 | 10.30 | 26500.34 | 1.59 |
| 11.00 | 2.60 | 35.33 | 29.52 | 78.53 | 59.13 | 42.26 | 12.74 | 32779.61 | 1.97 |
| 12.00 | 1.94 | 36.29 | 29.67 | 76.73 | 56.84 | 41.96 | 12.29 | 31619.44 | 1.90 |
| 13.00 | 2.11 | 38.39 | 29.65 | 75.04 | 53.24 | 41.19 | 11.53 | 29682.87 | 1.78 |
| 14.00 | 2.02 | 37.80 | 29.96 | 76.11 | 55.71 | 42.45 | 12.49 | 32153.40 | 1.93 |
| 15.00 | 2.12 | 37.58 | 30.05 | 76.99 | 57.17 | 43.70 | 13.65 | 35127.91 | 2.11 |
| 16.00 | 1.72 | 36.78 | 30.25 | 76.95 | 56.81 | 44.28 | 14.02 | 36090.82 | 2.17 |
| 17.00 | 0.16 | 32.76 | 29.09 | 72.22 | 46.22 | 40.71 | 11.62 | 29910.19 | 1.79 |
| 18.00 | 0.11 | 30.51 | 28.14 | 67.63 | 38.75 | 36.42 | 8.28 | 21312.65 | 1.28 |
| 19.00 | 0.02 | 28.78 | 27.32 | 61.76 | 33.83 | 32.36 | 5.04 | 12981.03 | 0.78 |
| 20.00 | 0.00 | 28.77 | 27.18 | 58.49 | 31.44 | 30.35 | 3.17 | 8152.85 | 0.49 |

ตารางที่ ก.4 ตารางแสดงผลการทดลองอัตราการไหล 0.5 ลิตรต่อนาที มุมเอียง 14 องศา วัดจากแนวราบ ครั้งที่ 1

| Time | I | T _{amb} | Vacuum | | | | | | |
|-------|------|------------------|-----------------|-------------------|-------------------|------------------|------|----------|----------|
| | | | T _{in} | T _{evap} | T _{cond} | T _{out} | ΔT | Q(J) | Q(MJ/m2) |
| 9.00 | 2.08 | 31.89 | 29.63 | 47.86 | 34.40 | 30.23 | 0.60 | 3076.83 | 0.18 |
| 10.00 | 2.45 | 33.08 | 30.39 | 49.46 | 37.17 | 33.02 | 2.63 | 13383.80 | 0.80 |
| 11.00 | 3.05 | 34.08 | 31.93 | 55.57 | 45.24 | 37.26 | 5.34 | 27140.54 | 1.63 |
| 12.00 | 3.16 | 35.45 | 33.19 | 57.45 | 48.03 | 40.16 | 6.96 | 35413.24 | 2.12 |
| 13.00 | 2.87 | 36.93 | 33.46 | 57.73 | 48.14 | 41.01 | 7.54 | 38362.93 | 2.30 |
| 14.00 | 3.39 | 37.81 | 33.51 | 56.95 | 46.96 | 40.82 | 7.31 | 37176.27 | 2.23 |
| 15.00 | 2.98 | 38.12 | 33.43 | 55.21 | 45.71 | 40.16 | 6.73 | 34226.58 | 2.05 |
| 16.00 | 2.34 | 39.90 | 33.19 | 53.75 | 43.99 | 39.08 | 5.89 | 29954.61 | 1.80 |
| 17.00 | 1.48 | 40.41 | 32.41 | 50.34 | 39.07 | 37.40 | 4.99 | 25369.03 | 1.52 |
| 18.00 | 0.38 | 34.48 | 31.15 | 45.73 | 33.65 | 33.59 | 2.44 | 12392.09 | 0.74 |
| 19.00 | 0.01 | 29.90 | 30.20 | 42.44 | 31.01 | 31.50 | 1.30 | 6585.95 | 0.40 |
| 20.00 | 0.00 | 30.66 | 29.72 | 39.03 | 29.72 | 30.34 | 0.62 | 3168.12 | 0.19 |

| Time | I | T _{amb} | PCM | | | | | | |
|-------|------|------------------|-----------------|-------------------|-------------------|------------------|------|----------|----------|
| | | | T _{in} | T _{evap} | T _{cond} | T _{out} | ΔT | Q(J) | Q(MJ/m2) |
| 9.00 | 2.08 | 31.89 | 30.06 | 48.78 | 31.15 | 30.34 | 0.28 | 1437.55 | 0.09 |
| 10.00 | 2.45 | 33.08 | 31.45 | 61.57 | 35.14 | 32.41 | 0.96 | 4882.25 | 0.29 |
| 11.00 | 3.05 | 34.08 | 34.07 | 77.01 | 49.73 | 38.44 | 4.37 | 22215.92 | 1.33 |
| 12.00 | 3.16 | 35.45 | 36.25 | 80.97 | 62.26 | 43.97 | 7.73 | 39286.83 | 2.36 |
| 13.00 | 2.87 | 36.93 | 36.90 | 81.74 | 65.06 | 45.48 | 8.58 | 43652.03 | 2.62 |
| 14.00 | 3.39 | 37.81 | 37.14 | 80.70 | 64.30 | 45.46 | 8.32 | 42329.75 | 2.54 |
| 15.00 | 2.98 | 38.12 | 36.71 | 79.56 | 62.72 | 44.56 | 7.85 | 39914.06 | 2.39 |
| 16.00 | 2.34 | 39.90 | 36.27 | 77.07 | 59.57 | 43.10 | 6.83 | 34726.67 | 2.08 |
| 17.00 | 1.48 | 40.41 | 35.31 | 72.89 | 52.16 | 40.76 | 5.45 | 27699.97 | 1.66 |
| 18.00 | 0.38 | 34.48 | 33.03 | 66.22 | 40.16 | 35.96 | 2.93 | 14892.55 | 0.89 |
| 19.00 | 0.01 | 29.90 | 31.22 | 61.88 | 35.46 | 33.26 | 2.05 | 10400.20 | 0.62 |
| 20.00 | 0.00 | 30.66 | 29.82 | 58.88 | 32.51 | 31.35 | 1.53 | 7786.92 | 0.47 |

ตารางที่ ก.5 ตารางแสดงผลการทดลองอัตราการไหล 0.5 ลิตรต่อนาที มุมเอียง 14 องศา วัดจากแนวราบ ครั้งที่ 2

| Time | I | T _{amb} | Vacuum | | | | | | |
|-------|------|------------------|-----------------|-------------------|-------------------|------------------|------|----------|-----------------------|
| | | | T _{in} | T _{evap} | T _{cond} | T _{out} | ΔT | Q(J) | Q(MJ/m ²) |
| 9.00 | 2.22 | 31.89 | 32.24 | 48.73 | 37.89 | 33.65 | 1.54 | 9149.73 | 0.55 |
| 10.00 | 2.73 | 33.08 | 31.54 | 52.14 | 42.15 | 36.30 | 4.80 | 28596.01 | 1.72 |
| 11.00 | 3.11 | 34.08 | 32.16 | 54.03 | 44.49 | 37.34 | 5.21 | 31043.55 | 1.86 |
| 12.00 | 3.32 | 35.45 | 32.69 | 54.53 | 45.03 | 37.97 | 5.32 | 31674.06 | 1.90 |
| 13.00 | 3.58 | 36.93 | 33.24 | 56.68 | 47.01 | 39.23 | 6.01 | 35814.52 | 2.15 |
| 14.00 | 2.50 | 37.81 | 33.23 | 55.62 | 45.99 | 39.61 | 6.40 | 38137.95 | 2.29 |
| 15.00 | 2.49 | 38.12 | 32.66 | 52.19 | 42.70 | 37.71 | 5.08 | 30274.04 | 1.82 |
| 16.00 | 2.17 | 39.90 | 32.88 | 53.78 | 44.64 | 38.37 | 5.51 | 32815.91 | 1.97 |
| 17.00 | 1.46 | 40.41 | 32.63 | 52.53 | 43.27 | 38.22 | 5.60 | 33352.09 | 2.00 |
| 18.00 | 0.21 | 34.48 | 30.93 | 44.67 | 33.99 | 33.88 | 2.99 | 17812.93 | 1.07 |
| 19.00 | 0.05 | 29.90 | 29.31 | 40.13 | 30.04 | 30.19 | 0.92 | 5490.83 | 0.33 |
| 20.00 | 0.00 | 30.66 | 28.99 | 37.25 | 29.11 | 29.17 | 0.17 | 996.17 | 0.06 |

| Time | I | T _{amb} | PCM | | | | | | |
|-------|------|------------------|-----------------|-------------------|-------------------|------------------|------|----------|-----------------------|
| | | | T _{in} | T _{evap} | T _{cond} | T _{out} | ΔT | Q(J) | Q(MJ/m ²) |
| 9.00 | 2.22 | 31.89 | 32.20 | 57.89 | 35.20 | 33.28 | 1.08 | 5509.48 | 0.33 |
| 10.00 | 2.73 | 33.08 | 33.34 | 69.87 | 48.27 | 37.98 | 4.64 | 23593.29 | 1.42 |
| 11.00 | 3.11 | 34.08 | 34.41 | 80.37 | 57.04 | 41.27 | 6.86 | 34887.72 | 2.09 |
| 12.00 | 3.32 | 35.45 | 35.23 | 80.46 | 59.31 | 42.77 | 7.53 | 38316.31 | 2.30 |
| 13.00 | 3.58 | 36.93 | 36.13 | 81.88 | 61.92 | 44.88 | 8.76 | 44525.07 | 2.67 |
| 14.00 | 2.50 | 37.81 | 36.46 | 81.48 | 61.63 | 45.57 | 9.12 | 46355.91 | 2.78 |
| 15.00 | 2.49 | 38.12 | 35.53 | 78.07 | 56.58 | 42.79 | 7.26 | 36926.23 | 2.22 |
| 16.00 | 2.17 | 39.90 | 36.06 | 79.61 | 58.89 | 44.03 | 7.97 | 40545.53 | 2.43 |
| 17.00 | 1.46 | 40.41 | 35.77 | 79.70 | 58.65 | 44.01 | 8.24 | 41914.42 | 2.51 |
| 18.00 | 0.21 | 34.48 | 32.57 | 69.83 | 42.49 | 37.31 | 4.74 | 24106.09 | 1.45 |
| 19.00 | 0.05 | 29.90 | 29.70 | 62.85 | 34.56 | 31.88 | 2.18 | 11091.01 | 0.67 |
| 20.00 | 0.00 | 30.66 | 29.37 | 59.25 | 32.21 | 30.52 | 1.16 | 5877.70 | 0.35 |

ตารางที่ ก.6 ตารางแสดงผลการทดลองอัตราการไหล 0.5 ลิตรต่อนาที มุมเอียง 14 องศา วัดจากแนวราบ ครั้งที่ 3

| Time | I | T _{amb} | Vacuum | | | | | | |
|-------|-------|------------------|-----------------|-------------------|-------------------|------------------|----------|------|-----------------------|
| | | | T _{in} | T _{evap} | T _{cond} | T _{out} | ΔT | Q(J) | Q(MJ/m ²) |
| 9.00 | 31.57 | 27.47 | 44.87 | 32.47 | 29.72 | 29.71 | 11985.24 | 0.72 | 27.06 |
| 10.00 | 31.80 | 28.18 | 48.23 | 37.21 | 32.48 | 32.49 | 22779.58 | 1.37 | 27.75 |
| 11.00 | 33.58 | 28.77 | 49.52 | 39.19 | 33.86 | 33.88 | 27060.02 | 1.62 | 28.43 |
| 12.00 | 34.36 | 28.97 | 49.61 | 39.17 | 34.72 | 34.74 | 30259.76 | 1.82 | 28.72 |
| 13.00 | 35.07 | 29.06 | 48.06 | 37.93 | 34.25 | 34.28 | 27547.40 | 1.65 | 28.83 |
| 14.00 | 34.95 | 29.05 | 48.81 | 38.43 | 34.24 | 34.28 | 27585.54 | 1.66 | 28.80 |
| 15.00 | 34.17 | 28.91 | 47.76 | 36.84 | 33.81 | 33.84 | 26097.98 | 1.57 | 28.67 |
| 16.00 | 33.47 | 28.51 | 47.29 | 35.93 | 32.93 | 32.96 | 23614.48 | 1.42 | 28.30 |
| 17.00 | 33.13 | 28.28 | 45.46 | 33.47 | 31.64 | 31.67 | 18083.81 | 1.09 | 28.12 |
| 18.00 | 33.19 | 28.25 | 43.77 | 32.04 | 31.31 | 31.35 | 16176.68 | 0.97 | 28.30 |
| 19.00 | 29.16 | 27.23 | 39.66 | 28.18 | 28.73 | 28.73 | 7950.60 | 0.48 | 27.19 |
| 20.00 | 27.88 | 26.62 | 35.74 | 26.80 | 27.01 | 27.00 | 2171.83 | 0.13 | 26.52 |

| Time | I | T _{amb} | PCM | | | | | | |
|-------|-------|------------------|-----------------|-------------------|-------------------|------------------|----------|------|-----------------------|
| | | | T _{in} | T _{evap} | T _{cond} | T _{out} | ΔT | Q(J) | Q(MJ/m ²) |
| 9.00 | 31.57 | 27.47 | 61.18 | 30.09 | 27.77 | 0.76 | 3331.12 | 0.20 | 0.00 |
| 10.00 | 31.80 | 28.18 | 71.37 | 38.51 | 31.17 | 3.44 | 17507.43 | 1.05 | 0.00 |
| 11.00 | 33.58 | 28.77 | 75.16 | 47.84 | 34.22 | 5.80 | 29518.09 | 1.77 | 0.00 |
| 12.00 | 34.36 | 28.97 | 76.01 | 53.48 | 35.74 | 7.03 | 35743.81 | 2.14 | 0.00 |
| 13.00 | 35.07 | 29.06 | 75.13 | 52.28 | 35.40 | 6.57 | 33404.40 | 2.00 | 0.00 |
| 14.00 | 34.95 | 29.05 | 75.41 | 52.66 | 35.40 | 6.60 | 33552.73 | 2.01 | 0.00 |
| 15.00 | 34.17 | 28.91 | 74.20 | 49.28 | 34.69 | 6.03 | 30670.85 | 1.84 | 0.00 |
| 16.00 | 33.47 | 28.51 | 72.86 | 46.86 | 33.51 | 5.24 | 26644.69 | 1.60 | 0.00 |
| 17.00 | 33.13 | 28.28 | 70.48 | 40.61 | 32.35 | 4.23 | 21512.40 | 1.29 | 0.00 |
| 18.00 | 33.19 | 28.25 | 69.84 | 38.27 | 32.23 | 3.91 | 19901.93 | 1.19 | 0.00 |
| 19.00 | 29.16 | 27.23 | 63.78 | 32.00 | 29.58 | 2.40 | 12184.43 | 0.73 | 0.00 |
| 20.00 | 27.88 | 26.62 | 58.98 | 29.33 | 27.72 | 1.21 | 6169.51 | 0.37 | 0.00 |

