

รายงานฉบับสมบูรณ์

คุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของ Vapor chamber ที่มีท่อวงรอบเป็น ส่วนควบแน่นและใช้ copper nano-water mixture เป็นสารทำงาน

Heat transfer characteristics of a vapor chamber with loop tube condenser using copper nano-water mixture as working fluid

รหัสโครงการ

SCH-NR2011-502

รายนามคณะผู้วิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วสันต์ ศรีเมือง

หน่วยงาน ห้องปฏิบัติการวิจัยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อความร้อน
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

วันเริ่มต้นโครงการ 2 กรกฎาคม 2555

วันสิ้นสุดโครงการ 1 สิงหาคม 2556

...../ตรวจสอบเนื้อหาแล้ว

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากศูนย์ประสานงานนักเรียนทุนรัฐบาลทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี และสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

นอกจากนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ที่สนับสนุนงบประมาณเพิ่มเติม จนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงอย่างสมบูรณ์

ผู้วิจัยเห็นว่า ผลงานวิจัยนี้ มีประโยชน์อย่างยิ่งต่อการพัฒนาประเทศไทย ซึ่งหากได้รับการพัฒนาจนเข้าสู่เชิงพาณิชย์ได้ วิวัฒนาการด้านการใช้ vapor chamber เพื่อระบายความร้อนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์นี้ จะสามารถผลิตในประเทศไทยได้ในโอกาสต่อไป

ปี พ.ศ. ที่ได้รับทุน 2554

ชื่อเรื่อง	คุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของ Vapor chamber ที่มีท่อวงรอบเป็นส่วนควบแน่นและใช้ Copper nano-water mixture เป็นสารทำงาน
นักวิจัย	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วสันต์ ศรีเมือง
หน่วยงาน	ห้องปฏิบัติการวิจัยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อความร้อน สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
แหล่งทุน	ศูนย์ประสานงานนักเรียนทุนรัฐบาลทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี และสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมรรถนะทางความร้อนของ Vapor chamber ที่มีการติดตั้งท่อวงรอบบนส่วนควบแน่น (TC) ส่วนควบแน่นของ Vapor chamber แบบธรรมดา (CC) ถูกดัดแปลงโดยการติดตั้งท่อแบบวงรอบเพื่อพัฒนาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนด้านอากาศสมรรถนะทางความร้อนของ Vapor chamber แบบ CC และ TC ที่เติมน้ำบริสุทธิ์เป็นสารทำงานถูกเปรียบเทียบ ชุดทดสอบสมรรถนะทางความร้อนของ Vapor chamber แบบ CC หรือ TC จะถูกจัดทำขึ้นเพื่อทดสอบโดยเฉพาะ ในการทดลองได้ทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของส่วนทำระเหย (T_j) 80, 90 และ 100 °C และเปลี่ยนความเร็วลมที่ใช้ระบายส่วนควบแน่น (V) คือ 1.0, 1.4 และ 1.8 m/s สุดท้าย ค่าความต้านทานความร้อนของ Vapor chamber แบบ TC ที่มีผงทองแดงระดับอนุภาคนาโนมาผสมเข้ากับน้ำบริสุทธิ์ซึ่งใช้เป็นสารทำงานถูกค้นหาค้นหาด้วยการทดลอง

ผลการทดลองพบว่า ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดของ Vapor chamber แบบ CC และ TC ที่เติมน้ำเป็นสารทำงานเท่ากับ 18.98 และ 77.50 W ตามลำดับ อัตราการถ่ายเทความร้อนของ Vapor chamber ทั้งสองแบบเพิ่มขึ้นตาม T_j และ V การนำท่อขนาดเล็กติดตั้งบนส่วนควบแน่นของ Vapor chamber สามารถลดค่าความต้านทานความร้อนได้ 75 % การใช้ Nano copper powder with water แทนน้ำบริสุทธิ์เป็นสารทำงานใน Vapor chamber แบบ TC นั้นทำให้ค่า R_{tc} ลดลงเฉลี่ย 32.13 %

คำสำคัญ: เวเปอร์แชมเบอร์, ฮีตซิงค์, ลูปคอนเดนเซอร์, ระบายความร้อน

- Research Title:** Heat transfer characteristics of a vapor chamber with loop tube condenser using copper nano-water mixture as working fluid
- Researcher:** Asst. Prof. Dr. Wasan Srimuang
- University:** Heat pipe heat exchanger research laboratory, department of mechanical engineering, Faculty of engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Isan.
- Source of Fund:** Coordinating Center for Thai Government Science and Technology Scholarship Students (CSTS), Ministry of Science and Technology, and National Science and Technology Development Agency (NSTDA).

Abstract

The objective of this research is to study on thermal performance of vapor chamber with loop tube condenser (TC). A condenser of conventional vapor chamber (CC) was modified by attach the loops tubes for improving of heat transfer coefficient on air side. Thermal performance of CC and TC was compared with operation by pure water as working fluid. A special test rig for tests of the thermal performance of CC or TC was setup. In during tests, temperatures (T_j) that supplied to evaporator were varied in the range of 80, 90 and 100 °C. The air velocity (V) that flow across the condenser was also varied of 1.0, 1.4 and 1.8 m/s. Finally, thermal resistance of the vapor chamber with copper nano-water mixture as working fluid was experimentally investigated.

Results, the maximum heat transfer rate of both vapor chambers with water as working fluid were 19.98 and 77.50 W, respectively. The heat transfer rate of both vapor chambers increased with T_j and V . The small tubes are installed on condenser can reduce the thermal resistance by 75 %. In conclusion, the use of nano copper powder with water instead of water as the working fluid in the TC found that the 32.13% average decrease in R_t .

Key words: vapor chamber, heat sink, loop condenser, cooling

สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
สารบัญ.....	ง
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	2
1.5 สมมุติฐานงานวิจัย.....	2
1.6 กรอบแนวความคิดในการวิจัย.....	3
1.7 ประโยชน์ที่คิดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 หลักการทำงานของ Vapor chamber.....	4
2.2 ทฤษฎีพื้นฐานในการคำนวณ.....	5
2.3 การถ่ายเทความร้อนออกจาก Vapor chamber.....	6
2.4 ความต้านทานความร้อน.....	7
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	8
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	11
3.1 พารามิเตอร์ในการทดสอบ.....	11
3.2 ขั้นตอนการทำ Vapor chamber.....	11
3.3 ขั้นตอนการผสม nano copper powder กับน้ำ.....	17
3.4 วงจรของชุดทดสอบ.....	19
3.5 อุปกรณ์ประกอบและเครื่องมือวัด.....	20
3.6 ขั้นตอนการทดลอง.....	24
3.7 ขั้นตอนการคำนวณ.....	25

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ 4 ผลการวิจัย.....	29
4.1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่จุดต่างๆ.....	29
4.2 การเปลี่ยนแปลงของ Q_{out} กรณีเต็มสารทำงานและไม่เต็มสารทำงานที่ $T_j = 100^\circ\text{C}$	30
4.3 ผลของ V_{air} ที่มีต่อ Q_{out}	33
4.4 ผลของ V_{air} ที่มีต่อ R_t	34
4.5 ผลของการผสม nano copper powder กับน้ำ.....	37
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย.....	39
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	39
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	39
บรรณานุกรม.....	41
ภาคผนวก ก ตารางบันทึกผลการทดลอง.....	42
ภาคผนวก ข การตีพิมพ์เผยแพร่.....	79
ภาคผนวก ค อนุสิทธิบัตร.....	91
ภาคผนวก ง ประวัตินักวิจัย.....	97
ภาคผนวก จ เอกสารอื่นๆ.....	102

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

Vapor chamber ที่มีหลายส่วนควบแน่น หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Vapor chamber with loop condenser เป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนชนิดหนึ่งที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมได้ดี ตัวอย่างเช่น นำไปเป็นอุปกรณ์ระบายความร้อน CPU ของคอมพิวเตอร์ หรือนำไปลดความชื้นของอากาศในระบบปรับอากาศ งานที่ใช้ความร้อนในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ หรืองานที่ต้องการให้ชิ้นส่วนที่สำคัญมีการกระจายอุณหภูมิอย่างสม่ำเสมอ เป็นต้น

Vapor chamber โดยทั่วไปประกอบด้วย 2 ส่วน คือ (1) ส่วนทำระเหย (Evaporator section) และ (2) ส่วนควบแน่น (Condenser section) Vapor chamber ทำงานด้วยหลักการดูดซับความร้อนจากแหล่งอุณหภูมิสูง เช่น Heater เข้าสู่สารทำงานซึ่งมีสถานะเป็นของเหลวอิ่มตัวที่บรรจุภายใน Vapor chamber จากนั้นสารกลายเป็นไอ (ความร้อนแฝง) สารทำงานที่กลายเป็นไอลอยตัวขึ้นสู่ด้านบนไปยังส่วนระบายความร้อน ซึ่งออกแบบให้มีลักษณะเป็นท่อขนาดเล็กหลายๆ ท่อ จากนั้นสารทำงานจะถูกถ่ายเทความร้อนออกไปสู่แหล่งอุณหภูมิต่ำ โดยแหล่งอุณหภูมิต่ำที่นำมาระบายความร้อน เช่น น้ำหรืออากาศ จากนั้นสารทำงานภายใน Vapor chamber จะเกิดการควบแน่นกลับเป็นของเหลวและไหลลงมาสู่ส่วนรับความร้อนโดยอาศัยแรงโน้มถ่วงของโลก ข้อดีของ Vapor chamber ที่แตกต่างจากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนทั่วไป คือ (1) ไม่ต้องใช้พลังงานเสริมในการทำงาน (2) อุณหภูมิในการใช้งานมีช่วงกว้างและสามารถทำงานได้แม้ว่าระหว่างอุณหภูมิแหล่งให้ความร้อนกับแหล่งรับความร้อนต่างกันไม่มากนัก ซึ่งขึ้นอยู่กับทางเลือกสารทำงานที่เหมาะสม (3) มีค่าฟลักซ์ในการถ่ายเทความร้อนสูง และ (4) ปัญหาในการบำรุงรักษามีน้อยเพราะไม่มีส่วนเคลื่อนไหว

ปัจจุบัน Vapor chamber ถูกพัฒนาให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นตามลำดับ แต่จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่า สมรรถนะของ Vapor chamber สามารถพัฒนาให้เพิ่มขึ้นได้อีก ในงานวิจัยนี้ได้ปรับปรุงรูปร่างของส่วนควบแน่นเพื่อลดค่าความต้านทานความร้อนของส่วนควบแน่น โดยการติดตั้งท่อขนาดเล็กเพิ่มบนส่วนควบแน่น

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของ Vapor chamber ที่มีท่อขนาดเล็กยึดติดกับด้านบนของส่วนควบแน่น ซึ่งเรียกว่า tube condenser (TC) ในการศึกษาจะเปรียบเทียบประสิทธิภาพผลทางความร้อนของ Vapor chamber ใน 2 ประเด็น คือ (1) กรณีติดตั้ง tube condenser และ (2) กรณีไม่ติดตั้ง tube condenser หรือเรียกว่า Conventional Vapor chamber

(CC) นอกจากนี้ยังจะศึกษาประสิทธิภาพผลทางความร้อนของ TC ในกรณีที่เติมน้ำบริสุทธิ์เทียบกับของผสมระหว่าง nano copper-น้ำบริสุทธิ์ ที่ใช้เป็นสารทำงาน

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ใช้ Vapor chamber ที่มีความกว้าง 140 mm ยาว 140 mm สูง 50 mm ซึ่งเป็นการขยายเสกจาก CPU ของคอมพิวเตอร์ตั้งโต๊ะ เพื่อให้สามารถพิจารณาเห็นความแตกต่างของอุณหภูมิจากผลการทดลองได้มากขึ้น

1.3.2 ทำการเปลี่ยนค่าอุณหภูมิของส่วนทำระเหย (T_j) ต่างกันสามค่า คือ 80, 90 และ 100 °C

1.3.3 ทำการทดลองโดยเปรียบเทียบการใช้สารทำงานสองชนิด ได้แก่ (1) น้ำบริสุทธิ์ และ (2) copper nano –water mixture ซึ่งอัตราการเติมสารทำงานจะคงที่คือ 50% ของปริมาตรภายใน vapor chamber

1.3.4 เปลี่ยนความเร็วของอากาศ (V) ที่ไหลผ่านภายนอกของส่วนทำระเหย ด้วยความเร็ว 1.0, 1.4 และ 1.8 m/s

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

- 1) ศึกษาทฤษฎีและหลักการของ Vapor chamber
- 2) ศึกษาวิเคราะห์ข้อมูลและการคำนวณทางวิศวกรรมเกี่ยวกับ Vapor chamber
- 3) ออกแบบสร้างชุดทดลองและ สร้าง Vapor chamber
- 4) ทำการทดลองโดยชุดทดลอง Vapor chamber ที่สร้างขึ้นเพื่อประเมินสมรรถนะของ Vapor chamber
- 5) บันทึกค่าที่ได้จากผลการทดลอง และวิเคราะห์ผล
- 6) สรุปผลการทดลอง
- 7) สรุปปัญหาและอุปสรรคในการดำเนินงานพร้อมข้อเสนอแนะต่างๆ

1.5 สมมุติฐานงานวิจัย

การเพิ่มสมรรถนะของ Vapor chamber ในการวิจัยนี้จะมุ่งเน้นสองประการ ได้แก่ (1) เพิ่มพื้นที่ในส่วนการควบแน่น โดยใช้การติดตั้งท่อขนาดเล็กเพิ่มขึ้นบนส่วนควบแน่น ซึ่งคาดว่าจะสามารถช่วยเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่าแบบเดิม ประการที่สองคือ เติมนางทองแดงลงในสารทำงานเหลว (น้ำบริสุทธิ์) ที่บรรจุใน Vapor chamber ซึ่งจะเป็นการเพิ่มค่านำความร้อน (k) ในสารทำงาน อีกทั้งเพิ่มพื้นที่การถ่ายเทความร้อนของตัวสารทำงานเองด้วย

1.6 กรอบแนวความคิดในการวิจัย

ในปัจจุบันงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ Vapor chamber ซึ่งใช้เป็นอุปกรณ์ระบายความร้อน มีนักวิจัยให้ความสนใจเป็นอย่างมาก ซึ่งมีนักวิจัยหลายท่านที่ได้ศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่ออิทธิพลต่อการถ่ายเทความร้อนของ Vapor chamber จากการสำรวจงานวิจัยที่ผ่านมายังไม่พบการศึกษาสมรรถนะของ Vapor chamber ที่มีส่วนควบแน่นเป็นท่อขนาดเล็ก การเพิ่มท่อขนาดเล็กที่เป็นส่วนควบแน่นจะมีผลต่อการเพิ่มสมรรถนะของ Vapor chamber ซึ่งผลงานวิจัยนี้จะตอบโจทย์ปัญหาที่เกิดขึ้นสำหรับการพัฒนาอุปกรณ์ระบายความร้อนของ CPU ของคอมพิวเตอร์แบบต่างๆ

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

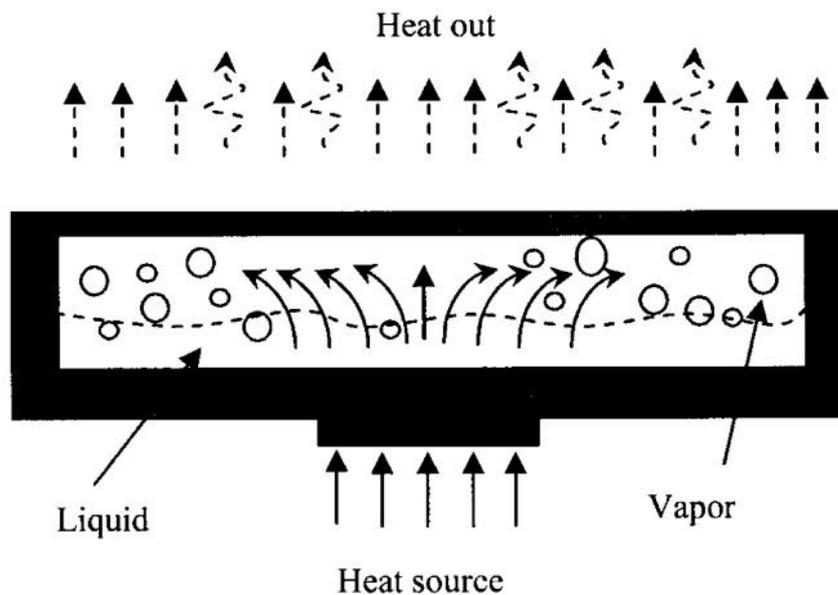
- 1) มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับการทำงานของ Vapor chamber แบบ CC และแบบ TC
- 2) ทราบถึงอิทธิพลของความเร็วลมที่มีต่อการควบแน่นของ Vapor chamber ทั้งสองชนิด
- 3) ทราบถึงอุณหภูมิที่จ่ายให้กับส่วนทำระเหยที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนของ Vapor chamber ทั้งสองชนิด
- 4) ได้รับองค์ความรู้ใหม่ที่สามารถนำไปพัฒนาในเชิงอุตสาหกรรมได้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 หลักการทำงานของ Vapor chamber

Vapor chamber เป็นอุปกรณ์ระบายความร้อนชนิดหนึ่งที่สามารถถ่ายเทความร้อนได้โดยไม่ต้องอาศัยพลังงานจากภายนอก ความร้อนจากแหล่งความร้อนสูง (Heat source) จะถ่ายเทเข้าสู่ส่วนทำระเหย (ปกติจะอยู่ส่วนล่าง) ของ Vapor chamber ซึ่งความร้อนนี้จะถ่ายเทเข้าสู่สารทำงานที่บรรจุอยู่ภายใน เป็นผลให้สารทำงานระเหยกลายเป็นไอแล้วลอยตัวขึ้นส่วนบน (ส่วนควบแน่น) และปกติส่วนทำระเหยจะสัมผัสกับแหล่งรับความร้อน (Heat sink) เช่น อากาศ ดังนั้นความร้อนจะถ่ายเทออกจากส่วนควบแน่นไปยังแหล่งรับความร้อน ลักษณะของ Vapor chamber แบบธรรมดา แสดงดังรูปที่ 2.1

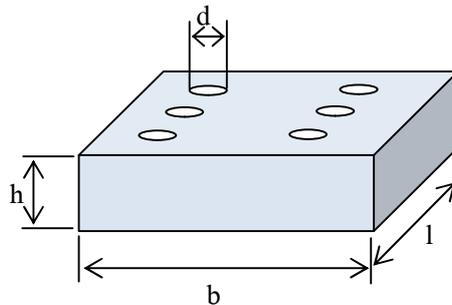


รูปที่ 2.1 ลักษณะการถ่ายเทความร้อนของ Vapor chamber แบบธรรมดา

ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของ Vapor chamber นั้น ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยด้วยกัน เช่น ขนาดของ Vapor chamber, ชนิดของวัสดุที่ใช้ทำ Vapor chamber, ลักษณะการติดตั้ง, ชนิดของสารทำงาน, ความเร็วลมที่ระบายความร้อน, อุณหภูมิของแหล่งความร้อน รวมทั้งลักษณะรูปร่างของส่วนควบแน่น ซึ่งในงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นศึกษาสมรรถนะทางความร้อนของ Vapor chamber เมื่อนำท่อขนาดเล็กโค้งคว่ำติดตั้งเข้ากับส่วนควบแน่น

2.2 ทฤษฎีพื้นฐานในการคำนวณ

การวิเคราะห์สมรรถนะทางความร้อนของ Vapor chamber นั้นจำเป็นต้องรู้ค่าต่างๆ เช่น พื้นที่ของส่วนรับความร้อน, ปริมาณการเติมสารทำงาน, พื้นที่ส่วนควบแน่นกรณีที่ไม่มีท่อและกรณีเพิ่มท่อ โค้ง ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 2.2 ลักษณะของ Vapor chamber

2.2.1 พื้นที่ของส่วนรับความร้อนของ Vapor Chamber สามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$A_e = b \times l \quad (2.1)$$

โดยที่ b คือ ความกว้าง (m)
 l คือ ความยาว (m)

2.2.2 การคำนวณหาปริมาตรสารทำงานที่เติมลงใน Vapor chamber (กรณีเติมสาร 50%) สามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$V = \frac{b \times l \times h}{2} \quad (2.2)$$

โดยที่ V คือ ปริมาตรสารทำงานที่เติมลงใน Vapor Chamber
 B คือ ความกว้าง (cm³)
 l คือ ความยาว (cm³)
 h คือ ความสูง (cm³)

2.2.3 การคำนวณหาพื้นที่ส่วนควบแน่นในกรณีที่มีท่อขนาดเล็ก สามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$A_{\text{cond},1} = b \times l \quad (2.3)$$

2.2.4 การคำนวณหาพื้นที่ส่วนควบแน่นในกรณีที่มีท่อขนาดเล็กบนส่วนควบแน่น สามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$A_{\text{cond},2} = \left[(b \times l) - \left(\frac{f}{4} d^2 n \right) \right] + (f d n) \quad (2.4)$$

เมื่อ n คือ จำนวนท่อขนาดเล็ก

2.2.5 การคำนวณหาพื้นที่ทางออกของอากาศระบายความร้อน สามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$A_{\text{air}} = \frac{f}{4} d^2 \quad (2.5)$$

2.3 การถ่ายเทความร้อนออกจาก Vapor chamber

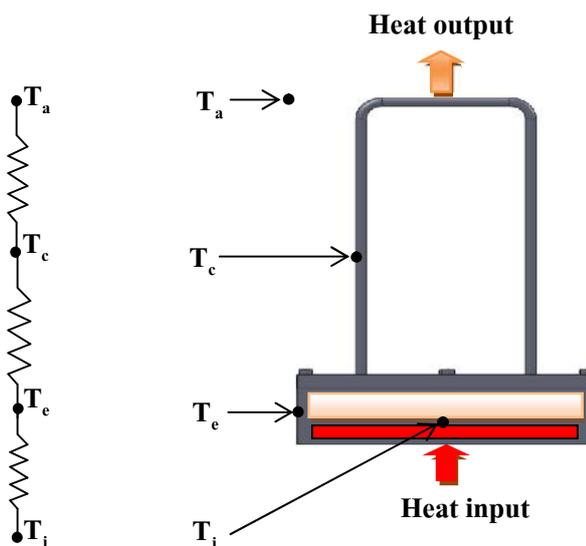
การถ่ายเทความร้อนออกจาก Vapor chamber นั้นหากใส่ความร้อนเข้าไปยังส่วนทำระเหย สารทำงานภายใน Vapor chamber จะรับความร้อนและก่อตัวกลายเป็นก้อนไอและก้อนของเหลว (อยู่ในสถานะเป็นของผสม) จะเกิดการเคลื่อนที่ขึ้นไปยังส่วนควบแน่น ซึ่งภายนอกของส่วนควบแน่นนี้จะมีอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำกว่ามาระบายความร้อนออกจากสารทำงาน จากนั้นสารทำงานที่มีสภาพเป็นไอบริเวณส่วนควบแน่นเกิดการกลั่นตัวกลายเป็นของเหลว อัตราการถ่ายเทความร้อนออกไปจากส่วนควบแน่น หาได้จากสมการ

$$Q_{\text{out}} = \dot{m} C_p (T_{\text{out}} - T_{\text{in}}) \quad (2.6)$$

เมื่อ \dot{m} คืออัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ (kg/s)
 C_p คือค่าความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ (J/kg·°C)
 T_{in} คืออุณหภูมิที่อากาศไหลเข้าส่วนควบแน่น (°C)
 T_{out} คืออุณหภูมิของอากาศที่ไหลออกจากส่วนควบแน่น (°C)

2.4 ความต้านทานความร้อน (Thermal resistance, R)

ค่าความต้านทานความร้อนในส่วนต่างๆ ของ Vapor chamber จะถูกใช้เป็นตัวชี้วัดสมรรถนะทางความร้อนของ Vapor chamber ความต้านทานความร้อนจะเกี่ยวเนื่องกับอุณหภูมิที่จุดต่างๆ ของ Vapor chamber ดังนี้



รูปที่ 2.3 จุดวัดอุณหภูมิที่ใช้ในการคำนวณหาความต้านทานความร้อน

โดยทั่วไปความต้านทานความร้อนของ Vapor chamber ประกอบไปด้วยสองส่วน ได้แก่ ความต้านทานความร้อนส่วนทำระเหย (R_e) และความต้านทานความร้อนส่วนควบแน่น (R_c) หากรวมความต้านทานทั้งสองตัวดังกล่าวข้างต้นจะเรียกว่า ความต้านทานรวม (R_p) ซึ่งค่าความต้านทานความร้อนของส่วนต่างๆ สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

2.4.1 ความต้านทานของส่วนทำระเหย หาได้จากสมการ

$$R_e = \frac{T_j - T_e}{Q_{out}} \quad (2.7)$$

- เมื่อ
- R_e คือ ความต้านทานของส่วนทำระเหย ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$)
 - T_j คือ อุณหภูมิจุดที่รับความร้อนจาก Heater ($^{\circ}\text{C}$)
 - T_e คือ อุณหภูมิของส่วนทำระเหย ($^{\circ}\text{C}$)

Q_{out} คือ อัตราการถ่ายเทความร้อน (W)

2.4.2 ความต้านทานของส่วนควบแน่น หาได้จากสมการ

$$R_c = \frac{T_c - T_a}{Q_{out}} \quad (2.8)$$

เมื่อ R_c คือ ความต้านทานของส่วนควบแน่น ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$)
 T_c คือ อุณหภูมิของพื้นผิวส่วนควบแน่น ($^{\circ}\text{C}$)
 T_a คือ อุณหภูมิแวดล้อม ($^{\circ}\text{C}$)
 Q_{out} คือ อัตราการถ่ายเทความร้อน (W)

2.4.3 ค่าความต้านทานรวมของ Vapor chamber หาได้จากสมการ

$$R_t = \frac{T_j - T_a}{Q_{out}} \quad (2.9)$$

เมื่อ R_t คือ ค่าความต้านทานรวมของความร้อน ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$)
 T_j คือ อุณหภูมิจุดที่รับความร้อนจาก Heater ($^{\circ}\text{C}$)
 T_a คือ อุณหภูมิแวดล้อม ($^{\circ}\text{C}$)
 Q_{out} คือ อัตราการถ่ายเทความร้อน (W)

ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้ R_t เป็นตัวประเมินสมรรถนะของ Vapor chamber ทั้งก่อนและหลังปรับปรุง

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

R. Boukhanouf [1] ได้ทำการศึกษาสมรรถนะของ Flat plate heat pipe (FPHP) โดยการใช้กล้องอินฟราเรด (IR) ถ่ายภาพการกระจายความร้อนบนผิวส่วนทำระเหย ซึ่งจากผลการทดลองพบว่า อุณหภูมิของท่อความร้อนแบบแผ่นแบน และกล้องของแข็งที่เป็นทองแดงจะมีมิติคล้ายคลึงกัน แสดงให้เห็นว่าการกระจายของอุณหภูมิตั้งบนพื้นผิวของท่อความร้อนแบบแผ่นแบนจะมีค่าน้อยกว่า 3°C เมื่อทำงานเต็มที่ 90°C และฟลักซ์ความร้อนที่ป้อนเข้าจาก 4 ถึง $40 \text{ W}/\text{cm}^2$ นอกจากนี้ ความต้านทานต่อการแพร่กระจายความร้อนของท่อความร้อนแบบแผ่นแบนถูกพบว่า มีขนาดเล็กกว่า 40 เท่าของปลั๊กทองแดง

แข็งเมื่อเทียบกับเวลา ดังนั้น กล่องของแข็งที่เป็นทองแดงและท่อความร้อนแบบแบนจะมีมิติคล้ายคลึงกัน

T. E. Tsai และคณะ [2] ได้ทำการศึกษา Vapor chamber ที่ใช้สำหรับระบายความร้อนระบบอิเล็กทรอนิกส์ โดยศึกษาระดับความต้านทานความร้อน อัตราส่วนการเพิ่มสารทำงาน และสมรรถนะทางความร้อนของโครงสร้างบนพื้นผิวของ Evaporator จากการทดลอง ผลของการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของความต้านทานความร้อนทั้งหมดและโครงสร้างของพื้นผิวจะมีอิทธิพลต่อ Evaporator อย่างเห็นได้ชัด ซึ่งสมรรถนะที่ดีที่สุดของพลังงานความร้อนจะอยู่ที่ 140 W และ 20% ของปริมาตรภายใน, และมีความต้านทานความร้อนรวมคือ 0.495 °C/W

S. S. Hsieh และคณะ [3] ได้ทำการศึกษาการกระจายความร้อนของ Flat Vapor Chamber สำหรับใช้ระบายความร้อนระบบอิเล็กทรอนิกส์ โดยการศึกษาการแพร่กระจายความต้านทานความร้อนของน้ำที่บรรจุอยู่ใน Flat Vapor Chamber จากจุดศูนย์กลางที่ได้รับความร้อน และศึกษาผลต่างของฟลักซ์ความร้อน (Heat fluxes) และการกระจายค่าความต้านทานที่มีผลต่อสมรรถนะในการระบายความร้อน โดยผลการทดลองนี้ พบว่า Vapor Chamber มีความสามารถในการระบายความร้อนออกได้ถึง 220 W/cm² และมีความต้านทานต่อการแพร่กระจายความร้อน 0.2 °C/W

S. F. Wang และคณะ [4] ได้ทำการศึกษาขนาดความยาวของส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นที่มีผลต่อสมรรถนะของ Flat plate heat pipe (FPHP) โดย FPHP ที่ทำการศึกษามีความยาว 255 mm กว้าง 25 mm และใช้น้ำเป็นสารทำงาน ผลที่ได้จากการทดลองเมื่อเปรียบเทียบกับ Vapor chamber แบบธรรมดา พบว่า FPHP มีการถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่าแบบเก่าเนื่องจากมีพื้นที่ส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นที่ยาว

S. C. Wong และคณะ [5] ได้ทำการทดสอบสมรรถนะของ Vapor chamber ที่ใช้สารทำงานที่เป็นของเหลวต่างกัน กล่าวคือ water, methanol และ acetone ซึ่ง water มีความตึงผิวและความร้อนแฝงที่มากกว่า methanol และ acetone โดยที่ acetone มีความตึงผิวและความร้อนแฝงที่คล้ายคลึงกัน แต่ methanol จะมีความตึงผิวและความร้อนแฝงที่น้อยกว่า ขนาดของ Vapor chamber คือ 90 mm × 90 mm ขนาดของแผ่นฮีตเตอร์ 1.21, 4.41 และ 9.61 cm² จากการทดลองพบว่า water มีค่าฮีตโหลดที่สูงที่สุด และ acetone ต่ำสุด

S. Lips และคณะ [6] ได้ทำการทดสอบท่อความร้อนแบบแผ่นแบน (FPHP) โดยศึกษาความแตกต่างของฟลักซ์ความร้อน และความหนาของพื้นที่ไอ โดย FPHP ทำจากแผ่นโปร่งใสเพื่อให้สังเกตพฤติกรรมของรัศมี meniscus และใช้กล้องจุลทรรศน์ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการกระจายตัวของเหลวใน FPHP และสมรรถนะการระบายความร้อนขึ้นอยู่กับอัตราการเพิ่มสารทำงาน และความหนาของพื้นที่ไอ ซึ่งความหนาของพื้นที่ไอจะมีผลทำให้การระเหยของของเหลวและความต้านทานความร้อนของ FPHP ลดลง แต่ความหนาของพื้นที่ไอจะมีอิทธิพลต่อไอของรัศมีความโค้ง meniscus และเป็นผลที่ต้องทำให้มีการปรับปรุงสมรรถนะของ FPHP โดยได้รับการพัฒนาในรูปแบบการกระจายของของเหลวที่อยู่ภายใน FPHP

S. C. Wong และคณะ [7] ได้ศึกษาสมรรถนะของ Vapor chamber ซึ่งมีร่องคู่ขนานกันอยู่บนพื้นผิวด้านในของแผ่นด้านบน โดยมีช่องเปิดระหว่างร่องเพื่อแทนที่ไส้ลักษณะเป็นรูพรุน ซึ่งมีไส้ในส่วนทำระเหยโดยทำจากซินเตอร์ (sinter) หลายชั้น ขนาดของ Vapor chamber คือ 10 cm x 8.9 cm กับ 2.1 cm x 2.1 cm และมีพื้นที่ให้ความร้อน 1.1 cm x 1.1 cm โหลดความร้อนที่เพิ่มขึ้นจาก 80 W ถึง 300 W ซึ่งความต้านทานในส่วนการทำระเหยจะมีอิทธิพลมากกว่าความต้านทานของ Vapor chamber ทั้งความต้านทานในส่วนการระเหยและต้านทานในส่วนควบแน่นลดลงกับภาระความร้อนที่เพิ่มขึ้นยกเว้นในกรณีที่มีความต้านทานต่อการระเหยของน้ำที่เพิ่มสูงขึ้นหลังจากที่เกิดการ dry out บางส่วน

จากการสืบค้นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังที่กล่าวข้างต้นพบว่า Vapor chamber เป็นอุปกรณ์ที่นักวิจัยให้ความสนใจเป็นอย่างมาก แต่อย่างไรก็ตาม ยังไม่พบการศึกษาสมรรถนะของ Vapor chamber ที่มีส่วนควบแน่นเป็นท่อโค้งขนาดเล็ก ซึ่งการติดตั้งท่อโค้งขนาดเล็กบนแผ่นฝาครอบของส่วนควบแน่นนั้น จะส่งเสริมกลไกให้มีการถ่ายเทความร้อนออกจากส่วนควบแน่นให้ดีขึ้นในสองประเด็นหลักๆ ได้แก่ ประเด็นแรกการติดตั้งท่อโค้งขนาดเล็กบนส่วนควบแน่น จะทำให้พื้นที่ในการระบายความร้อนมีมากขึ้น ประเด็นที่สอง โอบางส่วนที่อยู่ภายใน Vapor chamber จะไหลเข้าไปในท่อขนาดเล็กที่ติดตั้งเพิ่มขึ้น พฤติกรรมอย่างนี้จะทำให้ความร้อนที่อยู่ภายในไอลถ่ายเทออกให้กับอากาศที่อยู่รอบนอกท่อขนาดเล็กได้ดีขึ้น

จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้นในงานวิจัยนี้จึงต้องการทราบความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของ Vapor chamber ที่เพิ่มขึ้นหลังจากที่ติดตั้งท่อขนาดเล็กบนส่วนควบแน่นว่ามีความสามารถในการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นมากน้อยเพียงใด อีกทั้งหากเติมผงทองแดงเข้าผสมกับสารทำงานเหลว ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนจะเพิ่มขึ้นกี่เปอร์เซ็นต์

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

เพื่อให้การดำเนินงานทดสอบหาคณะลักษณะของการถ่ายเทความร้อนเป็นไปอย่างถูกต้องและประสบความสำเร็จ จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องพิจารณาพารามิเตอร์ในการทดสอบ รายละเอียดต่างๆ ของชุดทดสอบ อุปกรณ์ประกอบและเครื่องมือวัด ขั้นตอนการทดสอบ และขั้นตอนการวิเคราะห์ผลการทดสอบ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