ตารางที่ ก.7 ตารางแสดงผลการทดลองอัตราการไหล 1.0 ลิตรต่อนาที มุมเอียง 14 องศา วัดจากแนวราบ ครั้งที่ 1

| Time | I | T _{amb} | Vacuum | | | | | | |
|-------|------|------------------|-----------------|-------------------|-------------------|------------------|------|----------|----------|
| | | | T _{in} | T _{evap} | T _{cond} | T _{out} | ΔT | Q(J) | Q(MJ/m2) |
| 9.00 | 1.88 | 30.72 | 29.50 | 46.00 | 33.05 | 30.72 | 1.22 | 12375.14 | 0.74 |
| 10.00 | 2.35 | 32.20 | 30.83 | 50.01 | 39.57 | 33.63 | 2.80 | 28488.25 | 1.71 |
| 11.00 | 2.89 | 34.66 | 31.93 | 52.52 | 42.63 | 35.29 | 3.36 | 34192.68 | 2.05 |
| 12.00 | 2.33 | 36.52 | 32.74 | 53.68 | 44.60 | 36.84 | 4.10 | 41719.47 | 2.50 |
| 13.00 | 2.43 | 36.14 | 31.66 | 52.50 | 43.10 | 36.09 | 4.43 | 45067.54 | 2.70 |
| 14.00 | 2.34 | 38.01 | 31.53 | 52.58 | 43.26 | 35.51 | 3.98 | 40465.01 | 2.43 |
| 15.00 | 1.85 | 38.23 | 31.44 | 51.17 | 41.75 | 35.28 | 3.83 | 38998.64 | 2.34 |
| 16.00 | 1.67 | 38.98 | 31.53 | 51.88 | 42.22 | 35.42 | 3.90 | 39634.35 | 2.38 |
| 17.00 | 1.11 | 37.47 | 30.79 | 47.61 | 36.65 | 33.58 | 2.79 | 28403.48 | 1.70 |
| 18.00 | 0.77 | 34.68 | 29.33 | 42.79 | 30.58 | 30.73 | 1.40 | 14248.36 | 0.85 |
| 19.00 | 0.13 | 32.75 | 28.79 | 40.52 | 29.23 | 29.36 | 0.56 | 5729.86 | 0.34 |
| 20.00 | 0.00 | 31.52 | 30.19 | 37.78 | 30.18 | 30.19 | 0.00 | 1256.76 | 0.08 |

| Time | I | T _{amb} | PCM | | | | | | |
|-------|------|------------------|-----------------|-------------------|-------------------|------------------|------|----------|----------|
| | | | T _{in} | T _{evap} | T _{cond} | T _{out} | ΔT | Q(J) | Q(MJ/m2) |
| 9.00 | 1.88 | 30.72 | 29.93 | 63.53 | 31.72 | 30.05 | 0.12 | 1237.51 | 0.07 |
| 10.00 | 2.35 | 32.20 | 32.10 | 72.38 | 39.79 | 33.51 | 1.41 | 14367.03 | 0.86 |
| 11.00 | 2.89 | 34.66 | 33.48 | 76.02 | 50.55 | 36.59 | 3.11 | 31615.93 | 1.90 |
| 12.00 | 2.33 | 36.52 | 34.98 | 77.88 | 57.22 | 39.23 | 4.26 | 43321.46 | 2.60 |
| 13.00 | 2.43 | 36.14 | 34.43 | 77.21 | 56.74 | 38.73 | 4.30 | 43779.17 | 2.63 |
| 14.00 | 2.34 | 38.01 | 33.97 | 77.08 | 56.77 | 38.06 | 4.10 | 41651.66 | 2.50 |
| 15.00 | 1.85 | 38.23 | 33.85 | 76.54 | 55.73 | 38.06 | 4.21 | 42795.94 | 2.57 |
| 16.00 | 1.67 | 38.98 | 33.99 | 76.89 | 56.03 | 38.28 | 4.29 | 43668.98 | 2.62 |
| 17.00 | 1.11 | 37.47 | 32.65 | 72.92 | 48.19 | 35.75 | 3.11 | 31582.03 | 1.89 |
| 18.00 | 0.77 | 34.68 | 30.55 | 66.17 | 36.02 | 32.69 | 2.14 | 21724.30 | 1.30 |
| 19.00 | 0.13 | 32.75 | 29.52 | 62.61 | 32.36 | 30.77 | 1.25 | 12748.09 | 0.76 |
| 20.00 | 0.00 | 31.52 | 30.73 | 59.47 | 32.22 | 31.34 | 0.61 | 6211.19 | 0.37 |

ตารางที่ ก.8 ตารางแสดงผลการทดลองอัตราการไหล 1.0 ลิตรต่อนาที มุมเอียง 14 องศา วัดจากแนวราบ ครั้งที่ 2

| Time | I | T _{amb} | Vacuum | | | | | | |
|-------|------|------------------|-----------------|-------------------|-------------------|------------------|------|----------|-----------------------|
| | | | T _{in} | T _{evap} | T _{cond} | T _{out} | ΔT | Q(J) | Q(MJ/m ²) |
| 9.00 | 1.20 | 32.50 | 33.26 | 47.45 | 35.55 | 33.66 | 0.40 | 4017.68 | 0.24 |
| 10.00 | 0.63 | 32.68 | 34.66 | 46.80 | 35.92 | 35.05 | 0.40 | 4034.63 | 0.24 |
| 11.00 | 2.54 | 35.17 | 32.17 | 49.56 | 38.89 | 34.58 | 2.42 | 24597.71 | 1.48 |
| 12.00 | 3.39 | 37.78 | 32.67 | 53.11 | 42.57 | 35.72 | 3.04 | 30963.27 | 1.86 |
| 13.00 | 3.48 | 39.89 | 33.79 | 55.15 | 45.45 | 37.74 | 3.95 | 40125.96 | 2.41 |
| 14.00 | 3.38 | 40.55 | 34.03 | 55.28 | 45.32 | 37.93 | 3.90 | 39693.68 | 2.38 |
| 15.00 | 3.17 | 40.87 | 34.14 | 55.74 | 46.00 | 38.23 | 4.09 | 41617.76 | 2.50 |
| 16.00 | 0.61 | 36.05 | 33.01 | 49.29 | 38.88 | 36.13 | 3.12 | 31717.65 | 1.90 |
| 17.00 | 0.17 | 32.97 | 30.69 | 43.00 | 31.83 | 31.89 | 1.19 | 12146.28 | 0.73 |
| 18.00 | 0.16 | 32.10 | 29.54 | 41.40 | 30.12 | 30.16 | 0.62 | 6323.19 | 0.38 |
| 19.00 | 0.04 | 31.52 | 29.10 | 40.19 | 29.52 | 29.56 | 0.46 | 4653.39 | 0.28 |
| 20.00 | 0.00 | 31.04 | 28.82 | 37.28 | 29.10 | 29.14 | 0.32 | 3226.48 | 0.19 |

| Time | I | T _{amb} | PCM | | | | | | |
|-------|------|------------------|-----------------|-------------------|-------------------|------------------|------|----------|-----------------------|
| | | | T _{in} | T _{evap} | T _{cond} | T _{out} | ΔT | Q(J) | Q(MJ/m ²) |
| 9.00 | 1.20 | 32.50 | 33.02 | 61.83 | 34.31 | 33.23 | 0.22 | 2203.79 | 0.13 |
| 10.00 | 0.63 | 32.68 | 34.53 | 64.82 | 35.97 | 34.96 | 0.43 | 4399.11 | 0.26 |
| 11.00 | 2.54 | 35.17 | 32.00 | 70.54 | 37.97 | 33.78 | 1.78 | 18071.09 | 1.08 |
| 12.00 | 3.39 | 37.78 | 32.69 | 76.06 | 50.34 | 36.33 | 3.64 | 37057.61 | 2.22 |
| 13.00 | 3.48 | 39.89 | 34.15 | 79.17 | 56.76 | 39.13 | 4.98 | 50619.40 | 3.04 |
| 14.00 | 3.38 | 40.55 | 34.36 | 79.07 | 57.17 | 39.36 | 5.00 | 50873.68 | 3.05 |
| 15.00 | 3.17 | 40.87 | 34.49 | 79.87 | 57.95 | 39.80 | 5.32 | 54069.18 | 3.24 |
| 16.00 | 0.61 | 36.05 | 33.26 | 74.25 | 48.15 | 37.14 | 3.88 | 39447.87 | 2.37 |
| 17.00 | 0.17 | 32.97 | 30.92 | 65.71 | 35.04 | 32.75 | 1.83 | 18596.61 | 1.12 |
| 18.00 | 0.16 | 32.10 | 29.74 | 62.17 | 32.30 | 30.87 | 1.13 | 11476.67 | 0.69 |
| 19.00 | 0.04 | 31.52 | 29.29 | 59.88 | 31.17 | 30.09 | 0.80 | 8154.03 | 0.49 |
| 20.00 | 0.00 | 31.04 | 29.04 | 58.53 | 30.34 | 29.54 | 0.50 | 5085.67 | 0.31 |

ตารางที่ ก.9 ตารางแสดงผลการทดลองอัตราการไหล 1.0 ลิตรต่อนาที มุมเอียง 14 องศา วัดจากแนวราบ ครั้งที่ 3

| Time | I | T _{amb} | Vacuum | | | | | | |
|-------|------|------------------|-----------------|-------------------|-------------------|------------------|------|----------|----------|
| | | | T _{in} | T _{evap} | T _{cond} | T _{out} | ΔT | Q(J) | Q(MJ/m2) |
| 9.00 | 1.98 | 34.76 | 28.73 | 46.91 | 32.40 | 30.35 | 1.62 | 16503.01 | 0.99 |
| 10.00 | 2.59 | 33.05 | 28.97 | 49.46 | 36.74 | 31.72 | 2.76 | 28022.06 | 1.68 |
| 11.00 | 3.21 | 33.99 | 29.68 | 51.29 | 39.18 | 32.88 | 3.21 | 32607.64 | 1.96 |
| 12.00 | 3.17 | 34.30 | 29.91 | 50.61 | 39.10 | 33.33 | 3.42 | 34811.43 | 2.09 |
| 13.00 | 3.56 | 35.59 | 30.15 | 52.61 | 40.92 | 34.11 | 3.96 | 40270.06 | 2.42 |
| 14.00 | 2.71 | 36.19 | 30.37 | 51.14 | 40.77 | 34.65 | 4.28 | 43550.31 | 2.61 |
| 15.00 | 1.21 | 33.53 | 29.06 | 45.46 | 32.66 | 31.31 | 2.25 | 22910.96 | 1.37 |
| 16.00 | 1.02 | 32.92 | 28.23 | 44.26 | 31.16 | 29.91 | 1.68 | 17079.39 | 1.02 |
| 17.00 | 1.12 | 34.17 | 27.94 | 45.14 | 31.42 | 29.65 | 1.71 | 17418.43 | 1.05 |
| 18.00 | 0.59 | 33.55 | 27.82 | 43.05 | 30.00 | 29.41 | 1.59 | 16121.58 | 0.97 |
| 19.00 | 0.08 | 30.55 | 27.13 | 39.47 | 27.59 | 27.62 | 0.49 | 5009.39 | 0.30 |
| 20.00 | 0.00 | 29.62 | 26.56 | 36.02 | 26.68 | 26.71 | 0.15 | 1534.04 | 0.09 |

| Time | I | T _{amb} | PCM | | | | | | |
|-------|------|------------------|-----------------|-------------------|-------------------|------------------|------|----------|----------|
| | | | T _{in} | T _{evap} | T _{cond} | T _{out} | ΔT | Q(J) | Q(MJ/m2) |
| 9.00 | 1.98 | 34.76 | 28.47 | 67.02 | 33.75 | 29.19 | 0.72 | 7289.46 | 0.44 |
| 10.00 | 2.59 | 33.05 | 28.77 | 74.56 | 44.04 | 31.02 | 2.25 | 22834.67 | 1.37 |
| 11.00 | 3.21 | 33.99 | 29.49 | 77.31 | 54.36 | 32.98 | 3.49 | 35472.57 | 2.13 |
| 12.00 | 3.17 | 34.30 | 29.74 | 77.60 | 56.68 | 33.52 | 3.79 | 38507.02 | 2.31 |
| 13.00 | 3.56 | 35.59 | 30.03 | 79.73 | 60.57 | 34.32 | 4.29 | 43584.22 | 2.62 |
| 14.00 | 2.71 | 36.19 | 30.20 | 79.16 | 59.13 | 34.68 | 4.48 | 45601.54 | 2.74 |
| 15.00 | 1.21 | 33.53 | 28.78 | 70.74 | 42.42 | 31.30 | 2.52 | 25597.89 | 1.54 |
| 16.00 | 1.02 | 32.92 | 28.04 | 68.36 | 37.56 | 29.99 | 1.94 | 19766.32 | 1.19 |
| 17.00 | 1.12 | 34.17 | 28.11 | 69.10 | 37.67 | 29.91 | 1.80 | 18350.80 | 1.10 |
| 18.00 | 0.59 | 33.55 | 27.96 | 67.24 | 35.29 | 29.70 | 1.75 | 17765.95 | 1.07 |
| 19.00 | 0.08 | 30.55 | 26.93 | 61.88 | 31.17 | 27.95 | 1.02 | 10400.20 | 0.62 |
| 20.00 | 0.00 | 29.62 | 26.43 | 58.38 | 29.30 | 27.07 | 0.63 | 6452.97 | 0.39 |

ตารางที่ ก.10 ตารางแสดงผลการทดลองอัตราการไหล 0.25 ลิตรต่อนาที มุมเอียง 30 องศา วัดจากแนวราบ ครั้งที่ 1

| Time | I | T _{amb} | Vacuum | | | | | | |
|-------|------|------------------|-----------------|-------------------|-------------------|------------------|-------|----------|-----------------------|
| | | | T _{in} | T _{evap} | T _{cond} | T _{out} | ΔT | Q(J) | Q(MJ/m ²) |
| 9.00 | 0.94 | 30.97 | 32.76 | 50.57 | 37.17 | 33.77 | 1.01 | 2599.21 | 0.16 |
| 10.00 | 1.11 | 33.64 | 36.11 | 55.88 | 45.83 | 40.20 | 4.09 | 10534.08 | 0.63 |
| 11.00 | 1.22 | 35.67 | 39.05 | 59.26 | 51.08 | 45.07 | 6.02 | 15503.03 | 0.93 |
| 12.00 | 1.34 | 38.57 | 37.82 | 61.81 | 54.25 | 48.25 | 10.43 | 26834.89 | 1.61 |
| 13.00 | 1.30 | 39.76 | 34.08 | 61.71 | 54.18 | 48.84 | 14.76 | 37980.17 | 2.28 |
| 14.00 | 1.23 | 38.37 | 34.89 | 62.54 | 55.03 | 49.07 | 14.18 | 36491.85 | 2.19 |
| 15.00 | 1.27 | 38.34 | 34.42 | 61.44 | 53.42 | 49.16 | 14.74 | 37937.28 | 2.28 |
| 16.00 | 1.13 | 34.82 | 32.14 | 54.59 | 44.71 | 44.35 | 12.21 | 31424.25 | 1.89 |
| 17.00 | 0.82 | 34.96 | 32.89 | 54.47 | 44.02 | 42.07 | 9.18 | 23626.63 | 1.42 |
| 18.00 | 0.36 | 33.08 | 31.12 | 50.99 | 39.58 | 39.46 | 8.34 | 21467.06 | 1.29 |
| 19.00 | 0.07 | 30.43 | 29.03 | 43.72 | 34.16 | 34.89 | 5.86 | 15089.13 | 0.91 |
| 20.00 | 0.00 | 29.58 | 28.32 | 38.61 | 30.70 | 31.22 | 2.89 | 7448.31 | 0.45 |

| Time | I | T _{amb} | PCM | | | | | | |
|-------|------|------------------|-----------------|-------------------|-------------------|------------------|-------|----------|-----------------------|
| | | | T _{in} | T _{evap} | T _{cond} | T _{out} | ΔT | Q(J) | Q(MJ/m ²) |
| 9.00 | 0.94 | 30.97 | 32.57 | 69.29 | 35.67 | 33.38 | 0.81 | 2084.51 | 0.13 |
| 10.00 | 1.11 | 33.64 | 36.37 | 77.13 | 51.45 | 41.93 | 5.55 | 14289.21 | 0.86 |
| 11.00 | 1.22 | 35.67 | 39.55 | 80.53 | 62.12 | 48.99 | 9.44 | 24304.31 | 1.46 |
| 12.00 | 1.34 | 38.57 | 37.88 | 82.83 | 65.69 | 52.96 | 15.08 | 38799.40 | 2.33 |
| 13.00 | 1.30 | 39.76 | 33.39 | 82.92 | 65.61 | 52.34 | 18.95 | 48754.45 | 2.93 |
| 14.00 | 1.23 | 38.37 | 33.15 | 82.79 | 64.54 | 51.29 | 18.14 | 46674.23 | 2.80 |
| 15.00 | 1.27 | 38.34 | 32.87 | 81.09 | 61.95 | 50.41 | 17.53 | 45121.56 | 2.71 |
| 16.00 | 1.13 | 34.82 | 31.23 | 72.06 | 46.93 | 42.09 | 10.87 | 27967.22 | 1.68 |
| 17.00 | 0.82 | 34.96 | 31.56 | 74.34 | 49.09 | 41.19 | 9.62 | 24767.53 | 1.49 |
| 18.00 | 0.36 | 33.08 | 30.39 | 69.28 | 40.33 | 38.09 | 7.70 | 19826.47 | 1.19 |
| 19.00 | 0.07 | 30.43 | 28.80 | 62.52 | 34.51 | 33.57 | 4.78 | 12294.77 | 0.74 |
| 20.00 | 0.00 | 29.58 | 28.25 | 58.67 | 31.58 | 30.91 | 2.66 | 6849.24 | 0.41 |

ตารางที่ ก.11 ตารางแสดงผลการทดลองอัตราการไหล 0.25 ลิตรต่อวินาที มุมเอียง 30 องศา วัดจากแนวราบ ครั้งที่ 2

| Time | I | T _{amb} | Vacuum | | | | | | |
|-------|------|------------------|-----------------|-------------------|-------------------|------------------|-------|----------|-----------------------|
| | | | T _{in} | T _{evap} | T _{cond} | T _{out} | ΔT | Q(J) | Q(MJ/m ²) |
| 9.00 | 0.94 | 30.10 | 28.45 | 47.58 | 28.49 | 28.09 | -0.36 | 146.76 | 0.01 |
| 10.00 | 1.11 | 31.16 | 32.16 | 49.62 | 34.66 | 32.05 | -0.12 | 351.71 | 0.02 |
| 11.00 | 1.22 | 33.32 | 34.82 | 54.76 | 42.86 | 37.90 | 3.08 | 7930.59 | 0.48 |
| 12.00 | 1.34 | 33.98 | 35.45 | 57.71 | 48.01 | 42.42 | 6.97 | 17930.67 | 1.08 |
| 13.00 | 1.30 | 34.80 | 34.96 | 58.56 | 49.21 | 44.20 | 9.24 | 23768.17 | 1.43 |
| 14.00 | 1.23 | 36.29 | 37.16 | 61.36 | 53.11 | 46.30 | 9.14 | 23519.40 | 1.41 |
| 15.00 | 1.27 | 37.07 | 37.67 | 63.79 | 56.64 | 48.82 | 11.15 | 28681.36 | 1.72 |
| 16.00 | 1.13 | 36.40 | 36.14 | 62.24 | 54.22 | 49.07 | 12.92 | 33260.00 | 2.00 |
| 17.00 | 0.82 | 34.25 | 34.36 | 54.54 | 42.46 | 41.05 | 6.70 | 17229.40 | 1.03 |
| 18.00 | 0.36 | 30.95 | 32.53 | 52.02 | 38.28 | 37.25 | 4.72 | 12140.36 | 0.73 |
| 19.00 | 0.07 | 28.90 | 30.65 | 45.88 | 34.53 | 34.24 | 3.60 | 9255.93 | 0.56 |
| 20.00 | 0.00 | 28.40 | 29.93 | 39.86 | 31.64 | 31.47 | 1.54 | 3959.35 | 0.24 |

| Time | I | T _{amb} | PCM | | | | | | |
|-------|------|------------------|-----------------|-------------------|-------------------|------------------|-------|----------|-----------------------|
| | | | T _{in} | T _{evap} | T _{cond} | T _{out} | ΔT | Q(J) | Q(MJ/m ²) |
| 9.00 | 0.94 | 30.10 | 27.69 | 42.39 | 28.15 | 27.48 | -0.21 | 150.73 | 0.01 |
| 10.00 | 1.11 | 31.16 | 30.37 | 47.22 | 32.21 | 30.64 | 0.27 | 1263.64 | 0.08 |
| 11.00 | 1.22 | 33.32 | 32.72 | 53.96 | 37.75 | 34.89 | 2.17 | 6549.31 | 0.39 |
| 12.00 | 1.34 | 33.98 | 33.60 | 58.36 | 45.96 | 39.18 | 5.58 | 16831.74 | 1.01 |
| 13.00 | 1.30 | 34.80 | 34.11 | 57.66 | 46.24 | 39.53 | 5.42 | 16334.32 | 0.98 |
| 14.00 | 1.23 | 36.29 | 35.57 | 60.10 | 50.64 | 41.15 | 5.58 | 16826.72 | 1.01 |
| 15.00 | 1.27 | 37.07 | 35.40 | 62.03 | 54.11 | 43.52 | 8.11 | 24461.29 | 1.47 |
| 16.00 | 1.13 | 36.40 | 35.42 | 60.68 | 51.90 | 43.07 | 7.65 | 23064.51 | 1.38 |
| 17.00 | 0.82 | 34.25 | 34.06 | 56.54 | 44.37 | 39.67 | 5.61 | 16924.69 | 1.02 |
| 18.00 | 0.36 | 30.95 | 32.99 | 52.92 | 38.99 | 36.24 | 3.25 | 11129.05 | 0.67 |
| 19.00 | 0.07 | 28.90 | 30.82 | 50.24 | 34.83 | 33.85 | 3.03 | 9119.29 | 0.55 |
| 20.00 | 0.00 | 28.40 | 30.12 | 48.47 | 32.40 | 31.51 | 1.39 | 4190.84 | 0.25 |

ตารางที่ ก.12 ตารางแสดงผลการทดลองอัตราการไหล 0.25 ลิตรต่อนาที มุมเอียง 30 องศา วัดจากแนวราบ ครั้งที่ 3

| Time | I | T _{amb} | Vacuum | | | | | | |
|-------|-------|------------------|-----------------|-------------------|-------------------|------------------|-------|---------|----------|
| | | | T _{in} | T _{evap} | T _{cond} | T _{out} | ΔT | Q(J) | Q(MJ/m2) |
| 9.00 | 0.806 | 31.76 | 32.33 | 48.42 | 33.16 | 31.69 | -0.65 | 895.45 | 0.05 |
| 10.00 | 1.373 | 32.18 | 33.78 | 52.84 | 37.08 | 34.29 | 0.51 | 1312.47 | 0.08 |
| 11.00 | 1.859 | 33.58 | 31.61 | 52.79 | 37.31 | 34.50 | 2.89 | 7430.90 | 0.45 |
| 12.00 | 1.990 | 34.36 | 29.96 | 52.23 | 35.93 | 32.92 | 2.96 | 7613.19 | 0.46 |
| 13.00 | 2.071 | 35.86 | 29.95 | 52.08 | 35.99 | 32.83 | 2.88 | 7407.31 | 0.44 |
| 14.00 | 1.945 | 37.31 | 30.79 | 53.00 | 38.30 | 34.18 | 3.40 | 8743.38 | 0.52 |
| 15.00 | 1.836 | 36.91 | 30.72 | 52.13 | 37.26 | 33.89 | 3.17 | 8157.91 | 0.49 |
| 16.00 | 1.374 | 36.93 | 30.65 | 52.54 | 37.18 | 34.07 | 3.42 | 8807.71 | 0.53 |
| 17.00 | 0.926 | 33.54 | 29.57 | 51.21 | 32.43 | 31.59 | 2.02 | 5187.69 | 0.31 |
| 18.00 | 0.419 | 30.98 | 28.49 | 47.54 | 29.92 | 29.63 | 1.14 | 2944.48 | 0.18 |
| 19.00 | 0.057 | 29.58 | 27.57 | 42.96 | 27.99 | 28.06 | 0.49 | 1267.44 | 0.08 |
| 20.00 | 0.00 | 29.13 | 26.95 | 38.92 | 27.07 | 27.17 | 0.22 | 561.87 | 0.03 |

| Time | I | T _{amb} | PCM | | | | | | |
|-------|-------|------------------|-----------------|-------------------|-------------------|------------------|-------|---------|----------|
| | | | T _{in} | T _{evap} | T _{cond} | T _{out} | ΔT | Q(J) | Q(MJ/m2) |
| 9.00 | 0.806 | 31.76 | 31.70 | 50.21 | 32.27 | 31.07 | -0.63 | 546.56 | 0.032794 |
| 10.00 | 1.373 | 32.18 | 33.31 | 54.84 | 35.33 | 33.67 | 0.36 | 1090.29 | 0.065418 |
| 11.00 | 1.859 | 33.58 | 31.15 | 60.68 | 36.50 | 33.34 | 2.19 | 6594.53 | 0.395672 |
| 12.00 | 1.990 | 34.36 | 29.55 | 62.89 | 40.66 | 32.22 | 2.67 | 8041.55 | 0.482493 |
| 13.00 | 2.071 | 35.86 | 29.50 | 62.92 | 42.28 | 32.17 | 2.67 | 8034.02 | 0.482041 |
| 14.00 | 1.945 | 37.31 | 30.16 | 64.90 | 46.75 | 33.38 | 3.22 | 9699.60 | 0.581976 |
| 15.00 | 1.836 | 36.91 | 30.18 | 63.93 | 45.10 | 33.12 | 2.93 | 8845.46 | 0.530727 |
| 16.00 | 1.374 | 36.93 | 30.41 | 64.20 | 44.85 | 33.49 | 3.09 | 9300.16 | 0.55801 |
| 17.00 | 0.926 | 33.54 | 29.07 | 59.76 | 35.76 | 31.08 | 2.01 | 6071.99 | 0.364319 |
| 18.00 | 0.419 | 30.98 | 27.93 | 56.65 | 31.59 | 29.29 | 1.36 | 4094.89 | 0.245693 |
| 19.00 | 0.057 | 29.58 | 27.03 | 53.55 | 29.16 | 27.86 | 0.82 | 2477.03 | 0.148622 |
| 20.00 | 0.00 | 29.13 | 26.48 | 51.81 | 27.89 | 27.00 | 0.52 | 1565.10 | 0.093906 |