3.1 พารามิเตอร์ในการทดสอบ

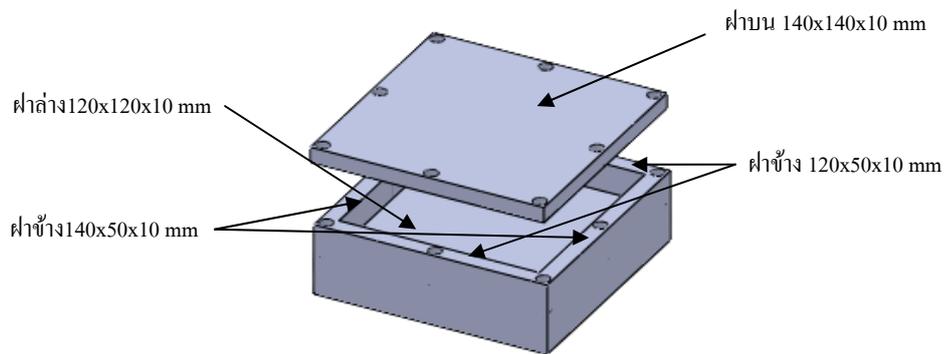
ในการศึกษานี้ ผู้วิจัยได้พิจารณาพารามิเตอร์ในการทดสอบและแบ่งออกเป็นพารามิเตอร์ควบคุมและพารามิเตอร์อิสระ โดยมีรายละเอียดดังตารางที่ 3.1 ดังนี้

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ในการทดสอบ

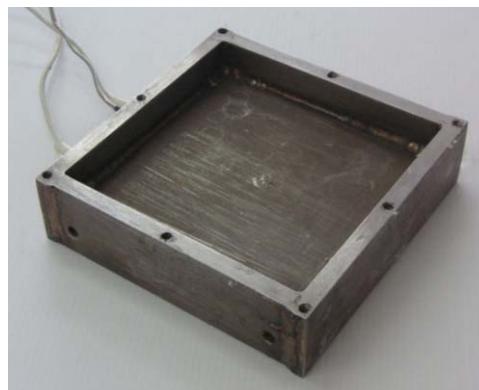
พารามิเตอร์ควบคุม
- อุณหภูมิของอากาศที่ระบายความร้อนออกจากส่วนควบแน่นกับอุณหภูมิบรรยากาศ (26-30°C)
- Vapor chamber ที่มีความกว้าง 140 mm ยาว 140 mm และสูง 50 mm
- ใช้ท่อที่เป็นส่วนควบแน่นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 mm จำนวน 12 ท่อ
- อัตราส่วนการเติมสารทำงาน 50% ของปริมาตรภายในทั้งหมด
- สัดส่วน Nano copper powder ที่เติมลงในน้ำเท่ากับ 1%w/v
พารามิเตอร์อิสระ
- ความเร็วลมที่ระบายความร้อนส่วนควบแน่น 3 ค่า คือ $V = 1.0, 1.4$ และ 1.8 m/s
- อุณหภูมิที่ให้กับส่วนทำระเหย 3 ค่าได้แก่ 80, 90 และ 100 °C
- ชนิดสารทำงานคือ (1) ไม่เติมสารทำงาน (2) น้ำ และ (3) copper nano powder-water

3.2 ขั้นตอนการทำ Vapor chamber

3.2.1 Vapor chamber ในงานวิจัยนี้ทำจากสแตนเลส หากมองด้วยสายตาแล้ว Vapor chamber จะมีลักษณะคล้ายกล่องสี่เหลี่ยมขนาดเล็ก โดยฝาด้านบนสามารถถอดออกได้ ซึ่งมีขนาดความกว้าง (b) = 140 mm ยาว (l) = 140 mm และ สูง (h) = 50 mm แสดงดังรูปที่ 3.1 (ก)



(ก)

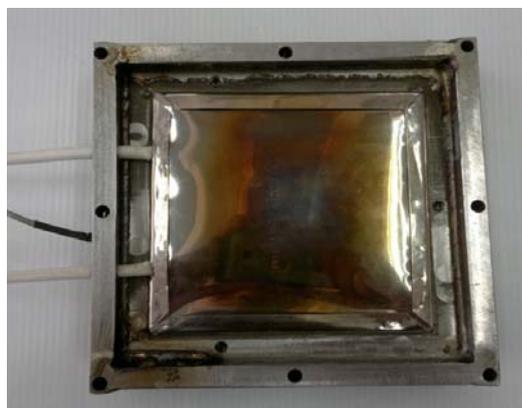


(ข)

รูปที่ 3.1 ลักษณะของ Vapor chamber

(ก) แบบลักษณะส่วนประกอบของ Vapor chamber (ข) Vapor chamber ขณะเปิดฝา

3.2.2 นำฮีตเตอร์ (Heater) ขนาด 400 W มาติดตั้งด้านล่างของ Vapor chamber แล้วนำแผ่นสแตนเลส ขนาดกว้าง 120 mm × ยาว 120 mm × สูง 5 mm จำนวน 1 ตัว มาปิดด้านล่างอีกครั้ง ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 การติดตั้งฮีตเตอร์ด้านล่างของส่วนทำระเหย

3.2.3 การทำส่วนควบแน่นของ Vapor chamber

นำแผ่นสแตนเลสที่มีขนาด 140 mm × 140 mm × 60 mm จำนวน 1 ชั้น มาทำการเจาะรูเพื่อไว้สำหรับยึดเข้ากับฐานจำนวน 6 รู และทำการเจาะรูเพื่อติดตั้งท่อขนาดเล็กจำนวน 24 รู หลังจากนั้นทำการติดตั้งท่อขนาดเล็กโดยการเชื่อมที่มีขนาดความยาว 420 mm และเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 mm ดังแสดงในรูปที่ 3.3



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.3 ส่วนควบแน่นของ Vapor chamber

(ก) แบบมีท่อขนาดเล็กเป็นส่วนควบแน่น (ข) แบบไม่มีท่อขนาดเล็กเป็นส่วนควบแน่น



รูปที่ 3.4 ติดตั้งอุปกรณ์ประกอบ

- 3.2.4 ทำการประกอบส่วนควบแน่นเข้ากับส่วนทำระเหย ติดตั้งเกจวัดความดันและวาล์วเปิด-ปิด เพื่อ
เติมสารทำงาน ดังแสดงในรูปที่ 3.4
- 3.2.5 ทำการติดสายเทอร์โมคัปเปิ้ล (Thermocouple) เข้ากับบริเวณผิวด้านนอกท่อขนาดเล็กและ
บริเวณตัว Vapor chamber เพื่อใช้ในการวัดอุณหภูมิของ Vapor chamber ดังแสดงในรูปที่
3.5



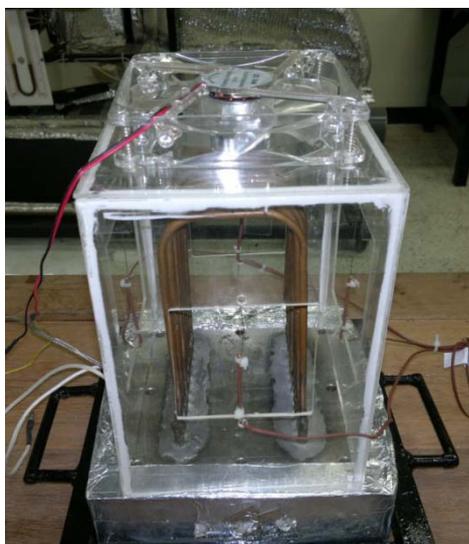
รูปที่ 3.5 การติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ

- 3.2.6 เมื่อประกอบอุปกรณ์ของ Vapor chamber เสร็จหมดทุกอย่างแล้วจึงนำ Vapor chamber ไป
หุ้มฉนวนใยแก้วเพื่อป้องกันความร้อนสูญเสีย ดังแสดงในรูปที่ 3.6



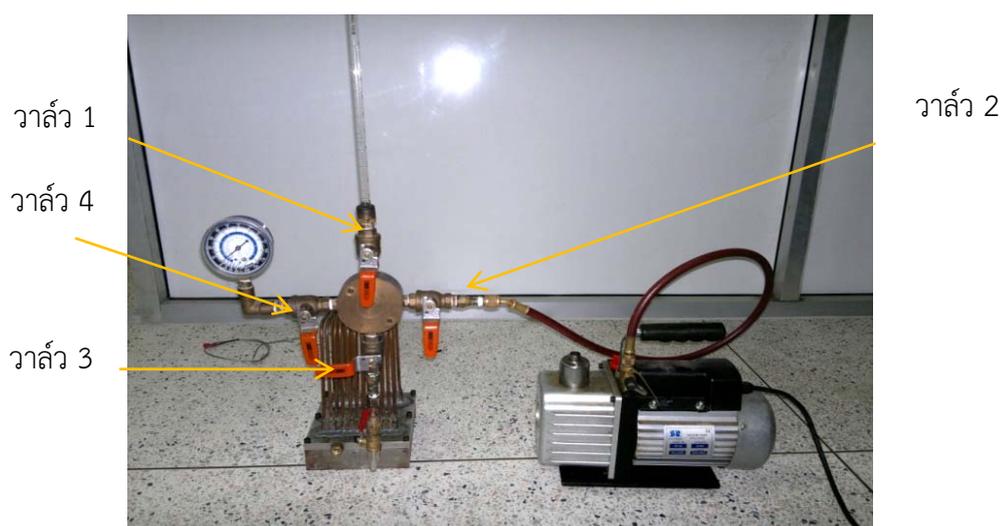
รูปที่ 3.6 การหุ้มฉนวนของ Vapor chamber

3.2.7 ทำการติดตั้งพัดลม (DC 12 โวลท์) ที่ด้านบนของ Vapor chamber เพื่อใช้ในการระบายความร้อนในส่วนควบแน่น ดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 การติดตั้งพัดลมบนส่วนควบแน่น

3.2.8 ขั้นตอนการทำสุญญากาศ โดยการใช้เครื่องทำสุญญากาศต่อสายเข้ากับอุปกรณ์เต็มสาร หลังจากนั้น เปิดวาล์วตัวที่ 2, 3 และ 4 และปิดวาล์วตัวที่ 1 แล้วเปิดสวิตซ์การทำงานของเครื่องทำสุญญากาศ ดังแสดงในรูปที่ 3.8



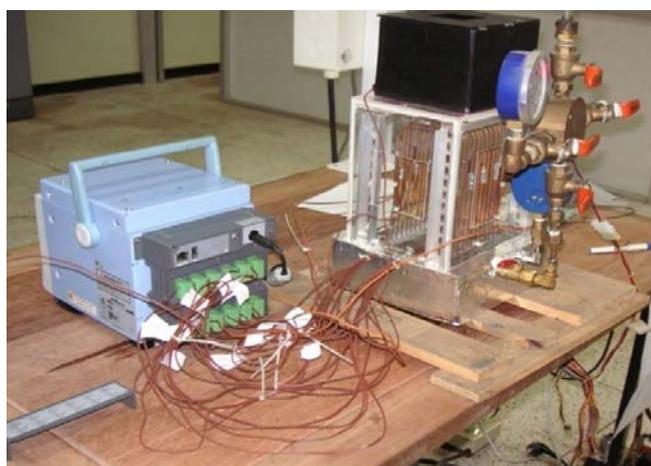
รูปที่ 3.8 แสดงการทำสุญญากาศ

3.2.9 ขั้นตอนการเติมสารทำงานโดยทำการประกอบชุดเติมสารเข้ากับ Vapor chamber โดยจะต่อกับ วาล์วที่ติดตั้งไว้ ดังแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 การเติมสารทำงาน

3.2.10 เมื่อทำการติดตั้งอุปกรณ์เสร็จหมดแล้วนำสายเทอร์โมคัปเปิ้ลต่อเข้ากับเครื่องบันทึกข้อมูล (Data logger) เพื่อเตรียมที่จะทดลอง ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 เครื่องบันทึกข้อมูลต่อสายเทอร์โมคัปเปิ้ลวัดอุณหภูมิ ณ จุดต่างๆ

3.3 ขั้นตอนการผสม nano copper powder กับน้ำ

3.3.1 ผงทองแดงยี่ห้อ ALDRICH ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $3 \mu\text{m}$ ดังรูปที่ 3.11



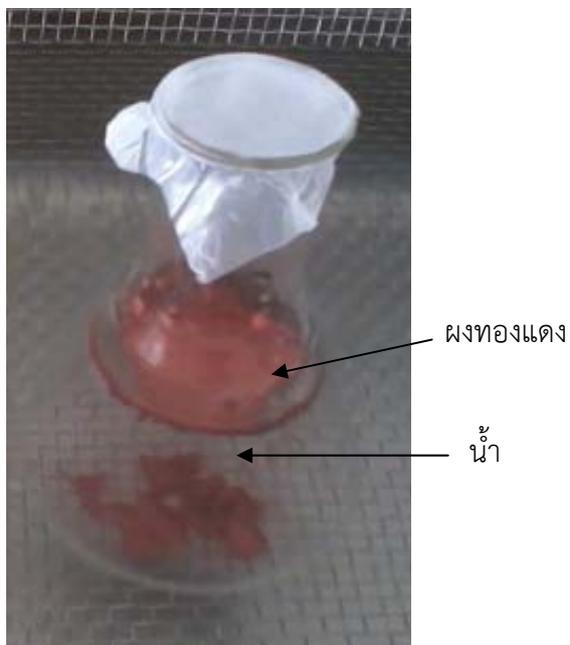
รูปที่ 3.11 ผงทองแดงระดับอนุภาคนาโนที่ใช้

3.3.2 ตวงผงทองแดงระดับอนุภาคนาโนให้ได้ปริมาณ 2.5 gram ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 การตวงผงทองแดงระดับอนุภาคนาโน

3.3.3 นำผงทองแดงระดับอนุภาคนาโนไปผสมกับน้ำ 250 CC จะได้อัตราส่วน 1 w/v% ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 ผงทองแดงระดับอนุภาคนาโนที่ผสมกับน้ำ

3.3.4 ใช้เครื่อง Ultrasonic bath เพื่อผสมผงทองแดงระดับอนุภาคนาโนกับน้ำให้เข้ากัน โดยใช้เวลาผสม 5 ชั่วโมง สำหรับน้ำที่ผสมผงทองแดงระดับอนุภาคนาโนเสร็จแล้วจะสามารถใช้งานได้ 48 ชั่วโมง หากมากกว่านั้นผงทองแดงระดับอนุภาคนาโนจะเริ่มตกตะกอนต้องนำมาผสมในเครื่อง Ultrasonic bath ใหม่ ดังรูปที่ 3.14

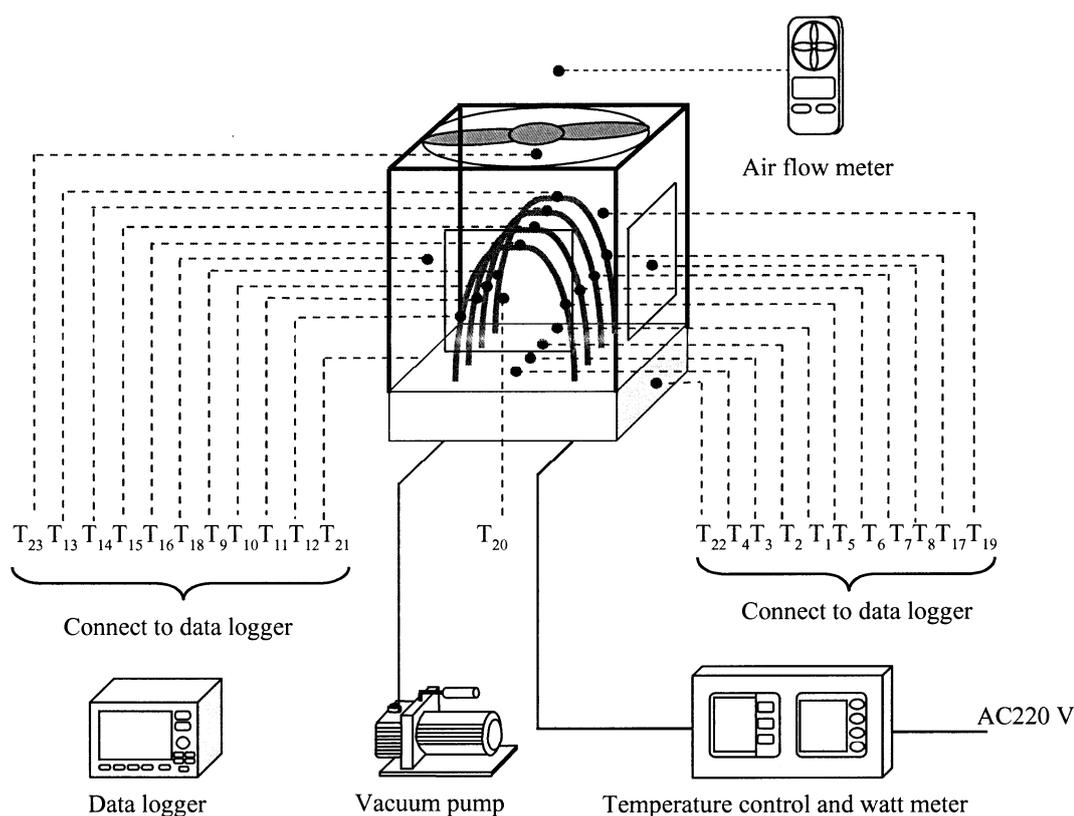


รูปที่ 3.14 การผสมผงทองแดงระดับอนุภาคนาโนกับน้ำในเครื่อง Ultrasonic bath

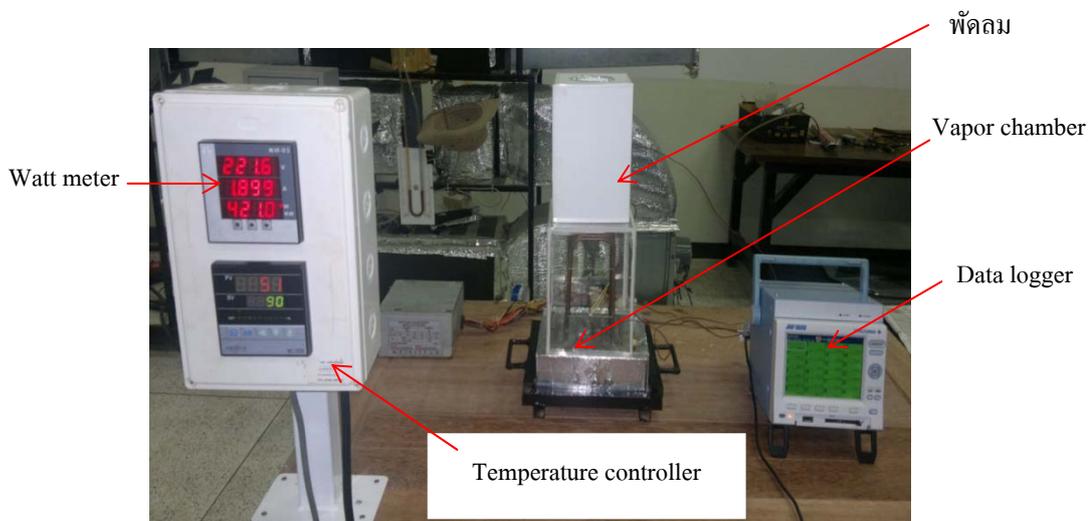
3.4 วงจรของชุดทดสอบ

เพื่อให้สามารถทำการศึกษามรรณะของ Vapor chamber ได้ ผู้ทำวิจัยได้ทำการสร้างชุดทดสอบ Vapor chamber ที่มีส่วนควบแน่นเป็นท่อโค้งขนาดเล็ก ขนาดของ Vapor chamber มีความกว้าง 140 mm ยาว 140 mm สูง 50 mm และกำหนดให้ความร้อนถ่ายเทเข้าส่วนทำระเหยด้วยฮีตเตอร์แบบแผ่นขนาด 400 W และระบายความร้อนออกจากส่วนระบายความร้อนด้วยอากาศอุณหภูมิห้อง

ชุดทดสอบในรูปที่ 3.15 และ 3.16 ประกอบไปด้วย เครื่องบันทึกข้อมูล, อุปกรณ์ปรับอุณหภูมิ (Temperature controller), วัตต์มิเตอร์ (Watt meter) พัดลมไฟฟ้า (Fan), เครื่องทำสุญญากาศ (Vacuum pump) และเครื่องวัดความเร็วลม (Anemometer air velocity meter) โดยมีรายละเอียดที่จะกล่าวในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 3.15 ไดอะแกรมการทดลอง



รูปที่ 3.16 ภาพถ่ายชุดทดลอง

3.5 อุปกรณ์ประกอบและเครื่องมือวัด

3.5.1 เครื่องบันทึกข้อมูลยี่ห้อ YOKOGAWA รุ่น DX200 ขนาด 24 ช่องสัญญาณ มีช่วงการวัดอุณหภูมิ -200 °C ถึง 1100 °C มีความแม่นยำ ± 0.1 ใช้ร่วมกับเทอร์โมคัปเปิ้ล ยี่ห้อ OMEGA ชนิด K ช่วงอุณหภูมิที่สามารถวัดได้ -270 ถึง 1372 °C ซึ่งใช้วัดอุณหภูมิ ณ จุดต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.17



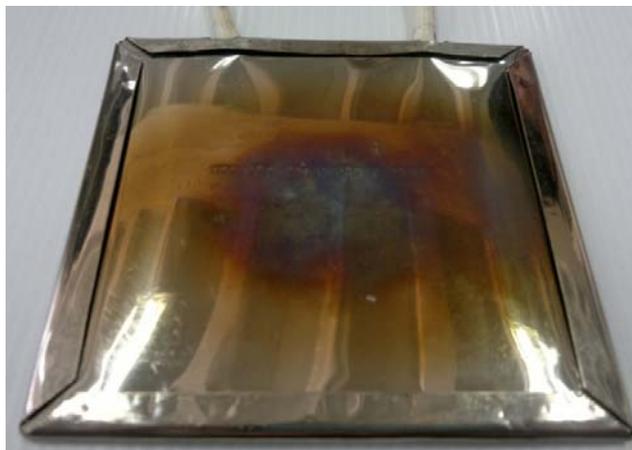
(ก)



(ข)

รูปที่ 3.17 (ก) เครื่องบันทึกข้อมูล (ข) สายเทอร์โมคัปเปิ้ล

3.5.2 ฮีตเตอร์ ขนาด 400 W กว้าง 100 x ยาว 100 mm x หนา 4 mm ความต้านทาน 115 โอห์ม ใช้สำหรับให้ความร้อนของน้ำที่อยู่ในส่วนทำระเหย ดังแสดงในรูปที่ 3.18



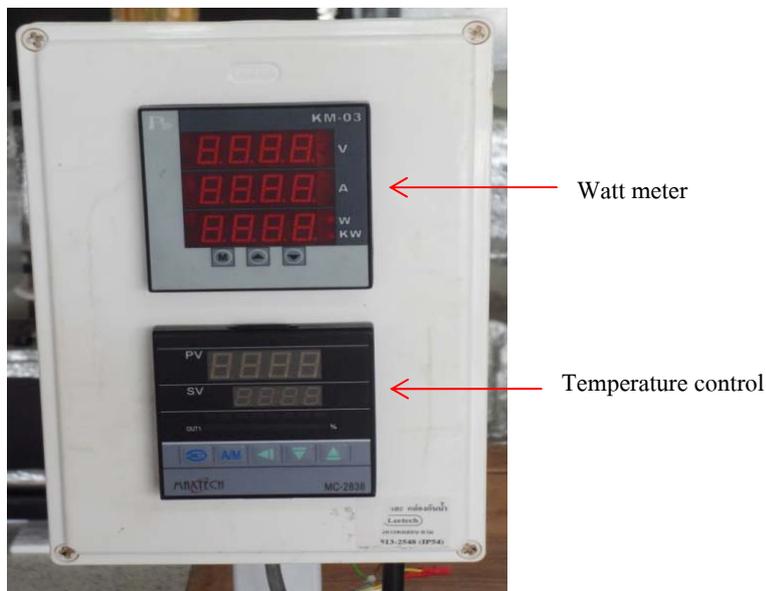
รูปที่ 3.18 ฮีตเตอร์

3.5.3 เครื่องวัดความเร็วลม ใช้สำหรับวัดความเร็วของลมที่ไหลเข้า-ออก กล้องครอบส่วนควบแน่น ยี่ห้อ P.M. รุ่น DA-40 ช่วงที่สามารถวัดได้ 0.1-20.0 m/s ดังแสดงในรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 เครื่องวัดความเร็วลม

3.5.4 ชุดควบคุมอุณหภูมิ ซึ่งควบคุมโดยการปรับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับฮีตเตอร์เพื่อให้ได้อุณหภูมิตามที่ต้องการ ซึ่งใช้ร่วมกับวัตต์มิเตอร์ ซึ่งสามารถใช้สำหรับวัดกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดลวดความร้อน (W) ดังแสดงในรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 ชุดควบคุมอุณหภูมิและวัตต์มิเตอร์

3.5.5 เครื่องทำสุญญากาศ แบบ single stage รุ่น SP-2 ใช้ในการทำสุญญากาศก่อนการเติมสารทำงานเข้าไปใน Vapor chamber ดังแสดงในรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 เครื่องทำสุญญากาศ

3.5.6 พัดลมระบายความร้อน (แบบ DC 12 V) ใช้สำหรับระบายความร้อนออกจากส่วนควบแน่น ดังแสดงในรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 พัดลมระบายความร้อนของส่วนควบแน่น

3.5.7 ชุดอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับเติมสารทำงาน ประกอบไปด้วย เกจวัดความดัน วาล์ว หลอดแก้ววัดปริมาตรสารทำงานขณะเติม ดังแสดงในรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 ชุดอุปกรณ์เติมสารทำงาน

3.5.8 ฉนวนใยแก้ว ใช้สำหรับหุ้มในส่วนการทำระเหยของ Vapor chamber เพื่อป้องกันความร้อนที่สูญเสียออกสู่บรรยากาศและสามารถทนความร้อนในอุณหภูมิสูงๆได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.24 ฉนวนกันความร้อน

3.6 ขั้นตอนการทดลอง

3.6.1 ขั้นตอนการทดลองในขณะที่ยังไม่เต็มสารทำงาน

- 1) เตรียมและติดตั้งอุปกรณ์ในการทดลองต่างๆ ไว้ที่โต๊ะทดลองให้พร้อมใช้งาน
- 2) ทำการทำสุญญากาศภายใน Vapor chamber โดยใช้เครื่องทำสุญญากาศหรือ Vacuum pump
- 3) ทำการติดตั้งสายเทอร์โมคัปเปิ้ลตามจุดต่างๆ ของ Vapor chamber ดังรูปที่ 3.15 แล้วต่อสายเทอร์โมคัปเปิ้ลเข้ากับเครื่องบันทึกข้อมูล
- 4) เปิดสวิทซ์ไฟและปรับตั้งอุณหภูมิเพื่อใช้ตั้งค่าฮีตเตอร์ คือ 80, 90 และ 100°C
- 5) ในระหว่างการทดลอง ก่อนที่จะเปลี่ยนค่าอุณหภูมิของฮีตเตอร์ จะทำการเปลี่ยนความเร็วลมที่ระบายความร้อนออกจากส่วนควบแน่น ดังนี้ $V = 1.0, 1.4$ และ 1.8 m/s ตามลำดับ
- 6) นำค่าที่ได้จากการทดลองไปคำนวณและนำเสนอเป็นกราฟ เช่น ค่าพลังงานความร้อน (Q_{out}) ที่ระบายออกจากส่วนควบแน่น

3.6.2 ขั้นตอนการทดลองในขณะที่เต็มสารทำงาน

7) ทำการทำสุญญากาศใน Vapor chamber โดยใช้เครื่องทำสุญญากาศหรือ Vacuum pump

8) เมื่อทำการทำสุญญากาศแล้ว เต็มสารทำงานเข้าใน Vapor chamber ในปริมาณ 50% ของปริมาตรภายใน

9) ต่อสายเทอร์โมคัปเปิ้ลเข้ากับเครื่องบันทึกข้อมูลและติดสายอีกด้านหนึ่งเข้ากับ Vapor chamber ในจุดที่ต้องการวัด

10) เปิดสวิทช์ไฟและปรับตั้งอุณหภูมิในชุดควบคุมอุณหภูมิเพื่อใช้ตั้งค่าฮีตเตอร์ คือ 80, 90 และ 100°C

11) ในระหว่างการทดลอง ก่อนที่จะเปลี่ยนค่าของฮีตเตอร์ จะทำการเปลี่ยนความเร็วลมระบายความร้อนส่วนควบแน่นเป็น $V = 1.0, 1.4$ และ 1.8 m/s ตามลำดับก่อน

12) นำค่าที่ได้จากการทดลองไปคำนวณและนำเสนอเป็นกราฟ เช่น ค่าพลังงานความร้อน (Q_{out}) ที่ระบายออกจากส่วนควบแน่น

3.7 ขั้นตอนการคำนวณ

ในหัวข้อนี้จะแสดงตัวอย่างการคำนวณโดยเริ่มจากหาค่า (1) พื้นที่ส่วนรับความร้อน (2) พื้นที่ส่วนควบแน่นที่ไม่ได้ติดตั้งท่อขนาดเล็ก (3) พื้นที่ส่วนควบแน่นที่ติดตั้งท่อขนาดเล็ก (4) ค่าพลังงานความร้อน (5) ค่าฟลักซ์ความร้อน (7) ค่าความต้านทานความร้อนของส่วนทำระเหย (8) ค่าความต้านทานความร้อนของส่วนควบแน่น และ (9) ค่าความต้านทานรวม ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

3.6.1 วิธีการหาพื้นที่ส่วนรับความร้อน ส่วนควบแน่นแบบไม่ติดตั้งท่อขนาดเล็กเป็นส่วนควบแน่น และแบบที่ติดตั้งท่อขนาดเล็กเป็นส่วนควบแน่น ได้ดังต่อไปนี้

- หาพื้นที่รับความร้อนจากสมการ (2.1) จะได้

$$A = b \times l = 120 \text{ mm} \times 120 \text{ mm}$$

จะได้ $A = 14400 \text{ mm}^2$ หรือ 0.0144 m^2

- หาพื้นที่ส่วนควบแน่นแบบไม่ติดตั้งท่อขนาดเล็กเป็นส่วนควบแน่นจากสมการ (2.1) จะได้

$$A_{cond,2} = b \times l = 140 \text{ mm} \times 140 \text{ mm}$$

จะได้ $A_{\text{cond},2} = 19600 \text{ mm}^2$ หรือ 0.0196 m^2

- หาพื้นที่ส่วนควบแน่นแบบที่ติดตั้งท่อขนาดเล็กเป็นส่วนควบแน่นจากสมการ (2.4)

จะได้ $A_{\text{cond},1} = \left[(b \times l) - \left(\frac{\pi}{4} (d^2) (n) \right) \right] + \left[(\pi) (d) (n) \right]$

$$A_{\text{cond},1} = \left[(140\text{mm} \times 140\text{mm}) - \left(\frac{\pi}{4} (5\text{mm}^2) (24) \right) \right] + \left[\pi (5\text{mm}) (420\text{mm}) (12) \right]$$

$$A_{\text{cond},1} = 0.098296 \text{ m}^2 \text{ หรือ } 982.96 \text{ cm}^2$$

- หาปริมาตรสารทำงานจากสมการ (2.2) จะได้

$$V = \frac{b \times l \times h}{2} = \frac{120 \text{ mm} \times 120 \text{ mm} \times 18 \text{ mm}}{2}$$

$$V = 129600 \text{ mm}^3 \text{ หรือ } 129.600 \text{ cm}^3$$

- หาพื้นที่ทางออกของอากาศระบายความร้อนจากสมการ (2.5) จะได้

$$A_{\text{air}} = \frac{\pi}{4} d^2 = \frac{\pi}{4} (6 \text{ mm})^2$$

$$A_{\text{air}} = 28.27 \text{ mm}^2 \text{ หรือ } 0.002827 \text{ m}^2$$

3.6.2 การคำนวณหาอัตราการถ่ายเทความร้อน (Q_{out})

ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ออกจากส่วนควบแน่น หาได้จากสมการ (2.6) ตัวอย่างเช่น กรณีที่ส่วนควบแน่นมีท่อขนาดเล็ก, เต็มสารทำงาน, ทำงานที่อุณหภูมิ 80°C และความเร็วลม 1 m/s ซึ่งเก็บข้อมูลจากการทดลองได้ดังนี้ $T_{\text{in}} = 32.97^\circ\text{C}$, $T_{\text{out}} = 41.46^\circ\text{C}$, $\rho = 1.2 \text{ kg/m}^3$, $C_p = 1006.1 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$ $A_{\text{air}} = 0.002827 \text{ m}^2$ และ $V = 1.0 \text{ m/s}$

จากสมการ $Q_{\text{out}} = \dot{m} C_p (T_{\text{out}} - T_{\text{in}})$

และเมื่อ $\dot{m} = \rho AV$ แทนในสมการ (2.1) จะได้

$$\begin{aligned} \text{แทนค่า} \quad Q_{\text{out}} &= \left[\left(1.2 \text{ kg/m}^3 \right) \left(0.002827 \text{ m}^2 \right) \left(1 \text{ m/s} \right) \right] \\ &\quad \times \left(41.46^\circ\text{C} - 32.97^\circ\text{C} \right) \\ &= 28.7 \text{ W} \end{aligned}$$

3.6.3 การคำนวณหาค่าความต้านทานของส่วนทำระเหย ส่วนควบแน่น และค่าความต้านทานความร้อนรวม

ค่าความต้านทานความร้อนบนพื้นผิวของวัสดุเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนของพื้นผิววัสดุนั้น ซึ่งค่าความต้านทานความร้อนบนพื้นผิวของวัสดุจะไม่คงที่ แต่จะแปรเปลี่ยนตามค่าพลังงานความร้อนที่ให้

- หาค่าความต้านทานของส่วนทำระเหย (R_e)

เมื่อ $T_j = 80^\circ\text{C}$, $T_e = 77.195^\circ\text{C/W}$ และ $Q_{\text{out}} = 28.7 \text{ W}$
แทนค่าลงในสมการ (2.7) จะได้

$$\begin{aligned} R_e &= \frac{T_j - T_e}{Q_{\text{out}}} \\ R_e &= \frac{80^\circ\text{C} - 77.195^\circ\text{C}}{28.7 \text{ W}} \\ R_e &= 0.097^\circ\text{C/W} \end{aligned}$$

- หาค่าความต้านทานความร้อนที่ออกจากส่วนควบแน่น (R_c)

เมื่อ $T_c = 58.314^\circ\text{C}$, $T_a = 30.864^\circ\text{C}$ และ $Q_{\text{out}} = 28.7 \text{ W}$

แทนค่าในสมการ (2.8) จะได้

$$\begin{aligned} R_c &= \frac{T_c - T_a}{Q_{\text{out}}} \\ &= \frac{(58.314 - 30.864)^\circ\text{C}}{28.7 \text{ W}} \\ &= 0.956^\circ\text{C/W} \end{aligned}$$

- หาค่าความต้านทานรวมของความร้อน (R_t)