ตารางที่ ก.13 ตารางแสดงผลการทดลองอัตราการไหล 0.5 ลิตรต่อนาที มุมเอียง 30 องศา วัดจากแนวราบ ครั้งที่ 1

| Time | l | T _{amb} | Vacuum | | | | | | |
|-------|------|------------------|-----------------|-------------------|-------------------|------------------|------|----------|-----------------------|
| | | | T _{in} | T _{evap} | T _{cond} | T _{out} | ΔT | Q(J) | Q(MJ/m ²) |
| 9.00 | 1.56 | 31.89 | 32.24 | 48.73 | 37.89 | 33.77 | 1.54 | 7810.75 | 0.47 |
| 10.00 | 2.63 | 33.12 | 30.17 | 49.45 | 36.42 | 34.20 | 4.02 | 20465.60 | 1.23 |
| 11.00 | 2.93 | 35.85 | 29.75 | 49.85 | 37.31 | 34.22 | 4.47 | 22720.24 | 1.36 |
| 12.00 | 1.89 | 38.33 | 29.79 | 49.35 | 36.04 | 33.88 | 4.08 | 20762.26 | 1.25 |
| 13.00 | 3.17 | 42.86 | 30.24 | 51.41 | 38.86 | 35.02 | 4.78 | 24305.28 | 1.46 |
| 14.00 | 1.47 | 41.73 | 30.71 | 51.40 | 39.69 | 36.71 | 6.00 | 30526.75 | 1.83 |
| 15.00 | 2.55 | 34.09 | 29.46 | 47.15 | 33.41 | 33.25 | 3.79 | 19287.42 | 1.16 |
| 16.00 | 2.22 | 31.77 | 28.12 | 43.54 | 29.67 | 29.80 | 1.68 | 8548.17 | 0.51 |
| 17.00 | 1.19 | 37.09 | 28.64 | 46.81 | 32.31 | 30.55 | 1.91 | 9709.40 | 0.58 |
| 18.00 | 0.49 | 33.32 | 28.62 | 46.21 | 31.56 | 31.31 | 2.69 | 13667.75 | 0.82 |
| 19.00 | 0.07 | 30.23 | 27.64 | 41.67 | 28.70 | 28.83 | 1.19 | 6039.24 | 0.36 |
| 20.00 | 0.00 | 29.73 | 27.22 | 37.09 | 27.58 | 27.79 | 0.57 | 2901.33 | 0.17 |

| Time | l | T _{amb} | PCM | | | | | | |
|-------|------|------------------|-----------------|-------------------|-------------------|------------------|------|----------|-----------------------|
| | | | T _{in} | T _{evap} | T _{cond} | T _{out} | ΔT | Q(J) | Q(MJ/m ²) |
| 9.00 | 1.56 | 31.89 | 32.19 | 57.89 | 35.20 | 33.24 | 1.05 | 6260.34 | 0.38 |
| 10.00 | 2.63 | 33.12 | 30.11 | 64.10 | 35.03 | 33.18 | 3.07 | 18299.46 | 1.10 |
| 11.00 | 2.93 | 35.85 | 29.44 | 70.96 | 37.11 | 32.72 | 3.28 | 19535.64 | 1.17 |
| 12.00 | 1.89 | 38.33 | 29.61 | 71.19 | 40.36 | 33.44 | 3.83 | 22837.09 | 1.37 |
| 13.00 | 3.17 | 42.86 | 30.13 | 73.31 | 46.06 | 35.17 | 5.04 | 30030.78 | 1.80 |
| 14.00 | 1.47 | 41.73 | 30.46 | 74.89 | 49.93 | 36.47 | 6.01 | 35799.63 | 2.15 |
| 15.00 | 2.55 | 34.09 | 29.00 | 68.40 | 37.71 | 32.58 | 3.59 | 21377.51 | 1.28 |
| 16.00 | 2.22 | 31.77 | 27.99 | 64.14 | 32.05 | 29.91 | 1.92 | 11438.41 | 0.69 |
| 17.00 | 1.19 | 37.09 | 28.44 | 67.83 | 33.14 | 30.56 | 2.12 | 12624.94 | 0.76 |
| 18.00 | 0.49 | 33.32 | 28.41 | 67.07 | 34.09 | 30.91 | 2.51 | 14933.47 | 0.90 |
| 19.00 | 0.07 | 30.23 | 27.53 | 62.02 | 30.70 | 29.03 | 1.51 | 8971.01 | 0.54 |
| 20.00 | 0.00 | 29.73 | 27.16 | 58.43 | 29.24 | 28.13 | 0.96 | 5727.99 | 0.34 |

ตารางที่ ก.14 ตารางแสดงผลการทดลองอัตราการไหล 0.5 ลิตรต่อนาที มุมเอียง 30 องศา วัดจากแนวราบ ครั้งที่ 2

| Time | I | T _{amb} | Vacuum | | | | | | |
|-------|------|------------------|-----------------|-------------------|-------------------|------------------|------|----------|-----------------------|
| | | | T _{in} | T _{evap} | T _{cond} | T _{out} | ΔT | Q(J) | Q(MJ/m ²) |
| 9.00 | 1.75 | 29.61 | 29.95 | 46.42 | 31.79 | 30.60 | 0.66 | 3348.07 | 0.20 |
| 10.00 | 1.87 | 31.69 | 30.15 | 50.41 | 37.52 | 34.98 | 2.23 | 11362.24 | 0.68 |
| 11.00 | 2.93 | 32.82 | 30.59 | 52.43 | 41.43 | 37.50 | 6.91 | 35146.24 | 2.11 |
| 12.00 | 3.04 | 35.12 | 30.67 | 52.93 | 42.14 | 38.48 | 7.82 | 39753.01 | 2.39 |
| 13.00 | 3.76 | 38.10 | 31.20 | 55.40 | 45.50 | 40.23 | 9.04 | 45957.53 | 2.76 |
| 14.00 | 3.47 | 36.56 | 31.63 | 55.57 | 45.83 | 41.24 | 9.61 | 48864.84 | 2.93 |
| 15.00 | 3.03 | 37.68 | 31.61 | 55.15 | 45.38 | 40.85 | 9.24 | 46995.86 | 2.82 |
| 16.00 | 1.92 | 36.08 | 31.18 | 53.37 | 42.87 | 39.80 | 8.62 | 43855.45 | 2.63 |
| 17.00 | 1.51 | 35.45 | 30.86 | 51.51 | 39.45 | 37.57 | 6.71 | 34103.68 | 2.05 |
| 18.00 | 0.72 | 34.05 | 30.36 | 48.95 | 34.59 | 35.05 | 4.69 | 23868.76 | 1.43 |
| 19.00 | 0.13 | 32.23 | 29.23 | 43.75 | 31.33 | 31.97 | 2.73 | 13905.08 | 0.83 |
| 20.00 | 0.00 | 30.81 | 28.18 | 38.56 | 29.14 | 29.62 | 1.44 | 7324.20 | 0.44 |

| Time | I | T _{amb} | PCM | | | | | | |
|-------|------|------------------|-----------------|-------------------|-------------------|------------------|------|----------|-----------------------|
| | | | T _{in} | T _{evap} | T _{cond} | T _{out} | ΔT | Q(J) | Q(MJ/m ²) |
| 9.00 | 1.75 | 29.61 | 30.07 | 58.16 | 31.52 | 30.85 | 0.78 | 4617.06 | 0.28 |
| 10.00 | 1.87 | 31.69 | 32.67 | 67.18 | 35.88 | 34.35 | 1.68 | 9978.82 | 0.60 |
| 11.00 | 2.93 | 32.82 | 29.94 | 73.69 | 42.67 | 35.39 | 5.45 | 32463.43 | 1.95 |
| 12.00 | 3.04 | 35.12 | 30.17 | 75.25 | 50.11 | 36.86 | 6.69 | 39845.76 | 2.39 |
| 13.00 | 3.76 | 38.10 | 30.65 | 77.65 | 54.87 | 39.11 | 8.46 | 50370.69 | 3.02 |
| 14.00 | 3.47 | 36.56 | 30.66 | 78.05 | 55.43 | 39.67 | 9.01 | 53657.24 | 3.22 |
| 15.00 | 3.03 | 37.68 | 30.57 | 77.47 | 54.20 | 39.10 | 8.53 | 50802.61 | 3.05 |
| 16.00 | 1.92 | 36.08 | 30.36 | 75.74 | 50.74 | 37.94 | 7.58 | 45172.77 | 2.71 |
| 17.00 | 1.51 | 35.45 | 30.10 | 73.83 | 46.95 | 36.05 | 5.95 | 35432.25 | 2.13 |
| 18.00 | 0.72 | 34.05 | 29.68 | 69.72 | 37.54 | 33.85 | 4.17 | 24842.79 | 1.49 |
| 19.00 | 0.13 | 32.23 | 28.86 | 63.98 | 32.76 | 31.35 | 2.49 | 14849.08 | 0.89 |
| 20.00 | 0.00 | 30.81 | 28.10 | 59.47 | 30.74 | 29.68 | 1.58 | 9429.46 | 0.57 |

ตารางที่ ก.15 ตารางแสดงผลการทดลองอัตราการไหล 0.5 ลิตรต่อนาที มุมเอียง 30 องศา วัดจากแนวราบ ครั้งที่ 3

| Time | I | T _{amb} | Vacuum | | | | | | |
|-------|------|------------------|-----------------|-------------------|-------------------|------------------|-------|----------|-----------------------|
| | | | T _{in} | T _{evap} | T _{cond} | T _{out} | ΔT | Q(J) | Q(MJ/m ²) |
| 9.00 | 1.86 | 30.16 | 29.77 | 48.02 | 34.06 | 32.35 | 2.58 | 13137.99 | 0.79 |
| 10.00 | 2.33 | 32.16 | 30.17 | 51.48 | 38.86 | 35.33 | 5.15 | 26212.41 | 1.57 |
| 11.00 | 3.18 | 34.42 | 30.60 | 53.82 | 43.09 | 38.37 | 7.77 | 39490.25 | 2.37 |
| 12.00 | 3.66 | 37.20 | 31.24 | 55.30 | 45.45 | 40.55 | 9.31 | 47356.09 | 2.84 |
| 13.00 | 3.27 | 37.87 | 31.39 | 55.40 | 45.92 | 41.43 | 10.04 | 51047.44 | 3.06 |
| 14.00 | 3.03 | 37.69 | 31.66 | 55.39 | 45.86 | 41.56 | 9.90 | 50360.88 | 3.02 |
| 15.00 | 2.93 | 37.46 | 31.90 | 55.49 | 46.12 | 41.84 | 9.94 | 50568.54 | 3.03 |
| 16.00 | 2.46 | 36.82 | 31.78 | 55.44 | 45.44 | 41.27 | 9.49 | 48279.99 | 2.90 |
| 17.00 | 1.44 | 35.59 | 30.96 | 51.94 | 39.93 | 38.95 | 8.00 | 40668.43 | 2.44 |
| 18.00 | 0.32 | 31.82 | 29.13 | 46.51 | 32.93 | 33.73 | 4.60 | 23381.38 | 1.40 |
| 19.00 | 0.16 | 31.78 | 28.61 | 42.46 | 30.12 | 30.74 | 2.14 | 10870.63 | 0.65 |
| 20.00 | 0.00 | 30.86 | 28.14 | 37.95 | 28.89 | 29.29 | 1.15 | 5848.52 | 0.35 |

| Time | I | T _{amb} | PCM | | | | | | |
|-------|------|------------------|-----------------|-------------------|-------------------|------------------|------|----------|-----------------------|
| | | | T _{in} | T _{evap} | T _{cond} | T _{out} | ΔT | Q(J) | Q(MJ/m ²) |
| 9.00 | 1.86 | 30.16 | 29.35 | 64.82 | 33.04 | 31.48 | 2.13 | 12679.55 | 0.76 |
| 10.00 | 2.33 | 32.16 | 29.92 | 72.54 | 37.88 | 33.55 | 3.64 | 21665.45 | 1.30 |
| 11.00 | 3.18 | 34.42 | 30.26 | 75.85 | 49.77 | 37.18 | 6.92 | 41240.81 | 2.47 |
| 12.00 | 3.66 | 37.20 | 30.65 | 77.33 | 54.47 | 39.33 | 8.68 | 51686.30 | 3.10 |
| 13.00 | 3.27 | 37.87 | 30.69 | 77.35 | 54.59 | 39.83 | 9.15 | 54481.36 | 3.27 |
| 14.00 | 3.03 | 37.69 | 30.76 | 77.00 | 54.16 | 39.49 | 8.74 | 52038.79 | 3.12 |
| 15.00 | 2.93 | 37.46 | 30.86 | 77.22 | 54.10 | 39.78 | 8.92 | 53160.78 | 3.19 |
| 16.00 | 2.46 | 36.82 | 30.67 | 76.61 | 53.27 | 39.09 | 8.43 | 50201.89 | 3.01 |
| 17.00 | 1.44 | 35.59 | 30.13 | 73.01 | 45.01 | 36.47 | 6.34 | 37780.50 | 2.27 |
| 18.00 | 0.32 | 31.82 | 28.84 | 65.77 | 34.18 | 32.21 | 3.37 | 20101.61 | 1.21 |
| 19.00 | 0.16 | 31.78 | 28.38 | 61.80 | 31.53 | 30.43 | 2.05 | 12232.74 | 0.73 |
| 20.00 | 0.00 | 30.86 | 27.95 | 58.49 | 30.13 | 29.31 | 1.35 | 8062.16 | 0.48 |

ตารางที่ ก.16 ตารางแสดงผลการทดลองอัตราการไหล 1.0 ลิตรต่อนาที มุมเอียง 30 องศา วัดจากแนวราบ ครั้งที่ 1

| Time | I | T _{amb} | Vacuum | | | | | | |
|-------|------|------------------|-----------------|-------------------|-------------------|------------------|------|----------|----------|
| | | | T _{in} | T _{evap} | T _{cond} | T _{out} | ΔT | Q(J) | Q(MJ/m2) |
| 9.00 | 0.67 | 29.01 | 28.28 | 44.87 | 29.24 | 28.86 | 0.58 | 6930.56 | 0.42 |
| 10.00 | 1.10 | 30.68 | 27.95 | 45.90 | 30.53 | 28.82 | 0.87 | 10306.48 | 0.62 |
| 11.00 | 1.49 | 31.73 | 28.56 | 47.21 | 32.02 | 29.83 | 1.27 | 15072.48 | 0.90 |
| 12.00 | 1.53 | 32.08 | 29.11 | 47.91 | 33.23 | 30.74 | 1.63 | 19431.39 | 1.17 |
| 13.00 | 1.71 | 33.50 | 29.32 | 47.79 | 33.90 | 30.95 | 1.63 | 19411.53 | 1.16 |
| 14.00 | 3.01 | 36.66 | 30.92 | 51.80 | 39.42 | 33.78 | 2.86 | 34017.34 | 2.04 |
| 15.00 | 1.36 | 35.30 | 30.55 | 48.68 | 35.07 | 32.74 | 2.19 | 26064.08 | 1.56 |
| 16.00 | 0.98 | 34.52 | 29.88 | 47.71 | 32.69 | 31.64 | 1.76 | 20970.41 | 1.26 |
| 17.00 | 0.59 | 33.67 | 29.10 | 46.44 | 30.53 | 30.15 | 1.04 | 12401.54 | 0.74 |
| 18.00 | 0.19 | 32.05 | 28.37 | 43.72 | 28.99 | 28.95 | 0.57 | 6801.48 | 0.41 |
| 19.00 | 0.03 | 31.50 | 27.90 | 39.65 | 28.22 | 28.27 | 0.37 | 4418.48 | 0.27 |
| 20.00 | 0.00 | 30.54 | 27.56 | 36.52 | 27.69 | 27.73 | 0.17 | 2050.94 | 0.12 |

| Time | I | T _{amb} | PCM | | | | | | |
|-------|------|------------------|-----------------|-------------------|-------------------|------------------|------|----------|----------|
| | | | T _{in} | T _{evap} | T _{cond} | T _{out} | ΔT | Q(J) | Q(MJ/m2) |
| 9.00 | 0.67 | 29.01 | 28.41 | 54.46 | 29.45 | 29.00 | 0.59 | 5992.62 | 0.36 |
| 10.00 | 1.10 | 30.68 | 28.15 | 57.08 | 29.87 | 28.99 | 0.84 | 8501.55 | 0.51 |
| 11.00 | 1.49 | 31.73 | 28.73 | 63.02 | 31.15 | 29.79 | 1.07 | 10866.39 | 0.65 |
| 12.00 | 1.53 | 32.08 | 29.28 | 68.34 | 33.19 | 31.02 | 1.75 | 17749.00 | 1.06 |
| 13.00 | 1.71 | 33.50 | 29.69 | 69.85 | 36.52 | 31.85 | 2.16 | 21953.16 | 1.32 |
| 14.00 | 3.01 | 36.66 | 31.44 | 75.70 | 50.56 | 35.68 | 4.24 | 43109.56 | 2.59 |
| 15.00 | 1.36 | 35.30 | 31.11 | 71.88 | 42.73 | 34.46 | 3.35 | 34031.63 | 2.04 |
| 16.00 | 0.98 | 34.52 | 30.43 | 69.43 | 38.53 | 33.29 | 2.85 | 29030.72 | 1.74 |
| 17.00 | 0.59 | 33.67 | 29.39 | 66.19 | 33.85 | 31.39 | 2.00 | 20325.74 | 1.22 |
| 18.00 | 0.19 | 32.05 | 28.58 | 62.99 | 31.39 | 29.99 | 1.41 | 14341.60 | 0.86 |
| 19.00 | 0.03 | 31.50 | 28.11 | 59.52 | 29.99 | 29.08 | 0.98 | 9934.01 | 0.60 |
| 20.00 | 0.00 | 30.54 | 27.64 | 58.08 | 28.89 | 28.22 | 0.58 | 5861.03 | 0.35 |

ตารางที่ ก.17 ตารางแสดงผลการทดลองอัตราการไหล 1.0 ลิตรต่อนาที มุมเอียง 30 องศา วัดจากแนวราบ ครั้งที่ 2

| Time | I | T _{amb} | Vacuum | | | | | | |
|-------|------|------------------|-----------------|-------------------|-------------------|------------------|------|----------|----------|
| | | | T _{in} | T _{evap} | T _{cond} | T _{out} | ΔT | Q(J) | Q(MJ/m2) |
| 9.00 | 0.41 | 27.98 | 30.25 | 47.83 | 31.82 | 30.78 | 0.53 | 5356.91 | 0.32 |
| 10.00 | 0.57 | 31.37 | 32.19 | 51.62 | 38.85 | 34.61 | 2.42 | 24657.04 | 1.48 |
| 11.00 | 0.79 | 34.13 | 33.38 | 53.44 | 42.07 | 36.67 | 3.29 | 33412.87 | 2.00 |
| 12.00 | 1.70 | 32.87 | 32.94 | 51.33 | 39.12 | 35.94 | 2.99 | 30429.28 | 1.83 |
| 13.00 | 1.82 | 35.09 | 33.27 | 51.23 | 39.16 | 35.99 | 2.72 | 27674.54 | 1.66 |
| 14.00 | 1.28 | 37.30 | 34.24 | 52.95 | 41.95 | 37.56 | 3.33 | 33828.20 | 2.03 |
| 15.00 | 0.97 | 36.91 | 34.56 | 54.04 | 42.61 | 38.40 | 3.84 | 39091.87 | 2.35 |
| 16.00 | 0.83 | 31.20 | 32.42 | 50.48 | 37.70 | 35.53 | 3.11 | 31598.98 | 1.90 |
| 17.00 | 0.42 | 30.02 | 31.28 | 46.49 | 32.29 | 31.77 | 0.49 | 4933.10 | 0.30 |
| 18.00 | 0.46 | 30.59 | 31.35 | 46.72 | 32.15 | 31.80 | 0.45 | 4568.63 | 0.27 |
| 19.00 | 0.11 | 29.30 | 30.80 | 43.36 | 31.14 | 31.00 | 0.19 | 1957.98 | 0.12 |
| 20.00 | 0.00 | 28.74 | 30.52 | 38.72 | 30.01 | 30.58 | 0.06 | 650.30 | 0.04 |

| Time | I | T _{amb} | PCM | | | | | | |
|-------|------|------------------|-----------------|-------------------|-------------------|------------------|------|----------|----------|
| | | | T _{in} | T _{evap} | T _{cond} | T _{out} | ΔT | Q(J) | Q(MJ/m2) |
| 9.00 | 0.41 | 27.98 | 29.43 | 60.51 | 30.52 | 29.61 | 0.18 | 2144.70 | 0.13 |
| 10.00 | 0.57 | 31.37 | 31.66 | 72.10 | 37.95 | 33.68 | 2.03 | 24157.67 | 1.45 |
| 11.00 | 0.79 | 34.13 | 32.96 | 75.71 | 49.69 | 36.21 | 3.25 | 38703.91 | 2.32 |
| 12.00 | 1.70 | 32.87 | 32.53 | 73.81 | 48.19 | 35.68 | 3.14 | 37452.83 | 2.25 |
| 13.00 | 1.82 | 35.09 | 32.85 | 73.33 | 47.72 | 35.65 | 2.80 | 33342.16 | 2.00 |
| 14.00 | 1.28 | 37.30 | 33.72 | 75.18 | 51.25 | 37.13 | 3.41 | 40610.31 | 2.44 |
| 15.00 | 0.97 | 36.91 | 34.13 | 76.17 | 52.56 | 37.95 | 3.82 | 45555.04 | 2.73 |
| 16.00 | 0.83 | 31.20 | 32.38 | 72.61 | 45.01 | 35.67 | 3.29 | 39170.58 | 2.35 |
| 17.00 | 0.42 | 30.02 | 31.22 | 66.20 | 34.99 | 32.44 | 1.22 | 14536.31 | 0.87 |
| 18.00 | 0.46 | 30.59 | 31.24 | 65.40 | 33.78 | 32.12 | 0.87 | 10415.70 | 0.62 |
| 19.00 | 0.11 | 29.30 | 30.70 | 62.17 | 32.60 | 31.31 | 0.62 | 7357.52 | 0.44 |
| 20.00 | 0.00 | 28.74 | 30.41 | 58.49 | 31.54 | 30.72 | 0.31 | 3681.93 | 0.22 |

ตารางที่ ก.18 ตารางแสดงผลการทดลองอัตราการไหล 1.0 ลิตรต่อนาที มุมเอียง 30 องศา วัดจากแนวราบ ครั้งที่ 3

| Time | I | T _{amb} | Vacuum | | | | | | |
|-------|------|------------------|-----------------|-------------------|-------------------|------------------|------|----------|-----------------------|
| | | | T _{in} | T _{evap} | T _{cond} | T _{out} | ΔT | Q(J) | Q(MJ/m ²) |
| 9.00 | 0.84 | 29.89 | 30.78 | 47.62 | 32.52 | 31.23 | 0.45 | 5341.89 | 0.32 |
| 10.00 | 1.52 | 31.43 | 31.85 | 49.58 | 36.24 | 33.23 | 1.38 | 16492.35 | 0.99 |
| 11.00 | 1.76 | 33.24 | 33.08 | 50.43 | 37.69 | 34.64 | 1.56 | 18617.20 | 1.12 |
| 12.00 | 1.86 | 35.16 | 33.58 | 51.76 | 39.85 | 36.27 | 2.69 | 32041.44 | 1.92 |
| 13.00 | 1.66 | 37.87 | 34.75 | 53.98 | 43.88 | 37.89 | 3.14 | 37383.33 | 2.24 |
| 14.00 | 0.62 | 37.58 | 34.53 | 54.49 | 43.95 | 38.80 | 4.27 | 50857.22 | 3.05 |
| 15.00 | 0.69 | 37.66 | 34.26 | 54.35 | 43.54 | 38.20 | 3.94 | 46915.34 | 2.81 |
| 16.00 | 0.31 | 36.91 | 33.93 | 54.50 | 42.96 | 37.68 | 3.75 | 44720.99 | 2.68 |
| 17.00 | 0.31 | 35.66 | 33.27 | 50.75 | 38.58 | 36.04 | 2.77 | 32944.99 | 1.98 |
| 18.00 | 0.21 | 34.96 | 32.53 | 47.77 | 34.25 | 34.17 | 1.64 | 19550.54 | 1.17 |
| 19.00 | 0.07 | 32.90 | 31.56 | 43.08 | 32.04 | 32.19 | 0.63 | 7466.74 | 0.45 |
| 20.00 | 0.00 | 31.18 | 31.36 | 39.16 | 31.34 | 31.44 | 0.08 | 947.34 | 0.06 |

| Time | I | T _{amb} | PCM | | | | | | |
|-------|------|------------------|-----------------|-------------------|-------------------|------------------|------|----------|-----------------------|
| | | | T _{in} | T _{evap} | T _{cond} | T _{out} | ΔT | Q(J) | Q(MJ/m ²) |
| 9.00 | 0.84 | 29.89 | 30.34 | 59.13 | 31.77 | 30.76 | 0.43 | 4322.82 | 0.26 |
| 10.00 | 1.52 | 31.43 | 31.50 | 67.65 | 34.84 | 32.91 | 1.41 | 14350.07 | 0.86 |
| 11.00 | 1.76 | 33.24 | 33.09 | 71.60 | 39.54 | 35.34 | 2.25 | 22851.62 | 1.37 |
| 12.00 | 1.86 | 35.16 | 33.40 | 73.94 | 47.59 | 37.36 | 3.96 | 40227.67 | 2.41 |
| 13.00 | 1.66 | 37.87 | 34.64 | 76.83 | 54.52 | 39.42 | 4.78 | 48619.04 | 2.92 |
| 14.00 | 0.62 | 37.58 | 34.19 | 78.10 | 56.43 | 40.07 | 5.87 | 59739.71 | 3.58 |
| 15.00 | 0.69 | 37.66 | 33.79 | 78.22 | 55.59 | 39.38 | 5.59 | 56840.87 | 3.41 |
| 16.00 | 0.31 | 36.91 | 33.52 | 77.49 | 54.67 | 38.80 | 5.28 | 53687.76 | 3.22 |
| 17.00 | 0.31 | 35.66 | 32.89 | 74.88 | 48.53 | 36.79 | 3.90 | 39702.16 | 2.38 |
| 18.00 | 0.21 | 34.96 | 32.28 | 69.72 | 38.11 | 34.69 | 2.41 | 24462.09 | 1.47 |
| 19.00 | 0.07 | 32.90 | 31.41 | 63.56 | 34.20 | 32.84 | 1.43 | 14553.50 | 0.87 |
| 20.00 | 0.00 | 31.18 | 31.25 | 59.41 | 32.83 | 31.84 | 0.59 | 5977.75 | 0.36 |