เมื่อ $T_j = 80 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_a = 29.759 \text{ }^\circ\text{C}$ และ $Q_{\text{out}} = 28.7 \text{ W}$

แทนค่าในสมการ (2.9) จะได้

$$R_t = \frac{(T_j - T_a)}{Q_{\text{out}}} = \frac{(80 - 29.759) \text{ }^\circ\text{C}}{28.7 \text{ W}}$$
$$= 1.722 \text{ }^\circ\text{C/W}$$

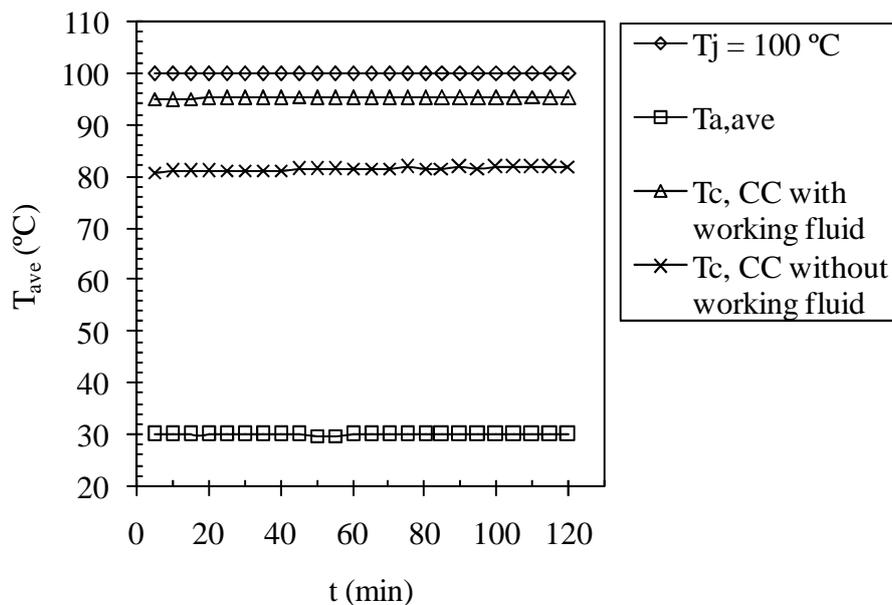
บทที่ 4 ผลการวิจัย

จากการศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนของ Vapor chamber ทั้งหมด 18 ตัวอย่างการทดลอง ผู้วิจัยได้แบ่งการนำเสนอออกเป็น 3 ความสัมพันธ์ดังนี้ (1) การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่จุดต่างๆ (2) การเปลี่ยนแปลงของ Q_{out} กรณีเติมสารทำงานและไม่เติมสารทำงานที่ $T_j = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$, (3) ผลของ V_{air} ที่มีต่อ Q_{out} ที่อุณหภูมิที่จุดต่างๆ (4) ผลของ V_{air} ที่มีต่อ R_t และ (5) ผลของ nono copper powder ที่เติมลงในน้ำ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

4.1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่จุดต่างๆ

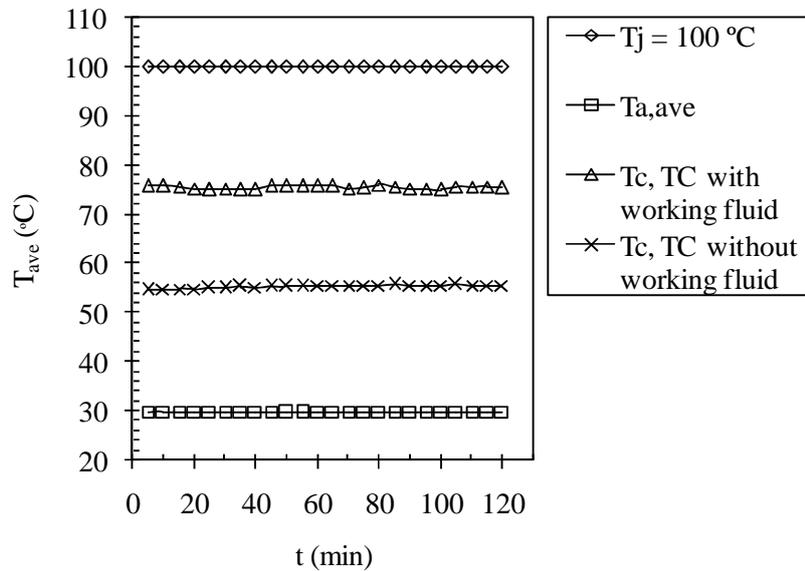
เนื่องจากว่าค่าอุณหภูมิที่จุดต่างๆ ของ Vapor chamber จะถูกใช้ในการคำนวณหาค่าความต้านทานความร้อนของส่วนต่างๆ ของ Vapor chamber ซึ่งค่าความต้านทานความร้อนจะเป็นส่วนผกผันกับอัตราการถ่ายเทความร้อนของ Vapor chamber ในการทดลองนี้ได้กำหนดให้ $T_j = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ $V = 1.4\text{ m/s}$ โดยอุณหภูมิของอากาศในห้องทดลอง $T_a = 29.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.1

จากการทดลองพบว่า กรณีไม่เติมสารทำงานและเติมสารทำงานมี $T_{cave} = 81.51$ และ $95.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ตามลำดับ ซึ่งสังเกตได้ว่าในกรณีที่เติมสารทำงานมีอุณหภูมิสูงกว่าไม่เติมสารทำงานเท่ากับ $13.89\text{ }^{\circ}\text{C}$ แสดงให้เห็นว่าสารทำงานสามารถพาความร้อนจากฮีตเตอร์เพื่อส่งผ่านไปยังส่วนควบแน่นได้จริง



รูปที่ 4.1 อุณหภูมิที่จุดต่างๆ ของ Vapor chamber แบบ CC กรณี $T_j = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ $V = 1.4\text{ m/s}$

สำหรับกรณีที่มีท่อติดตั้งบนส่วนควบแน่น (TC) ได้ทำการทดลองในเงื่อนไขเดียวกันกับที่กล่าวมาในขั้นต้น ซึ่งผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.2 ดังนี้



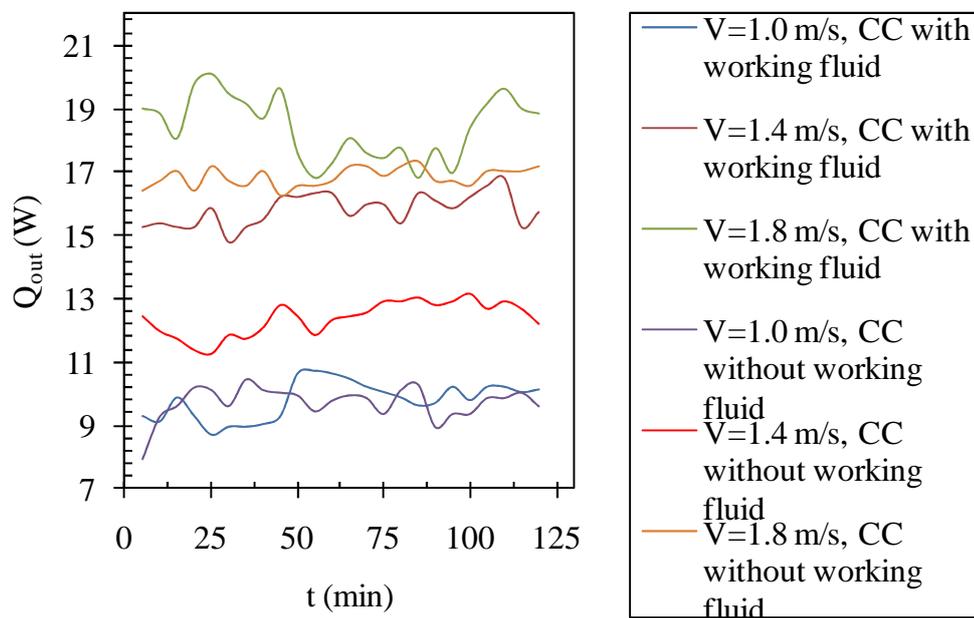
รูปที่ 4.2 อุณหภูมิที่จุดต่างๆ ของ Vapor chamber แบบ TC กรณีที่ $T_j = 100$ °C และ $V = 1.4$ m/s

ผลการทดลองพบว่า กรณีไม่เติมสารทำงานและเติมสารทำงานมี $T_{c,ave} = 55.38$ และ 75.54 °C ตามลำดับ ซึ่งสังเกตได้ว่าในกรณีที่เติมสารทำงานมีอุณหภูมิสูงกว่าไม่เติมสารทำงานเท่ากับ 20.16 °C เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับกรณีที่ Vapor chamber ที่มีฝาแบบธรรมดา (Conventional condenser, CC) ที่ไม่เติมสารทำงานค่า T_c ลดลง 26.13 °C และในกรณีที่เติมสารทำงาน T_c ลดลง 20 °C สาเหตุที่ลดลงของอุณหภูมิส่วนควบแน่นไม่เท่ากันเนื่องจากการเติมสารทำงานจะมีการพาความร้อนที่ดีกว่าแบบไม่เติมสารทำงาน ดังนั้นจึงทำให้อุณหภูมิลดลงไม่เท่ากัน

4.2 การเปลี่ยนแปลงของ Q_{out} กรณีเติมสารทำงานและไม่เติมสารทำงานที่ $T_j = 100$ °C

Q_{out} หมายถึง อัตราการถ่ายเทความร้อนที่ออกจากส่วนควบแน่น โดยคำนวณจากสมการที่ (2.6) ซึ่ง Q_{out} ขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงของอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ (\dot{m}) และผลต่างระหว่างอุณหภูมิของอากาศที่เข้าและออกจากส่วนควบแน่น (ΔT_{air}) ซึ่งจะนำค่า ΔT_{air} ที่ได้จากการทดลองมาแทนลงในสมการดังกล่าว โดยที่ค่า ΔT_{air} นี้จะเปลี่ยนไปตามค่าอุณหภูมิที่จ่ายให้กับส่วนทำระเหย (T_j) รวมถึงการเปลี่ยนความเร็วลมที่ระบายความร้อนในส่วนควบแน่นด้วย ในที่นี้ได้ดำเนินการทดลองดังนี้ อุณหภูมิใน

ส่วนทำระเหย $T_j = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ และกำหนดความเร็วลมที่ระบายความร้อนส่วนควบแน่นสามค่า ได้แก่ 1.0, 1.4 และ 1.8 m/s จากรูปที่ 4.3 จะพบว่า Vapor chamber แบบ CC ในกรณีที่ไม่มีเต็มสารทำงานที่ $V = 1.0\text{ m/s}$ จะมีค่า $Q_{out} = 9.9\text{ W}$ ในกรณีที่เต็มสารทำงานจะมีค่า $Q_{out} = 9.77\text{ W}$ ที่ $V = 1.4\text{ m/s}$ ในกรณีที่ไม่มีเต็มสารทำงานจะมีค่า $Q_{out} = 11.36\text{ W}$ ในกรณีที่เต็มสารทำงานจะมีค่า $Q_{out} = 15.27\text{ W}$ ที่ $V = 1.8\text{ m/s}$ ในกรณีที่ไม่มีเต็มสารทำงานจะมีค่า $Q_{out} = 16.81\text{ W}$ ในกรณีที่เต็มสารทำงานจะมีค่า $Q_{out} = 18.97\text{ W}$ จะสังเกตได้ว่าค่าของ Q_{out} ทั้งในกรณีที่ไม่มีเต็มสารทำงานและกรณีที่เต็มสารทำงานจะมีค่าที่ใกล้เคียงกัน

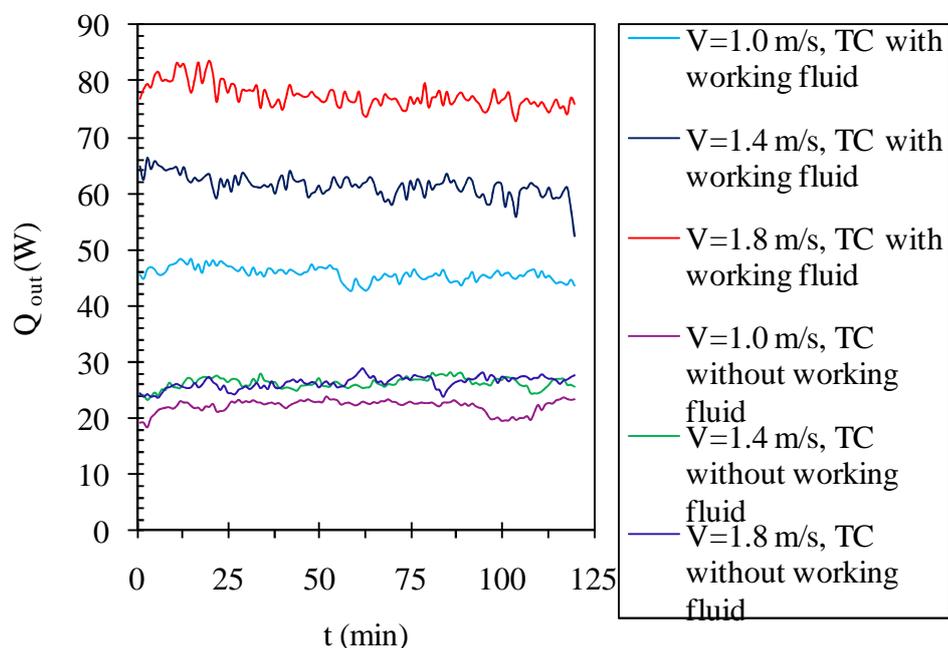


รูปที่ 4.3 การเปลี่ยนแปลง Q_{out} กรณี Vapor chamber แบบ CC ที่ $T_j = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$

จากผลการทดลอง จะเห็นได้ว่า Vapor chamber แบบ CC ค่าของ Q_{out} จะเปลี่ยนไปตามความเร็วลมที่ระบายความร้อนส่วนควบแน่น โดยค่าของ $Q_{out,ave}$ ที่ $V = 1.0\text{ m/s}$ ระหว่างกรณีที่ไม่มีเต็มสารทำงานจะมีค่ามากกว่ากรณีที่เต็มสารทำงาน 0.13 W ที่ $V = 1.4\text{ m/s}$ ระหว่างกรณีที่เต็มสารทำงานจะมีค่ามากกว่ากรณีที่ไม่มีเต็มสารทำงานเท่ากับ 3.91 W และที่ $V = 1.8\text{ m/s}$ ระหว่างกรณีที่เต็มสารทำงานจะมีค่ามากกว่ากรณีที่ไม่มีเต็มสารทำงาน 2.17 W ตามลำดับ ดังนั้น จะเห็นได้ว่า Vapor chamber แบบ CC จะมีค่า Q_{out} ที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากว่า Vapor chamber แบบ CC จะมีพื้นที่ในการถ่ายเทความร้อนน้อยกว่า Vapor chamber แบบ TC จึงทำให้ค่าของ Q_{out} มีการเปลี่ยนแปลงที่ไม่คงที่

สำหรับกรณีที่มีท่อติดตั้งบนส่วนควบแน่น (TC) ได้ทำการทดลองในเงื่อนไขเดียวกันกับที่กล่าวมาในขั้นต้น ซึ่งผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.4 จากการทดลองหาค่า Q_{out} ของ Vapor chamber แบบ TC

กรณีที่ไม่เติมสารทำงานและเติมสารทำงานที่ $V = 1.0$ m/s จะมีค่า Q_{out} เป็น 22.28 และ 45.71 W ตามลำดับ สำหรับที่ $V = 1.4$ m/s ในกรณีที่ไม่เติมสารทำงานและเติมสารทำงานจะมีค่า Q_{out} เป็น 26.20 และ 61.51 W ตามลำดับ ในกรณีที่ไม่เติมสารทำงานและเติมสารทำงาน ที่ $V = 1.8$ m/s จะมีค่า Q_{out} เป็น 26.30 และ 77.49 W ตามลำดับ หากพิจารณารูปที่ 4.4 พบว่า ที่ $V = 1.8$ m/s ในกรณีเติมสารทำงาน จะมีค่า Q_{out} มากที่สุดและ ที่ $V = 1.0$ m/s ในกรณีไม่เติมสารทำงานจะมีค่า Q_{out} ที่น้อยที่สุด โดยค่าของ $Q_{out,ave}$ ที่ $V = 1.0, 1.4$ และ 1.8 m/s กรณีที่เติมสารทำงานจะมีค่ามากกว่ากรณีที่ไม่เติมสารทำงานเท่ากับ 23.43, 35.31 และ 51.19 W ตามลำดับ

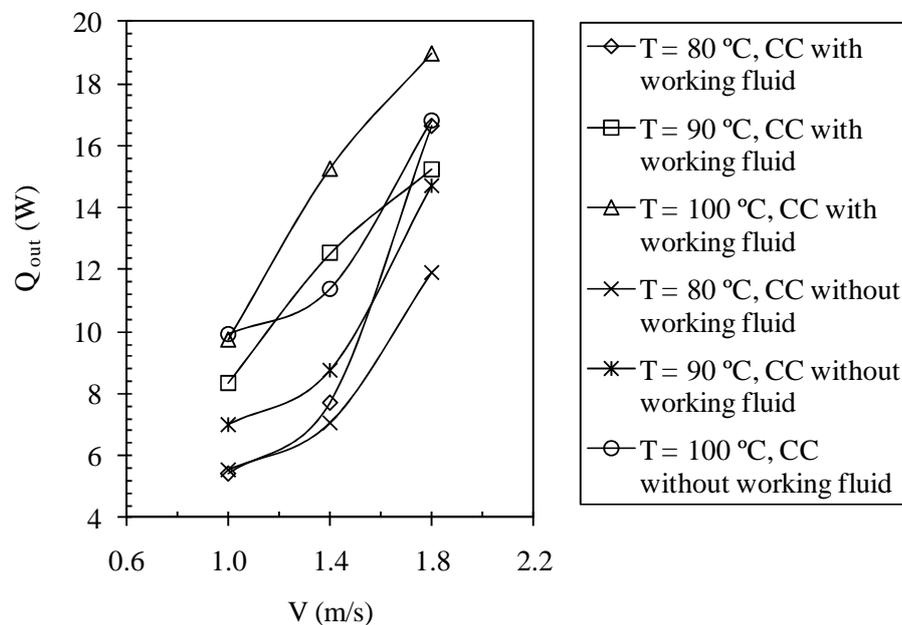


รูปที่ 4.4 การเปลี่ยนแปลง Q_{out} กรณี Vapor chamber แบบ TC ที่ $T_j = 100$ °C

จากผลการทดลอง จะเห็นได้ว่า Vapor chamber แบบ TC ค่าของ Q_{out} จะเปลี่ยนแปลงไปตามความเร็วลมที่ระบายความร้อนส่วนควบแน่น โดยหากเพิ่มความเร็วลมให้กับส่วนควบแน่นค่าของ Q_{out} ก็จะมีมากขึ้นตามไปด้วย และถ้าหากเปรียบเทียบค่า Q_{out} ระหว่าง Vapor chamber แบบ CC กับ Vapor chamber แบบ TC จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า Vapor chamber แบบ TC กรณีเติมสารทำงานจะมีความสามารถในการถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่าแบบ CC เนื่องจาก Vapor chamber แบบ TC จะมีพื้นที่ในการถ่ายเทความร้อนมาก นอกจากนี้ ความเร็วลมที่ระบายความร้อนออกจากส่วนควบแน่นก็เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของ Q_{out} ด้วยเช่นกัน

4.3 ผลของ V_{air} ที่มีต่อ Q_{out}

ในการทดลองเพื่อศึกษาผลของ V_{air} ที่มีต่อ Q_{out} ได้กำหนดเงื่อนไขในการทดลองดังนี้ อุณหภูมิส่วนทำระเหย $T_j = 80, 90$ และ 100 °C และกำหนดความเร็วลมที่ระบายความร้อนส่วนควบแน่นสามค่าคือ $V = 1.0, 1.4$ และ 1.8 m/s ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.5 ซึ่งพบว่าค่าของ Q_{out} เพิ่มขึ้นตามความเร็วลมที่ระบายความร้อนของส่วนควบแน่น ค่า $Q_{out,ave}$ ของ Vapor chamber แบบ CC ในกรณีที่ไม่เติมสารทำงานและเติมสารทำงานที่ $V = 1.0$ m/s และ $T_j = 80$ °C มีค่าเป็น 5.53 และ 5.43 W ตามลำดับ และสำหรับ Vapor chamber แบบ CC ทำงานที่ $V = 1.8$ m/s และ $T_j = 100$ °C ในกรณีไม่เติมสารทำงานและเติมสารทำงานมีค่า $Q_{out,ave}$ เป็น 16.81 และ 18.98 W ตามลำดับ

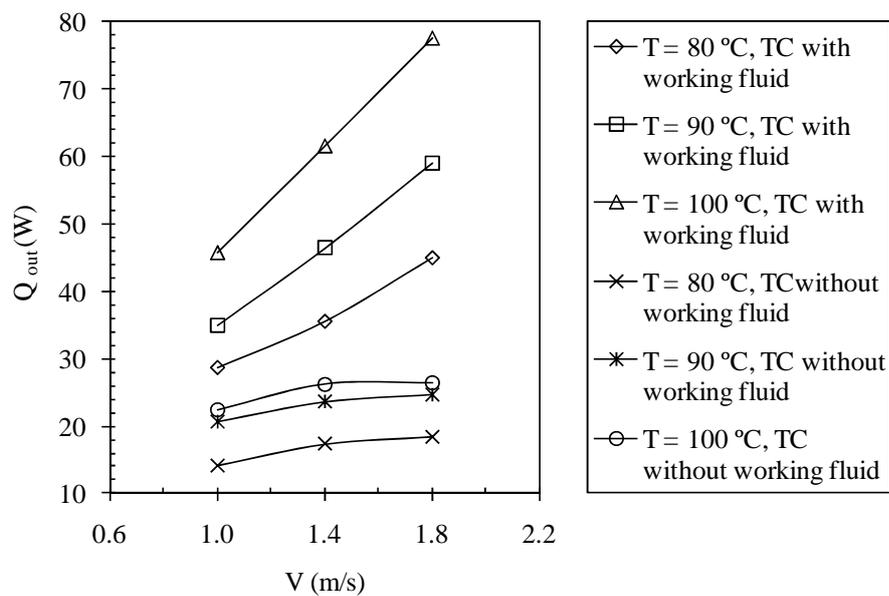


รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ของ V_{air} และ Q_{out} ของ Vapor chamber แบบ CC ที่อุณหภูมิต่างๆ

สำหรับ Vapor chamber ที่มีท่อติดตั้งบนส่วนควบแน่น (หรือเรียกว่า Vapor chamber แบบ TC) ซึ่งได้ทำการทดลองในเงื่อนไขเดียวกันกับที่กล่าวมาในขั้นต้น ผลการทดลองดังรูปที่ 4.6 ซึ่งพบว่า ในกรณีไม่เติมสารทำงานและเติมสารทำงานที่ $V = 1.0$ m/s และ $T_j = 80$ °C มีค่า $Q_{out,ave}$ เป็น 14.00 และ 28.67 W ตามลำดับ สำหรับ Vapor chamber แบบ TC ทำงานที่ $V = 1.8$ m/s และ $T_j = 100$ °C ในกรณีไม่เติมสารทำงานและเติมสารทำงานมีค่า $Q_{out,ave}$ เป็น 26.37 และ 77.49 W ตามลำดับ

จากการทดลองทั้งสองกรณี (รูปที่ 4.5 และ 4.6) สรุปได้ว่าการเปลี่ยนแปลง Q_{out} กรณีเติมสารทำงานและไม่เติมสารทำงานเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิส่วนทำระเหย (T_j) และความเร็วลมที่ใช้ระบายความร้อนในส่วนควบแน่น ถ้าหากเปรียบเทียบระหว่าง Vapor chamber แบบ CC กับแบบ TC พบว่า Vapor

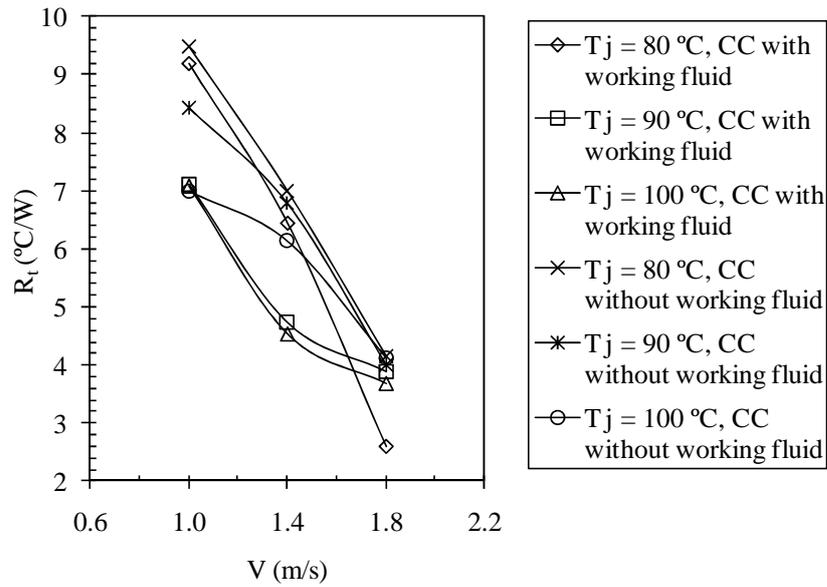
chamber แบบ TC ในกรณีที่เติมสารทำงานมีค่า Q_{out} มากกว่า Vapor chamber แบบ CC ทั้งนี้อาจมีสาเหตุจาก Vapor chamber แบบ TC จะมีพื้นที่ในการถ่ายเทความร้อนได้มากกว่า ซึ่งในกรณีที่เติมสารทำงานนั้น สารทำงานเมื่อเกิดการเปลี่ยนสถานะเป็นไอ ซึ่งไอบางส่วนจะลอยขึ้นสู่ด้านบนของส่วนควบแน่นและไหลเข้าท่อขนาดเล็กที่ติดตั้งเพิ่มเติม โดยภายนอกของท่อขนาดเล็กติดตั้งอยู่นี้มีอากาศมาระบาย เป็นผลให้เกิดการพาความร้อนได้ดีขึ้น นอกจากนี้ยังสรุปได้ว่า การเพิ่มความเร็วลมที่ระบายความร้อนก็จะยิ่งทำให้ค่า Q_{out} เพิ่มขึ้นด้วย



รูปที่ 4.6 ผลของ V_{air} ที่มีต่อ Q_{out} กรณี Vapor chamber แบบ TC ที่อุณหภูมิต่างๆ

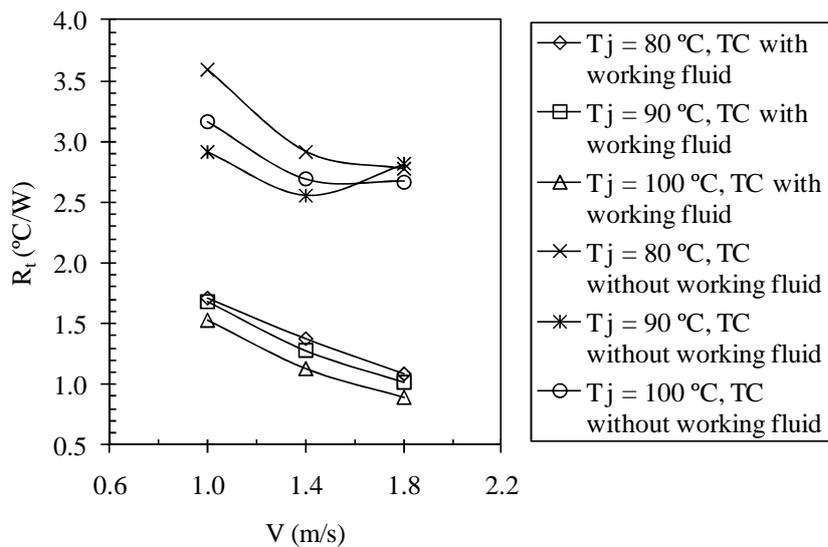
4.4 ผลของ V_{air} ที่มีต่อ R_t

การศึกษาผลของ V_{air} ที่มีต่อ R_t นี้ ได้กำหนดเงื่อนไขในการทดลองคือ อุณหภูมิที่จ่ายให้กับส่วนทำระเหยสามค่า ได้แก่ $T_j = 80, 90$ และ 100 °C และกำหนดความเร็วลมที่ระบายความร้อนส่วนควบแน่นสามค่า กล่าวคือ $V = 1.0, 1.4$ และ 1.8 m/s ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.7 ซึ่งพบว่า Vapor chamber แบบ CC กรณีไม่เติมสารทำงาน ทำงานที่ $T_j = 80$ °C และ $V = 1.0$ m/s มีค่า R_t สูงที่สุดเท่ากับ 9.49 °C/W และในทำนองเดียวกัน หาก Vapor chamber แบบ CC ทำงานที่ $T_j = 100$ °C และ $V = 1.8$ m/s มีค่า R_t ต่ำที่สุดเท่ากับ 4.10 °C/W และกรณีที่เติมสารทำงาน ทำงานที่ $T_j = 80$ °C และ $V = 1.0$ m/s มีค่า R_t สูงที่สุดเท่ากับ 9.18 °C/W และที่ $T_j = 100$ °C และ $V = 1.8$ m/s มีค่า R_t ต่ำที่สุดเท่ากับ 3.67 °C/W



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ของ V_{air} กับ R_t กรณี Vapor chamber แบบ CC

จากรูปที่ 4.7 จะเห็นได้ว่าค่า R_t ของ Vapor chamber แบบ CC ในกรณีที่ไม่มีเติมสารทำงานจะมีค่ามากกว่าในกรณีที่เติมสารทำงาน ซึ่งการที่ค่า R_t มีค่ามาก แสดงว่ามีการถ่ายเทความร้อนไม่ดี ดังนั้นจึงเป็นการยืนยันอีกครั้งว่า สารทำงานที่เติมใน Vapor chamber แบบ CC นั้น ทำให้มีการถ่ายเทความร้อนได้ดีขึ้น ซึ่งผลที่ได้นี้สอดคล้องกับผลการทดลองในหัวข้อที่ผ่านมา



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ของ V_{air} กับ R_t สำหรับ Vapor chamber แบบ TC

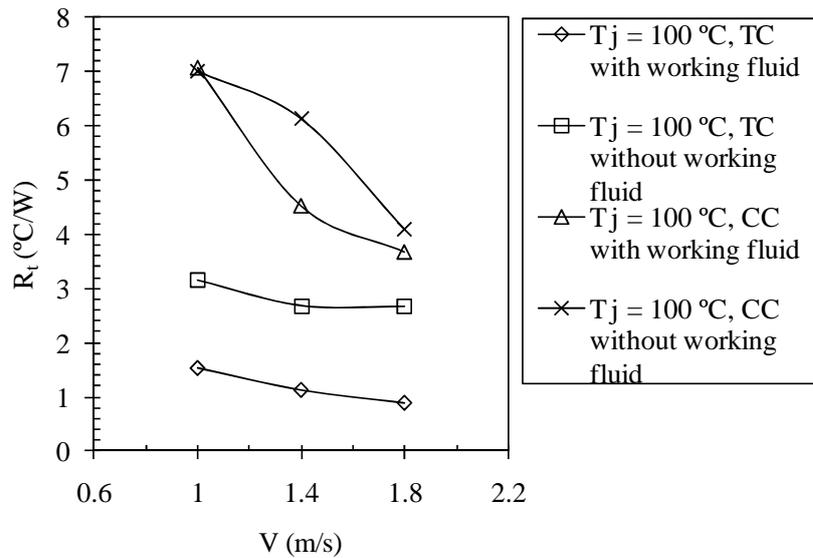
สำหรับ Vapor chamber แบบ TC ได้ทำการทดลองในเงื่อนไขเดียวกันกับ Vapor chamber แบบ CC ซึ่งผลของ V_{air} ที่มีต่อ R_f แสดงดังรูปที่ 4.8 ซึ่งผลการทดลองจะพบว่า ที่ $T_j = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ $V = 1.0\text{ m/s}$ ในกรณีที่ไม่เติมสารทำงานจะมีค่า R_f สูงที่สุดเท่ากับ $3.59\text{ }^{\circ}\text{C/W}$ และที่ $T_j = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ $V = 1.8\text{ m/s}$ จะมีค่า R_f ต่ำที่สุดเท่ากับ $2.66\text{ }^{\circ}\text{C/W}$ และกรณีที่เติมสารทำงาน ที่ $T_j = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ $V = 1.0\text{ m/s}$ จะมีค่า R_f สูงที่สุดเท่ากับ $1.71\text{ }^{\circ}\text{C/W}$ และที่ $T_j = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ $V = 1.8\text{ m/s}$ จะมีค่า R_f ต่ำที่สุดเท่ากับ $0.89\text{ }^{\circ}\text{C/W}$

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าค่า R_f ของ Vapor chamber แบบ TC ในกรณีที่ไม่เติมสารทำงาน จะมากกว่าในกรณีที่เติมสารทำงาน ซึ่งมีลักษณะเช่นเดียวกับ Vapor chamber แบบ CC จากผลการทดลองนี้ทำให้แน่ชัดยิ่งขึ้นว่า สารทำงานที่เติมใน Vapor chamber จะสามารถเพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่าในกรณีที่ไม่มีสารทำงานจึงทำให้ค่าของ R_f ในกรณีที่ไม่เติมสารทำงานมีค่ามากกว่าในกรณีที่มีสารทำงาน

ถ้าหากเปรียบเทียบระหว่าง Vapor chamber แบบ CC และ Vapor chamber แบบ TC จะเห็นได้ว่า Vapor chamber แบบ TC จะมีค่า R_f น้อยกว่า Vapor chamber แบบ CC เนื่องจากว่า Vapor chamber แบบ TC จะมีการติดตั้งท่อบนส่วนควบแน่นซึ่งจะเป็นการเพิ่มพื้นที่ในการถ่ายเทความร้อนและช่วยทำให้การถ่ายเทความร้อนดียิ่งขึ้น อีกประเด็นหนึ่งที่น่าสนใจ กล่าวคือ การปรับเปลี่ยนความเร็วลมที่ระบายความร้อนที่ส่วนควบแน่นทำให้ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานของความร้อนที่เกิดขึ้นเป็นผลให้ค่า R_f ลดลง

เพื่อให้เห็นภาพที่ชัดเจนยิ่งขึ้น ผู้วิจัยได้นำข้อมูลจากรูปที่ 4.7 และ 4.8 มาแสดงรวมกันเป็นรูปที่ 4.9 จะเห็นได้ว่าที่ $T_j = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ของ Vapor chamber แบบ CC กรณีไม่เติมสารทำงาน ที่ $V = 1.0\text{ m/s}$ จะมีค่า R_f มากที่สุดเป็น $7.00\text{ }^{\circ}\text{C/W}$ และที่ $V = 1.8\text{ m/s}$ จะมีค่า R_f ต่ำที่สุดเป็น $4.10\text{ }^{\circ}\text{C/W}$ และในกรณีที่เติมสารทำงาน ที่ $V = 1.0\text{ m/s}$ จะมีค่า R_f มากที่สุดเป็น $7.08\text{ }^{\circ}\text{C/W}$ และที่ $V = 1.8\text{ m/s}$ จะมีค่า R_f ต่ำที่สุดเป็น $3.67\text{ }^{\circ}\text{C/W}$