ตารางที่ ก.19 ตารางแสดงผลการทดลองอัตราการไหล 0.25 ลิตรต่อนาที มุมเอียง 45 องศา วัดจากแนวราบ ครั้งที่ 1

| Time | I | T _{amb} | Vacuum | | | | | | |
|-------|-------|------------------|-----------------|-------------------|-------------------|------------------|-------|----------|-----------------------|
| | | | T _{in} | T _{evap} | T _{cond} | T _{out} | ΔT | Q(J) | Q(MJ/m ²) |
| 9.00 | 0.806 | 28.26 | 32.11 | 53.92 | 34.66 | 31.38 | -0.73 | -3712.54 | 0.00 |
| 10.00 | 1.373 | 30.42 | 31.30 | 57.52 | 42.24 | 36.04 | 4.75 | 24140.00 | 1.45 |
| 11.00 | 1.859 | 33.14 | 31.90 | 60.78 | 49.30 | 42.39 | 10.49 | 53357.19 | 3.20 |
| 12.00 | 1.990 | 33.86 | 32.95 | 63.81 | 53.64 | 47.09 | 14.15 | 71936.85 | 4.32 |
| 13.00 | 2.071 | 37.75 | 34.38 | 65.04 | 56.10 | 50.05 | 15.67 | 79700.97 | 4.78 |
| 14.00 | 1.945 | 39.27 | 35.79 | 68.99 | 60.61 | 52.65 | 16.87 | 85786.83 | 5.15 |
| 15.00 | 1.836 | 40.08 | 35.93 | 68.56 | 60.17 | 53.81 | 17.88 | 90927.60 | 5.46 |
| 16.00 | 1.374 | 42.56 | 36.32 | 67.97 | 59.66 | 53.41 | 17.09 | 86909.92 | 5.21 |
| 17.00 | 0.926 | 39.95 | 34.89 | 65.42 | 54.85 | 51.48 | 16.59 | 84362.84 | 5.06 |
| 18.00 | 0.419 | 30.30 | 30.28 | 54.67 | 42.75 | 43.67 | 13.40 | 68122.59 | 4.09 |
| 19.00 | 0.057 | 27.05 | 27.59 | 45.14 | 34.23 | 35.28 | 7.68 | 39070.68 | 2.34 |
| 20.00 | 0.00 | 26.87 | 26.99 | 39.61 | 29.78 | 30.40 | 3.41 | 17337.14 | 1.04 |

| Time | I | T _{amb} | PCM | | | | | | |
|-------|-------|------------------|-----------------|-------------------|-------------------|------------------|-------|----------|-----------------------|
| | | | T _{in} | T _{evap} | T _{cond} | T _{out} | ΔT | Q(J) | Q(MJ/m ²) |
| 9.00 | 0.806 | 28.26 | 30.84 | 57.38 | 33.06 | 30.84 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 10.00 | 1.373 | 30.42 | 29.96 | 71.02 | 45.88 | 36.22 | 6.27 | 31870.22 | 1.91 |
| 11.00 | 1.859 | 33.14 | 29.87 | 76.50 | 56.67 | 42.29 | 12.42 | 63172.54 | 3.79 |
| 12.00 | 1.990 | 33.86 | 30.24 | 78.43 | 59.58 | 45.38 | 15.14 | 77001.33 | 4.62 |
| 13.00 | 2.071 | 37.75 | 30.58 | 78.92 | 60.46 | 46.75 | 16.16 | 82205.67 | 4.93 |
| 14.00 | 1.945 | 39.27 | 30.97 | 81.69 | 62.92 | 48.50 | 17.53 | 89173.04 | 5.35 |
| 15.00 | 1.836 | 40.08 | 31.21 | 80.36 | 62.40 | 48.55 | 17.34 | 88164.38 | 5.29 |
| 16.00 | 1.374 | 42.56 | 31.10 | 79.01 | 60.73 | 47.43 | 16.32 | 83019.38 | 4.98 |
| 17.00 | 0.926 | 39.95 | 30.63 | 74.15 | 56.65 | 45.11 | 14.48 | 73632.07 | 4.42 |
| 18.00 | 0.419 | 30.30 | 28.60 | 64.46 | 37.05 | 36.04 | 7.45 | 37867.07 | 2.27 |
| 19.00 | 0.057 | 27.05 | 27.12 | 59.23 | 31.40 | 30.65 | 3.52 | 17910.05 | 1.07 |
| 20.00 | 0.00 | 26.87 | 26.49 | 57.70 | 29.18 | 28.38 | 1.89 | 9612.76 | 0.58 |

ตารางที่ ก.20 ตารางแสดงผลการทดลองอัตราการไหล 0.25 ลิตรต่อนาที มุมเอียง 45 องศา วัดจากแนวราบ ครั้งที่ 2

| Time | I | T _{amb} | Vacuum | | | | | | |
|-------|-------|------------------|-----------------|-------------------|-------------------|------------------|-------|----------|-----------------------|
| | | | T _{in} | T _{evap} | T _{cond} | T _{out} | ΔT | Q(J) | Q(MJ/m ²) |
| 9.00 | 0.806 | 28.26 | 32.11 | 53.92 | 34.66 | 31.38 | -0.73 | -3712.54 | 0.00 |
| 10.00 | 1.373 | 30.42 | 31.30 | 57.52 | 42.24 | 36.04 | 4.75 | 24140.00 | 1.45 |
| 11.00 | 1.859 | 33.14 | 31.90 | 60.78 | 49.30 | 42.39 | 10.49 | 53357.19 | 3.20 |
| 12.00 | 1.990 | 33.86 | 32.95 | 63.81 | 53.64 | 47.09 | 14.15 | 71936.85 | 4.32 |
| 13.00 | 2.071 | 37.75 | 34.38 | 65.04 | 56.10 | 50.05 | 15.67 | 79700.97 | 4.78 |
| 14.00 | 1.945 | 39.27 | 35.79 | 68.99 | 60.61 | 52.65 | 16.87 | 85786.83 | 5.15 |
| 15.00 | 1.836 | 40.08 | 35.93 | 68.56 | 60.17 | 53.81 | 17.88 | 90927.60 | 5.46 |
| 16.00 | 1.374 | 42.56 | 36.32 | 67.97 | 59.66 | 53.41 | 17.09 | 86909.92 | 5.21 |
| 17.00 | 0.926 | 39.95 | 34.89 | 65.42 | 54.85 | 51.48 | 16.59 | 84362.84 | 5.06 |
| 18.00 | 0.419 | 30.30 | 30.28 | 54.67 | 42.75 | 43.67 | 13.40 | 68122.59 | 4.09 |
| 19.00 | 0.057 | 27.05 | 27.59 | 45.14 | 34.23 | 35.28 | 7.68 | 39070.68 | 2.34 |
| 20.00 | 0.00 | 26.87 | 26.99 | 39.61 | 29.78 | 30.40 | 3.41 | 17337.14 | 1.04 |

| Time | I | T _{amb} | PCM | | | | | | |
|-------|-------|------------------|-----------------|-------------------|-------------------|------------------|-------|----------|-----------------------|
| | | | T _{in} | T _{evap} | T _{cond} | T _{out} | ΔT | Q(J) | Q(MJ/m ²) |
| 9.00 | 0.806 | 28.26 | 30.84 | 57.38 | 33.06 | 30.84 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 10.00 | 1.373 | 30.42 | 29.96 | 71.02 | 45.88 | 36.22 | 6.27 | 31870.22 | 1.91 |
| 11.00 | 1.859 | 33.14 | 29.87 | 76.50 | 56.67 | 42.29 | 12.42 | 63172.54 | 3.79 |
| 12.00 | 1.990 | 33.86 | 30.24 | 78.43 | 59.58 | 45.38 | 15.14 | 77001.33 | 4.62 |
| 13.00 | 2.071 | 37.75 | 30.58 | 78.92 | 60.46 | 46.75 | 16.16 | 82205.67 | 4.93 |
| 14.00 | 1.945 | 39.27 | 30.97 | 81.69 | 62.92 | 48.50 | 17.53 | 89173.04 | 5.35 |
| 15.00 | 1.836 | 40.08 | 31.21 | 80.36 | 62.40 | 48.55 | 17.34 | 88164.38 | 5.29 |
| 16.00 | 1.374 | 42.56 | 31.10 | 79.01 | 60.73 | 47.43 | 16.32 | 83019.38 | 4.98 |
| 17.00 | 0.926 | 39.95 | 30.63 | 74.15 | 56.65 | 45.11 | 14.48 | 73632.07 | 4.42 |
| 18.00 | 0.419 | 30.30 | 28.60 | 64.46 | 37.05 | 36.04 | 7.45 | 37867.07 | 2.27 |
| 19.00 | 0.057 | 27.05 | 27.12 | 59.23 | 31.40 | 30.65 | 3.52 | 17910.05 | 1.07 |
| 20.00 | 0.00 | 26.87 | 26.49 | 57.70 | 29.18 | 28.38 | 1.89 | 9612.76 | 0.58 |

ตารางที่ ก.21 ตารางแสดงผลการทดลองอัตราการไหล 0.5 ลิตรต่อนาที มุมเอียง 45 องศา วัดจากแนวราบ ครั้งที่ 1

| Time | l | T _{amb} | Vacuum | | | | | | |
|-------|------|------------------|-----------------|-------------------|-------------------|------------------|-------|----------|-----------------------|
| | | | T _{in} | T _{evap} | T _{cond} | T _{out} | ΔT | Q(J) | Q(MJ/m ²) |
| 9.00 | 1.21 | 29.61 | 30.01 | 46.42 | 31.79 | 30.30 | 0.29 | 1640.13 | 0.10 |
| 10.00 | 1.59 | 31.69 | 32.24 | 50.41 | 37.52 | 34.31 | 2.07 | 10544.30 | 0.63 |
| 11.00 | 2.00 | 32.82 | 33.17 | 52.43 | 41.43 | 37.47 | 4.29 | 21826.01 | 1.31 |
| 12.00 | 1.94 | 35.12 | 33.61 | 52.93 | 42.14 | 38.46 | 4.86 | 24703.66 | 1.48 |
| 13.00 | 2.11 | 38.10 | 33.19 | 55.40 | 45.50 | 37.04 | 3.85 | 19575.60 | 1.17 |
| 14.00 | 2.02 | 36.56 | 32.90 | 55.57 | 45.83 | 35.53 | 2.63 | 13375.32 | 0.80 |
| 15.00 | 2.12 | 37.68 | 32.84 | 55.15 | 45.38 | 35.27 | 2.43 | 12349.71 | 0.74 |
| 16.00 | 1.72 | 36.08 | 32.21 | 53.37 | 42.87 | 34.21 | 2.00 | 10179.82 | 0.61 |
| 17.00 | 1.16 | 35.45 | 31.51 | 51.51 | 39.45 | 32.84 | 1.33 | 6772.42 | 0.41 |
| 18.00 | 0.70 | 34.05 | 30.92 | 48.95 | 34.59 | 31.43 | 0.51 | 2597.93 | 0.16 |
| 19.00 | 0.02 | 32.23 | 30.21 | 43.75 | 31.33 | 30.39 | 0.18 | 940.85 | 0.06 |
| 20.00 | 0.00 | 30.81 | 30.06 | 38.56 | 29.14 | 29.60 | -0.45 | 0.00 | 0.00 |

| Time | l | T _{amb} | PCM | | | | | | |
|-------|------|------------------|-----------------|-------------------|-------------------|------------------|------|----------|-----------------------|
| | | | T _{in} | T _{evap} | T _{cond} | T _{out} | ΔT | Q(J) | Q(MJ/m ²) |
| 9.00 | 1.21 | 29.61 | 29.71 | 58.16 | 31.52 | 29.99 | 0.29 | 1449.42 | 0.09 |
| 10.00 | 1.59 | 31.69 | 31.64 | 67.18 | 35.88 | 32.69 | 1.05 | 5323.00 | 0.32 |
| 11.00 | 2.00 | 32.82 | 32.66 | 73.69 | 42.67 | 35.05 | 2.39 | 12146.28 | 0.73 |
| 12.00 | 1.94 | 35.12 | 33.39 | 75.25 | 50.11 | 37.10 | 3.71 | 18859.37 | 1.13 |
| 13.00 | 2.11 | 38.10 | 33.60 | 77.65 | 54.87 | 37.67 | 4.07 | 20715.64 | 1.24 |
| 14.00 | 2.02 | 36.56 | 33.18 | 78.05 | 55.43 | 36.93 | 3.75 | 19083.99 | 1.15 |
| 15.00 | 2.12 | 37.68 | 32.37 | 77.47 | 54.20 | 36.11 | 3.74 | 19020.42 | 1.14 |
| 16.00 | 1.72 | 36.08 | 32.66 | 75.74 | 50.74 | 35.38 | 2.72 | 13811.84 | 0.83 |
| 17.00 | 1.16 | 35.45 | 30.59 | 73.83 | 46.95 | 33.96 | 3.37 | 17130.24 | 1.03 |
| 18.00 | 0.70 | 34.05 | 29.09 | 69.72 | 37.54 | 31.32 | 2.23 | 11336.81 | 0.68 |
| 19.00 | 0.02 | 32.23 | 27.96 | 63.98 | 32.76 | 29.39 | 1.43 | 7247.08 | 0.43 |
| 20.00 | 0.00 | 30.81 | 27.15 | 59.47 | 30.74 | 28.09 | 0.94 | 4764.69 | 0.29 |

ตารางที่ ก.22 ตารางแสดงผลการทดลองอัตราการไหล 0.5 ลิตรต่อนาที มุมเอียง 45 องศา วัดจากแนวราบ ครั้งที่ 2

| Time | I | T _{amb} | Vacuum | | | | | | |
|-------|------|------------------|-----------------|-------------------|-------------------|------------------|-------|----------|-----------------------|
| | | | T _{in} | T _{evap} | T _{cond} | T _{out} | ΔT | Q(J) | Q(MJ/m ²) |
| 9.00 | 1.47 | 29.61 | 30.13 | 46.22 | 30.49 | 29.84 | -0.29 | 372.95 | 0.02 |
| 10.00 | 1.70 | 31.69 | 30.74 | 49.36 | 32.23 | 31.01 | 0.27 | 1627.42 | 0.10 |
| 11.00 | 2.00 | 32.82 | 31.25 | 51.48 | 34.12 | 32.57 | 1.32 | 6721.56 | 0.40 |
| 12.00 | 1.85 | 35.12 | 32.74 | 52.74 | 38.31 | 34.70 | 1.96 | 9976.40 | 0.60 |
| 13.00 | 1.90 | 38.10 | 33.43 | 53.94 | 40.06 | 36.88 | 3.45 | 17554.05 | 1.05 |
| 14.00 | 2.05 | 36.56 | 32.94 | 52.91 | 38.06 | 35.71 | 2.77 | 14074.60 | 0.84 |
| 15.00 | 1.80 | 37.68 | 32.86 | 52.30 | 37.23 | 35.29 | 2.42 | 12324.28 | 0.74 |
| 16.00 | 1.60 | 36.08 | 32.41 | 52.34 | 36.32 | 34.78 | 2.37 | 12044.57 | 0.72 |
| 17.00 | 1.45 | 35.45 | 31.82 | 51.62 | 34.20 | 33.38 | 1.55 | 7895.51 | 0.47 |
| 18.00 | 1.23 | 34.05 | 31.09 | 48.68 | 32.30 | 31.79 | 0.70 | 3538.78 | 0.21 |
| 19.00 | 0.10 | 32.23 | 30.43 | 44.71 | 30.85 | 30.63 | 0.20 | 1059.52 | 0.06 |
| 20.00 | 0.00 | 30.81 | 30.04 | 40.33 | 29.92 | 29.71 | -0.33 | 0.00 | 0.00 |

| Time | I | T _{amb} | PCM | | | | | | |
|-------|------|------------------|-----------------|-------------------|-------------------|------------------|------|----------|-----------------------|
| | | | T _{in} | T _{evap} | T _{cond} | T _{out} | ΔT | Q(J) | Q(MJ/m ²) |
| 9.00 | 1.47 | 29.61 | 29.57 | 54.95 | 30.09 | 29.82 | 0.25 | 1576.56 | 0.09 |
| 10.00 | 1.70 | 31.69 | 29.90 | 55.79 | 30.75 | 30.43 | 0.52 | 2665.74 | 0.16 |
| 11.00 | 2.00 | 32.82 | 30.57 | 58.95 | 31.71 | 31.30 | 0.72 | 3674.40 | 0.22 |
| 12.00 | 1.85 | 35.12 | 31.92 | 67.87 | 34.38 | 33.09 | 1.18 | 5975.67 | 0.36 |
| 13.00 | 1.90 | 38.10 | 32.61 | 70.59 | 38.53 | 35.43 | 2.82 | 14354.31 | 0.86 |
| 14.00 | 2.05 | 36.56 | 32.04 | 69.26 | 37.80 | 34.63 | 2.59 | 13176.13 | 0.79 |
| 15.00 | 1.80 | 37.68 | 31.98 | 68.97 | 37.53 | 34.46 | 2.48 | 12595.52 | 0.76 |
| 16.00 | 1.60 | 36.08 | 31.60 | 68.23 | 36.84 | 34.13 | 2.53 | 12866.75 | 0.77 |
| 17.00 | 1.45 | 35.45 | 30.99 | 66.18 | 34.47 | 32.75 | 1.76 | 8959.26 | 0.54 |
| 18.00 | 1.23 | 34.05 | 30.46 | 64.00 | 32.51 | 31.63 | 1.17 | 5954.48 | 0.36 |
| 19.00 | 0.10 | 32.23 | 29.85 | 60.94 | 31.24 | 30.69 | 0.84 | 4288.92 | 0.26 |
| 20.00 | 0.00 | 30.81 | 29.51 | 58.10 | 30.29 | 29.89 | 0.37 | 1896.71 | 0.11 |

ตารางที่ ก.23 ตารางแสดงผลการทดลองอัตราการไหล 0.5 ลิตรต่อนาที มุมเอียง 45 องศา วัดจากแนวราบ ครั้งที่ 3

| Time | I | T _{amb} | Vacuum | | | | | | |
|-------|------|------------------|-----------------|-------------------|-------------------|------------------|------|----------|----------|
| | | | T _{in} | T _{evap} | T _{cond} | T _{out} | ΔT | Q(J) | Q(MJ/m2) |
| 9.00 | 0.79 | 30.16 | 27.39 | 49.63 | 30.91 | 28.88 | 1.49 | 7425.08 | 0.45 |
| 10.00 | 2.37 | 32.16 | 28.56 | 51.54 | 36.13 | 32.14 | 3.58 | 18194.00 | 1.09 |
| 11.00 | 2.63 | 34.42 | 29.28 | 52.43 | 37.85 | 33.76 | 4.47 | 22745.67 | 1.36 |
| 12.00 | 2.57 | 37.20 | 28.70 | 51.45 | 34.12 | 32.83 | 4.13 | 20986.88 | 1.26 |
| 13.00 | 1.97 | 37.87 | 28.87 | 51.17 | 34.97 | 31.73 | 2.86 | 14545.03 | 0.87 |
| 14.00 | 2.10 | 37.69 | 29.00 | 50.71 | 34.18 | 31.60 | 2.61 | 13269.37 | 0.80 |
| 15.00 | 2.30 | 37.46 | 29.56 | 52.86 | 36.46 | 32.68 | 3.12 | 15875.78 | 0.95 |
| 16.00 | 1.50 | 36.82 | 29.27 | 51.64 | 34.53 | 31.85 | 2.58 | 13125.27 | 0.79 |
| 17.00 | 0.77 | 35.59 | 28.38 | 48.12 | 30.37 | 30.02 | 1.64 | 8344.74 | 0.50 |
| 18.00 | 0.42 | 31.82 | 27.06 | 44.26 | 28.07 | 28.18 | 1.13 | 5721.38 | 0.34 |
| 19.00 | 0.04 | 31.78 | 26.13 | 39.28 | 26.38 | 26.52 | 0.39 | 1987.65 | 0.12 |
| 20.00 | 0.00 | 30.86 | 25.89 | 36.54 | 25.81 | 25.89 | 0.01 | 212.60 | 0.01 |

| Time | I | T _{amb} | PCM | | | | | | |
|-------|------|------------------|-----------------|-------------------|-------------------|------------------|------|----------|----------|
| | | | T _{in} | T _{evap} | T _{cond} | T _{out} | ΔT | Q(J) | Q(MJ/m2) |
| 9.00 | 0.79 | 30.16 | 28.73 | 55.17 | 29.54 | 29.27 | 0.54 | 2729.31 | 0.16 |
| 10.00 | 2.37 | 32.16 | 29.33 | 63.58 | 31.66 | 30.52 | 1.19 | 6068.90 | 0.36 |
| 11.00 | 2.63 | 34.42 | 29.60 | 70.21 | 36.29 | 32.65 | 3.05 | 15515.54 | 0.93 |
| 12.00 | 2.57 | 37.20 | 28.33 | 67.93 | 34.78 | 32.07 | 3.74 | 19011.94 | 1.14 |
| 13.00 | 1.97 | 37.87 | 28.94 | 68.47 | 35.32 | 31.70 | 2.76 | 14040.70 | 0.84 |
| 14.00 | 2.10 | 37.69 | 28.86 | 68.47 | 36.06 | 32.33 | 3.47 | 17660.00 | 1.06 |
| 15.00 | 2.30 | 37.46 | 29.34 | 69.83 | 38.40 | 33.33 | 3.99 | 20270.65 | 1.22 |
| 16.00 | 1.50 | 36.82 | 28.50 | 67.46 | 36.38 | 32.12 | 3.62 | 18397.42 | 1.10 |
| 17.00 | 0.77 | 35.59 | 27.53 | 64.04 | 31.41 | 30.10 | 2.57 | 13070.18 | 0.78 |
| 18.00 | 0.42 | 31.82 | 26.55 | 61.16 | 28.86 | 28.44 | 1.89 | 9624.64 | 0.58 |
| 19.00 | 0.04 | 31.78 | 25.77 | 57.81 | 27.15 | 26.93 | 1.15 | 5861.24 | 0.35 |
| 20.00 | 0.00 | 30.86 | 25.53 | 57.13 | 26.33 | 26.20 | 0.68 | 3434.91 | 0.21 |

ตารางที่ ก.24 ตารางแสดงผลการทดลองอัตราการไหล 1.0 ลิตรต่อนาที มุมเอียง 45 องศา วัดจากแนวราบ ครั้งที่ 1

| Time | I | T _{amb} | Vacuum | | | | | | |
|-------|------|------------------|-----------------|-------------------|-------------------|------------------|------|----------|----------|
| | | | T _{in} | T _{evap} | T _{cond} | T _{out} | ΔT | Q(J) | Q(MJ/m2) |
| 9.00 | 1.69 | 26.91 | 28.54 | 48.58 | 31.07 | 29.20 | 0.65 | 6645.28 | 0.40 |
| 10.00 | 2.76 | 30.17 | 28.58 | 53.53 | 37.15 | 32.61 | 4.03 | 41007.48 | 2.46 |
| 11.00 | 3.13 | 32.66 | 29.20 | 54.77 | 40.69 | 34.68 | 5.48 | 55747.45 | 3.34 |
| 12.00 | 2.99 | 34.20 | 29.74 | 55.50 | 42.58 | 36.11 | 6.36 | 64732.14 | 3.88 |
| 13.00 | 3.32 | 35.82 | 30.14 | 56.11 | 43.28 | 37.02 | 6.88 | 69995.82 | 4.20 |
| 14.00 | 3.20 | 38.47 | 30.41 | 56.94 | 44.50 | 37.93 | 7.52 | 76488.52 | 4.59 |
| 15.00 | 3.17 | 40.11 | 30.50 | 57.14 | 44.74 | 38.26 | 7.77 | 78988.98 | 4.74 |
| 16.00 | 2.66 | 41.04 | 30.57 | 56.38 | 43.21 | 37.50 | 6.93 | 70495.91 | 4.23 |
| 17.00 | 2.46 | 40.05 | 30.34 | 55.49 | 39.92 | 36.48 | 6.14 | 62443.59 | 3.75 |
| 18.00 | 2.02 | 33.74 | 28.66 | 49.82 | 32.06 | 32.36 | 3.70 | 37591.60 | 2.26 |
| 19.00 | 0.51 | 29.05 | 26.84 | 42.88 | 27.80 | 28.15 | 1.31 | 13324.46 | 0.80 |
| 20.00 | 0.00 | 27.25 | 26.18 | 39.12 | 26.53 | 26.62 | 0.44 | 4449.96 | 0.27 |

| Time | I | T _{amb} | PCM | | | | | | |
|-------|------|------------------|-----------------|-------------------|-------------------|------------------|------|----------|----------|
| | | | T _{in} | T _{evap} | T _{cond} | T _{out} | ΔT | Q(J) | Q(MJ/m2) |
| 9.00 | 1.69 | 26.91 | 26.52 | 51.14 | 27.54 | 26.77 | 0.25 | 2921.66 | 0.18 |
| 10.00 | 2.76 | 30.17 | 27.70 | 64.22 | 33.00 | 29.74 | 2.04 | 24266.89 | 1.46 |
| 11.00 | 3.13 | 32.66 | 28.69 | 73.09 | 40.83 | 33.04 | 4.36 | 51889.85 | 3.11 |
| 12.00 | 2.99 | 34.20 | 29.37 | 74.74 | 43.29 | 34.53 | 5.23 | 53245.67 | 3.19 |
| 13.00 | 3.32 | 35.82 | 29.66 | 75.27 | 43.94 | 35.45 | 5.79 | 68997.81 | 4.14 |
| 14.00 | 3.20 | 38.47 | 29.71 | 75.83 | 44.63 | 35.88 | 6.18 | 73585.09 | 4.42 |
| 15.00 | 3.17 | 40.11 | 29.72 | 76.07 | 44.68 | 35.88 | 6.16 | 73346.79 | 4.40 |
| 16.00 | 2.66 | 41.04 | 29.96 | 74.47 | 43.57 | 35.57 | 5.61 | 66813.39 | 4.01 |
| 17.00 | 2.46 | 40.05 | 29.87 | 71.08 | 41.75 | 34.93 | 5.05 | 60200.57 | 3.61 |
| 18.00 | 2.02 | 33.74 | 28.16 | 65.07 | 32.83 | 31.07 | 2.91 | 34682.60 | 2.08 |
| 19.00 | 0.51 | 29.05 | 26.46 | 60.06 | 28.37 | 27.92 | 1.46 | 17395.91 | 1.04 |
| 20.00 | 0.00 | 27.25 | 25.84 | 57.99 | 27.24 | 26.84 | 1.00 | 11890.18 | 0.71 |

ตารางที่ ก.25 ตารางแสดงผลการทดลองอัตราการไหล 1.0 ลิตรต่อนาที มุมเอียง 45 องศา วัดจากแนวราบ ครั้งที่ 2

| Time | I | T _{amb} | Vacuum | | | | | | |
|-------|------|------------------|-----------------|-------------------|-------------------|------------------|------|----------|-----------------------|
| | | | T _{in} | T _{evap} | T _{cond} | T _{out} | ΔT | Q(J) | Q(MJ/m ²) |
| 9.00 | 0.11 | 28.32 | 28.36 | 48.66 | 29.41 | 28.81 | 0.45 | 2274.43 | 0.14 |
| 10.00 | 0.07 | 30.07 | 27.80 | 50.84 | 30.30 | 29.50 | 1.70 | 8628.69 | 0.52 |
| 11.00 | 0.44 | 32.70 | 29.24 | 54.10 | 33.96 | 32.96 | 3.72 | 18897.51 | 1.13 |
| 12.00 | 1.33 | 33.74 | 30.57 | 55.66 | 36.93 | 35.73 | 5.16 | 26254.79 | 1.58 |
| 13.00 | 0.98 | 34.56 | 30.98 | 55.82 | 37.84 | 36.44 | 5.46 | 27784.73 | 1.67 |
| 14.00 | 1.05 | 34.58 | 30.67 | 54.77 | 37.20 | 35.60 | 4.93 | 25055.42 | 1.50 |
| 15.00 | 0.45 | 35.63 | 30.57 | 55.06 | 36.20 | 34.80 | 4.23 | 21495.45 | 1.29 |
| 16.00 | 2.13 | 31.89 | 29.79 | 53.44 | 35.46 | 34.26 | 4.47 | 22728.72 | 1.36 |
| 17.00 | 1.07 | 33.53 | 28.86 | 52.56 | 32.69 | 31.69 | 2.84 | 14422.12 | 0.87 |
| 18.00 | 1.10 | 33.16 | 28.62 | 50.54 | 31.66 | 30.86 | 2.24 | 11379.19 | 0.68 |
| 19.00 | 1.26 | 28.34 | 27.17 | 43.54 | 28.96 | 28.36 | 1.19 | 6043.47 | 0.36 |
| 20.00 | 0.00 | 28.83 | 26.63 | 38.54 | 27.30 | 26.90 | 0.27 | 1392.31 | 0.08 |

| Time | I | T _{amb} | Vacuum | | | | | | |
|-------|------|------------------|-----------------|-------------------|-------------------|------------------|------|----------|-----------------------|
| | | | T _{in} | T _{evap} | T _{cond} | T _{out} | ΔT | Q(J) | Q(MJ/m ²) |
| 9.00 | 0.11 | 28.32 | 28.05 | 53.75 | 28.88 | 28.63 | 0.58 | 3442.11 | 0.21 |
| 10.00 | 0.07 | 30.07 | 27.34 | 55.09 | 28.89 | 28.40 | 1.06 | 6334.81 | 0.38 |
| 11.00 | 0.44 | 32.70 | 28.63 | 68.58 | 34.82 | 31.07 | 2.44 | 14506.52 | 0.87 |
| 12.00 | 1.33 | 33.74 | 30.02 | 74.24 | 43.14 | 34.53 | 4.51 | 26883.23 | 1.61 |
| 13.00 | 0.98 | 34.56 | 30.46 | 74.44 | 43.99 | 35.31 | 4.85 | 28898.85 | 1.73 |
| 14.00 | 1.05 | 34.58 | 30.27 | 72.33 | 41.11 | 34.51 | 4.24 | 25249.88 | 1.51 |
| 15.00 | 0.45 | 35.63 | 30.07 | 73.30 | 42.20 | 34.34 | 4.27 | 25423.64 | 1.53 |
| 16.00 | 2.13 | 31.89 | 29.65 | 70.92 | 38.61 | 33.58 | 3.93 | 23383.20 | 1.40 |
| 17.00 | 1.07 | 33.53 | 28.91 | 67.66 | 35.14 | 31.47 | 2.56 | 15226.38 | 0.91 |
| 18.00 | 1.10 | 33.16 | 28.60 | 64.90 | 32.36 | 30.72 | 2.11 | 12585.22 | 0.76 |
| 19.00 | 1.26 | 28.34 | 26.99 | 60.44 | 28.93 | 28.42 | 1.43 | 8514.26 | 0.51 |
| 20.00 | 0.00 | 28.83 | 26.37 | 57.95 | 27.55 | 27.24 | 0.88 | 5220.14 | 0.31 |