สำหรับ Vapor chamber แบบ TC จะเห็นได้ว่า กรณีไม่เติมสารทำงาน ที่ $V = 1.0\text{ m/s}$ มีค่า R_f มากที่สุดเท่ากับ $3.16\text{ }^{\circ}\text{C/W}$ และที่ $V = 1.8\text{ m/s}$ จะมีค่า R_f ต่ำที่สุดเท่ากับ $2.66\text{ }^{\circ}\text{C/W}$ และในกรณีที่เติมสารทำงาน ที่ $V = 1.0\text{ m/s}$ จะมีค่า R_f มากที่สุดเท่ากับ $1.52\text{ }^{\circ}\text{C/W}$ และที่ $V = 1.8\text{ m/s}$ จะมีค่า R_f ต่ำที่สุดเท่ากับ $0.8\text{ }^{\circ}\text{C/W}$



รูปที่ 4.9 ผลของ V_{air} ที่มีต่อ R_t กรณี Vapor chamber แบบ CC และแบบ TC ที่ $T_j = 100^\circ\text{C}$

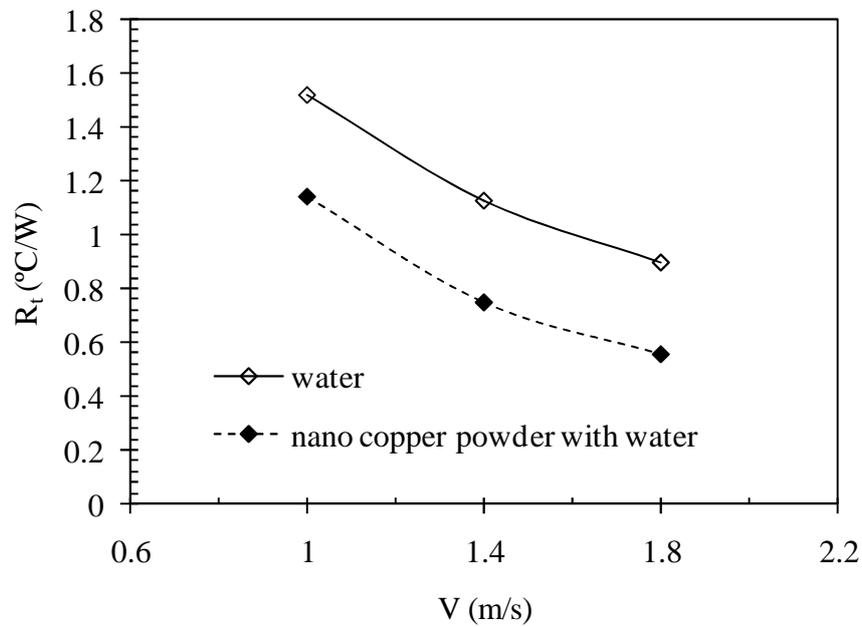
จากรูปที่ 4.9 จะเห็นว่า ในช่วงที่ $V = 1.0$ m/s ของ Vapor chamber แบบ CC ทั้งในกรณีที่เติมสารทำงานและไม่เติมสารทำงาน จะมีความแตกต่างของ $R_t = 0.08$ °C/W และที่ $V = 1.8$ m/s จะมีความแตกต่างของ $R_t = 0.5$ °C/W ซึ่งที่ $T_j = 100$ °C จะมีค่าความแตกต่างของ R_t น้อยมาก ส่วนในกรณี Vapor chamber แบบ TC ที่ $T_j = 100$ °C ที่ $V = 1.0$ m/s กรณีเติมสารทำงานและไม่เติมสารทำงาน จะมีความแตกต่างของ $R_t = 1.64$ °C/W และที่ $V = 1.8$ m/s จะมีความแตกต่างของ $R_t = 1.77$ °C/W ซึ่งจะแสดงให้เห็นว่าค่าของ R_t ในกรณีที่เติมสารและไม่เติมสารทำงานจะมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก แต่จะแตกต่างที่ความเร็วลมที่ใช้ระบายความร้อนส่วนควบแน่นและเนื่องจากว่า Vapor chamber แบบ TC จะมีการติดตั้งท่อขนาดเล็กไว้บนส่วนควบแน่น ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มพื้นที่การถ่ายเทความร้อน และในกรณีที่มีการเติมสารทำงานจะยิ่งทำให้ค่า R_t ลดลงไปด้วย

จากการทดลอง Vapor chamber ทั้งสองแบบสรุปได้ว่าค่า R_t ของ Vapor chamber แบบ TC ที่มีการเติมสารทำงาน มีค่าน้อยกว่า Vapor chamber แบบ CC

4.5 ผลของ nano copper powder ที่เติมลงในน้ำ

รูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง V_{air} กับ R_t กรณีใช้น้ำเป็นสารทำงาน และกรณีใช้นano copper powder with water เป็นสารทำงานของ Vapor chamber แบบ TC ผลการทดลองพบว่าค่า R_t มีค่าลดลงเมื่อเติม nano copper powder with water กล่าวคือ การเติม nano copper ผสมลงในน้ำซึ่งใช้เป็นสารทำงาน ณ V_{air} เท่ากับ 1, 1.4 และ 1.8 m/s พบว่า R_t มีค่า เป็น 1.14, 0.75 และ 0.56

$^{\circ}\text{C}/\text{W}$ ตามลำดับ ดังนั้นสรุปได้ว่า การใช้ nano copper powder with water เป็นสารทำงานนั้น ให้ค่า R_t ลดลงเฉลี่ย 32.13 %



รูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง V_{air} กับ R_t กรณีใช้น้ำเป็นสารทำงานและกรณีใช้ nano copper powder with water เป็นสารทำงานของ Vapor chamber แบบ TC ที่ $T_j = 100^{\circ}\text{C}$

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลการทดลองเพื่อศึกษาคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของ Vapor chamber แบบ CC และ TC รวมทั้งเปรียบเทียบประสิทธิภาพทางความร้อนของ Vapor chamber ทั้งสองชนิด นอกจากนี้ยังจะศึกษาประสิทธิภาพทางความร้อนของ Vapor chamber แบบ TC ในกรณีที่เติมน้ำบริสุทธิ์เทียบกับของผสมระหว่าง nano copper-น้ำบริสุทธิ์ ที่ใช้เป็นสารทำงาน ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

1) Vapor chamber แบบ CC กรณีเติมสารทำงาน และ $T_j = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ มีค่า T_c มากกว่าแบบ Vapor chamber แบบ TC เท่ากับ $20\text{ }^{\circ}\text{C}$

2) Vapor chamber แบบ TC กรณีเติมสารทำงาน มีค่า Q_{out} สูงกว่า Vapor chamber แบบ CC เท่ากับ 58.51 W

3) Vapor chamber แบบ TC กรณีเติมสารทำงาน มีค่า R_t น้อยกว่า Vapor chamber แบบ CC เท่ากับ $2.77\text{ }^{\circ}\text{C/W}$

4) $V_{air} = 1.8\text{ m/s}$ และ $T_j = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ให้ค่า Q_{out} สูงสุดเท่ากับ 77.49 W

5) Vapor chamber ทั้งสองชนิดมีค่า ΔT ของลมที่ระบายความร้อนออกจากส่วนควบแน่นเพิ่มขึ้นตาม T_j

6) Vapor chamber ทั้งสองชนิดมีค่า Q_{out} เพิ่มขึ้นตาม T_j

7) Vapor chamber ทั้งสองชนิดมีค่า R_t ลดลงตาม V_{air}

8) Vapor chamber ทั้งสองชนิดมีค่า Q_{out} เพิ่มขึ้นตาม V_{air}

9) การใช้ nano copper powder with water เป็นสารทำงานใน Vapor chamber แบบ TC ให้ค่า R_t ลดลงจากการใช้น้ำเป็นสารทำงานเฉลี่ย $32.13\text{ }\%$

5.2 ข้อเสนอแนะ

1) ควรมีการปรับปรุงอัตราความเร็วของพัดลมที่ใช้ดูดอากาศในส่วนควบแน่นให้มีหลายค่าเพื่อจะได้เห็นถึงความแตกต่างของค่า Q_{out} ที่มากขึ้น

2) ควรมีเปลี่ยนเส้นผ่านศูนย์กลางท่อที่ติดตั้งบริเวณที่ใช้เป็นส่วนควบแน่นให้มีหลายขนาดมากขึ้น เพื่อจะได้มีข้อมูลมากขึ้น

3) ควรมีการเลือกใช้สารทำงานชนิดอื่น เช่น ผงนาโนของโลหะชนิดต่างๆ มาใช้เติมในการทดลอง เพื่อที่จะเห็นถึงประสิทธิภาพในการพาความร้อนที่ดียิ่งขึ้น

4) ในช่วงการทดลองควรมีการเพิ่มอุณหภูมิให้กับส่วนทำระเหยที่มากขึ้นเพื่อที่จะได้เห็นถึงความแตกต่างในการถ่ายเทความร้อนของ Vapor chamber

5) ในการใช้ nano copper powder ผสมลงในน้ำนั้น ควรมีการเปลี่ยนสัดส่วน nano copper powder ให้มีหลายๆ สัดส่วน เพื่อที่จะได้ทราบผลของการเปลี่ยนสัดส่วนจำนวนผงที่มีต่อสมรรถนะทางความร้อน Vapor chamber

บรรณานุกรม

- [1] R. Boukhanouf, A. Haddad, M.T. North and C. Buffone, “Experimental investigation of a plate heat pipe performance using IR thermal imaging camera”, Applied Thermal Engineering, 26, 2006, pp. 2148-2156.
- [2] T. E. Tsai, H. H. Wu, C. C. Chang and Sih-Li Chen, “Two-phase closed thermosyphon vapor-chamber system for electronic cooling”, International communications in Heat and Mass Transfer, 37, 2010, pp. 484-489.
- [3] S. S. Hsieh, R. Y. Lee, J. C. Shyu and S. W. Chen, “Thermal performance of flat vapor chamber heat spreader”, Energy Conservation and Management, 49, 2008. Pp. 1774-1784.
- [4] S. F. Wang, J. Chen, Y. Hu and W. Zhang. “Effect of evaporation section and condensation section length on thermal performance of flat plate heat pipe”, Applied Thermal Engineering, 31, 2011, pp. 2367-2373.
- [5] S. C. Wong, S. F. Huang and K. C. Hsieh, “Performance tests on novel vapor chamber”, Thermal Engineering, 31, 2011, pp. 1757-1762.
- [6] S. Lips, F. Lefevre and Bonjour, “Combined effects of the filling ratio and the vapour space thickness on the performance of a flat heat pipe”, International Journal of Heat and Mass Transfer, 53, 2010, pp. 694-702.
- [7] S. C. Wong, K. C. Hsieh, J. D. Wu and W. L. Han, “A novel vapor chamber and its performance”, International Journal of Heat and Mass Transfer, 53, 2010, pp. 2377-2384.

ภาคผนวก ก

ตารางบันทึกผลการทดลอง

ตารางที่ ก. 1 ค่า Q_{out} และ R_t กรณี $T_j = 80^\circ\text{C}$, $V_{air} = 1.0\text{ m/s}$ และ TC with working fluid

Time (min)	$T_j = 80^\circ\text{C}$, TC with working fluid									
	$T_{air\ in,1}$ ($^\circ\text{C}$)	$T_{air\ in,2}$ ($^\circ\text{C}$)	$T_{air\ in,3}$ ($^\circ\text{C}$)	$T_{air\ in,4}$ ($^\circ\text{C}$)	$T_{air\ in,ave}$ ($^\circ\text{C}$)	$T_{air,out}$ ($^\circ\text{C}$)	ΔT ($^\circ\text{C}$)	T_{atm} ($^\circ\text{C}$)	Q_{out} (W)	R_t ($^\circ\text{C}/\text{W}$)
5	33.000	32.500	34.100	32.100	32.925	41.300	8.375	30.983	28.312	1.731
10	32.600	32.900	34.400	32.500	33.100	41.700	8.600	30.983	29.072	1.685
15	33.200	32.500	34.700	32.300	33.175	41.800	8.625	30.983	29.157	1.684
20	33.000	32.600	35.200	32.600	33.350	41.800	8.450	30.983	28.565	1.715
25	32.600	32.600	34.700	32.400	33.075	41.500	8.425	30.983	28.481	1.720
30	32.500	32.800	34.600	32.300	33.050	41.500	8.450	30.983	28.565	1.719
35	33.400	33.000	33.200	32.400	33.000	41.800	8.800	30.983	29.748	1.632
40	33.800	33.700	34.800	32.300	33.650	41.400	7.750	30.983	26.199	1.755
45	32.600	32.800	33.900	32.300	32.900	41.700	8.800	30.983	29.748	1.705
50	32.100	32.900	34.800	32.200	33.000	41.400	8.400	30.983	28.396	1.745
55	32.900	32.400	34.800	33.000	33.275	41.800	8.525	30.983	28.819	1.676
60	32.300	32.900	34.700	32.500	33.100	41.600	8.500	30.983	28.734	1.768
65	32.300	32.900	34.600	32.000	32.950	41.500	8.550	30.983	28.903	1.733
70	32.000	32.500	34.300	32.300	32.775	41.400	8.625	30.983	29.157	1.687
75	32.300	32.400	34.600	32.200	32.875	41.400	8.525	30.983	28.819	1.704
80	32.900	32.700	33.300	31.800	32.675	41.100	8.425	30.983	28.481	1.727
85	32.500	32.300	33.500	32.300	32.650	41.700	9.050	30.983	30.593	1.611
90	32.400	32.600	34.800	32.000	32.950	41.500	8.550	30.983	28.903	1.702
95	33.600	32.600	33.700	32.200	33.025	41.400	8.375	30.983	28.312	1.741
100	32.400	32.900	33.200	31.700	32.550	41.100	8.550	30.983	28.903	1.706
105	32.400	32.500	34.300	32.000	32.800	41.300	8.500	30.983	28.734	1.719
110	31.900	32.400	35.400	32.800	33.125	41.000	7.875	30.983	26.621	1.852
115	32.300	32.700	33.700	32.400	32.775	41.300	8.525	30.983	28.819	1.711
120	32.100	32.700	33.900	31.900	32.650	41.100	8.450	30.983	28.565	1.729
average	32.629	32.700	34.300	32.271	32.975	41.463	8.488	30.983	28.692	1.715

ตารางที่ ก. 2 ค่า Q_{out} และ R_t กรณี $T_j = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$, $V_{air} = 1.0\text{ m/s}$ และ TC without working fluid

Time (min)	$T_j = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$, TC Without working fluid									
	$T_{air\ in,1}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,2}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,3}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,4}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,ave}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air,out}$ ($^{\circ}\text{C}$)	ΔT ($^{\circ}\text{C}$)	T_{atm} ($^{\circ}\text{C}$)	Q_{out} (W)	R_t ($^{\circ}\text{C/W}$)
5	32.100	31.100	31.000	30.800	31.250	35.400	4.150	30.983	14.114	3.494
10	32.300	31.300	30.500	31.000	31.275	35.400	4.125	30.983	13.860	3.515
15	32.600	31.600	30.300	30.500	31.250	35.200	3.950	30.983	13.184	3.671
20	32.500	31.000	30.400	30.700	31.150	35.400	4.250	30.983	14.452	3.412
25	32.300	31.200	30.400	30.600	31.125	35.400	4.275	30.983	13.860	3.392
30	31.900	31.100	30.300	30.600	30.975	35.400	4.425	30.983	14.790	3.277
35	32.200	31.700	30.400	30.800	31.275	35.500	4.225	30.983	14.283	3.432
40	32.300	30.900	30.900	30.200	31.075	35.500	4.425	30.983	14.959	3.277
45	32.400	31.200	30.400	30.700	31.175	35.400	4.225	30.983	14.283	3.432
50	32.700	31.000	30.400	30.600	31.175	35.400	4.225	30.983	14.283	3.432
55	32.300	31.600	31.000	30.500	31.350	35.600	4.250	30.983	14.367	3.412
60	32.900	31.600	30.300	30.700	31.375	35.400	4.025	30.983	13.606	3.602
65	33.000	31.400	30.100	30.500	31.250	35.200	3.950	30.983	13.353	3.671
70	32.500	31.400	30.500	30.400	31.200	35.600	4.400	30.983	14.874	3.295
75	32.000	31.700	30.300	31.100	31.275	35.500	4.225	30.983	14.283	3.432
80	32.600	31.300	30.100	30.800	31.200	35.400	4.200	30.983	14.198	3.452
85	32.600	31.300	30.100	30.900	31.225	35.400	4.175	30.983	14.114	3.473
90	32.900	31.300	30.200	30.700	31.275	35.300	4.025	30.983	13.606	3.602
95	32.600	31.100	30.100	30.600	31.100	35.200	4.100	30.983	13.860	3.537
100	33.200	31.000	30.200	30.700	31.275	35.300	4.025	30.983	13.606	3.602
105	32.900	31.300	30.200	30.800	31.300	35.300	4.000	30.983	13.606	3.625
110	32.300	31.100	30.300	30.800	31.125	35.300	4.175	30.983	13.945	3.473
115	31.400	31.200	30.700	31.100	31.100	35.600	4.500	30.983	14.874	3.222
120	31.700	31.400	30.700	30.900	31.175	35.800	4.625	30.983	15.128	3.135
average	32.425	31.283	30.408	30.708	31.206	35.413	4.206	30.983	14.145	3.453

ตารางที่ ก. 3 ค่า Q_{out} และ R_t กรณี $T_j = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$, $V_{air} = 1.0\text{ m/s}$ และ TC with working fluid

Time (min)	$T_j = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$, TC with working fluid									
	$T_{air\ in,1}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,2}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,3}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,4}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,ave}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air,out}$ ($^{\circ}\text{C}$)	ΔT ($^{\circ}\text{C}$)	T_{atm} ($^{\circ}\text{C}$)	Q_{out} (W)	R_t ($^{\circ}\text{C/W}$)
5	33.400	34.700	35.300	32.900	34.075	44.400	10.325	31.100	34.904	1.691
10	33.500	33.800	34.900	33.100	33.825	44.400	10.575	31.300	35.749	1.651
15	33.800	34.100	34.900	32.900	33.925	44.500	10.575	31.300	35.749	1.651
20	33.300	33.900	35.800	32.900	33.975	44.300	10.325	31.000	34.904	1.691
25	33.200	34.000	34.900	33.300	33.850	44.600	10.750	31.300	36.340	1.624
30	33.200	34.300	35.700	33.200	34.100	44.600	10.500	31.100	35.495	1.663
35	33.900	34.200	35.000	33.300	34.100	44.500	10.400	31.100	35.157	1.679
40	33.200	33.600	35.500	33.200	33.875	44.300	10.425	31.200	35.242	1.675
45	33.300	34.600	36.500	33.300	34.425	44.400	9.975	31.200	33.720	1.750
50	33.300	34.100	34.900	32.900	33.800	44.500	10.700	31.300	36.171	1.632
55	33.200	33.800	34.900	33.200	33.775	44.300	10.525	31.300	35.580	1.659
60	33.100	33.600	36.000	33.500	34.050	44.600	10.550	31.300	35.664	1.655
65	33.500	33.600	34.600	33.200	33.725	44.400	10.675	31.400	36.087	1.635
70	32.900	34.600	35.600	33.400	34.125	44.400	10.275	31.300	34.735	1.699
75	32.900	33.800	34.900	33.500	33.775	44.300	10.525	31.200	35.580	1.659
80	34.800	33.300	34.700	33.600	34.100	44.300	10.200	31.300	34.481	1.712
85	33.100	34.700	36.200	33.300	34.325	44.100	9.775	31.200	33.044	1.786
90	33.300	33.800	34.900	33.400	33.850	44.600	10.750	31.500	36.340	1.624
95	33.200	34.300	35.100	33.200	33.950	44.300	10.350	31.400	34.988	1.687
100	33.200	34.200	35.900	33.100	34.100	44.200	10.100	31.400	34.143	1.729
105	33.300	33.900	35.900	33.100	34.050	44.300	10.250	31.300	34.650	1.703
110	33.200	34.200	35.700	33.200	34.075	44.500	10.425	31.400	35.242	1.675
115	33.500	34.300	35.000	33.300	34.025	44.600	10.575	31.300	35.749	1.651
120	33.600	34.500	35.800	33.300	34.300	44.000	9.700	31.300	32.791	1.800
average	33.371	34.079	35.358	33.221	34.007	44.392	10.384	31.271	35.104	1.683

ตารางที่ ก. 4 ค่า Q_{out} และ R_t กรณี $T_j = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$, $V_{air} = 1.0\text{ m/s}$ และ TC without working fluid

Time (min)	$T_j = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$, TC without working fluid									
	$T_{air\ in,1}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,2}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,3}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,4}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,ave}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air,out}$ ($^{\circ}\text{C}$)	ΔT ($^{\circ}\text{C}$)	T_{atm} ($^{\circ}\text{C}$)	Q_{out} (W)	R_t ($^{\circ}\text{C/W}$)
5	32.700	31.700	31.600	31.800	31.950	38.000	6.050	30.983	20.452	2.934
10	32.600	31.600	30.800	31.400	31.600	37.900	6.300	30.983	21.297	2.822
15	32.100	31.200	30.600	31.400	31.325	37.800	6.475	30.983	21.889	2.750
20	32.400	31.600	30.500	31.500	31.500	38.000	6.500	30.983	21.973	2.740
25	32.600	32.400	30.400	31.500	31.725	37.900	6.175	30.983	20.875	2.884
30	32.500	32.400	30.600	31.400	31.725	38.000	6.275	30.983	21.213	2.843
35	32.600	32.100	30.600	31.100	31.600	37.900	6.300	30.983	21.297	2.827
40	32.600	32.000	30.400	31.300	31.575	37.700	6.125	30.983	20.706	2.912
45	33.700	31.300	30.400	31.400	31.700	37.400	5.700	30.983	19.269	3.124
50	32.200	31.500	30.800	31.700	31.550	37.800	6.250	30.983	21.128	2.849
55	31.600	32.500	30.400	31.800	31.575	37.900	6.325	30.983	21.382	2.816
60	32.600	31.500	30.400	31.700	31.550	37.500	5.950	30.983	20.114	2.993
65	31.700	32.300	30.400	32.300	31.675	37.900	6.225	30.983	21.044	2.861
70	31.400	31.300	31.400	32.200	31.575	37.800	6.225	30.983	21.044	2.865
75	31.800	32.300	30.700	32.000	31.700	37.800	6.100	30.983	20.621	2.924
80	31.900	32.200	30.800	31.300	31.550	37.700	6.150	30.983	20.790	2.900
85	32.000	31.600	31.100	31.400	31.525	37.600	6.075	30.983	20.537	2.931
90	32.000	31.200	31.100	31.700	31.500	37.700	6.200	30.983	20.959	2.872
95	31.900	31.600	31.500	32.500	31.875	37.900	6.025	30.983	20.367	2.961
105	31.700	32.100	30.500	32.400	31.675	37.700	6.025	30.983	20.367	2.966
110	31.700	32.100	30.500	31.800	31.525	37.600	6.075	30.983	20.537	2.936
115	31.400	31.800	31.700	31.100	31.500	37.400	5.900	30.983	19.945	3.028
120	32.000	31.800	32.000	31.000	31.700	37.100	5.400	30.983	18.255	3.298
average	32.161	31.830	30.835	31.639	31.616	37.739	6.123	30.983	20.698	2.915

ตารางที่ ก. 5 ค่า Q_{out} และ R_t กรณี $T_j = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$, $V_{air} = 1.0\text{ m/s}$ และ TC with working fluid

Time (min)	$T_j = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$, TC With working fluid									
	$T_{air\ in,1}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,2}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,3}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,4}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,ave}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air,out}$ ($^{\circ}\text{C}$)	ΔT ($^{\circ}\text{C}$)	T_{atm} ($^{\circ}\text{C}$)	Q_{out} (W)	R_t ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$)
5	32.600	33.900	35.800	32.600	33.725	47.500	13.775	30.600	46.566	1.482
10	32.600	33.800	35.600	32.600	33.650	47.700	14.050	30.700	47.496	1.453
15	32.600	33.200	35.500	32.500	33.450	47.800	14.350	30.600	48.510	1.423
20	32.900	33.600	36.500	32.300	33.825	47.800	13.975	30.600	47.242	1.461
25	32.700	33.600	35.400	32.900	33.650	47.600	13.950	30.500	47.158	1.464
30	32.600	33.800	36.400	32.400	33.800	47.400	13.600	30.600	45.975	1.501
35	32.600	33.900	34.900	32.600	33.500	47.300	13.800	30.700	45.21413	1.526
40	32.600	34.000	35.800	32.700	33.775	47.300	13.525	30.500	46.39731	1.488
45	32.800	33.300	35.900	32.800	33.700	47.300	13.600	30.600	45.55218	1.515
50	32.300	33.700	35.400	32.700	33.525	47.400	13.875	30.400	46.98889	1.469
55	32.700	34.500	36.800	32.600	34.150	47.300	13.150	30.500	46.48182	1.485
60	32.100	32.900	38.200	33.200	34.100	47.000	12.900	30.300	44.79157	1.541
65	32.300	32.600	37.100	32.900	33.725	46.900	13.175	30.400	45.21413	1.526
70	32.400	33.100	36.400	32.600	33.625	47.000	13.375	30.500	45.214	1.526
75	32.600	33.000	35.900	32.600	33.525	46.900	13.375	30.500	45.214	1.526
80	32.400	33.200	35.900	32.300	33.450	46.800	13.350	30.400	45.130	1.529
85	31.900	32.200	36.700	33.100	33.475	46.800	13.325	30.300	45.045	1.532
90	31.900	32.200	37.000	32.800	33.475	46.700	13.225	30.300	44.707	1.544
95	32.000	33.100	35.300	32.500	33.225	46.700	13.475	30.200	45.552	1.515
100	31.900	32.900	35.900	32.400	33.275	46.700	13.425	30.300	45.383	1.521
105	32.100	33.300	34.900	32.700	33.250	46.700	13.450	30.400	45.468	105
100	31.900	32.900	35.900	32.400	33.275	46.700	13.425	30.300	45.383	1.521
115	31.800	32.000	38.300	32.700	33.700	46.700	13.000	30.400	43.946	115
120	31.800	32.300	37.900	33.300	33.825	46.700	12.875	30.200	43.524	120
average	32.338	33.208	36.225	32.675	33.611	47.113	13.501	30.450	45.756	15.481

ตารางที่ ก. 6 ค่า Q_{out} และ R_t กรณี $T_j = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$, $V_{air} = 1.0\text{ m/s}$ และ TC without working fluid

Time (min)	$T_j = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$, TC without working fluid									
	$T_{air\ in,1}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,2}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,3}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,4}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,ave}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air,out}$ ($^{\circ}\text{C}$)	ΔT ($^{\circ}\text{C}$)	T_{atm} ($^{\circ}\text{C}$)	Q_{out} (W)	R_t ($^{\circ}\text{C/W}$)
5	32.300	31.400	32.000	31.300	31.750	29.900	6.150	30.983	20.790	2.934
10	31.600	31.800	31.100	32.100	31.650	29.700	6.450	30.983	21.804	2.822
15	32.500	31.300	30.900	31.300	31.500	29.700	6.600	30.983	22.311	2.750
20	32.400	31.200	31.300	31.700	31.650	29.700	6.550	30.983	22.142	2.740
25	31.900	32.800	31.000	31.700	31.850	29.700	6.550	30.983	22.142	2.884
30	32.200	31.600	31.200	32.000	31.750	29.800	6.850	30.983	23.156	2.843
35	32.000	32.300	31.100	32.300	31.925	29.700	6.675	30.983	22.565	2.827
40	32.400	31.800	30.700	31.900	31.700	29.700	6.600	30.983	22.311	2.912
45	31.700	32.300	30.700	32.100	31.700	29.600	6.900	30.983	23.325	3.124
50	32.100	32.800	30.700	32.300	31.975	29.700	6.825	30.983	23.072	2.849
55	32.600	31.700	31.300	31.600	31.800	29.800	6.900	30.983	23.325	2.816
60	32.100	31.600	31.700	31.700	31.775	29.800	6.625	30.983	22.396	2.993
65	32.100	31.900	31.300	32.700	32.000	29.800	6.800	30.983	22.987	2.861
70	32.300	31.700	31.200	32.300	31.875	29.800	6.825	30.983	23.072	2.865
75	31.600	31.300	32.200	32.800	31.975	29.700	6.825	30.983	23.072	2.924
80	32.200	32.100	31.300	32.200	31.950	29.600	6.750	30.983	22.818	2.900
85	32.200	31.700	31.600	31.800	31.825	29.900	6.775	30.983	22.903	2.931
90	32.100	32.600	30.800	32.400	31.975	29.800	6.725	30.983	22.734	2.872
95	33.100	32.100	30.600	31.700	31.875	29.800	6.425	30.983	21.720	2.961
100	33.700	32.000	30.400	31.500	31.900	29.800	5.800	30.983	19.607	2.905
105	34.300	31.700	30.400	31.400	31.950	29.800	5.950	30.983	20.114	2.966
110	32.600	31.600	30.600	31.400	31.550	29.800	6.650	30.983	22.480	2.936
115	32.300	31.500	30.600	32.000	31.600	29.600	6.900	30.983	23.325	3.028
120	32.000	31.700	30.400	32.500	31.650	29.600	6.950	30.983	23.494	3.298
average	32.346	31.854	31.046	31.946	31.798	29.742	6.627	30.983	22.403	2.914

ตารางที่ ก. 7 ค่า Q_{out} และ R_t กรณี $T_j = 80^\circ\text{C}$, $V_{air} = 1.0\text{ m/s}$ และ CC with working fluid

Time (min)	$T_j = 80^\circ\text{C}$, CC with working fluid									
	$T_{air\ in,1}$ ($^\circ\text{C}$)	$T_{air\ in,2}$ ($^\circ\text{C}$)	$T_{air\ in,3}$ ($^\circ\text{C}$)	$T_{air\ in,4}$ ($^\circ\text{C}$)	$T_{air\ in,ave}$ ($^\circ\text{C}$)	$T_{air,out}$ ($^\circ\text{C}$)	ΔT ($^\circ\text{C}$)	T_{atm} ($^\circ\text{C}$)	Q_{out} (W)	R_t ($^\circ\text{C}/\text{W}$)
5	33.700	33.000	32.600	31.600	32.725	34.300	1.575	30.983	5.324	9.206
10	33.200	33.200	32.700	31.500	32.650	34.500	1.850	30.983	6.254	7.838
15	34.100	33.200	32.700	31.500	32.875	34.500	1.625	30.983	5.493	8.923
20	33.900	33.300	32.700	31.500	32.850	34.400	1.550	30.983	5.240	9.355
25	34.100	33.300	32.600	31.500	32.875	34.400	1.525	30.983	5.155	9.508
30	34.300	33.100	32.700	31.400	32.875	34.300	1.425	30.983	4.817	10.175
35	33.800	33.200	32.700	31.400	32.775	34.300	1.525	30.983	5.155	9.508
40	33.800	33.100	32.700	31.400	32.750	34.300	1.550	30.983	5.240	9.355
45	34.900	32.900	32.600	31.400	32.950	34.300	1.350	30.983	4.564	10.741
50	34.500	32.900	32.600	31.400	32.850	34.300	1.450	30.983	4.902	10.000
55	34.300	32.900	32.500	31.400	32.775	34.300	1.525	30.983	5.155	9.508
60	34.000	33.000	32.600	31.400	32.750	34.300	1.550	30.983	5.240	9.355
65	33.600	33.100	32.800	31.400	32.725	34.600	1.875	30.983	6.338	7.733
70	33.600	33.200	32.700	31.400	32.725	34.600	1.875	30.983	6.338	7.733
75	33.600	33.100	32.600	31.500	32.700	34.600	1.900	30.983	6.423	7.632
80	33.600	33.200	32.800	31.400	32.750	34.600	1.850	30.983	6.254	7.838
85	34.000	33.200	32.700	31.400	32.825	34.400	1.575	30.983	5.324	9.206
90	34.400	33.100	32.700	31.400	32.900	34.300	1.400	30.983	4.733	10.357
95	34.300	32.900	32.700	31.400	32.825	34.400	1.575	30.983	5.324	9.206
100	34.300	33.000	32.800	31.300	32.850	34.300	1.450	30.983	4.902	10.000
105	34.200	33.300	32.800	31.400	32.925	34.300	1.375	30.983	4.648	10.545
110	33.700	33.300	32.600	31.400	32.750	34.400	1.650	30.983	5.578	8.788
115	33.900	33.200	32.600	31.600	32.825	34.400	1.575	30.983	5.324	9.206
120	33.700	32.900	32.700	31.900	32.800	34.500	1.700	30.983	5.747	8.529
average	33.979	33.108	32.675	31.454	32.804	34.400	1.596	30.983	5.395	9.177

ตารางที่ ก. 8 ค่า Q_{out} และ R_t กรณี $T_j = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$, $V_{air} = 1.0\text{ m/s}$ และ CC without working fluid

Time (min)	$T_j = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$, CC without working fluid									
	$T_{air\ in,1}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,2}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,3}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,4}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,ave}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air,out}$ ($^{\circ}\text{C}$)	ΔT ($^{\circ}\text{C}$)	T_{atm} ($^{\circ}\text{C}$)	Q_{out} (W)	R_t ($^{\circ}\text{C/W}$)
5	31.100	29.800	31.300	31.300	30.875	31.800	0.925	30.983	3.127	15.676
10	30.700	29.800	31.200	31.200	30.725	31.800	1.075	30.983	3.634	13.488
15	30.700	29.800	31.600	31.600	30.925	31.800	0.875	30.983	2.958	16.571
20	30.600	30.100	30.200	30.200	30.275	31.800	1.525	30.983	5.155	9.508
25	30.800	30.000	30.100	30.100	30.250	31.900	1.650	30.983	5.578	8.788
30	30.700	30.400	29.700	29.700	30.125	31.900	1.775	30.983	6.000	8.169
35	31.000	30.400	30.000	30.000	30.350	31.800	1.450	30.983	4.902	10.000
40	31.000	30.300	30.100	30.100	30.375	31.900	1.525	30.983	5.155	9.508
45	30.600	29.800	31.000	31.000	30.600	31.800	1.200	30.983	4.057	12.083
50	30.700	29.600	31.000	31.000	30.575	31.800	1.225	30.983	4.141	11.837
55	30.800	29.600	31.000	31.000	30.600	31.900	1.300	30.983	4.395	11.154
60	30.700	29.700	30.200	30.200	30.200	31.900	1.700	30.983	5.747	8.529
65	31.000	29.800	29.900	29.900	30.150	31.900	1.750	30.983	5.916	8.286
70	30.700	29.800	29.700	29.700	29.975	31.900	1.925	30.983	6.507	7.532
75	30.600	29.700	29.700	29.700	29.925	32.000	2.075	30.983	7.015	6.988
80	30.700	29.600	31.000	31.000	30.575	31.900	1.325	30.983	4.479	10.943
85	30.700	29.700	31.000	31.000	30.600	31.900	1.300	30.983	4.395	11.154
90	30.600	29.600	31.000	31.000	30.550	31.800	1.250	30.983	4.226	11.600
95	30.800	29.600	31.000	31.000	30.600	31.800	1.200	30.983	4.057	12.083
100	30.900	30.000	29.900	29.900	30.175	31.900	1.725	30.983	5.831	8.406
105	30.900	30.300	29.700	29.700	30.150	31.900	1.750	30.983	5.916	8.286
110	31.100	30.100	29.700	29.700	30.150	31.900	1.750	30.983	5.916	8.286
115	31.000	30.100	29.800	29.800	30.175	31.900	1.725	30.983	5.831	8.406
120	30.800	29.700	30.800	30.800	30.525	31.900	1.375	30.983	4.648	10.545
average	30.800	29.888	30.442	30.442	30.393	31.867	1.474	30.983	4.983	10.326

ตารางที่ ก. 9 ค่า Q_{out} และ R_t กรณี $T_j = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$, $V_{air} = 1.0\text{ m/s}$ และ CC with working fluid

Time (min)	$T_j = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$, CC with working fluid									
	$T_{air\ in,1}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,2}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,3}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,4}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,ave}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air,out}$ ($^{\circ}\text{C}$)	ΔT ($^{\circ}\text{C}$)	T_{atm} ($^{\circ}\text{C}$)	Q_{out} (W)	R_t ($^{\circ}\text{C/W}$)
5	33.400	34.200	33.400	32.300	33.325	35.700	2.375	30.983	8.029	7.351
10	33.300	34.600	33.500	31.900	33.325	35.700	2.375	30.983	8.029	7.351
15	33.600	34.700	33.300	31.700	33.325	35.600	2.275	30.983	7.691	7.674
20	33.200	34.900	33.200	31.700	33.250	35.600	2.350	30.983	7.944	7.429
25	32.300	35.200	34.100	31.500	33.275	35.300	2.025	30.983	6.846	8.621
30	32.200	35.200	34.500	31.400	33.325	35.200	1.875	30.983	6.338	9.311
35	32.100	35.100	33.600	31.500	33.075	35.400	2.325	30.983	7.860	7.509
40	32.700	35.300	33.600	31.600	33.300	35.400	2.100	30.983	7.099	8.313
45	32.400	35.000	33.300	31.400	33.025	35.400	2.375	30.983	8.029	7.351
50	32.600	34.900	33.200	31.400	33.025	35.400	2.375	30.983	8.029	7.351
55	32.800	34.500	33.300	31.400	33.000	35.400	2.400	30.983	8.113	7.274
60	32.300	35.000	33.200	31.500	33.000	35.400	2.400	30.983	8.113	7.274
65	32.100	35.200	33.300	31.500	33.025	35.400	2.375	30.983	8.029	7.351
70	32.300	35.100	33.200	31.400	33.000	35.400	2.400	30.983	8.113	7.274
75	32.400	35.100	33.100	31.400	33.000	35.400	2.400	30.983	8.113	7.274
80	32.200	35.100	33.200	31.600	33.025	35.500	2.475	30.983	8.367	7.054
85	32.300	35.200	33.200	31.400	33.025	35.400	2.375	30.983	8.029	7.351
90	32.200	35.300	33.100	31.500	33.025	35.400	2.375	30.983	8.029	7.351
95	32.200	35.300	33.000	31.400	32.975	35.300	2.325	30.983	7.860	7.509
100	32.200	35.000	32.900	31.400	32.875	35.500	2.625	30.983	8.874	6.651
105	32.200	35.300	32.800	31.400	32.925	35.500	2.575	30.983	8.705	6.780
110	32.400	34.600	32.900	31.400	32.825	35.400	2.575	30.983	8.705	6.780
115	32.400	34.300	32.700	31.700	32.775	35.600	2.825	30.983	9.550	6.180
120	32.400	33.900	32.700	31.700	32.675	35.600	2.925	30.983	9.888	5.969
average	32.508	34.917	33.263	31.546	33.058	35.454	2.396	30.983	8.099	7.347

ตารางที่ ก. 10 ค่า Q_{out} และ R_t กรณี $T_j = 90^\circ\text{C}$, $V_{air} = 1.0\text{ m/s}$ และ CC without working fluid

Time (min)	$T_j = 90^\circ\text{C}$, CC without working fluid									
	$T_{air\ in,1}$ ($^\circ\text{C}$)	$T_{air\ in,2}$ ($^\circ\text{C}$)	$T_{air\ in,3}$ ($^\circ\text{C}$)	$T_{air\ in,4}$ ($^\circ\text{C}$)	$T_{air\ in,ave}$ ($^\circ\text{C}$)	$T_{air,out}$ ($^\circ\text{C}$)	ΔT ($^\circ\text{C}$)	T_{atm} ($^\circ\text{C}$)	Q_{out} (W)	R_t ($^\circ\text{C/W}$)
5	31.100	30.500	30.100	30.600	30.575	32.700	2.125	30.983	7.184	8.216
10	31.100	31.000	30.100	29.800	30.500	32.900	2.400	30.983	8.113	7.274
15	30.900	30.800	30.100	30.600	30.600	32.800	2.200	30.983	7.437	7.935
20	31.100	30.800	30.000	31.000	30.725	32.900	2.175	30.983	7.353	8.027
25	31.200	31.100	30.200	30.000	30.625	32.800	2.175	30.983	7.353	8.027
30	31.400	31.000	30.400	29.700	30.625	32.900	2.275	30.983	7.691	7.674
35	31.100	30.700	30.100	30.700	30.650	32.800	2.150	30.983	7.268	8.120
40	31.100	31.000	30.400	29.800	30.575	32.900	2.325	30.983	7.860	7.509
45	30.800	30.700	30.100	30.600	30.550	32.800	2.250	30.983	7.606	7.759
50	31.000	30.600	30.000	31.100	30.675	32.800	2.125	30.983	7.184	8.216
55	31.100	30.800	29.900	31.000	30.700	32.800	2.100	30.983	7.099	8.313
60	31.100	30.700	29.900	31.000	30.675	32.800	2.125	30.983	7.184	8.216
65	31.400	30.800	30.100	30.800	30.775	32.800	2.025	30.983	6.846	8.621
70	31.300	30.600	30.100	30.700	30.675	32.800	2.125	30.983	7.184	8.216
75	31.100	30.700	30.200	30.100	30.525	32.800	2.275	30.983	7.691	7.674
80	30.900	30.600	30.100	30.200	30.450	32.800	2.350	30.983	7.944	7.429
85	31.000	30.800	30.100	30.400	30.575	32.800	2.225	30.983	7.522	7.846
90	30.900	31.000	30.000	30.300	30.550	32.900	2.350	30.983	7.944	7.429
95	30.700	31.100	30.000	30.400	30.550	32.900	2.350	30.983	7.944	7.429
100	30.900	31.000	30.100	30.300	30.575	32.900	2.325	30.983	7.860	7.509
105	30.800	31.100	30.000	30.700	30.650	32.900	2.250	30.983	7.606	7.759
110	31.000	30.700	29.800	31.000	30.625	32.800	2.175	30.983	7.353	8.027
115	30.700	30.500	29.800	31.400	30.600	32.700	2.100	30.983	7.099	8.313
120	30.900	30.500	29.800	31.500	30.675	32.700	2.025	30.983	6.846	8.621
average	31.025	30.796	30.058	30.571	30.613	32.821	2.208	30.983	7.465	7.923

ตารางที่ ก. 11 ค่า Q_{out} และ R_t กรณี $T_j = 100^\circ\text{C}$, $V_{air} = 1.0\text{ m/s}$ และ CC with working fluid

Time (min)	$T_j = 100^\circ\text{C}$, CC with working fluid									
	$T_{air\ in,1}$ ($^\circ\text{C}$)	$T_{air\ in,2}$ ($^\circ\text{C}$)	$T_{air\ in,3}$ ($^\circ\text{C}$)	$T_{air\ in,4}$ ($^\circ\text{C}$)	$T_{air\ in,ave}$ ($^\circ\text{C}$)	$T_{air,out}$ ($^\circ\text{C}$)	ΔT ($^\circ\text{C}$)	T_{atm} ($^\circ\text{C}$)	Q_{out} (W)	R_t ($^\circ\text{C}/\text{W}$)
5	33.000	32.400	31.900	32.600	32.475	35.200	2.725	30.983	9.212	7.492
10	33.700	32.300	32.000	32.100	32.525	35.200	2.675	30.983	9.043	7.632
15	33.300	32.200	31.900	31.400	32.200	35.100	2.900	30.983	9.803	7.040
20	33.800	32.700	32.000	31.400	32.475	35.200	2.725	30.983	9.212	7.492
25	33.700	32.700	32.500	30.900	32.450	35.000	2.550	30.983	8.620	8.006
30	33.800	32.500	32.300	30.900	32.375	35.000	2.625	30.983	8.874	7.778
35	33.700	32.300	32.200	31.300	32.375	35.000	2.625	30.983	8.874	7.778
40	33.300	32.300	31.600	31.800	32.250	34.900	2.650	30.983	8.958	7.704
45	33.000	32.500	31.400	32.200	32.275	35.000	2.725	30.983	9.212	7.492
50	33.100	32.500	31.300	31.400	32.075	35.200	3.125	30.983	10.564	6.533
55	33.000	32.500	31.400	31.300	32.050	35.200	3.150	30.983	10.649	6.481
60	32.700	32.400	31.300	31.100	31.875	35.000	3.125	30.983	10.564	6.533
65	32.800	32.600	31.400	31.300	32.025	35.100	3.075	30.983	10.395	6.639
70	33.100	32.500	31.300	31.100	32.000	35.000	3.000	30.983	10.141	6.805
75	33.600	32.500	31.800	30.700	32.150	35.100	2.950	30.983	9.972	6.921
80	33.000	32.300	31.400	32.100	32.200	35.100	2.900	30.983	9.803	7.040
85	32.800	32.400	31.300	32.200	32.175	35.000	2.825	30.983	9.550	7.227
90	32.900	32.400	31.300	32.000	32.150	35.000	2.850	30.983	9.634	7.164
95	32.800	32.300	31.300	31.600	32.000	35.000	3.000	30.983	10.141	6.805
100	32.800	32.600	32.100	31.000	32.125	35.000	2.875	30.983	9.719	7.101
105	32.600	32.400	32.000	31.000	32.000	35.000	3.000	30.983	10.141	6.805
110	32.600	32.500	31.900	31.000	32.000	35.000	3.000	30.983	10.141	6.805
115	32.800	32.600	31.800	31.000	32.050	35.000	2.950	30.983	9.972	6.921
120	33.000	32.200	31.600	30.900	31.925	34.900	2.975	30.983	10.057	6.863
average	33.121	32.442	31.708	31.429	32.175	35.050	2.875	30.983	9.719	7.127

ตารางที่ ก. 12 ค่า Q_{out} และ R_t กรณี $T_j = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$, $V_{air} = 1.0\text{ m/s}$ และ CC without working fluid

Time (min)	$T_j = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$, CC without working fluid									
	$T_{air\ in,1}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,2}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,3}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,4}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,ave}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air,out}$ ($^{\circ}\text{C}$)	ΔT ($^{\circ}\text{C}$)	T_{atm} ($^{\circ}\text{C}$)	Q_{out} (W)	R_t ($^{\circ}\text{C/W}$)
5	31.100	31.700	30.500	31.700	31.250	33.600	2.350	30.983	7.944	8.688
10	31.000	31.800	30.700	30.700	31.050	33.800	2.750	30.983	9.296	7.424
15	30.800	31.800	30.400	30.800	30.950	33.800	2.850	30.983	9.634	7.164
20	30.800	31.500	30.400	30.400	30.775	33.800	3.025	30.983	10.226	6.749
25	31.000	31.800	30.400	30.400	30.900	33.900	3.000	30.983	10.141	6.805
30	30.900	31.800	30.400	30.700	30.950	33.800	2.850	30.983	9.634	7.164
35	30.800	31.700	30.300	30.400	30.800	33.900	3.100	30.983	10.480	6.586
40	30.700	31.900	30.500	30.500	30.900	33.900	3.000	30.983	10.141	6.805
45	30.700	32.000	30.400	30.600	30.925	33.900	2.975	30.983	10.057	6.863
50	30.900	31.900	30.400	30.600	30.950	33.900	2.950	30.983	9.972	6.921
55	31.700	31.700	30.500	30.100	31.000	33.800	2.800	30.983	9.465	7.292
60	31.600	31.700	30.600	30.100	31.000	33.900	2.900	30.983	9.803	7.040
65	31.200	31.700	30.700	30.200	30.950	33.900	2.950	30.983	9.972	6.921
70	31.200	31.900	30.700	30.100	30.975	33.900	2.925	30.983	9.888	6.980
75	31.200	32.000	31.000	29.900	31.025	33.800	2.775	30.983	9.381	7.357
80	30.700	31.700	30.900	29.900	30.800	33.800	3.000	30.983	10.141	6.805
85	31.000	31.500	30.600	30.300	30.850	33.900	3.050	30.983	10.311	6.694
90	31.000	31.400	30.300	31.500	31.050	33.700	2.650	30.983	8.958	7.704
95	30.800	31.900	30.400	31.400	31.125	33.900	2.775	30.983	9.381	7.357
100	30.900	31.900	30.700	31.000	31.125	33.900	2.775	30.983	9.381	7.357
105	30.700	31.900	30.600	30.700	30.975	33.900	2.925	30.983	9.888	6.980
110	30.700	31.900	30.600	30.700	30.975	33.900	2.925	30.983	9.888	6.980
115	30.800	31.900	30.500	30.500	30.925	33.900	2.975	30.983	10.057	6.863
120	31.008	31.783	30.537	30.577	30.976	33.823	2.847	30.983	9.625	7.203
average	30.967	31.783	30.543	30.574	30.967	33.847	2.880	30.983	9.736	7.113

ตารางที่ ก. 13 ค่า Q_{out} และ R_t กรณี $T_j = 80^\circ\text{C}$, $V_{air} = 1.4\text{ m/s}$ และ TC with working fluid

Time (min)	$T_j = 80^\circ\text{C}$, TC with working fluid									
	$T_{air\ in,1}$ ($^\circ\text{C}$)	$T_{air\ in,2}$ ($^\circ\text{C}$)	$T_{air\ in,3}$ ($^\circ\text{C}$)	$T_{air\ in,4}$ ($^\circ\text{C}$)	$T_{air\ in,ave}$ ($^\circ\text{C}$)	$T_{air,out}$ ($^\circ\text{C}$)	ΔT ($^\circ\text{C}$)	T_{atm} ($^\circ\text{C}$)	Q_{out} (W)	R_t ($^\circ\text{C/W}$)
5	32.500	35.100	35.400	32.600	33.900	41.400	7.500	30.983	35.495	1.372
10	32.600	34.500	34.300	32.400	33.450	41.400	7.950	30.983	37.625	1.294
15	32.500	33.300	35.200	32.300	33.325	41.200	7.875	30.983	37.270	1.307
20	32.700	34.900	34.000	32.500	33.525	41.000	7.475	30.983	35.377	1.379
25	33.200	33.900	33.000	32.200	33.075	40.800	7.725	30.983	36.560	1.332
30	32.600	34.900	33.900	32.200	33.400	40.700	7.300	30.983	34.549	1.413
35	32.600	34.900	34.600	32.200	33.575	40.800	7.225	30.983	34.194	1.424
40	32.300	35.300	35.100	32.500	33.800	40.800	7.000	30.983	33.129	1.470
45	32.300	33.600	33.300	32.200	32.850	40.800	7.950	30.983	37.625	1.294
50	32.300	34.200	34.300	32.300	33.275	41.100	7.825	30.983	37.033	1.315
55	32.300	35.400	35.600	32.500	33.950	40.800	6.850	30.983	32.419	1.502
60	32.400	35.000	33.700	32.300	33.350	40.700	7.350	30.983	34.785	1.400
65	32.300	33.800	34.200	32.100	33.100	40.700	7.600	30.983	35.968	1.357
70	32.300	33.900	33.500	32.200	32.975	40.500	7.525	30.983	35.614	1.370
75	32.900	33.000	33.200	32.100	32.800	40.600	7.800	30.983	36.915	1.322
80	32.300	34.300	34.500	32.400	33.375	40.500	7.125	30.983	33.720	1.450
85	32.300	34.900	34.000	32.300	33.375	40.800	7.425	30.983	35.140	1.392
90	32.500	34.300	33.600	32.500	33.225	40.600	7.375	30.983	34.904	1.401
95	32.200	34.700	34.500	32.400	33.450	40.500	7.050	30.983	33.365	1.466
100	32.600	33.600	33.900	32.600	33.175	40.700	7.525	30.983	35.614	1.376
105	32.900	32.800	33.200	32.100	32.750	40.600	7.850	30.983	37.152	1.319
110	32.300	33.500	34.500	32.500	33.200	40.800	7.600	30.983	35.968	1.362
115	32.600	33.300	33.700	32.400	33.000	40.600	7.600	30.983	35.968	1.362
120	32.600	33.400	33.100	32.100	32.800	40.700	7.900	30.983	37.388	1.311
average	32.504	34.188	34.096	32.329	33.279	40.796	7.517	30.983	35.574	1.375

ตารางที่ ก. 14 ค่า Q_{out} และ R_t กรณี $T_j = 80^\circ\text{C}$, $V_{air} = 1.4\text{ m/s}$ และ TC without working fluid

Time (min)	$T_j = 80^\circ\text{C}$, TC without working fluid									
	$T_{air\ in,1}$ ($^\circ\text{C}$)	$T_{air\ in,2}$ ($^\circ\text{C}$)	$T_{air\ in,3}$ ($^\circ\text{C}$)	$T_{air\ in,4}$ ($^\circ\text{C}$)	$T_{air\ in,ave}$ ($^\circ\text{C}$)	$T_{air,out}$ ($^\circ\text{C}$)	ΔT ($^\circ\text{C}$)	T_{atm} ($^\circ\text{C}$)	Q_{out} (W)	R_t ($^\circ\text{C}/\text{W}$)
5	31.900	30.400	30.300	30.400	30.750	34.600	3.850	30.983	18.221	2.690
10	32.800	30.400	30.100	30.100	30.850	34.300	3.450	30.983	16.328	3.002
15	32.800	30.400	29.800	30.200	30.800	34.200	3.400	30.983	16.091	3.046
20	32.600	30.100	29.800	30.000	30.625	34.300	3.675	30.983	17.393	2.818
25	32.200	30.400	29.900	30.000	30.625	34.300	3.675	30.983	17.393	2.818
30	31.700	30.300	30.500	30.400	30.725	34.500	3.775	30.983	17.866	2.744
35	31.700	30.400	30.100	30.100	30.575	34.500	3.925	30.983	18.576	2.639
40	32.600	30.700	29.900	30.300	30.875	34.300	3.425	30.983	16.209	3.024
45	32.700	30.300	29.800	29.800	30.650	34.400	3.750	30.983	17.748	2.762
50	32.600	30.300	29.900	30.200	30.750	34.300	3.550	30.983	16.801	2.917
55	33.100	30.500	29.800	30.100	30.875	34.400	3.525	30.983	16.683	2.938
60	32.600	30.400	29.900	30.100	30.750	34.400	3.650	30.983	17.274	2.838
65	32.200	30.800	29.900	30.400	30.825	34.400	3.575	30.983	16.919	2.897
70	32.700	30.500	29.800	30.100	30.775	34.300	3.525	30.983	16.683	2.938
75	32.900	30.400	29.900	30.100	30.825	34.300	3.475	30.983	16.446	2.980
80	32.500	30.400	29.800	30.100	30.700	34.300	3.600	30.983	17.038	2.877
85	32.000	30.400	30.000	30.100	30.625	34.600	3.975	30.983	18.812	2.606
90	32.300	30.700	30.000	30.400	30.850	34.600	3.750	30.983	17.748	2.762
95	32.400	30.500	30.000	30.100	30.750	34.600	3.850	30.983	18.221	2.690
100	32.800	30.700	30.100	29.900	30.875	34.600	3.725	30.983	17.629	2.780
105	32.000	30.500	30.700	29.800	30.750	34.600	3.850	30.983	18.221	2.690
110	32.600	30.500	30.100	29.900	30.775	34.600	3.825	30.983	18.103	2.708
115	32.000	30.700	30.700	30.000	30.850	34.700	3.850	30.983	18.221	2.690
120	32.300	30.700	30.100	29.800	30.725	34.600	3.875	30.983	18.339	2.673
average	32.417	30.475	30.038	30.100	30.757	34.446	3.689	30.983	17.457	2.814

ตารางที่ ก. 15 ค่า Q_{out} และ R_t กรณี $T_j = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$, $V_{air} = 1.4\text{ m/s}$ และ TC with working fluid

Time (min)	$T_j = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$, TC with working fluid									
	$T_{air\ in,1}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,2}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,3}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,4}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,ave}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air,out}$ ($^{\circ}\text{C}$)	ΔT ($^{\circ}\text{C}$)	T_{atm} ($^{\circ}\text{C}$)	Q_{out} (W)	R_t ($^{\circ}\text{C/W}$)
5	33.400	34.700	35.300	32.900	34.075	44.400	10.325	30.983	34.904	1.691
10	33.500	33.800	34.900	33.100	33.825	44.400	10.575	30.983	35.749	1.651
15	33.800	34.100	34.900	32.900	33.925	44.500	10.575	30.983	35.749	1.651
20	33.300	33.900	35.800	32.900	33.975	44.300	10.325	30.983	34.904	1.691
25	33.200	34.000	34.900	33.300	33.850	44.600	10.750	30.983	36.340	1.624
30	33.200	34.300	35.700	33.200	34.100	44.600	10.500	30.983	35.495	1.663
35	33.900	34.200	35.000	33.300	34.100	44.500	10.400	30.983	35.157	1.679
40	33.200	33.600	35.500	33.200	33.875	44.300	10.425	30.983	35.242	1.675
45	33.300	34.600	36.500	33.300	34.425	44.400	9.975	30.983	33.720	1.750
50	33.300	34.100	34.900	32.900	33.800	44.500	10.700	30.983	36.171	1.632
55	33.200	33.800	34.900	33.200	33.775	44.300	10.525	30.983	35.580	1.659
60	33.100	33.600	36.000	33.500	34.050	44.600	10.550	30.983	35.664	1.655
65	33.500	33.600	34.600	33.200	33.725	44.400	10.675	30.983	36.087	1.635
70	32.900	34.600	35.600	33.400	34.125	44.400	10.275	30.983	34.735	1.699
75	32.900	33.800	34.900	33.500	33.775	44.300	10.525	30.983	35.580	1.659
80	34.800	33.300	34.700	33.600	34.100	44.300	10.200	30.983	34.481	1.712
85	33.100	34.700	36.200	33.300	34.325	44.100	9.775	30.983	33.044	1.786
90	33.300	33.800	34.900	33.400	33.850	44.600	10.750	30.983	36.340	1.624
95	33.200	34.300	35.100	33.200	33.950	44.300	10.350	30.983	34.988	1.687
100	33.200	34.200	35.900	33.100	34.100	44.200	10.100	30.983	34.143	1.729
105	33.300	33.900	35.900	33.100	34.050	44.300	10.250	30.983	34.650	1.703
110	33.200	34.200	35.700	33.200	34.075	44.500	10.425	30.983	35.242	1.675
115	33.500	34.300	35.000	33.300	34.025	44.600	10.575	30.983	35.749	1.651
120	33.600	34.500	35.800	33.300	34.300	44.000	9.700	30.983	32.791	1.800
average	33.371	34.079	35.358	33.221	34.007	44.392	10.384	30.983	35.104	1.683

ตารางที่ ก. 16 ค่า Q_{out} และ R_t กรณี $T_j = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$, $V_{air} = 1.4\text{ m/s}$ และ TC without working fluid

Time (min)	$T_j = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$, TC without working fluid									
	$T_{air\ in,1}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,2}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,3}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,4}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,ave}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air,out}$ ($^{\circ}\text{C}$)	ΔT ($^{\circ}\text{C}$)	T_{atm} ($^{\circ}\text{C}$)	Q_{out} (W)	R_t ($^{\circ}\text{C/W}$)
5	31.700	30.800	32.000	31.400	31.475	36.400	4.925	30.983	23.309	2.532
10	32.000	30.400	31.700	31.100	31.300	36.300	5.000	30.983	23.663	2.494
15	31.700	30.700	30.700	31.400	31.125	36.200	5.075	30.983	24.018	2.457
20	31.400	30.400	32.000	31.000	31.200	36.200	5.000	30.983	23.663	2.494
25	31.700	31.400	30.500	31.500	31.275	36.300	5.025	30.983	23.782	2.482
30	31.900	31.700	30.200	31.800	31.400	36.400	5.000	30.983	23.663	2.494
35	31.600	31.400	30.200	31.600	31.200	36.300	5.100	30.983	24.137	2.445
40	32.000	31.000	30.600	31.300	31.225	36.200	4.975	30.983	23.545	2.507
45	32.000	31.400	30.400	31.000	31.200	36.300	5.100	30.983	24.137	2.445
50	31.700	31.700	30.100	31.500	31.250	36.300	5.050	30.983	23.900	2.469
55	31.700	31.200	30.200	31.100	31.050	36.200	5.150	30.983	24.373	2.421
60	31.800	30.900	30.700	31.500	31.225	36.200	4.975	30.983	23.545	2.507
65	32.000	30.900	30.700	32.100	31.425	36.300	4.875	30.983	23.072	2.558
70	31.900	31.300	30.400	31.300	31.225	36.200	4.975	30.983	23.545	2.507
75	31.800	31.000	30.300	31.200	31.075	36.200	5.125	30.983	24.255	2.433
80	31.700	31.100	30.500	31.500	31.200	36.200	5.000	30.983	23.663	2.494
85	32.300	30.800	30.400	31.300	31.200	36.100	4.900	30.983	23.190	2.545
90	32.400	30.700	30.400	31.500	31.250	36.200	4.950	30.983	23.427	2.519
95	32.600	30.600	30.900	32.100	31.550	36.200	4.650	30.983	22.007	2.682
100	31.900	30.400	31.000	31.500	31.200	36.200	5.000	30.983	23.663	2.494
105	31.700	30.700	30.700	32.100	31.300	36.200	4.900	30.983	23.190	2.545
110	32.000	30.700	30.400	31.500	31.150	36.100	4.950	30.983	23.427	2.519
115	31.400	30.900	30.700	31.800	31.200	36.200	5.000	30.983	23.663	2.494
120	31.600	30.700	31.400	32.300	31.500	36.200	4.700	30.983	22.244	2.653
average	31.854	30.950	30.713	31.517	31.258	36.233	4.975	30.983	23.545	2.508

ตารางที่ ก. 17 ค่า Q_{out} และ R_t กรณี $T_j = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$, $V_{air} = 1.4\text{ m/s}$ และ TC with working fluid

Time (min)	$T_j = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$, TC with working fluid									
	$T_{air\ in,1}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,2}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,3}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,4}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,ave}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air,out}$ ($^{\circ}\text{C}$)	ΔT ($^{\circ}\text{C}$)	T_{atm} ($^{\circ}\text{C}$)	Q_{out} (W)	R_t ($^{\circ}\text{C/W}$)
5	32.600	33.900	34.600	32.400	33.375	47.300	13.925	30.983	65.903	1.047
10	32.300	33.700	34.700	32.300	33.250	46.900	13.650	30.983	64.601	1.068
15	33.000	33.600	34.000	32.500	33.275	46.400	13.125	30.983	62.117	1.111
20	32.100	33.700	34.200	32.300	33.075	46.500	13.425	30.983	63.536	1.086
25	32.200	33.600	34.900	32.400	33.275	46.500	13.225	30.983	62.590	1.103
30	33.300	33.000	33.600	32.300	33.050	46.400	13.350	30.983	63.181	1.092
35	32.200	33.600	35.600	32.100	33.375	46.400	13.025	30.983	61.643	1.120
40	32.000	33.600	33.700	32.400	32.925	46.300	13.375	30.983	63.300	1.090
45	32.500	34.000	34.100	32.300	33.225	46.400	13.175	30.983	62.353	1.107
50	32.600	32.900	34.200	32.300	33.000	46.000	13.000	30.983	61.525	1.122
55	32.300	33.600	34.600	32.000	33.125	46.200	13.075	30.983	61.880	1.115
60	32.300	33.600	34.700	32.000	33.150	46.200	13.050	30.983	61.762	1.117
65	32.600	33.400	34.400	32.300	33.175	46.300	13.125	30.983	62.117	1.111
70	33.100	33.600	36.100	32.500	33.825	46.100	12.275	30.983	58.094	1.188
75	32.900	33.400	34.300	32.300	33.225	46.400	13.175	30.983	62.353	1.107
80	32.300	34.300	34.100	32.200	33.225	46.400	13.175	30.983	62.353	1.107
85	32.000	34.100	33.500	32.600	33.050	46.500	13.450	30.983	63.655	1.084
90	32.300	34.100	34.900	32.600	33.475	46.500	13.025	30.983	61.643	1.120
95	32.400	34.800	34.300	32.600	33.525	46.200	12.675	30.983	59.987	1.151
100	33.600	33.800	33.600	32.400	33.350	46.400	13.050	30.983	61.762	1.117
105	32.300	34.900	34.600	32.700	33.625	46.400	12.775	30.983	60.460	1.142
110	32.300	34.200	35.400	32.500	33.600	46.500	12.900	30.983	61.052	1.130
115	32.600	34.700	34.300	32.600	33.550	46.100	12.550	30.983	59.395	1.162
120	32.100	36.400	37.900	32.800	34.800	45.900	11.100	30.983	52.533	1.314
average	32.496	33.938	34.596	32.392	33.355	46.383	13.028	30.983	61.658	1.121

ตารางที่ ก. 18 ค่า Q_{out} และ R_t กรณี $T_j = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$, $V_{air} = 1.4\text{ m/s}$ และ TC without working fluid

Time (min)	$T_j = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$, TC without working fluid									
	$T_{air\ in,\ 1}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,\ 2}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,\ 3}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,\ 4}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,\ ave}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air,\ out}$ ($^{\circ}\text{C}$)	ΔT ($^{\circ}\text{C}$)	T_{atm} ($^{\circ}\text{C}$)	Q_{out} (W)	R_t ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$)
5	32.100	30.600	31.600	31.400	31.425	36.600	5.175	30.983	24.492	2.818
10	32.400	31.400	30.700	31.100	31.400	36.800	5.400	30.983	25.557	2.701
15	31.700	31.200	30.700	31.200	31.200	36.900	5.700	30.983	26.976	2.558
20	32.000	31.300	30.500	31.700	31.375	37.100	5.725	30.983	27.095	2.547
25	32.400	31.100	31.000	31.200	31.425	37.000	5.575	30.983	26.385	2.616
30	32.600	31.100	30.700	31.000	31.350	36.800	5.450	30.983	25.793	2.676
35	32.000	31.000	30.700	31.300	31.250	36.900	5.650	30.983	26.740	2.581
40	32.600	31.200	30.400	31.300	31.375	36.700	5.325	30.983	25.202	2.739
45	32.200	31.000	30.400	31.100	31.175	36.600	5.425	30.983	25.675	2.688
50	32.100	30.800	30.500	30.900	31.075	36.800	5.725	30.983	27.095	2.547
55	31.900	31.400	30.500	31.100	31.225	36.800	5.575	30.983	26.385	2.616
60	32.000	31.400	30.400	31.100	31.225	36.700	5.475	30.983	25.912	2.664
65	32.400	30.700	31.200	31.100	31.350	37.000	5.650	30.983	26.740	2.581
70	32.500	30.600	31.000	31.200	31.325	36.800	5.475	30.983	25.912	2.664
75	32.000	30.400	31.300	31.300	31.250	36.900	5.650	30.983	26.740	2.581
80	32.000	30.400	30.800	31.400	31.150	36.800	5.650	30.983	26.740	2.581
85	32.000	31.000	30.500	31.200	31.175	37.000	5.825	30.983	27.568	2.504
90	31.700	31.400	31.300	31.200	31.400	37.100	5.700	30.983	26.976	2.558
95	31.300	30.500	31.900	31.400	31.275	36.800	5.525	30.983	26.148	2.639
100	31.600	31.400	30.700	31.700	31.350	37.000	5.650	30.983	26.740	2.581
105	32.900	31.300	30.900	31.000	31.525	37.000	5.475	30.983	25.912	2.664
110	33.100	30.900	30.500	31.300	31.450	36.600	5.150	30.983	24.373	2.832
115	32.300	30.800	30.700	31.400	31.300	37.000	5.700	30.983	26.976	2.558
120	32.800	31.000	30.400	31.400	31.400	36.800	5.400	30.983	25.557	2.701
average	32.192	30.996	30.804	31.250	31.310	36.854	5.544	30.983	26.237	2.633

ตารางที่ ก. 19 ค่า Q_{out} และ R_t กรณี $T_j = 80^\circ C$, $V_{air} = 1.4 \text{ m/s}$ และ CC with working fluid

Time (min)	$T_j = 80^\circ C$, CC with working fluid									
	$T_{air\ in,1}$ ($^\circ C$)	$T_{air\ in,2}$ ($^\circ C$)	$T_{air\ in,3}$ ($^\circ C$)	$T_{air\ in,4}$ ($^\circ C$)	$T_{air\ in,ave}$ ($^\circ C$)	$T_{air,out}$ ($^\circ C$)	ΔT ($^\circ C$)	T_{atm} ($^\circ C$)	Q_{out} (W)	R_t ($^\circ C/W$)
5	33.200	32.300	31.800	31.300	32.150	34.200	2.050	30.983	9.702	5.052
10	33.000	32.300	31.900	31.200	32.100	34.200	2.100	30.983	9.939	4.932
15	32.900	32.300	32.000	31.200	32.100	34.200	2.100	30.983	9.939	4.932
20	32.800	32.300	32.200	31.000	32.075	34.100	2.025	30.983	9.584	5.115
25	33.000	32.300	32.100	31.000	32.100	34.100	2.000	30.983	9.465	5.179
30	32.800	32.300	32.300	31.000	32.100	34.100	2.000	30.983	9.465	5.179
35	32.300	32.300	32.400	31.000	32.000	34.100	2.100	30.983	9.939	4.932
40	32.900	32.200	32.300	31.100	32.125	34.100	1.975	30.983	9.347	5.244
45	33.400	32.400	32.300	31.100	32.300	34.100	1.800	30.983	8.519	5.754
50	33.600	32.300	32.200	31.200	32.325	34.100	1.775	30.983	8.401	5.835
55	33.600	32.400	32.200	31.200	32.350	34.100	1.750	30.983	8.282	5.918
60	33.600	32.300	32.100	31.200	32.300	34.000	1.700	30.983	8.046	6.092
65	33.300	32.300	32.200	31.100	32.225	34.100	1.875	30.983	8.874	5.524
70	33.500	32.400	32.300	31.200	32.350	34.100	1.750	30.983	8.282	5.918
75	33.300	32.500	32.100	31.200	32.275	34.100	1.825	30.983	8.637	5.675
80	33.700	32.300	32.000	31.300	32.325	34.000	1.675	30.983	7.927	6.183
85	33.700	32.300	32.200	31.200	32.350	33.900	1.550	30.983	7.336	6.682
90	33.800	32.300	32.300	31.200	32.400	33.900	1.500	30.983	7.099	6.905
95	34.000	32.300	32.200	31.100	32.400	33.900	1.500	30.983	7.099	6.905
100	34.100	32.300	32.100	31.100	32.400	33.900	1.500	30.983	7.099	6.905
105	34.200	32.300	32.100	31.100	32.425	33.900	1.475	30.983	6.981	7.022
110	33.600	32.300	32.100	31.100	32.275	33.900	1.625	30.983	7.691	6.374
115	34.300	32.200	32.200	31.100	32.450	33.700	1.250	30.983	5.916	8.286
120	33.600	32.200	32.200	31.100	32.275	33.800	1.525	30.983	7.217	6.792
average	33.425	32.308	32.158	31.138	32.257	34.025	1.768	30.983	8.366	5.972