ประวัติผู้วิจัย

| | |
|-----------------|---|
| ชื่อ - สกุล | นายเกียรติศักดิ์ บุญญาอรุณเนตร |
| ที่อยู่ | 133/19 ถนนราชดำเนิน ซอย 8 ตำบลพระปฐมเจดีย์ อำเภอเมือง จังหวัดนครปฐม |
| ประวัติการศึกษา | |
| พ.ศ. 2553 | สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยศิลปากร อำเภอเมือง จังหวัดนครปฐม |
| พ.ศ. 2554 | ศึกษาต่อระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน มหาวิทยาลัยศิลปากร อำเภอเมือง จังหวัดนครปฐม |





สารบัญ

| | | หน้า |
|--------------------------|---|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย | | ง |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ | | จ |
| กิตติกรรมประกาศ | | ฉ |
| สารบัญตาราง | | ช |
| สารบัญรูปภาพ | | ฅ |
| บทที่ | | |
| 1 | บทนำ | 1 |
| | 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา | 1 |
| | 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย | 3 |
| | 1.3 สมมติฐานของการวิจัย | 3 |
| | 1.4 ขอบเขตของงานวิจัย | 4 |
| | 1.5 ขั้นตอนของการวิจัย | 4 |
| | 1.6 ข้อตกลงเบื้องต้นของการวิจัย | 5 |
| | 1.7 ความจำกัดของการวิจัย | 5 |
| | 1.8 นิยามศัพท์เฉพาะ | 5 |
| 2 | ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง | 5 |
| | 2.1 เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ | 6 |
| | 2.2 ท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซโฟน | 15 |
| | 2.3 วิธีการสะสมพลังงานความร้อน | 23 |
| | 2.4 วัสดุสะสมความร้อนแฝง | 24 |
| 3 | ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย | 27 |
| | 3.1 ระยะเวลาการวิจัย | 27 |
| | 3.2 แผนการดำเนินงาน | 27 |
| | 3.3 แผนการทดลอง | 28 |
| | 3.4 การออกแบบท่อความร้อน | 29 |
| | 3.5 อุปกรณ์และเครื่องมือวัด | 31 |
| | 3.6 ขั้นตอนการสร้างเครื่องเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อใช้ใน การทดลอง | 33 |
| | 3.7 ขั้นตอนการทดสอบเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ | 36 |
| | 3.8 การวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง | 37 |

| บทที่ | หน้า |
|--|------|
| 4 ผลการวิจัย..... | 39 |
| 4.1 สมรรถนะทางความร้อนของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์..... | 39 |
| 4.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีการ สะสมพลังงานความร้อนโดยมีการใช้วัสดุเปลี่ยนสถานะ | 51 |
| 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ | 60 |
| 5.1 สรุปผลการทดลอง | 60 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ | 62 |



สารบัญตาราง

| ตารางที่ | | หน้า |
|----------|---|------|
| 2.1 | ตารางแสดงคุณสมบัติวัสดุของแข็ง ของเหลวสำหรับการสะสมความร้อนสัมผัส | 24 |
| 3.1 | ระยะเวลาของการดำเนินการวิจัย | 27 |
| 3.2 | ตารางแสดงรูปแบบการทดลอง | 29 |
| 4.1 | แสดงประสิทธิภาพสูงสุด และการสูญเสียความร้อนของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้ตัวรับรังสีแบบท่อสุญญากาศร่วมกับท่อเทอร์โมไซฟอนแบบธรรมดา และแบบมีวัสดุเปลี่ยนสถานะ (พาราฟิน) | 47 |
| 4.2 | แสดงประสิทธิภาพสูงสุด และการสูญเสียความร้อนของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้ตัวรับรังสีแบบท่อสุญญากาศร่วมกับท่อเทอร์โมไซฟอนแบบธรรมดา และแบบมีวัสดุเปลี่ยนสถานะ (พาราฟิน) | 50 |
| 4.3 | ตารางแสดงผลที่ได้จากการคำนวณ | 53 |
| 4.4 | ผลการคำนวณหาค่าความร้อนจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ | 57 |



สารบัญรูปภาพ

| รูปที่ | | หน้า |
|--------|--|------|
| 1.1 | แสดงเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ | 2 |
| 1.2 | ภาพตัดขวางของท่อสุญญากาศร่วมกับท่อเทอร์โมไซฟอนและมีวัสดุเปลี่ยนสถานะ | 3 |
| 2.1 | ตัวกักเก็บความร้อน (Solar Collector)..... | 6 |
| 2.2 | ตัวกักเก็บความร้อนแบบแผ่นแบน เป็นกล่องที่ถูกหุ้มฉนวนและกันน้ำได้ ภายในมีแผ่น ตัวดูดซับสีทึบ ทำหน้าที่ทำความร้อนและถ่ายเทให้กับของเหลวที่ไหลอยู่ในท่อ | 8 |
| 2.3 | ตัวกักเก็บความร้อนแบบรวมศูนย์ ที่มีการแสดงทิศทางการไหลของของไหล | 9 |
| 2.4 | แสดงส่วนต่างๆของท่อสุญญากาศร่วมกับท่อความร้อน..... | 9 |
| 2.5 | ระบบผลิตน้ำร้อนด้วยหลอดสุญญากาศแบบท่อความร้อน | 10 |
| 2.6 | หลอดสุญญากาศร่วมกับท่อความร้อน | 10 |
| 2.7 | ตัวดูดซับพลังงานแสงอาทิตย์ (Absorber) | 11 |
| 2.8 | คอนเดนเซอร์ (Condenser) ของท่อความร้อน | 11 |
| 2.9 | แมนิโฟลด์ (Manifold) ของเครื่องทำน้ำร้อน | 11 |
| 2.10 | ถังเก็บน้ำร้อนของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ | 12 |
| 2.11 | ตัวอย่างระบบปั้มน้ำและชุดควบคุม | 12 |
| 2.12 | ระบบแอกทิฟ เป็นการใช้ปั้มในการหมุนเวียนของเหลวในระบบทำน้ำร้อน | 13 |
| 2.13 | ระบบแอกทิฟแบบปิดจะใช้ของเหลว เช่น น้ำ หรือ ของเหลวจุดเยือกแข็งต่ำในวงจร ของตัวกักเก็บความร้อน และใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อถ่ายเทความร้อน ให้กับน้ำที่ต้องการนำไปใช้งาน | 14 |
| 2.14 | ลักษณะส่วนประกอบของเทอร์โมไซฟอน | 16 |
| 2.15 | ลักษณะการเกิดขีดจำกัดการแห้ง | 19 |
| 2.16 | แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขบอนด์กับ f_1 | 21 |
| 2.17 | แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมเอียงของท่อ กับค่า f_3 | 22 |
| 2.18 | ลักษณะของการจัดเก็บความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ | 23 |
| 3.1 | แผนผังการดำเนินงานวิจัย | 28 |
| 3.2 | แผนผังแสดงการออกแบบท่อเทอร์โมไซฟอน | 30 |
| 3.3 | เกจวัดความดันและสายเติมน้ำยา | 31 |
| 3.4 | ปั้มสุญญากาศ | 32 |
| 3.5 | แสดงภาพเครื่องบันทึกข้อมูล | 32 |
| 3.6 | แสดงภาพสายเทอร์โมคัปเปิล..... | 32 |
| 3.7 | แสดงภาพท่อเทอร์โมไซฟอนกับท่อสุญญากาศ | 33 |
| 3.8 | ตำแหน่งที่ติดเทอร์โมคัปเปิลเพื่อวัดอุณหภูมิ | 35 |
| 3.9 | เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ ที่ใช้ตัวรับรังสีชนิดท่อสุญญากาศร่วมกับ ท่อเทอร์โมไซฟอนและมีวัสดุเปลี่ยนสถานะ | 36 |

| รูปที่ | หน้า |
|--------|---|
| 4.1 | กราฟแสดงอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้ตัวรับรังสี แบบท่อสุญญากาศร่วมกับท่อเทอร์โมไซฟอนแบบธรรมดา ที่อัตราการไหล 0.50 กิโลกรัมต่อนาที มุมเอียงการทำงาน 30 องศาจากแนวระดับ ทดลองในวันที่ 29 มิถุนายน 2557 40 |
| 4.2 | กราฟแสดงอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้ตัวรับรังสีแบบท่อสุญญากาศร่วมกับท่อเทอร์โมไซฟอนแบบมีวัสดุเปลี่ยนสถานะ ที่อัตราการไหล 0.50 กิโลกรัมต่อนาที มุมเอียงการทำงาน 30 องศาจากแนวระดับ ทดลองในวันที่ 29 มิถุนายน 2557..... 41 |
| 4.3 | กราฟแสดงการถ่ายเทความร้อนของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้ตัวรับรังสีแบบท่อสุญญากาศร่วมกับท่อเทอร์โมไซฟอนแบบธรรมดา และแบบมีวัสดุเปลี่ยนสถานะ (พาราฟิน) และค่าความเข้มแสงอาทิตย์ ที่อัตราการไหล 0.50 กิโลกรัมต่อนาที มุมเอียงการทำงาน 30 องศาจากแนวระดับ 42 |
| 4.4 | กราฟแสดงประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้ตัวรับรังสีแบบท่อสุญญากาศร่วมกับท่อเทอร์โมไซฟอนแบบธรรมดา และแบบมีวัสดุเปลี่ยนสถานะ (พาราฟิน) กับ $(T_m - T_a)/I$ ที่อัตราการไหล 0.50 กิโลกรัมต่อนาที มุมเอียงการทำงาน 30 องศา จากแนวระดับ 43 |
| 4.5 | กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการถ่ายเทความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ของตัวรับรังสีอาทิตย์กับอัตราการไหล ที่มุมตัวรับรังสีอาทิตย์ 14 องศา กับแนวระดับ 45 |
| 4.6 | กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานความร้อนของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์กับอัตราการไหล ที่มุมตัวรับรังสีอาทิตย์ 14 องศา กับแนวระดับ 45 |
| 4.7 | กราฟแสดงประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้ตัวรับรังสีแบบท่อสุญญากาศร่วมกับท่อเทอร์โมไซฟอนแบบธรรมดา และแบบมีวัสดุเปลี่ยนสถานะ (พาราฟิน) กับ $(T_m - T_a)/I$ ที่อัตราการไหลต่างๆ มุมเอียงการทำงาน 14 องศาจากแนวระดับ 46 |
| 4.8 | กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการถ่ายเทความร้อนของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้ตัวรับรังสีแบบท่อสุญญากาศร่วมกับท่อเทอร์โมไซฟอนแบบธรรมดา และแบบมีวัสดุเปลี่ยนสถานะ (พาราฟิน) กับมุมเอียง ที่อัตราการไหลของน้ำขาเข้า 0.5 กิโลกรัมต่อนาที..... 48 |
| 4.9 | กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานความร้อนของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์กับมุมเอียง ที่อัตราการไหลของน้ำขาเข้า 0.5 กิโลกรัมต่อนาที..... 50 |

| รูปที่ | หน้า |
|--------|---|
| 4.10 | กราฟแสดงประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้ตัวรับรังสีแบบท่อสุญญากาศร่วมกับท่อเทอร์โมไซโฟนแบบธรรมดา และแบบมีวัสดุเปลี่ยนสถานะ (พาราฟิน) กับ $(T_m - T_a)/I$ ที่มุมเอียงการทำงานต่างๆ อัตราการไหลของน้ำขาเข้า 0.5 กิโลกรัมต่อนาที 51 |
| 4.11 | แผนภาพแสดงความต้านทานความร้อนของเครื่องน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีการสะสมพลังงานความร้อนโดยมีการใช้วัสดุเปลี่ยนสถานะ 52 |
| 4.12 | กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมกับค่าความร้อนสูญเสียและอุณหภูมิที่ผิวท่อแก้วและอุณหภูมิผิวรับรังสีอาทิตย์ 54 |
| 4.13 | กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีการสะสมพลังงานความร้อนโดยมีการใช้วัสดุเปลี่ยนสถานะกับช่วงเวลาของวันที่ 29 มิถุนายน 2557 58 |