ตารางที่ ก. 20 ค่า Q_{out} และ R_t กรณี $T_j = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$, $V_{air} = 1.4\text{ m/s}$ และ CC without working fluid

Time (min)	$T_j = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$, CC without working fluid									
	$T_{air\ in,1}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,2}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,3}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,4}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,ave}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air,out}$ ($^{\circ}\text{C}$)	ΔT ($^{\circ}\text{C}$)	T_{atm} ($^{\circ}\text{C}$)	Q_{out} (W)	R_t ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$)
5	31.500	31.000	30.700	31.000	31.050	33.100	2.050	30.983	12.474	3.930
10	31.100	30.900	30.300	30.900	30.800	32.900	2.100	30.983	12.778	3.836
15	31.200	31.000	30.100	31.000	30.825	32.700	1.875	30.983	11.409	4.296
20	30.400	30.500	30.100	30.500	30.375	32.500	2.125	30.983	12.930	3.791
25	30.100	30.400	30.300	30.400	30.300	32.400	2.100	30.983	12.778	3.836
30	30.400	30.500	29.300	30.500	30.175	32.100	1.925	30.983	11.713	4.185
35	30.200	30.700	29.500	30.700	30.275	32.300	2.025	30.983	12.322	3.978
40	30.300	30.300	29.500	30.300	30.100	32.200	2.100	30.983	12.778	3.836
45	30.600	30.100	29.400	30.100	30.050	32.200	2.150	30.983	13.083	3.747
50	30.400	30.100	29.900	30.100	30.125	32.200	2.075	30.983	12.626	3.882
55	30.400	30.100	29.700	30.100	30.075	32.100	2.025	30.983	12.322	3.978
60	30.200	30.300	29.500	30.300	30.075	32.000	1.925	30.983	11.713	4.185
65	30.100	30.100	29.500	30.100	29.950	32.000	2.050	30.983	12.474	3.930
70	30.300	30.000	29.800	30.000	30.025	32.100	2.075	30.983	12.626	3.882
75	30.500	30.000	29.500	30.000	30.000	32.000	2.000	30.983	12.170	4.028
80	30.400	30.000	29.500	30.000	29.975	32.000	2.025	30.983	12.322	3.978
85	30.100	30.200	29.800	30.200	30.075	32.000	1.925	30.983	11.713	4.185
90	30.200	30.000	29.200	30.000	29.850	32.000	2.150	30.983	13.083	3.747
95	30.300	29.800	29.300	29.800	29.800	32.000	2.200	30.983	13.387	3.662
100	30.400	29.800	29.200	29.800	29.800	31.900	2.100	30.983	12.778	3.836
105	30.200	29.800	29.400	29.800	29.800	31.900	2.100	30.983	12.778	3.836
110	30.600	29.800	29.500	29.800	29.925	31.900	1.975	30.983	12.018	4.079
115	30.400	29.800	29.500	29.800	29.875	31.800	1.925	30.983	11.713	4.185
120	30.200	29.900	29.200	29.900	29.800	31.900	2.100	30.983	12.778	3.836
average	30.438	30.213	29.654	30.213	30.129	32.175	2.046	30.983	12.449	3.944

ตารางที่ ก. 21 ค่า Q_{out} และ R_t กรณี $T_j = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$, $V_{air} = 1.4\text{ m/s}$ และ CC with working fluid

Time (min)	$T_j = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$, CC with working fluid									
	$T_{air\ in,\ 1}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,\ 2}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,\ 3}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,\ 4}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,\ ave}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air,\ out}$ ($^{\circ}\text{C}$)	ΔT ($^{\circ}\text{C}$)	T_{atm} ($^{\circ}\text{C}$)	Q_{out} (W)	R_t ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$)
5	32.200	32.900	32.600	31.600	32.325	34.900	2.575	30.983	12.187	4.843
10	32.500	32.800	32.600	31.500	32.350	34.900	2.550	30.983	12.068	4.890
15	32.400	32.600	32.600	31.600	32.300	34.900	2.600	30.983	12.305	4.796
20	32.300	32.500	32.700	31.500	32.250	34.900	2.650	30.983	12.542	4.706
25	32.300	32.500	32.800	31.600	32.300	34.900	2.600	30.983	12.305	4.796
30	32.300	32.500	32.800	31.600	32.300	34.900	2.600	30.983	12.305	4.796
35	32.300	32.600	32.800	31.700	32.350	34.900	2.550	30.983	12.068	4.890
40	32.300	32.500	32.800	31.700	32.325	34.900	2.575	30.983	12.187	4.843
45	32.400	32.600	32.900	31.700	32.400	35.000	2.600	30.983	12.305	4.796
50	32.600	32.600	32.800	31.700	32.425	35.000	2.575	30.983	12.187	4.843
55	32.800	32.500	32.600	31.700	32.400	35.000	2.600	30.983	12.305	4.796
60	32.900	32.600	32.600	31.600	32.425	35.000	2.575	30.983	12.187	4.843
65	32.800	32.400	32.600	31.600	32.350	34.900	2.550	30.983	12.068	4.890
70	32.900	32.600	32.600	31.700	32.450	35.000	2.550	30.983	12.068	4.890
75	32.900	32.500	32.700	31.700	32.450	35.100	2.650	30.983	12.542	4.706
80	32.700	32.600	32.900	31.700	32.475	35.100	2.625	30.983	12.423	4.751
85	32.700	32.600	32.900	31.700	32.475	35.100	2.625	30.983	12.423	4.751
90	32.400	32.400	32.900	31.700	32.350	35.000	2.650	30.983	12.542	4.706
95	32.600	32.600	32.800	31.700	32.425	35.000	2.575	30.983	12.187	4.843
100	32.400	32.600	32.900	31.800	32.425	35.200	2.775	30.983	13.133	4.494
105	32.600	32.600	32.800	31.900	32.475	35.100	2.625	30.983	12.423	4.751
110	32.500	32.600	32.900	31.800	32.450	35.100	2.650	30.983	12.542	4.706
115	32.300	32.500	32.900	31.700	32.350	35.100	2.750	30.983	13.015	4.535
120	32.300	32.400	32.900	31.700	32.325	35.000	2.675	30.983	12.660	4.662
average	32.517	32.567	32.767	31.675	32.381	34.996	2.615	30.983	12.374	4.772

ตารางที่ ก. 22 ค่า Q_{out} และ R_t กรณี $T_j = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$, $V_{air} = 1.4\text{ m/s}$ และ CC without working fluid

Time (min)	$T_j = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$, CC without working fluid									
	$T_{air\ in,1}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,2}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,3}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,4}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,ave}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air,out}$ ($^{\circ}\text{C}$)	ΔT ($^{\circ}\text{C}$)	T_{atm} ($^{\circ}\text{C}$)	Q_{out} (W)	R_t ($^{\circ}\text{C/W}$)
5	30.600	30.300	30.700	30.100	30.425	32.900	2.475	30.983	15.060	3.919
10	30.700	30.400	30.700	30.200	30.500	32.900	2.400	30.983	14.604	4.041
15	30.400	30.300	30.700	30.300	30.425	32.900	2.475	30.983	15.060	3.919
20	30.600	30.100	30.700	30.700	30.525	32.900	2.375	30.983	14.452	4.084
25	30.700	30.200	30.600	30.300	30.450	32.900	2.450	30.983	14.908	3.959
30	31.200	30.300	30.500	30.300	30.575	32.900	2.325	30.983	14.147	4.172
35	30.900	30.400	30.500	30.400	30.550	32.900	2.350	30.983	14.299	4.127
40	30.400	30.400	30.500	30.100	30.350	32.900	2.550	30.983	15.516	3.804
45	30.700	30.400	30.600	29.800	30.375	32.900	2.525	30.983	15.364	3.841
50	30.600	30.400	30.700	29.800	30.375	32.900	2.525	30.983	15.364	3.841
55	30.600	30.500	30.700	29.800	30.400	32.900	2.500	30.983	15.212	3.880
60	30.700	30.400	30.500	29.800	30.350	32.900	2.550	30.983	15.516	3.804
65	30.800	30.600	30.400	29.900	30.425	32.900	2.475	30.983	15.060	3.919
70	30.800	30.500	30.400	29.800	30.375	32.900	2.525	30.983	15.364	3.841
75	30.600	30.500	30.400	29.900	30.350	32.900	2.550	30.983	15.516	3.804
80	30.600	30.400	30.400	29.900	30.325	32.900	2.575	30.983	15.669	3.767
85	30.700	30.400	30.300	29.900	30.325	32.900	2.575	30.983	15.669	3.767
90	30.700	30.600	30.400	29.900	30.400	32.900	2.500	30.983	15.212	3.880
95	30.900	30.500	30.500	29.800	30.425	32.800	2.375	30.983	14.452	4.084
100	30.400	30.400	30.400	29.900	30.275	32.900	2.625	30.983	15.973	3.695
105	30.400	30.400	30.400	29.800	30.250	32.800	2.550	30.983	15.516	3.804
110	30.600	30.400	30.400	29.700	30.275	32.900	2.625	30.983	15.973	3.695
115	30.400	30.400	30.500	29.800	30.275	32.800	2.525	30.983	15.364	3.841
120	30.200	30.400	30.400	30.000	30.250	32.900	2.650	30.983	16.125	3.660
average	30.633	30.400	30.513	29.996	30.385	32.888	2.502	30.983	15.225	3.881

ตารางที่ ก. 23 ค่า Q_{out} และ R_t กรณี $T_j = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$, $V_{air} = 1.4\text{ m/s}$ และ CC with working fluid

Time (min)	$T_j = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$, CC with working fluid									
	$T_{air\ in,1}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,2}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,3}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,4}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,ave}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air,out}$ ($^{\circ}\text{C}$)	ΔT ($^{\circ}\text{C}$)	T_{atm} ($^{\circ}\text{C}$)	Q_{out} (W)	R_t ($^{\circ}\text{C/W}$)
5	32.300	31.900	32.000	31.300	31.875	35.100	3.225	30.983	15.263	4.522
10	32.200	31.900	32.000	31.300	31.850	35.100	3.250	30.983	15.381	4.487
15	32.500	31.900	31.900	31.200	31.875	35.100	3.225	30.983	15.263	4.522
20	32.200	32.000	32.000	31.300	31.875	35.100	3.225	30.983	15.263	4.522
25	32.100	32.000	32.000	31.300	31.850	35.200	3.350	30.983	15.855	4.353
30	32.900	32.100	32.000	31.300	32.075	35.200	3.125	30.983	14.790	4.667
35	32.400	32.300	31.900	31.300	31.975	35.200	3.225	30.983	15.263	4.522
40	32.300	32.100	32.000	31.300	31.925	35.200	3.275	30.983	15.500	4.453
45	32.000	32.000	31.900	31.200	31.775	35.200	3.425	30.983	16.209	4.258
50	32.100	32.000	31.800	31.200	31.775	35.200	3.425	30.983	16.209	4.258
55	31.900	32.000	31.800	31.300	31.750	35.200	3.450	30.983	16.328	4.227
60	31.800	32.100	31.900	31.200	31.750	35.200	3.450	30.983	16.328	4.227
65	32.000	32.300	31.800	31.500	31.900	35.200	3.300	30.983	15.618	4.419
70	32.100	32.000	31.700	31.500	31.825	35.200	3.375	30.983	15.973	4.321
75	32.000	32.000	32.000	31.300	31.825	35.200	3.375	30.983	15.973	4.321
80	32.200	32.000	32.000	31.600	31.950	35.200	3.250	30.983	15.381	4.487
85	32.000	31.800	31.900	31.300	31.750	35.200	3.450	30.983	16.328	4.227
90	31.900	32.100	31.900	31.300	31.800	35.200	3.400	30.983	16.091	4.289
95	32.000	32.200	31.900	31.300	31.850	35.200	3.350	30.983	15.855	4.353
100	32.000	32.200	32.000	31.300	31.875	35.300	3.425	30.983	16.209	4.258
105	31.800	32.100	32.000	31.300	31.800	35.300	3.500	30.983	16.564	4.167
110	31.700	32.100	31.900	31.300	31.750	35.300	3.550	30.983	16.801	4.108
115	32.400	32.000	31.800	31.700	31.975	35.200	3.225	30.983	15.263	4.522
120	32.000	32.200	32.000	31.700	31.975	35.300	3.325	30.983	15.736	4.386
average	32.117	32.054	31.921	31.346	31.859	35.200	3.341	30.983	15.810	4.370

ตารางที่ ก. 24 ค่า Q_{out} และ R_t กรณี $T_j = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$, $V_{air} = 1.4\text{ m/s}$ และ CC without working fluid

Time (min)	$T_j = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$, CC without working fluid									
	$T_{air\ in,1}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,2}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,3}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,4}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,ave}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air,out}$ ($^{\circ}\text{C}$)	ΔT ($^{\circ}\text{C}$)	T_{atm} ($^{\circ}\text{C}$)	Q_{out} (W)	R_t ($^{\circ}\text{C/W}$)
5	30.400	31.100	30.800	30.000	30.575	33.200	2.625	30.983	12.423	5.555
10	30.800	31.400	30.700	29.800	30.675	33.200	2.525	30.983	11.950	5.775
15	31.000	31.400	30.700	29.800	30.725	33.200	2.475	30.983	11.713	5.892
20	31.200	31.300	30.900	29.800	30.800	33.200	2.400	30.983	11.358	6.076
25	31.200	31.300	30.800	30.000	30.825	33.200	2.375	30.983	11.240	6.140
30	31.200	31.100	30.700	29.800	30.700	33.200	2.500	30.983	11.832	5.833
35	31.300	31.000	30.700	29.900	30.725	33.200	2.475	30.983	11.713	5.892
40	31.700	30.800	30.500	30.000	30.750	33.300	2.550	30.983	12.068	5.719
45	31.400	30.700	30.500	29.800	30.600	33.300	2.700	30.983	12.778	5.401
50	31.400	30.700	30.400	29.800	30.575	33.200	2.625	30.983	12.423	5.555
55	31.700	30.900	30.500	29.700	30.700	33.200	2.500	30.983	11.832	5.833
60	31.300	30.800	30.500	29.800	30.600	33.200	2.600	30.983	12.305	5.609
65	31.300	30.700	30.500	29.800	30.575	33.200	2.625	30.983	12.423	5.555
70	31.300	30.700	30.400	29.800	30.550	33.200	2.650	30.983	12.542	5.503
75	31.100	30.600	30.400	29.800	30.475	33.200	2.725	30.983	12.897	5.352
80	31.100	30.600	30.300	29.900	30.475	33.200	2.725	30.983	12.897	5.352
85	31.000	30.700	30.300	29.800	30.450	33.200	2.750	30.983	13.015	5.303
90	31.200	30.700	30.300	29.800	30.500	33.200	2.700	30.983	12.778	5.401
95	31.100	30.700	30.400	29.700	30.475	33.200	2.725	30.983	12.897	5.352
100	30.800	30.500	30.100	30.300	30.425	33.200	2.775	30.983	13.133	30.800
105	30.600	30.700	30.400	30.400	30.525	33.200	2.675	30.983	12.660	30.600
110	30.500	30.700	30.400	30.300	30.475	33.200	2.725	30.983	12.897	30.500
115	30.700	30.800	30.400	30.200	30.525	33.200	2.675	30.983	12.660	30.700
120	31.300	30.700	30.400	30.100	30.625	33.200	2.575	30.983	12.187	31.300
average	31.108	30.858	30.500	29.921	30.597	33.208	2.611	30.983	12.359	10.875

ตารางที่ ก. 25 ค่า Q_{out} และ R_t กรณี $T_j = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$, $V_{air} = 1.8\text{ m/s}$ และ TC with working fluid

Time (min)	$T_j = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$, TC with working fluid									
	$T_{air\ in,1}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,2}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,3}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,4}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,ave}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air,out}$ ($^{\circ}\text{C}$)	ΔT ($^{\circ}\text{C}$)	T_{atm} ($^{\circ}\text{C}$)	Q_{out} (W)	R_t ($^{\circ}\text{C/W}$)
5	32.600	34.900	33.800	32.900	33.550	41.100	7.550	31.500	45.941	1.056
10	32.600	35.200	33.800	32.800	33.600	41.100	7.500	31.400	45.637	1.065
15	32.600	35.400	33.700	33.200	33.725	41.000	7.275	31.400	44.268	1.098
20	32.600	34.400	33.500	32.900	33.350	40.800	7.450	31.400	45.332	1.072
25	32.500	34.600	33.300	32.600	33.250	40.800	7.550	31.400	45.941	1.058
30	32.600	34.600	33.300	32.900	33.350	40.900	7.550	31.400	45.941	1.058
35	32.400	35.200	33.300	32.600	33.375	40.700	7.325	31.400	44.572	1.090
40	32.400	34.600	33.100	32.600	33.175	40.800	7.625	31.400	46.397	1.047
45	33.200	34.700	33.300	32.700	33.475	40.800	7.325	31.300	44.572	1.093
50	32.500	34.700	33.500	32.700	33.350	40.800	7.450	31.400	45.332	1.072
55	32.400	34.400	34.900	32.900	33.650	40.900	7.250	31.400	44.115	1.102
60	32.500	34.900	35.500	32.600	33.875	41.000	7.125	31.300	43.355	1.123
65	32.300	34.800	33.400	32.600	33.275	40.800	7.525	31.300	45.789	1.064
70	32.600	34.300	33.300	32.600	33.200	40.800	7.600	31.400	46.245	1.051
75	32.300	34.400	33.600	32.400	33.175	40.800	7.625	31.400	46.397	1.047
80	32.300	34.500	33.300	32.300	33.100	40.700	7.600	31.400	46.245	1.051
85	32.500	35.100	33.500	32.500	33.400	40.800	7.400	31.400	45.028	1.079
90	32.300	34.800	35.400	32.600	33.775	40.800	7.025	31.400	42.746	1.137
95	32.400	34.600	33.200	32.700	33.225	40.700	7.475	31.300	45.485	1.071
100	32.400	34.600	34.800	32.400	33.550	40.700	7.150	31.400	43.507	1.117
105	32.300	34.500	33.600	32.300	33.175	40.600	7.425	31.300	45.180	1.078
110	32.300	34.200	33.600	32.400	33.125	40.600	7.475	31.300	45.485	1.071
115	32.400	34.300	33.900	32.500	33.275	40.600	7.325	31.300	44.572	1.093
120	32.400	34.800	33.900	32.400	33.375	40.600	7.225	31.300	43.963	1.108
average	32.475	34.688	33.771	32.629	33.391	40.800	7.409	31.371	45.085	1.079

ตารางที่ ก. 26 ค่า Q_{out} และ R_t กรณี $T_j = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$, $V_{air} = 1.8\text{ m/s}$ และ TC without working fluid

Time (min)	$T_j = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$, TC without working fluid									
	$T_{air\ in,1}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,2}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,3}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,4}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,ave}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air,out}$ ($^{\circ}\text{C}$)	ΔT ($^{\circ}\text{C}$)	T_{atm} ($^{\circ}\text{C}$)	Q_{out} (W)	R_t ($^{\circ}\text{C/W}$)
5	30.800	29.200	28.600	29.000	29.400	32.400	3.000	30.983	18.255	2.685
10	31.300	29.100	28.700	29.100	29.550	32.500	2.950	30.983	17.950	2.731
15	31.500	29.100	28.700	29.000	29.575	32.500	2.925	30.983	17.798	2.754
20	31.400	29.100	28.800	29.000	29.575	32.500	2.925	30.983	17.798	2.754
25	31.400	29.100	28.800	29.100	29.600	32.600	3.000	30.983	18.255	2.685
30	31.400	29.100	28.900	29.200	29.650	32.600	2.950	30.983	17.950	2.731
35	31.400	29.200	28.900	29.200	29.675	32.700	3.025	30.983	18.407	2.663
40	31.700	29.200	29.100	29.200	29.800	32.700	2.900	30.983	17.646	2.778
45	31.700	29.200	29.100	29.200	29.800	32.700	2.900	30.983	17.646	2.778
50	31.700	29.200	29.200	29.300	29.850	32.900	3.050	30.983	18.559	2.641
55	31.800	29.400	29.200	29.400	29.950	32.900	2.950	30.983	17.950	2.731
60	31.800	29.400	29.200	29.400	29.950	33.000	3.050	30.983	18.559	2.641
65	32.000	29.300	29.200	29.300	29.950	32.900	2.950	30.983	17.950	2.731
70	31.300	29.600	29.300	29.400	29.900	33.100	3.200	30.983	19.472	2.517
75	31.400	29.700	29.400	29.500	30.000	33.200	3.200	30.983	19.472	2.517
80	31.700	29.500	29.300	29.500	30.000	33.000	3.000	30.983	18.255	2.685
85	31.500	29.500	29.200	29.600	29.950	33.100	3.150	30.983	19.167	2.557
90	32.000	29.700	29.200	29.500	30.100	33.100	3.000	30.983	18.255	2.685
95	30.600	29.500	29.500	29.600	29.800	33.200	3.400	30.983	20.689	2.369
100	31.400	29.500	29.500	29.800	30.050	33.200	3.150	30.983	19.167	2.557
105	31.400	29.700	29.300	29.600	30.000	33.200	3.200	30.983	19.472	2.517
110	31.900	29.800	29.400	29.500	30.150	33.200	3.050	30.983	18.559	2.641
115	32.000	29.800	29.400	29.600	30.200	33.200	3.000	30.983	18.255	2.685
120	32.000	29.800	29.500	29.600	30.225	33.300	3.075	30.983	18.711	2.620
average	31.546	29.404	29.142	29.358	29.863	32.904	3.042	30.983	18.508	2.652

ตารางที่ ก. 27 ค่า Q_{out} และ R_t กรณี $T_j = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$, $V_{air} = 1.8\text{ m/s}$ และ TC with working fluid

Time (min)	$T_j = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$, TC with working fluid									
	$T_{air\ in,1}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,2}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,3}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,4}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,ave}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air,out}$ ($^{\circ}\text{C}$)	ΔT ($^{\circ}\text{C}$)	T_{atm} ($^{\circ}\text{C}$)	Q_{out} (W)	R_t ($^{\circ}\text{C/W}$)
5	32.600	30.400	30.400	30.900	31.075	35.000	3.925	29.900	23.883	2.533
10	31.700	30.300	29.900	31.300	30.800	35.000	4.200	29.500	25.557	2.375
15	31.800	30.100	30.000	31.100	30.750	34.900	4.150	29.500	25.252	2.408
20	32.000	30.400	30.100	31.300	30.950	34.900	3.950	29.600	24.035	2.530
25	31.400	30.400	29.900	31.100	30.700	34.900	4.200	29.500	25.557	2.379
30	31.200	30.100	30.700	31.200	30.800	34.800	4.000	29.500	24.340	2.490
35	32.200	30.200	31.000	30.300	30.925	34.800	3.875	29.700	23.579	2.574
40	31.700	30.400	30.400	30.700	30.800	34.800	4.000	29.600	24.340	2.490
45	31.300	29.800	30.400	30.800	30.575	34.600	4.025	29.300	24.492	2.470
50	31.600	29.500	30.000	30.700	30.450	34.500	4.050	29.200	24.644	2.455
55	31.800	29.900	29.800	30.700	30.550	34.600	4.050	29.300	24.644	2.455
60	31.400	29.800	30.100	30.700	30.500	34.600	4.100	29.200	24.948	2.425
65	31.500	29.800	29.700	31.000	30.500	34.700	4.200	29.400	25.557	2.367
70	31.700	29.800	29.800	31.100	30.600	34.700	4.100	29.300	24.948	2.425
75	31.600	30.300	29.700	31.000	30.650	34.700	4.050	29.400	24.644	2.455
80	32.200	30.600	29.800	30.900	30.875	34.700	3.825	29.500	23.275	2.599
85	31.800	30.400	30.400	30.700	30.825	34.800	3.975	29.600	24.187	2.502
90	31.700	30.200	29.900	30.800	30.650	34.800	4.150	29.500	25.252	3.564
95	31.800	30.000	29.800	30.900	30.625	34.900	4.275	29.500	26.013	3.460
100	31.400	31.000	29.800	31.100	30.825	34.900	4.075	29.500	24.796	3.630
105	31.900	30.100	30.000	31.000	30.750	34.900	4.150	29.500	25.252	3.564
110	31.800	30.000	29.900	31.000	30.675	34.800	4.125	29.500	25.100	3.586
115	31.000	30.000	30.700	31.100	30.700	34.800	4.100	29.600	24.948	3.607
120	31.900	30.400	30.000	31.000	30.825	34.800	3.975	29.500	24.187	3.721
average	31.708	30.163	30.092	30.933	30.724	34.788	4.064	29.483	24.726	2.794

ตารางที่ ก. 28 ค่า Q_{out} และ R_t กรณี $T_j = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$, $V_{air} = 1.8\text{ m/s}$ และ TC without working fluid

Time (min)	$T_j = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$, TC without working fluid									
	$T_{air\ in,1}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,2}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,3}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,4}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,ave}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air,out}$ ($^{\circ}\text{C}$)	ΔT ($^{\circ}\text{C}$)	T_{atm} ($^{\circ}\text{C}$)	Q_{out} (W)	R_t ($^{\circ}\text{C/W}$)
5	32.600	30.400	30.400	30.900	31.075	35.000	3.925	30.983	23.883	2.471
10	31.700	30.300	29.900	31.300	30.800	35.000	4.200	30.983	25.557	2.309
15	31.800	30.100	30.000	31.100	30.750	34.900	4.150	30.983	25.252	2.337
20	32.000	30.400	30.100	31.300	30.950	34.900	3.950	30.983	24.035	2.455
25	31.400	30.400	29.900	31.100	30.700	34.900	4.200	30.983	25.557	2.309
30	31.200	30.100	30.700	31.200	30.800	34.800	4.000	30.983	24.340	2.425
35	32.200	30.200	31.000	30.300	30.925	34.800	3.875	30.983	23.579	2.503
40	31.700	30.400	30.400	30.700	30.800	34.800	4.000	30.983	24.340	2.425
45	31.300	29.800	30.400	30.800	30.575	34.600	4.025	30.983	24.492	2.410
50	31.600	29.500	30.000	30.700	30.450	34.500	4.050	30.983	24.644	2.395
55	31.800	29.900	29.800	30.700	30.550	34.600	4.050	30.983	24.644	2.395
60	31.400	29.800	30.100	30.700	30.500	34.600	4.100	30.983	24.948	2.366
65	31.500	29.800	29.700	31.000	30.500	34.700	4.200	30.983	25.557	2.309
70	31.700	29.800	29.800	31.100	30.600	34.700	4.100	30.983	24.948	2.366
75	31.600	30.300	29.700	31.000	30.650	34.700	4.050	30.983	24.644	2.395
80	32.200	30.600	29.800	30.900	30.875	34.700	3.825	30.983	23.275	2.536
85	31.800	30.400	30.400	30.700	30.825	34.800	3.975	30.983	24.187	2.440
90	31.700	30.200	29.900	30.800	30.650	34.800	4.150	30.983	25.252	3.564
95	31.800	30.000	29.800	30.900	30.625	34.900	4.275	30.983	26.013	3.460
100	31.400	31.000	29.800	31.100	30.825	34.900	4.075	30.983	24.796	3.630
105	31.900	30.100	30.000	31.000	30.750	34.900	4.150	30.983	25.252	3.564
110	31.800	30.000	29.900	31.000	30.675	34.800	4.125	30.983	25.100	3.586
115	31.000	30.000	30.700	31.100	30.700	34.800	4.100	30.983	24.948	3.607
120	31.900	30.400	30.000	31.000	30.825	34.800	3.975	30.983	24.187	3.721
average	31.708	30.163	30.092	30.933	30.724	34.788	4.064	30.983	24.726	2.749

ตารางที่ ก. 29 ค่า Q_{out} และ R_t กรณี $T_j = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$, $V_{air} = 1.8\text{ m/s}$ และ TC with working fluid

Time (min)	$T_j = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$, TC with working fluid									
	$T_{air\ in,1}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,2}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,3}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,4}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,ave}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air,out}$ ($^{\circ}\text{C}$)	ΔT ($^{\circ}\text{C}$)	T_{atm} ($^{\circ}\text{C}$)	Q_{out} (W)	R_t ($^{\circ}\text{C/W}$)
5	31.700	35.600	33.500	31.900	33.175	46.500	13.325	30.400	81.081	0.858
10	31.700	35.900	33.600	32.000	33.300	46.500	13.200	30.600	80.321	0.864
15	31.700	36.200	35.400	32.200	33.875	46.700	12.825	30.500	78.039	0.891
20	31.500	35.600	32.700	31.600	32.850	46.600	13.750	30.600	83.667	0.829
25	31.700	36.800	34.300	31.900	33.675	46.500	12.825	30.600	78.039	0.889
30	32.000	35.700	33.900	32.100	33.425	46.300	12.875	30.600	78.343	0.886
35	31.800	36.200	33.600	32.000	33.400	46.300	12.900	30.500	78.495	0.885
40	31.900	36.200	35.300	31.700	33.775	46.100	12.325	30.600	74.996	0.925
45	32.000	36.200	33.700	31.900	33.450	46.200	12.750	30.700	77.582	0.893
50	31.900	36.200	33.700	32.000	33.450	46.100	12.650	30.700	76.974	0.900
55	32.000	36.000	34.600	32.400	33.750	46.200	12.450	30.700	75.757	0.915
60	32.500	36.900	33.300	31.800	33.625	46.200	12.575	30.400	76.518	0.910
65	32.500	35.700	33.800	31.900	33.475	46.100	12.625	30.400	76.822	0.906
70	32.000	35.900	34.100	31.900	33.475	46.100	12.625	30.400	76.822	0.906
75	32.000	36.200	33.800	32.000	33.500	46.200	12.700	30.400	77.278	0.901
80	31.800	35.700	35.200	32.100	33.700	46.100	12.400	30.400	75.453	0.922
85	31.900	35.500	33.600	32.400	33.350	46.200	12.850	30.400	78.191	0.890
90	32.000	36.200	33.500	32.100	33.450	46.100	12.650	30.400	76.974	0.904
95	31.900	36.500	34.500	32.000	33.725	46.000	12.275	30.400	74.692	0.932
100	31.900	35.600	34.500	32.000	33.500	46.100	12.600	30.300	76.670	0.909
105	32.300	36.400	33.900	32.000	33.650	46.100	12.450	30.500	75.757	0.917
110	31.800	36.100	34.700	32.100	33.675	46.100	12.425	30.400	75.605	0.921
115	32.000	36.300	33.300	32.300	33.475	46.100	12.625	30.400	76.822	0.906
120	32.000	36.900	33.700	31.800	33.600	46.100	12.500	30.400	76.061	0.915
average	31.938	36.104	34.008	32.004	33.514	46.229	12.716	30.488	77.373	0.899

ตารางที่ ก. 30 ค่า Q_{out} และ R_t กรณี $T_j = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$, $V_{air} = 1.8\text{ m/s}$ และ TC without working fluid

Time (min)	$T_j = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$, TC without working fluid									
	$T_{air\ in,1}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,2}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,3}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,4}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,ave}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air,out}$ ($^{\circ}\text{C}$)	ΔT ($^{\circ}\text{C}$)	T_{atm} ($^{\circ}\text{C}$)	Q_{out} (W)	R_t ($^{\circ}\text{C/W}$)
5	31.700	30.700	31.300	30.900	31.150	35.100	3.950	30.983	24.035	2.917
10	31.100	30.500	30.800	31.400	30.950	35.200	4.250	30.983	25.861	2.715
15	31.300	31.000	30.400	31.300	31.000	35.200	4.200	30.983	25.557	2.751
20	30.900	30.600	30.100	31.200	30.700	35.200	4.500	30.983	27.382	2.567
25	31.100	31.000	30.700	31.400	31.050	35.100	4.050	30.983	24.644	2.849
30	31.300	30.800	30.900	30.900	30.975	35.200	4.225	30.983	25.709	2.727
35	31.000	30.500	31.100	31.200	30.950	35.200	4.250	30.983	25.861	2.711
40	31.600	30.700	30.600	31.000	30.975	35.200	4.225	30.983	25.709	2.734
45	31.400	30.600	30.400	30.700	30.775	35.200	4.425	30.983	26.926	2.611
50	31.900	31.000	30.100	31.000	31.000	35.200	4.200	30.983	25.557	2.755
55	32.200	30.700	30.000	31.100	31.000	35.200	4.200	30.983	25.557	2.755
60	31.000	30.700	30.100	31.300	30.775	35.300	4.525	30.983	27.534	2.557
65	31.100	30.400	30.800	31.200	30.875	35.400	4.525	30.983	27.534	2.553
70	31.500	30.300	30.700	30.900	30.850	35.300	4.450	30.983	27.078	2.596
75	31.000	31.400	30.300	31.600	31.075	35.500	4.425	30.983	26.926	2.615
80	31.300	30.700	30.100	31.000	30.775	35.300	4.525	30.983	27.534	2.550
85	31.500	30.700	31.600	31.400	31.300	35.400	4.100	30.983	24.948	2.814
90	31.400	31.200	30.600	31.000	31.050	35.400	4.350	30.983	26.469	2.648
95	31.000	30.700	30.300	31.100	30.775	35.400	4.625	30.983	28.143	2.494
100	31.000	31.400	30.100	31.500	31.000	35.500	4.500	30.983	27.382	2.564
105	31.000	31.300	30.100	31.600	31.000	35.500	4.500	30.983	27.382	2.564
110	31.000	31.000	30.200	31.500	30.925	35.400	4.475	30.983	27.230	2.582
115	31.300	30.700	30.300	31.300	30.900	35.300	4.400	30.983	26.774	2.626
120	30.700	31.000	30.000	31.300	30.750	35.300	4.550	30.983	27.686	2.546
average	31.263	30.817	30.483	31.200	30.941	35.292	4.351	30.983	26.476	2.658

ตารางที่ ก. 31 ค่า Q_{out} และ R_t กรณี $T_j = 80^\circ\text{C}$, $V_{air} = 1.8\text{ m/s}$ และ CC with working fluid

Time (min)	$T_j = 80^\circ\text{C}$, CC with working fluid									
	$T_{air\ in,1}$ ($^\circ\text{C}$)	$T_{air\ in,2}$ ($^\circ\text{C}$)	$T_{air\ in,3}$ ($^\circ\text{C}$)	$T_{air\ in,4}$ ($^\circ\text{C}$)	$T_{air\ in,ave}$ ($^\circ\text{C}$)	$T_{air,out}$ ($^\circ\text{C}$)	ΔT ($^\circ\text{C}$)	T_{atm} ($^\circ\text{C}$)	Q_{out} (W)	R_t ($^\circ\text{C/W}$)
5	31.100	31.200	31.200	31.000	31.050	33.600	2.550	30.983	15.516	3.159
10	31.100	31.200	31.100	31.000	31.050	33.600	2.550	30.983	15.516	3.159
15	31.600	31.200	31.100	31.000	31.050	33.600	2.550	30.983	15.516	3.159
20	31.400	31.300	31.000	30.900	31.050	33.700	2.650	30.983	16.125	3.040
25	31.500	31.400	31.100	30.900	31.050	33.700	2.650	30.983	16.125	3.040
30	31.300	31.400	31.100	30.800	31.050	33.700	2.650	30.983	16.125	3.040
35	31.200	31.400	31.100	30.900	31.050	33.700	2.650	30.983	16.125	3.040
40	31.300	31.400	31.300	30.900	31.050	33.700	2.650	30.983	16.125	3.040
45	31.200	31.300	31.400	30.800	31.050	33.700	2.650	30.983	16.125	3.040
50	31.300	31.400	31.300	31.000	31.050	33.600	2.550	30.983	15.516	3.159
55	31.200	31.400	31.300	31.000	31.050	33.800	2.750	30.983	16.733	2.929
60	31.100	31.300	31.300	31.000	31.050	33.800	2.750	30.983	16.733	2.929
65	31.400	31.400	31.300	30.900	31.050	33.800	2.750	30.983	16.733	2.929
70	31.300	31.400	31.300	30.800	31.050	33.700	2.650	30.983	16.125	3.040
75	31.200	31.500	31.400	30.800	31.050	33.800	2.750	30.983	16.733	2.929
80	31.100	31.500	31.500	30.700	31.050	33.800	2.750	30.983	16.733	2.929
85	31.100	31.500	31.500	30.900	31.050	33.800	2.750	30.983	16.733	2.929
90	31.000	31.500	31.400	30.800	31.050	33.800	2.750	30.983	16.733	2.929
95	31.000	31.400	31.400	30.800	31.050	33.700	2.650	30.983	16.125	3.040
100	30.900	31.400	31.400	30.700	31.050	33.800	2.750	30.983	16.733	2.929
105	31.000	31.500	31.700	30.700	31.050	33.700	2.650	30.983	16.125	3.040
110	31.200	31.400	31.400	30.800	31.050	33.700	2.650	30.983	16.125	3.040
115	31.200	31.400	31.400	31.000	31.050	33.800	2.750	30.983	16.733	2.929
120	31.200	31.400	31.400	31.000	31.050	33.800	2.750	30.983	16.733	2.929
average	31.204	31.383	31.308	30.879	31.050	33.725	2.675	30.983	16.277	3.014

ตารางที่ ก. 32 ค่า Q_{out} และ R_t กรณี $T_j = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$, $V_{air} = 1.8\text{ m/s}$ และ CC without working fluid

Time (min)	$T_j = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$, CC without working fluid									
	$T_{air\ in,1}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,2}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,3}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,4}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,ave}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air,out}$ ($^{\circ}\text{C}$)	ΔT ($^{\circ}\text{C}$)	T_{atm} ($^{\circ}\text{C}$)	Q_{out} (W)	R_t ($^{\circ}\text{C/W}$)
5	31.500	31.000	30.700	31.000	31.050	33.100	2.050	30.983	12.474	3.930
10	31.100	30.900	30.300	30.900	30.800	32.900	2.100	30.983	12.778	3.836
15	30.700	30.900	29.900	30.900	30.600	32.600	2.000	30.983	12.170	4.028
20	30.500	31.000	30.100	31.000	30.650	32.500	1.850	30.983	11.257	4.354
25	30.400	30.800	30.100	30.800	30.525	32.600	2.075	30.983	12.626	3.882
30	30.400	30.700	30.100	30.700	30.475	32.600	2.125	30.983	12.930	3.791
35	30.400	30.500	30.100	30.500	30.375	32.500	2.125	30.983	12.930	3.791
40	30.100	30.400	30.300	30.400	30.300	32.400	2.100	30.983	12.778	3.836
45	30.300	30.300	30.400	30.300	30.325	32.400	2.075	30.983	12.626	3.882
50	30.300	30.400	30.000	30.400	30.275	32.300	2.025	30.983	12.322	3.978
55	30.100	30.400	29.700	30.400	30.150	32.300	2.150	30.983	13.083	3.747
60	30.200	30.700	29.500	30.700	30.275	32.300	2.025	30.983	12.322	3.978
65	30.100	30.500	29.600	30.500	30.175	32.200	2.025	30.983	12.322	3.978
70	30.100	30.400	29.500	30.400	30.100	32.100	2.000	30.983	12.170	4.028
75	30.100	30.300	29.700	30.300	30.100	32.300	2.200	30.983	13.387	3.662
80	30.300	30.300	29.500	30.300	30.100	32.200	2.100	30.983	12.778	3.836
85	30.600	30.100	29.400	30.100	30.050	32.200	2.150	30.983	13.083	3.747
90	30.500	30.100	29.500	30.100	30.050	32.200	2.150	30.983	13.083	3.747
95	30.600	29.900	30.000	29.900	30.100	32.000	1.900	30.983	11.561	4.240
100	30.100	30.000	30.000	30.000	30.025	32.100	2.075	30.983	12.626	3.882
105	30.400	30.100	29.900	30.100	30.125	32.200	2.075	30.983	12.626	3.882
110	30.400	30.100	29.700	30.100	30.075	32.100	2.025	30.983	12.322	3.978
115	30.300	30.200	29.400	30.200	30.025	32.000	1.975	30.983	12.018	4.079
120	30.100	30.100	29.500	30.100	29.950	32.000	2.050	30.983	12.474	3.930
average	30.400	30.421	29.871	30.421	30.278	32.338	2.059	30.983	12.531	3.918

ตารางที่ ก. 33 ค่า Q_{out} และ R_t กรณี $T_j = 90^\circ\text{C}$, $V_{air} = 1.8\text{ m/s}$ และ CC with working fluid

Time (min)	$T_j = 90^\circ\text{C}$, CC with working fluid									
	$T_{air\ in,1}$ ($^\circ\text{C}$)	$T_{air\ in,2}$ ($^\circ\text{C}$)	$T_{air\ in,3}$ ($^\circ\text{C}$)	$T_{air\ in,4}$ ($^\circ\text{C}$)	$T_{air\ in,ave}$ ($^\circ\text{C}$)	$T_{air,out}$ ($^\circ\text{C}$)	ΔT ($^\circ\text{C}$)	T_{atm} ($^\circ\text{C}$)	Q_{out} (W)	R_t ($^\circ\text{C/W}$)
5	32.900	32.900	32.900	32.900	32.900	35.500	2.600	30.983	15.821	3.730
10	32.900	32.700	33.100	31.900	32.650	35.000	2.350	30.983	14.299	4.127
15	32.800	32.700	33.200	31.900	32.650	35.000	2.350	30.983	14.299	4.127
20	32.800	32.900	33.100	32.000	32.700	35.000	2.300	30.983	13.995	4.217
25	32.600	32.800	33.100	32.000	32.625	35.000	2.375	30.983	14.452	4.084
30	32.900	32.700	33.000	32.000	32.650	35.000	2.350	30.983	14.299	4.127
35	32.900	32.800	33.100	32.000	32.700	35.000	2.300	30.983	13.995	4.217
40	32.600	32.600	33.000	32.000	32.550	35.000	2.450	30.983	14.908	3.959
45	32.800	32.600	32.900	31.900	32.550	35.000	2.450	30.983	14.908	3.959
50	32.800	32.600	33.000	31.900	32.575	35.000	2.425	30.983	14.756	4.000
55	33.000	32.700	33.100	31.900	32.675	35.000	2.325	30.983	14.147	4.172
60	33.300	32.600	33.000	32.000	32.725	35.100	2.375	30.983	14.452	4.084
65	33.500	32.700	33.100	31.900	32.800	35.100	2.300	30.983	13.995	4.217
70	33.400	32.800	33.000	31.900	32.775	35.200	2.425	30.983	14.756	4.000
75	33.200	32.800	33.200	31.800	32.750	35.100	2.350	30.983	14.299	4.127
80	33.000	32.800	33.300	31.800	32.725	35.200	2.475	30.983	15.060	3.919
85	33.000	32.900	33.300	31.800	32.750	35.200	2.450	30.983	14.908	3.959
90	32.900	32.800	33.300	31.800	32.700	35.100	2.400	30.983	14.604	4.041
95	33.000	32.800	33.200	31.900	32.725	35.100	2.375	30.983	14.452	4.084
100	32.900	32.800	33.200	31.900	32.700	35.100	2.400	30.983	14.604	4.041
105	32.800	32.900	33.100	31.900	32.675	35.100	2.425	30.983	14.756	4.000
110	32.600	32.900	33.200	31.900	32.650	35.000	2.350	30.983	14.299	4.127
115	32.600	32.700	33.200	31.900	32.600	35.100	2.500	30.983	15.212	3.880
120	32.700	32.700	33.200	31.900	32.625	35.100	2.475	30.983	15.060	3.919
average	32.913	32.758	33.117	31.950	32.684	35.083	2.399	30.983	14.597	4.047

ตารางที่ ก. 34 ค่า Q_{out} และ R_t กรณี $T_j = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$, $V_{air} = 1.8\text{ m/s}$ และ CC without working fluid

Time (min)	$T_j = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$, CC without working fluid									
	$T_{air\ in,1}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,2}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,3}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,4}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,ave}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air,out}$ ($^{\circ}\text{C}$)	ΔT ($^{\circ}\text{C}$)	T_{atm} ($^{\circ}\text{C}$)	Q_{out} (W)	R_t ($^{\circ}\text{C/W}$)
5	30.700	30.300	30.700	29.800	30.375	32.900	2.525	30.983	15.364	3.841
10	30.700	30.200	30.900	29.800	30.400	32.800	2.400	30.983	14.604	4.041
15	30.400	30.400	31.000	29.800	30.400	32.900	2.500	30.983	15.212	3.880
20	30.500	30.400	30.700	29.900	30.375	32.900	2.525	30.983	15.364	3.841
25	30.600	30.300	30.700	30.100	30.425	32.900	2.475	30.983	15.060	3.919
30	30.700	30.400	30.700	30.200	30.500	32.900	2.400	30.983	14.604	4.041
35	30.400	30.300	30.700	30.300	30.425	32.900	2.475	30.983	15.060	3.919
40	30.600	30.100	30.700	30.700	30.525	32.900	2.375	30.983	14.452	4.084
45	30.700	30.200	30.600	30.300	30.450	32.900	2.450	30.983	14.908	3.959
50	31.200	30.300	30.500	30.300	30.575	32.900	2.325	30.983	14.147	4.172
55	30.900	30.400	30.500	30.400	30.550	32.900	2.350	30.983	14.299	4.127
60	30.400	30.400	30.500	30.100	30.350	32.900	2.550	30.983	15.516	3.804
65	30.300	30.400	30.400	29.900	30.250	32.900	2.650	30.983	16.125	3.660
70	30.300	30.400	30.400	30.100	30.300	32.900	2.600	30.983	15.821	3.730
75	30.400	30.400	30.600	29.900	30.325	32.900	2.575	30.983	15.669	3.767
80	30.700	30.400	30.600	29.800	30.375	32.900	2.525	30.983	15.364	3.841
85	30.600	30.400	30.700	29.800	30.375	32.900	2.525	30.983	15.364	3.841
90	30.600	30.500	30.700	29.800	30.400	32.900	2.500	30.983	15.212	3.880
95	30.700	30.400	30.500	29.800	30.350	32.900	2.550	30.983	15.516	3.804
100	30.800	30.600	30.400	29.900	30.425	32.900	2.475	30.983	15.060	3.919
105	30.800	30.500	30.400	29.800	30.375	32.900	2.525	30.983	15.364	3.841
110	30.600	30.500	30.400	29.900	30.350	32.900	2.550	30.983	15.516	3.804
115	30.600	30.400	30.400	29.900	30.325	32.900	2.575	30.983	15.669	3.767
120	30.700	30.400	30.300	29.900	30.325	32.900	2.575	30.983	15.669	3.767
average	30.621	30.375	30.583	30.008	30.397	32.896	2.499	30.983	15.206	3.885

ตารางที่ ก. 35 ค่า Q_{out} และ R_t กรณี $T_j = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$, $V_{air} = 1.8\text{ m/s}$ และ CC with working fluid

Time (min)	$T_j = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$, CC with working fluid									
	$T_{air\ in,1}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,2}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,3}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,4}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,ave}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air,out}$ ($^{\circ}\text{C}$)	ΔT ($^{\circ}\text{C}$)	T_{atm} ($^{\circ}\text{C}$)	Q_{out} (W)	R_t ($^{\circ}\text{C/W}$)
5	32.700	33.300	31.900	32.300	32.550	35.600	3.050	30.983	18.559	3.719
10	32.900	33.300	31.700	32.400	32.575	35.600	3.025	30.983	18.407	3.750
15	32.800	33.300	31.600	32.700	32.600	35.500	2.900	30.983	17.646	3.911
20	32.800	33.200	32.200	31.100	32.325	35.500	3.175	30.983	19.320	3.719
25	32.900	33.300	32.300	31.000	32.375	35.600	3.225	30.983	19.624	3.490
30	32.900	33.500	32.600	30.900	32.475	35.600	3.125	30.983	19.015	3.544
35	33.200	33.200	32.500	30.800	32.425	35.500	3.075	30.983	18.711	3.630
40	33.900	33.500	32.100	30.900	32.600	35.600	3.000	30.983	18.255	3.544
45	33.900	33.300	32.000	31.000	32.550	35.700	3.150	30.983	19.167	3.264
50	33.300	34.200	32.200	31.000	32.675	35.500	2.825	30.983	17.190	3.241
55	32.400	34.600	32.600	30.800	32.600	35.300	2.700	30.983	16.429	3.288
60	32.200	34.900	32.600	30.800	32.625	35.400	2.775	30.983	16.886	3.288
65	32.100	34.900	32.600	30.800	32.600	35.500	2.900	30.983	17.646	3.264
70	31.900	34.900	32.800	30.700	32.575	35.400	2.825	30.983	17.190	3.361
75	32.000	34.900	32.800	30.700	32.600	35.400	2.800	30.983	17.038	3.241
80	32.200	34.600	32.700	30.700	32.550	35.400	2.850	30.983	17.342	3.241
85	32.800	34.600	32.700	30.700	32.700	35.400	2.700	30.983	16.429	3.288
90	32.200	34.600	32.700	30.700	32.550	35.400	2.850	30.983	17.342	3.386
95	33.200	34.600	32.600	30.700	32.775	35.500	2.725	30.983	16.581	3.361
100	32.900	34.300	32.500	30.900	32.650	35.600	2.950	30.983	17.950	3.218
105	33.000	33.900	32.300	30.900	32.525	35.600	3.075	30.983	18.711	3.264
110	33.000	33.900	32.300	31.000	32.550	35.700	3.150	30.983	19.167	3.288
115	32.900	34.100	32.300	30.900	32.550	35.600	3.050	30.983	18.559	3.195
120	32.600	34.600	32.300	30.800	32.575	35.600	3.025	30.983	18.407	3.463
average	32.779	34.063	32.371	31.050	32.566	35.521	2.955	30.983	17.982	3.415

ตารางที่ ก. 36 ค่า Q_{out} และ R_t กรณี $T_j = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$, $V_{air} = 1.8\text{ m/s}$ และ CC without working fluid

Time (min)	$T_j = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$, CC without working fluid									
	$T_{air\ in,1}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,2}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,3}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,4}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air\ in,ave}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{air,out}$ ($^{\circ}\text{C}$)	ΔT ($^{\circ}\text{C}$)	T_{atm} ($^{\circ}\text{C}$)	Q_{out} (W)	R_t ($^{\circ}\text{C/W}$)
5	30.000	30.200	30.100	29.300	29.900	32.600	2.700	30.983	16.429	4.201
10	30.100	30.000	30.000	29.300	29.850	32.600	2.750	30.983	16.733	4.124
15	29.900	29.900	30.000	29.400	29.800	32.600	2.800	30.983	17.038	4.051
20	30.100	29.900	29.800	29.400	29.800	32.500	2.700	30.983	16.429	4.201
25	29.800	29.900	29.900	29.500	29.775	32.600	2.825	30.983	17.190	4.015
30	30.200	29.900	29.800	29.500	29.850	32.600	2.750	30.983	16.733	4.124
35	30.400	29.800	29.900	29.400	29.875	32.600	2.725	30.983	16.581	4.162
40	29.900	29.800	30.100	29.400	29.800	32.600	2.800	30.983	17.038	4.051
45	29.800	29.900	30.100	29.500	29.825	32.500	2.675	30.983	16.277	4.240
50	29.700	29.800	30.100	29.500	29.775	32.500	2.725	30.983	16.581	4.162
55	29.800	29.800	30.100	29.400	29.775	32.500	2.725	30.983	16.581	4.162
60	29.600	29.800	30.000	29.600	29.750	32.500	2.750	30.983	16.733	4.124
65	29.600	29.800	30.000	29.700	29.775	32.600	2.825	30.983	17.190	4.015
70	29.600	30.000	30.000	29.500	29.775	32.600	2.825	30.983	17.190	4.015
75	30.000	29.700	30.100	29.500	29.825	32.600	2.775	30.983	16.886	4.087
80	29.800	29.600	30.100	29.600	29.775	32.600	2.825	30.983	17.190	4.015
85	29.800	29.600	30.100	29.500	29.750	32.600	2.850	30.983	17.342	3.980
90	29.700	30.100	30.100	29.500	29.850	32.600	2.750	30.983	16.733	4.124
95	30.000	29.900	30.100	29.400	29.850	32.600	2.750	30.983	16.733	4.124
100	29.900	29.800	30.000	29.400	29.775	32.500	2.725	30.983	16.581	4.162
105	29.800	29.800	29.900	29.300	29.700	32.500	2.800	30.983	17.038	4.051
110	29.800	29.800	29.800	29.400	29.700	32.500	2.800	30.983	17.038	4.051
115	29.700	29.800	29.800	29.500	29.700	32.500	2.800	30.983	17.038	4.051
120	29.600	29.800	29.800	29.500	29.675	32.500	2.825	30.983	17.190	4.015
average	29.858	29.850	29.988	29.458	29.789	32.558	2.770	30.983	16.854	4.096

ภาคผนวก ข

การตีพิมพ์เผยแพร่

การเปรียบเทียบคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของ Conventional Vapor Chamber (CVC) กับ Loop Vapor Chamber (LVC)

วสันต์ ศรีเมือง *

บทคัดย่อ

คุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนระหว่างห้องไอแบบธรรมดา (Conventional Vapor Chamber, CVC) และห้องไอแบบวงรอบ (Loop Vapor chamber, LVC) ถูกทำการเปรียบเทียบ ชุดทดลองทำด้วยกล่องสแตนเลสที่มีฝาแตกต่างกัน กรณี CVC มีฝาเป็นแผ่นสี่เหลี่ยม และกรณี LVC มีฝาเป็นท่อรูปตัว U กลับหัวติดบนแผ่นสี่เหลี่ยม ในขณะที่ทำการทดลองได้เปลี่ยนอุณหภูมิที่จ่ายให้ส่วนทำระเหย (T_j) ในช่วง 80 - 100°C โดยการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้ฮีตเตอร์ (Heater) และใช้อากาศในห้องทดลองสำหรับระบายความร้อนส่วนควบแน่น ซึ่งได้เปลี่ยนความเร็วของอากาศ (V_{air}) ในช่วง 1.0 - 1.8 m/s ผลการทดลองพบว่า อัตราการถ่ายเทความร้อนออกที่ส่วนควบแน่นทั้งกรณี CVC และ LVC เพิ่มขึ้นตาม T_j และ V_{air} ในการวิจัยนี้สรุปได้ว่า LVC มีค่าความต้านทานความร้อนต่ำกว่า CVC ประมาณ 309%

คำสำคัญ : เวเปอร์แชมเบอร์, ฮีตซิงค์, ลูปลอนเดนเซอร์, ซีพียู, ท่อความร้อน

ห้องปฏิบัติการวิจัยอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อความร้อน, สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล, คณะวิศวกรรมศาสตร์ และสถาบันศึกษาระบบสารสนเทศ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

* ผู้ติดต่อ, อีเมล: wasan.sr@rmuti.ac.th รับเมื่อ 24 กรกฎาคม 2555 ตอบรับเมื่อ 3 เมษายน 2556

Comparative Heat Transfer Characteristics of Conventional Vapor Chamber (CVC) and Loop Vapor Chamber (LVC)

Wasan Srimuang^{*}

Abstract

The heat transfer characteristics of a conventional vapor chamber (CVC) and a loop vapor chamber (LVC) are compared. The test module is made by a stainless box with difference covers : the cover of the CVC is a rectangular plate, and the cover of the LVC is a rectangular plate with overturn-U tubes. In the experiments, temperatures of heat source (T_j) are supplied to an evaporator section in the range of 80 – 100 °C by a change of volts to an electrical heater. The fresh air in the experimental room is used for cooling a condenser section. The velocities (V_{air}) of fresh air are varied from 1.0 – 1.8 m/s. The results of the present study show that the heat transfer rate of both CVC and LVC are increased with T_j and V_{air} . In conclusion, the thermal resistance of LVC is lower than that of CVC about 309%.

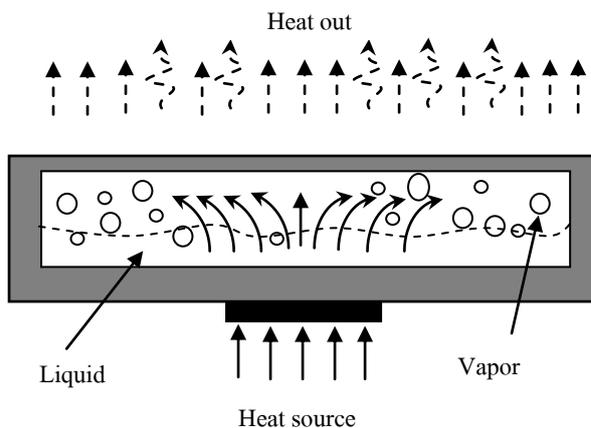
Keywords : Vapor chamber, Heat sink, Loop condenser, CPU, Heat pipe

Heat pipe Heat Exchanger Research Laboratory, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Isan.

^{*} Corresponding author, E-mail: wasan.sr@rmuti.ac.th Received 24 July 2012, Accepted 3 April 2013

1. บทนำ

Vapor chamber เป็นอุปกรณ์ระบายความร้อนชนิดหนึ่ง โดยไม่ต้องอาศัยพลังงานกลจากภายนอกมาช่วยในการทำงาน หลักการส่งถ่ายความร้อนใน Vapor chamber แสดงดังรูปที่ 1 ซึ่งมีหลักการส่งถ่ายความร้อนจากความร้อนแฝงของสารทำงานที่บรรจุอยู่ภายใน โดยสารทำงานจะเปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอ เมื่อได้รับความร้อนจากแหล่งความร้อนสูง จากนั้นสารทำงานดังกล่าวเคลื่อนที่ขึ้นไปส่วนบนของ Vapor chamber ซึ่งเรียกว่าส่วนควบแน่น โดยภายนอกของส่วนควบแน่นนี้จะมีอากาศอุณหภูมิห้องไหลผ่านเพื่อใช้ระบายความร้อนออก ดังนั้น สารทำงานที่มีสถานะเป็นไอ จะกลั่นตัวกลายเป็นของเหลว แล้วไหลตกกลับมายังส่วนทำระเหยอีกครั้ง



รูปที่ 1 หลักการส่งถ่ายความร้อนของ Vapor chamber แบบธรรมดา (CVC)

ปัจจุบัน Vapor chamber ได้ถูกพัฒนาให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตาม ผู้วิจัยเห็นว่าสมรรถนะของ Vapor chamber ยังสามารถพัฒนาให้เพิ่มขึ้นได้อีก โดยการปรับปรุงรูปร่างของส่วนควบแน่นเพื่อเพิ่มพื้นที่ในการระบายความร้อน

จากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนา Vapor chamber สรุปได้ดังนี้ R. Boukhanouf และคณะ [1] ได้ทำการศึกษาสมรรถนะของ Flat plate heat pipe (FPHP) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Vapor chamber หรือบางครั้งเรียกว่า Vapor chamber แบบธรรมดา (CVC) ซึ่งประยุกต์เป็นอุปกรณ์ระบายความร้อนออกจาก CPU ของคอมพิวเตอร์ เขาศึกษาโดยใช้กล้องอินฟราเรด (Infra red, IR) ถ่ายภาพการกระจายอุณหภูมิที่ผิวบริเวณส่วนทำระเหยของ FPHP ทั้งในกรณีเต็มสารทำงานและไม่เต็มสารทำงาน ในขณะที่เพิ่มฟลักซ์ความร้อนจาก 4 ถึง 40 W/cm² ซึ่งได้เปรียบเทียบกับแบบแผ่นทองแดงสี่เหลี่ยมตันธรรมดา ผลการทดลองเขาพบว่า การกระจายอุณหภูมิของ FPHP ในกรณีเต็มสารทำงานจะมีการกระจายอุณหภูมิอย่างสม่ำเสมอตลอดพื้นที่ของผิวส่วนทำระเหย จุดที่อุณหภูมิสูงสุดต่างกับจุดอุณหภูมิต่ำสุดประมาณ 1 °C ซึ่งต่างจากกรณีไม่เต็มสารทำงาน โดยมีการกระจายอุณหภูมิไม่สม่ำเสมอ สำหรับกรณีแบบแผ่นทองแดงสี่เหลี่ยมตันธรรมดาพบว่าการกระจายอุณหภูมิไม่สม่ำเสมอ กล่าวคือ จุดที่อุณหภูมิสูงสุดต่างกับจุดอุณหภูมิต่ำสุดประมาณ 50 °C ในการศึกษาของ [1] สรุปได้ว่าค่าความต้านทานความร้อนของ FPHP (กรณีเต็มสาร) มีค่าต่ำกว่าแบบแผ่นทองแดงสี่เหลี่ยมตันธรรมดาถึง 40 เท่า งานวิจัยในลักษณะคล้ายกันรายงานโดย T. E. Tsai และคณะ [2] ซึ่งได้ทำการศึกษาสมรรถนะของ Vapor chamber สำหรับระบายความร้อนระบบอิเล็กทรอนิกส์ โดยศึกษาระดับค่าความต้านทานความร้อน (R) อัตราส่วนการเต็มสารทำงานของ Vapor chamber ที่มีลักษณะพื้นผิวของส่วนทำระเหยต่างกัน นอกจากนี้ในงานของ [2] ยังได้ติดตั้งท่อเทอร์โมไซฟอนเข้าที่ส่วนบนของส่วนควบแน่นอีกด้วย จากการศึกษานี้เขาพบว่า การจ่ายไหลความร้อนเพิ่มขึ้น และการลดอัตราการเต็มสารทำงาน ส่งผลให้ค่าความต้านทานความร้อนลดลง และยังพบว่า ลักษณะโครงสร้างของพื้นผิวส่วนทำระเหยมีผลต่อความต้านทานความร้อน เมื่อเปรียบเทียบกับแบบผิวเรียบธรรมดาพบว่า กรณีผิวแบบซินเตอร์

(sintered), แบบร่องเอียง (grooved) และแบบร่องตรง (etched) สามารถลดค่าความต้านทานความร้อนได้ 56, 13 และ 42% ตามลำดับ จากการศึกษาของ [2] สรุปได้ว่าสมรรถนะสูงสุดพบที่การใช้ผิวด้านในส่วนทำระเหยแบบซินเตอร์ซึ่งทดลองที่จ่ายความร้อนสูงสุด (140 W) และเติมสารทำงาน 20% ของปริมาตรภายใน ซึ่งมีความต้านทานความร้อนรวม (R_{Σ}) เพียง 0.495 °C/W อีกรงานวิจัยหนึ่งที่น่าสนใจ คือ S. S. Hsieh และคณะ [3] ได้ทำการศึกษาการกระจายความร้อนของ Flat Vapor Chamber (FVC) หรือเรียกว่า Conventional Vapor Chamber (CVC) ที่ใช้สำหรับระบบความร้อนระบบอิเล็กทรอนิกส์ โดยการศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ผิวส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่น ในการศึกษา [3] นี้ได้ใช้ ขนาดพื้นที่ของฮีตเตอร์ต่างกัน ผลการทดลองนี้ พบว่าขนาดพื้นที่ของฮีตเตอร์ต่างกันมีผลน้อยมากต่อการกระจายอุณหภูมิที่ผิวของส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่น นอกจากนี้ยังพบว่า CVC สามารถระบายความร้อนออกได้ถึง 220 W/cm² และมีความต้านทานความร้อนประมาณ 0.2 °C/W สำหรับผลของการเปลี่ยนแปลงไหลความร้อนที่จ่ายให้ส่วนทำระเหยพบว่าเมื่อไหลความร้อนเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความต้านทานความร้อนลดลงซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ [2] ที่ได้กล่าวมาข้างต้น S. F. Wang และคณะ [4] ได้ศึกษาผลของความยาวส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นที่มีผลต่อสมรรถนะของ Flat plate heat pipe (FPHP) ซึ่ง FPHP นี้มีความยาว 255 mm กว้าง 25 mm และใช้น้ำเป็นสารทำงาน ในการทดลองได้เปลี่ยนความยาวของส่วนทำระเหย (L_c) ด้วยการเปลี่ยนความยาวของฮีตเตอร์ 5 ค่า ได้แก่ $L_c = 20, 30, 40, 50$ และ 70 mm ตามลำดับ ในขณะที่เดียวกันความยาวของส่วนควบแน่น (L_c) เปลี่ยนแปลงโดยเปลี่ยนความยาวของกล่องระบายความเย็น ซึ่งเปลี่ยน 5 ค่า ได้แก่ $L_c = 20, 40, 50, 60, 80$ และ 100 mm ตามลำดับ จากการศึกษาเขาพบว่า การเพิ่ม L_c เป็นผลให้ค่าความต้านทานความร้อนลดลงและยังทำให้ขีดจำกัดการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าการ

เพิ่ม L_c ทำให้เกิดปรากฏการแห้งของ FPHP ได้ที่จ่ายไหลความร้อนต่ำ อย่างไรก็ตามมีประเด็นที่น่าสนใจจากงานของ [4] คือ กรณีความยาวของ L_c ใกล้เคียง L_c จะทำให้ FPHP มีสมรรถนะทางความร้อนที่ดี S. C. Wong และคณะ [5] ได้ทำการทดสอบสมรรถนะทางความร้อนของ Vapor chamber ในกรณีที่ใช้สารทำงานต่างกัน 3 ชนิด กล่าวคือ น้ำ, methanol และ acetone จากการศึกษาเขาพบว่า Vapor chamber ที่ใช้น้ำเป็นสารทำงานมีความต้านทานความร้อนต่ำสุด ในขณะที่ใช้ acetone มีความต้านทานความร้อนสูงสุด นอกจากนี้ยังได้นำเสนอผลของขนาดแผ่นฮีตเตอร์ (1.21, 4.41 และ 9.61 cm²) ที่มีต่อสมรรถนะทางความร้อนของ Vapor chamber จากการทดลองเขาพบว่า ค่าความต้านทานความร้อนลดลงเมื่อขนาดหน้าตัดฮีตเตอร์ใหญ่ขึ้น S. Lips [6] และคณะ ได้ทำการทดลองหาสมรรถนะของ FPHP ที่มีหน้าตัดส่วนทำระเหยเป็นร่องสี่เหลี่ยมตรง ผลการทดลองเขาพบว่า อัตราการเติมสารทำงาน, ขนาดของไหลความร้อน และความหนาของปริมาตรไอเหนือของเหลวมีผลอย่างยิ่งต่อสมรรถนะทางความร้อนของ FPHP ซึ่งความหนาของปริมาตรไอมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงมุมโค้งงอของผิวของเหลว สรุปได้ว่า ที่มีต่อสมรรถนะทางความร้อนของ FPHP ในการศึกษาของ [6] สรุปได้ว่า อัตราการเติมสารทำงานที่เหมาะสมคือ 10-25% ซึ่งให้ค่าความต้านทานความร้อนอยู่ในช่วงต่ำสุด S. C. Wong และคณะ [7] ได้ศึกษาสมรรถนะของ Vapor chamber ที่มีร่องเอียงคู่ขนานกันบนพื้นผิวด้านในของแผ่นส่วนควบแน่น ซึ่งเขาได้ใช้ (ใส่ชนิดซินเตอร์หลายชั้น) ติดตั้งเฉพาะผิวส่วนทำระเหย ขนาดยาวและกว้างของ Vapor chamber เป็น 10 cm × 8.9 cm ซึ่งมีขนาดของฮีตเตอร์ 2 ขนาด กล่าวคือ ขนาด 2.1 x 2.1 cm² และ 1.1 x 1.1 cm² โดยมีการให้ไหลความร้อนที่เพิ่มขึ้นจาก 80 ถึง 300 W ผลการศึกษาพบว่า ทั้งความต้านทานความร้อนของส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นมีค่าลดลงเมื่อจ่ายไหลความร้อนเพิ่มขึ้น

จากการสืบค้นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังกล่าวข้างต้นพบว่า Vapor chamber เป็นอุปกรณ์ที่นักวิจัยหลายท่านให้ความสนใจศึกษาเป็นอย่างมาก และผู้วิจัยสรุปได้ว่าความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของ Vapor chamber นั้น ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยด้วยกัน เช่น ขนาดของ Vapor chamber, ชนิดของวัสดุที่ใช้ทำ Vapor chamber, ลักษณะการติดตั้ง, ชนิดของสารทำงาน, ความเร็วลมที่ระบายความร้อน และอุณหภูมิของแหล่งจ่ายความร้อน รวมทั้งลักษณะรูปร่างของส่วนควบแน่น ซึ่งในงานวิจัยนี้้นำประเด็นลักษณะรูปร่างของส่วนควบแน่นมาพิจารณาเพื่อเพิ่มสมรรถนะทางความร้อนของ Vapor chamber

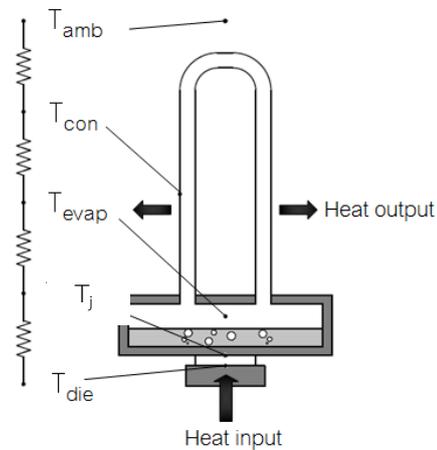
ในปัจจุบันยังไม่พบรายงานการศึกษาสมรรถนะของ Vapor chamber ที่มีท่อขนาดเล็กติดตั้งบนส่วนควบแน่น โดยการติดตั้งท่อขนาดเล็กบนแผ่นฝาครอบของส่วนควบแน่นนี้จะส่งเสริมกลไกให้มีการถ่ายเทความร้อนออกจากส่วนควบแน่นให้ดีขึ้นในสองเหตุผลหลักๆ ได้แก่ เหตุผลแรก การติดตั้งท่อขนาดเล็กบนส่วนควบแน่น เป็นการเพิ่มพื้นที่ในการระบายความร้อนให้มากขึ้น เหตุผลที่สอง ไอบางส่วนที่อยู่ภายใน Vapor chamber จะไหลเข้าไปในท่อขนาดเล็กที่ติดตั้งเพิ่มขึ้น เป็นผลให้ความร้อนที่อยู่ภายในไอล้างเทออกให้กับอากาศที่อยู่รอบนอกท่อขนาดเล็กได้ดีขึ้น

จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้น ในงานวิจัยนี้จึงมีจุดประสงค์ที่จะทราบคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของ Vapor chamber ที่เพิ่มขึ้นหลังจากที่ติดตั้งท่อขนาดเล็กบนส่วนควบแน่นว่ามีความสามารถในการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเพียงไร

2. หลักการทำงานของ Loop Vapor Chamber (LVC)

รูปที่ 2 แสดงส่วนประกอบและหลักการทำงานของ LVC หรือบางครั้งเรียกว่า “Vapor chamber with tube condenser (VCTC)

T_a



รูปที่ 2 หลักการทำงานของ Vapor chamber ที่มีท่อขนาดเล็กติดตั้งบนส่วนควบแน่น (LVC)

สำหรับหลักการทำงานของ LVC จะมีลักษณะคล้ายกับ CVC กล่าวคือ เมื่อความร้อนถ่ายเทเข้าสู่ส่วนทำระเหย จะทำให้สารทำงานซึ่งมีสถานะเป็นของเหลวเปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอ ซึ่งไอดังกล่าวนี้จะลอยขึ้นสู่ด้านบน และไหลเข้าไปยังท่อขนาดเล็กที่ติดตั้งอยู่บนส่วนควบแน่น ในขณะเดียวกันอุณหภูมิอากาศที่ใช้ระบายความร้อนซึ่งอยู่ด้านล่างนอกท่อ มีค่าต่ำกว่า ดังนั้น ไอในท่อจึงเกิดการควบแน่นกลายเป็นของเหลวและไหลตกลงสู่ส่วนทำระเหยด้วยแรงโน้มถ่วง ดังนั้นในขณะที่ LVC ทำงาน สารทำงานที่อยู่ภายในจะเกิดการเปลี่ยนสถานะกลับไปมาตลอดเวลา เป็นผลให้ความร้อนถูกถ่ายเทจากแหล่งความร้อนสูง (heat source) ไปสู่แหล่งรับความร้อน (heat sink) ได้อย่างต่อเนื่อง

3. ทฤษฎี

สำหรับการคำนวณหาปริมาณการถ่ายเทความร้อน และปริมาณความต้านทานความร้อนของทั้ง CVC และ LVC มีรายละเอียด ดังนี้

- สมการการหาค่าการถ่ายเทความร้อนที่ออกจาก Vapor Chamber

$$Q_{out} = \dot{m}C_p(T_{out} - T_{in}) \quad (1)$$

เมื่อ m คืออัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่ไหลผ่าน ส่วนควบแน่น, C_p คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของ อากาศที่ไหลผ่านส่วนควบแน่น ($\text{kJ/kg}^\circ\text{C}$), T_{out} คือ อุณหภูมิ ของอากาศที่ไหลออกจากส่วนควบแน่น ($^\circ\text{C}$) และ T_{in} คือ อุณหภูมิของอากาศที่ไหลเข้าส่วนควบแน่น ($^\circ\text{C}$)

- สมการหาค่าความต้านทานความร้อนรวม (R_t) มีหน่วย เป็น ($^\circ\text{C/W}$) หาได้จาก

$$R_t = \frac{T_j - T_a}{Q_{\text{out}}} \quad (2)$$

เมื่อ T_j หรือ T_{base} คือ อุณหภูมิของผนังส่วนทำระเหยที่ ติดกับฮีตเตอร์ ($^\circ\text{C}$) และ T_a หรือ T_{amb} คือ อุณหภูมิของ อากาศที่ไหลออกจากส่วนควบแน่น ($^\circ\text{C}$)

4. ชุดทดลองและขั้นตอนการทดลอง

4.1 ชุดทดลอง

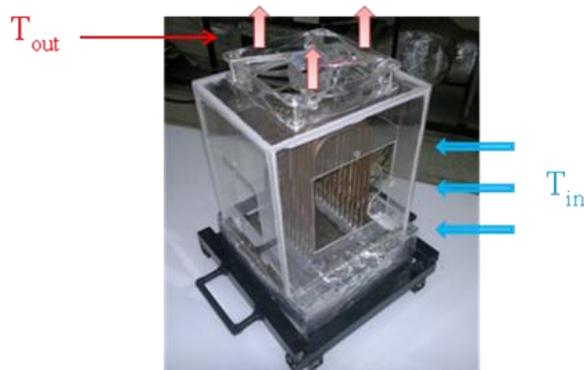
รูปที่ 3ก แสดงส่วนทำระเหยของ CVC รูปที่ 3ข แสดง ส่วนทำระเหย LVC รูปที่ 3ค แสดง LVC ที่ถูกลดรอบด้วย ก่อ่งพลาสติกใส ซึ่งด้านข้างก่อก่อ่งทั้งสี่ด้านได้ทำช่องให้อากาศไหลเข้า และด้านบนจะมีช่องซึ่งติดพัดลมและเป็น ช่องให้อากาศไหลออก



(ก)



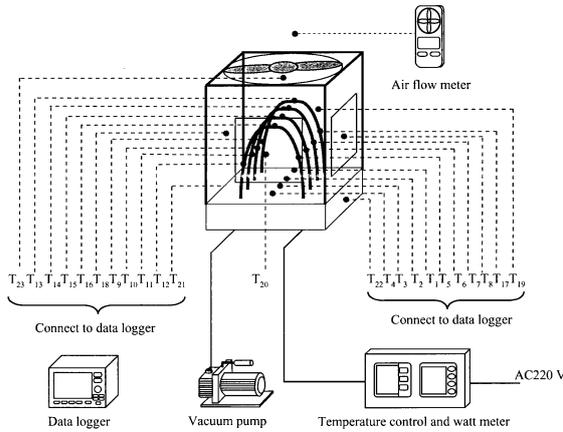
(ข)



(ค)

รูปที่ 3 ชุดทดสอบ (ก) ฝา CVC (ข) ฝา LVC และ (ค) LVC ที่ถูกลดรอบด้วยก่อก่อ่งพลาสติก

รูปที่ 4 แสดงวงจรชุดทดสอบและอุปกรณ์ต่างๆ ซึ่ง ประกอบไปด้วย เทอร์โมคัปเปิ้ล (Thermocouple) ยี่ห้อ OMEGA ชนิด K ใช้ร่วมกับเครื่องบันทึกข้อมูล (Data logger) ยี่ห้อ Yokogawa รุ่น DX 200 ฮีตเตอร์ขนาด 400 W ซึ่งมีความต้านทาน 115 Ω เครื่องวัดความเร็วลม (Anemometer air velocity meter), ชุดควบคุมอุณหภูมิ (Temperature controller), เครื่องทำสุญญากาศ (Vacuum pump) แบบ single stage รุ่น SP-2 และพัดลมระบายความร้อน แบบ DC 12 V ชนิดปรับความเร็วลมได้



รูปที่ 4 การต่อชุดทดสอบเข้ากับอุปกรณ์ต่างๆ เพื่อทดลอง

4.2 ขั้นตอนการทดลอง

ก่อนเริ่มการทำงานได้ทำสุญญากาศภายใน Vapor chamber โดยใช้เครื่องทำสุญญากาศ จากนั้นเริ่มการทำงาน (ในสถานะของเหลว) ปริมาณ 50 % ของปริมาตรภายใน จากนั้นนำสายเทอร์โมคัปเปิลต่อเข้ากับผิวนอกของ Vapor chamber ณ จุดต่างๆ และอีกด้านหนึ่งของเทอร์โมคัปเปิลต่อเข้ากับเครื่องบันทึกอุณหภูมิ ในระหว่างการทดลองได้ทำการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิของฮีตเตอร์ 3 ค่า ได้แก่ 80 90 และ 100 °C ร่วมกับเปลี่ยนค่าความเร็วลมระบายความร้อนส่วนควบแน่นอีก 3 ค่าเช่นกัน ได้แก่ 1.0 1.4 และ 1.8 m/s ตามลำดับ ซึ่งค่าอุณหภูมิและค่าความเร็วดังกล่าวเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับสภาวะการทำงานจริงของ CPU ของคอมพิวเตอร์

5. ผลและอภิปรายการทดลอง

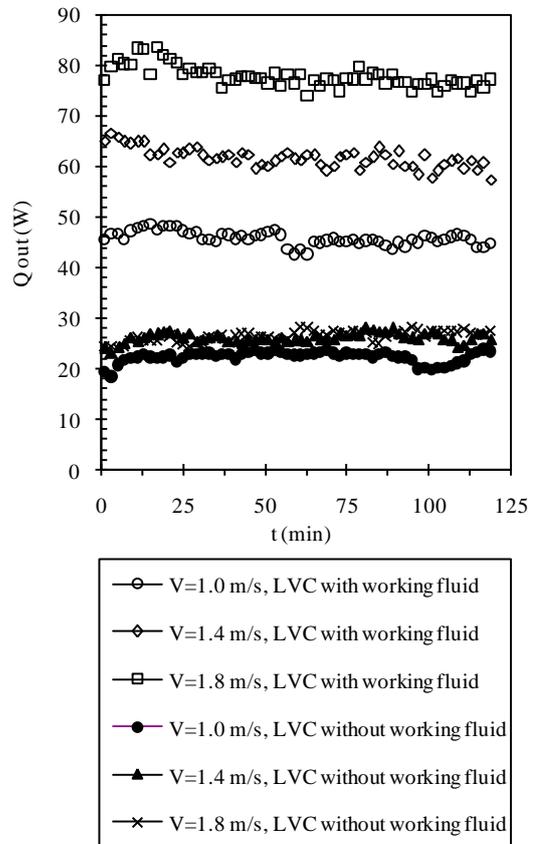
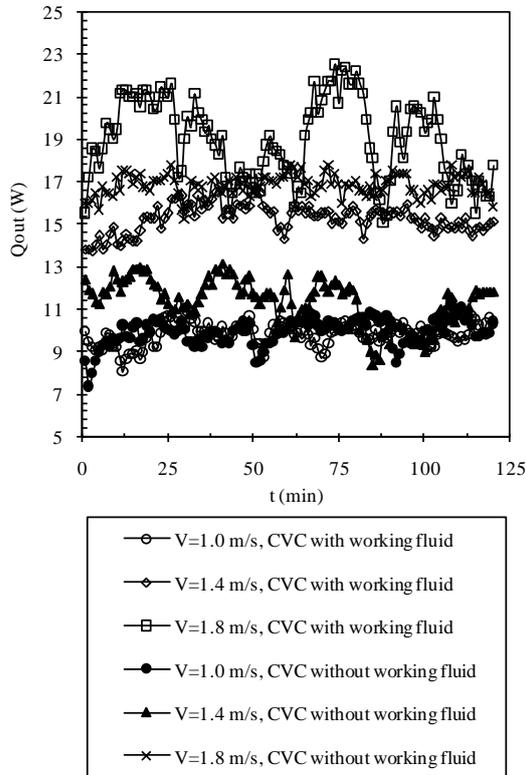
จากผลการทดลองหาคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของ CVC และ LVC ผู้วิจัยได้แบ่งการนำเสนอออกเป็นสองประเด็นดังนี้ (1) การเปลี่ยนแปลงค่าของ Q_{out} กรณีเดิมสารทำงานและไม่เดิมสารทำงานของ CVC และ LVC และ (2) ผลของ V_{air} ที่มีต่อ R_f ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

5.1 การเปลี่ยนแปลงของ Q_{out} กรณีเดิมสารทำงานและไม่เดิมสารทำงาน

ในการวิจัยนี้ใช้สมมติฐานว่าไม่มีความร้อนสูญเสียออกจากระบบ เนื่องจากการหุ้มฉนวนภายนอกชุดทดลองอย่างดี ดังนั้นค่าความร้อนที่ออกจากส่วนควบแน่น (Q_{out}) จะเท่ากับความร้อนที่จ่ายให้กับส่วนทำระเหย (Q_{in}) ซึ่งค่า Q_{out} ได้มาจากการคำนวณโดยใช้สมการ (1) ในการทดลองนี้ได้ทดลองทั้ง 3 อุณหภูมิ กล่าวคือ 80, 90 และ 100 °C แต่เลือกนำเสนอเฉพาะ 100 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิสูงสุดในเงื่อนไขของการทดลองนี้ ได้ควบคุมอุณหภูมิของส่วนทำระเหย $T_j = 100$ °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิสูงสุด และเปลี่ยนแปลงความเร็วอากาศที่ไหลผ่านส่วนควบแน่น 3 ค่า คือ $V_{air} = 1.0, 1.4$ และ 1.8 m/s ตามลำดับ

รูปที่ 5 แสดงค่า Q_{out} ของ CVC ในกรณีไม่เดิมสารทำงาน ซึ่งพบว่าการเพิ่ม V_{air} จาก 1.0 ถึง 1.8 m/s มีค่า Q_{out} เพิ่มขึ้นจาก 9.5 W เป็น 16.81 W สำหรับในกรณีเดิมสารทำงานจะมีค่า Q_{out} เพิ่มขึ้นจาก 9.71 W เป็น 18.97 W พบว่าค่าของ Q_{out} ในกรณีเดิมสารทำงานมีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าในกรณีไม่เดิมสารทำงานประมาณ 12.85% ซึ่งเป็นการเพิ่มขึ้นค่อนข้างต่ำ แสดงให้เห็นว่า การเพิ่มความเร็วมีผลต่อการระบายความร้อนเพียงเล็กน้อย

สำหรับกรณี LVC ซึ่งได้ทำการทดลองในเงื่อนไขเดียวกันกับ CVC ที่กล่าวมาในข้างต้น ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 6 พบว่าค่า Q_{out} กรณีไม่เดิมสารทำงานที่ $V_{air} = 1.0, 1.4$ และ 1.8 m/s มีค่า $Q_{out} = 22.28, 26.20$ และ 26.30 W ตามลำดับ สำหรับในกรณีเดิมสารทำงานจะมีค่า $Q_{out} = 45.71, 61.51$ และ 77.49 W ตามลำดับ หรืออาจกล่าวได้ว่ากรณีเดิมสารทำงาน ความร้อนที่ถ่ายเทออกจากส่วนควบแน่นเพิ่มขึ้นจากกรณีไม่เดิมสารทำงานประมาณ 23.43, 35.31 และ 51.19 W ตามลำดับ



รูปที่ 5 การเปลี่ยนแปลง Q_{out} ของ CVC ที่ $T_j = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$

ในกรณีเดิมและไม่เติมสารทำงาน นอกจากนี้ยังพบว่า ค่า Q_{out} ของทั้ง CVC และ LVC จะเพิ่มตามความเร็วของอากาศที่ระบายความร้อนส่วนควบแน่น ถ้าหากเปรียบเทียบค่า Q_{out} ระหว่าง CVC กับ LVC จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า LVC ที่เติมสารทำงานจะมีความสามารถในการถ่ายเทความร้อนได้มากกว่าแบบ CVC ประมาณ 309 % ทั้งนี้อาจจะมีสาเหตุจาก LVC มีพื้นที่ในการถ่ายเทความร้อนมากกว่า CVC เนื่องจากได้ติดตั้งท่อขนาดเล็กไว้บนส่วนควบแน่น ซึ่งเป็นการสะท้อนความจริงที่ว่า การเพิ่มพื้นที่ที่ระบายความร้อนทำให้ค่าการถ่ายเทความร้อนได้มากขึ้น

ผู้วิจัยได้พยายามค้นหาผลงานวิจัยของคนอื่นๆ ในอดีต ที่แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนเพื่อมาทำการเปรียบเทียบ แต่อย่างไรก็ตาม ยังไม่พบงานวิจัยในอดีตใดที่มีเงื่อนไขและนำเสนอค่าในลักษณะเดียวกัน

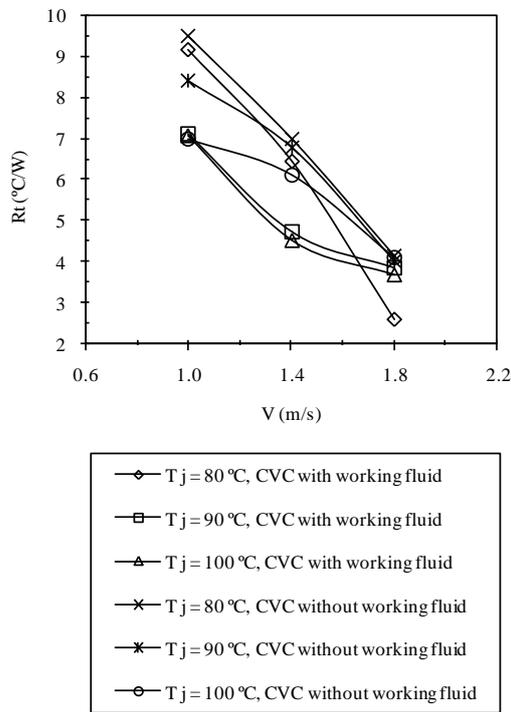
รูปที่ 6 การเปลี่ยนแปลง Q_{out} ของ LVC ที่ $T_j = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$

ในกรณีเดิมและไม่เติมสารทำงาน

จากรูปที่ 5 และ 6 จะเห็นว่า เมื่อเพิ่มความเร็วของพัดลมขึ้น ทำให้ Q_{out} เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากว่า ความเร็วของลมที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่นำมาระบายความร้อนออกจากส่วนควบแน่น ซึ่งทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นตามสมการที่ (1)

5.2 ผลของ V_{air} ที่มีต่อ R_t

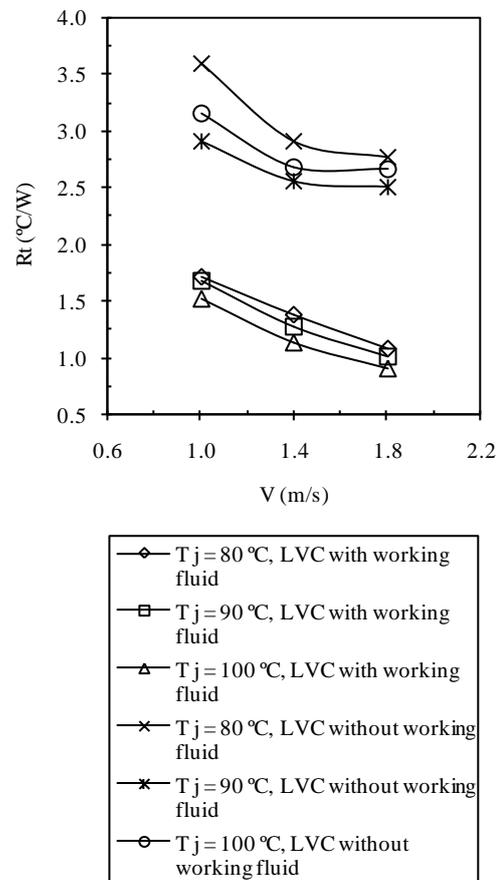
การเปลี่ยนความเร็วอากาศที่ใช้ระบายความร้อนออกจากส่วนควบแน่น (V_{air}) จะมีผลต่อความต้านทานของความร้อน (R_t) ที่เกิดขึ้นด้วย ซึ่งค่าความต้านทานความร้อนของทั้ง CVC และ LVC หาได้จากสมการ (2) ผลของ V_{air} ที่มีต่อ R_t แสดงดังรูปที่ 7, 8 และ 9



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่าง V_{air} กับ R_t ของ CVC

รูปที่ 7 พบว่า กรณี CVC ไม่เติมสารทำงาน ที่ $T_j = 80$ °C และ $V = 1.0$ m/s มีค่า R_t สูงที่สุดเท่ากับ 9.49 °C/W และที่ $T_j = 100$ °C และ $V = 1.8$ m/s มีค่า R_t ต่ำที่สุดเท่ากับ 2.66 °C/W และกรณีเติมสารทำงาน ที่ $T_j = 80$ °C และ $V = 1.0$ m/s มีค่า R_t สูงที่สุด = 9.18 °C/W และที่ $T_j = 100$ °C และ $V = 1.8$ m/s มีค่า R_t ต่ำที่สุด = 3.67 °C/W พิจารณาได้ว่า ค่า R_t ของ CVC ในกรณีที่เติมสารทำงานมีค่าสูงกว่าในกรณีที่เติมสารทำงาน อาจมีสาเหตุเนื่องจากในกรณีที่เติมสารทำงานนั้น สารทำงานมีการเปลี่ยนสถานะและเคลื่อนที่ ส่งผลให้ความร้อนถ่ายเทได้มากขึ้น

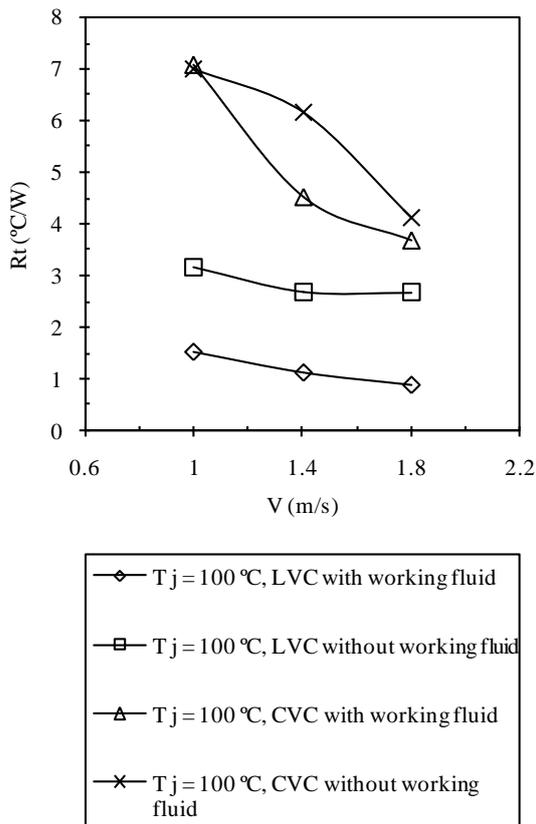
รูปที่ 8 แสดงผลของ V_{air} ที่มีต่อ R_t ของ LVC ซึ่งพบว่า ที่ $T_j = 80$ °C และ $V_{air} = 1.0$ m/s ในกรณีที่เติมสารทำงาน มีค่า R_t สูงที่สุดเป็น 3.59 °C/W และที่ $T_j = 100$ °C และ $V_{air} = 1.8$ m/s มีค่า R_t ต่ำที่สุดเป็น 0.89 °C/W และกรณีเติมสารทำงาน ที่ $T_j = 80$ °C และ $V_{air} = 1.0$ m/s จะมีค่า R_t สูงที่สุดเป็น 1.71 °C/W และที่ $T_j = 100$ °C และ $V_{air} = 1.8$ m/s มีค่า R_t ต่ำที่สุดเป็น 0.89 °C/W



รูปที่ 8 ผลของ V_{air} ที่มีต่อ R_t ของ LVC

สังเกตได้ว่าค่า R_t ของ LVC ในกรณีไม่เติมสารทำงาน จะสูงกว่าในกรณีเติมสารทำงาน ซึ่งสอดคล้องกับผลของ CVC ในรูปที่ 8 ดังที่ได้กล่าวผ่านมาแล้ว ทั้งนี้อาจมีสาเหตุเนื่องจากในกรณีที่เติมสารทำงานนั้น สารทำงานจะสามารถพาความร้อนได้มากขึ้น ถ้าหากเปรียบเทียบค่า R_t ระหว่าง CVC กับ LVC จะเห็นได้ว่า LVC มีค่า R_t ต่ำกว่า CVC เนื่องจากว่า LVC ได้มีการติดตั้งท่อบนส่วนควบแน่นซึ่งจะเป็นการเพิ่มพื้นที่ในการถ่ายเทความร้อนและช่วยทำให้การถ่ายเทความร้อนดียิ่งขึ้น เพื่อให้ชัดเจนมากยิ่งขึ้น ผู้วิจัยได้เปรียบเทียบค่า R_t ของ CVC และ LVC ซึ่งแสดงดังรูปที่ 9 จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า ค่า R_t ของ CVC สูงกว่า LVC ทั้งในกรณีเติมและไม่เติมสารทำงาน ถ้าพิจารณาเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลง R_t ของ LVC ระหว่างเติมสารและไม่เติม

สาร พบว่าที่ $T_j = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ $V_{\text{air}} = 1.0\text{ m/s}$ ทั้งกรณีเติมสารทำงานและไม่เติมสารทำงาน จะมีความแตกต่างของ $R_t = 1.64\text{ }^{\circ}\text{C/W}$ และที่ $V_{\text{air}} = 1.8\text{ m/s}$ จะมีความแตกต่างของ $R_t = 1.77\text{ }^{\circ}\text{C/W}$ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่า R_t ในกรณีที่เติมสารและไม่เติมสารทำงานจะมีค่าแตกต่างกันสูงกว่า CVC



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่าง V_{air} กับ R_t ของ CVC และ LVC ที่ $T_j = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง R_t กับ V_{air} พบว่า การเพิ่ม V_{air} เป็นผลให้ค่า R_t ลดลง นั่นหมายความว่า การเพิ่มความเร็วของอากาศระบายความร้อนออกจากส่วนควบแน่น การติดตั้งท่อไค้งบนส่วนควบแน่น และการเติมสารทำงาน จะทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนออกจาก Vapor chamber ได้มากขึ้น

สำหรับการลดลงของค่า R_t เมื่อความเร็วของอากาศระบายความร้อนเพิ่มขึ้นนั้น หากพิจารณาสมการที่ (1) จะเห็นว่า อัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นตามความเร็วลม และพิจารณาสมการ (2) จะเห็นว่า หากอัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าความต้านทานลดลง ดังนั้นสรุปได้ว่าการเพิ่มความเร็วของอากาศระบายความร้อนทำให้ค่าความต้านทานความร้อนลดลง

6. สรุปผลการวิจัย

การเปรียบเทียบสมรรถนะทางความร้อนระหว่าง CVC และ LVC ทั้งกรณีเติมและไม่เติมสารทำงาน รวมทั้งการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่จ่ายให้กับส่วนทำระเหย และความเร็วของอากาศที่ใช้ระบายออกจากส่วนทำระเหย สรุปได้ดังนี้

LVC มีความสามารถถ่ายโอนความร้อนผ่านตัวเองได้มากกว่า CVC ซึ่งกรณีเติมสารทำงานทั้ง CVC และ LVC ทำให้สมรรถนะทางความร้อนสูงกว่าการไม่เติมสารทำงาน รวมทั้งค่าความร้อนที่ระบายออกจากส่วนควบแน่นเพิ่มขึ้นตามความเร็วลมที่ใช้ระบายและอุณหภูมิของแหล่งจ่าย นอกจากนี้ยังสรุปได้ว่าความต้านทานความร้อนลดลงเมื่อความเร็วของอากาศที่ใช้ระบายความร้อนออกจากส่วนควบแน่นเพิ่มขึ้นตาม

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณศูนย์ประสานงานนักเรียนทุนรัฐบาลทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (ศนวท.) กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่สนับสนุนงบประมาณสำหรับการทำวิจัยนี้

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] R. Boukhanouf, A. Haddad, M.T. North and C. Buffone, “Experimental investigation of a plate heat pipe performance using IR thermal imaging camera”, *Applied Thermal Engineering*, 26, 2006, pp. 2148-2156.
- [2] T. E. Tsai, H. H. Wu, C. C. Chang and Sih-Li Chen, “Two-phase closed thermosyphon vapor-chamber system for electronic cooling”, *International communications in Heat and Mass Transfer*, 37, 2010, pp. 484-489.
- [3] S. S. Hsieh, R. Y. Lee, J. C. Shyu and S. W. Chen, “Thermal performance of flat vapor chamber heat spreader”, *Energy Conservation and Management*, 49, 2008. Pp. 1774-1784.
- [4] S. F. Wang, J. Chen, Y. Hu and W. Zhang. “Effect of evaporation section and condensation section length on thermal performance of flat plate heat pipe”, *Applied Thermal Engineering*, 31, 2011, pp. 2367-2373.
- [5] S. C. Wong, S. F. Huang and K. C. Hsieh, “Performance tests on novel vapor chamber”, *Thermal Engineering*, 31, 2011, pp. 1757-1762.
- [6] S. Lips, F. Lefevre and Bonjour, “Combined effects of the filling ratio and the vapour space thickness on the performance of a flat heat pipe”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53, 2010, pp. 694-702.
- [7] S. C. Wong, K. C. Hsieh, J. D. Wu and W. L. Han, “A novel vapor chamber and its performance”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53, 2010, pp. 2377-2384.

ภาคผนวก ค

อนุสิทธิบัตร

ภาคผนวก ง
ประวัติส่วนตัวนักวิจัย

ประวัติส่วนตัวของ นายวสันต์ ศรีเมือง



ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วสันต์ ศรีเมือง

Email: wasan.sr@rmuti.ac.th, w.srimuang@hotmail.com

- Name** : Dr. Wasan Srimuang
- Date of birth** : June 06, 1975
- Nationality** : Thai
- Religion** : Buddhism
- Home Address** : 707/313 Moo 8, Nongbuasala, Muang District,
Nakhonrachasima Province, 30000
- Office** : Heat pipe heat exchanger research laboratory,
Department of Mechanical Engineering,
Rajamagala University of Technology Isan (RMUTI),
Suranarai Rd. Muang District, Nakhonrachasima, Thailand.
- Telephone number** : 087-0055449, 087-6552493, 044-242978 ext 3410
- Education**
- 1994-1997 : B.Eng (Mechanical Engineering)
Rajamagala Institute of Technology, Nakhonrachasima
Campus (RIT), Thailand.
- 2002-2004 : M.Eng (Mechanical Engineering)
Srinakarinwirot University (SWU), Nakornnayok, Thailand.

2006-2009 : Ph.D. (Mechanical Engineering), Mahasarakham University (MSU), Thailand.

Teach : Heat Transfer, Thermodynamics, Fluid Mechanics, Fluid Machinery, CFD, and ME. Project.

Research

ผลงานเผยแพร่งานวิจัยระดับชาติ

ประเภทการประชุมสัมมนา

1. วสันต์ ศรีเมือง, วรณวิไล ไกรเพชร, อโณทัย สุขแสงพนมรุ่ง, การคำนวณระเบียบวิธีเชิงตัวเลขของการไหลภายในไซโคลน, การประชุมวิชาการองค์การเครือข่ายวิศวกรรมการบินและปรับอากาศ ครั้งที่ 2, วันที่ 18-19 สิงหาคม 2547, จังหวัดเชียงใหม่.

2. W. Srimuang, A. Suksangpanomrung and W. Kraipech, **A study of the effect of the cyclone geometry on its flow behavior by using CFD method**, 18th Mechanical Engineering network of Thailand, Khon Khan University, Thailand , October 2004, P.58-66.

3. วสันต์ ศรีเมือง. ๒๕๕๐. **การพัฒนาเครื่องจักรสำหรับการผลิตคอนกรีตบล็อกในโรงงานอุตสาหกรรม**. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์ ครั้งที่ ๕ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ระหว่างวันที่ ๑๐-๑๑ พฤษภาคม ๒๕๕๐ ณ โรงแรมภูเก็ตแกรนด์รีสอร์ท & สปาร์ จังหวัดภูเก็ต. จำนวน ๖ หน้า.

4. วสันต์ ศรีเมือง และ มงคล คชาพันธ์. ๒๕๕๐. **การพัฒนาเครื่องตัดและถ่างขนาดเล็กสำหรับกัญญ์**. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ ๒๑ ระหว่างวันที่ ๑๗-๑๙ ตุลาคม ๒๕๕๐ ณ โรงแรมเวลคัม จอมเทียน บีช จังหวัดชลบุรี. จำนวน ๖ หน้า.

5. วสันต์ ศรีเมือง และ ธวัชชัย ประมวลรัมย์. ๒๕๕๑. **การพัฒนาเครื่องอัดเม็ดระบบเพลเลทมิลล์ให้ทำงานร่วมกับเครื่องผสมแบบเพลลานอนโดยใช้เครื่องต้นกำลังร่วมกัน**. การประชุมวิชาการเครือข่าย

วิศวกรรมเครื่องกลแห่งชาติ ครั้งที่ ๒๒ ระหว่างวันที่ ๑๕-๑๗ ตุลาคม ๒๕๕๑ ณ สถาบันพัฒนาวิสาหกิจขนาดกลางและย่อม มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ รังสิต จังหวัดปทุมธานี. จำนวน ๗ หน้า.

ผลงานเผยแพร่งานวิจัยระดับนานาชาติ

International conference

1. W. Srimuang and S. Rittidech, **Effect of working fluid, filling ratio and hydraulics radius on heat transfer characteristics of a vertical flat shape thermosyphon**, 9th International symposium heat pipe, Monash University, Malaysia, November 2008, P.75-79.
2. W. Srimuang and P. Amtachaya and B. Krittacom, **Thermal performance of a flat two phase closed thermosyphon (FTPCT) with different cross-sectional areas and temperature of heat source**. 10th International symposium heat pipe, Taipei, Taiwan, 2011, Nov. 6-9, 2011.
3. P. Khantikomol and W. Srimuang, **An experimental investigation of heat transfer characteristics of a closed-end oscillating flat heat pipe (CEOFHP)**, 10th International symposium heat pipe, Taipei, Taiwan, 2011, Nov. 6-9, 2011.
4. B. Krittacom, P. Amtachaya, W. Srimuang and K. Inla, **The pack-bed sphere liquid porous burner**, World academy of science, Engineering and Technology, 81(2011), 80-84.
5. W. Srimuang and P. Khantikomol, **Investigation of effectiveness of a closed-end flat thermosyphon heat exchanger (CEFTHE)**, The second TSME International Conference on Mechanical Engineering, Krabi, Thailand, 2011, Oct. 19-21, 2011.
6. P. Khantikomol and W. Srimuang, **A numerical analysis of gas enthalpy-radiation converter (GERC) by Using single cordierite open-cellular porous plate**. The second TSME International Conference on Mechanical Engineering, Krabi, Thailand, 2011, Oct. 19-21, 2011.

International journal

1. W. Srimuang, S. Rittidech, and B. Bubphachot, **Heat transfer characteristics of a vertical flat thermosyphon (VFT)**, Journal of Mechanical Science and Technology, 23 (2009) 2548~2554.
2. P. Amatachaya, W. Srimuang, **Comparative heat transfer characteristics of a flat two-phase closed thermosyphon (FTPCT) and a conventional two-phase closed thermosyphon (CTPCT)**, International Communications in Heat and Mass Transfer, 37 (2010) 293–298.
3. W. Srimuang, S. Rittidech, **Correlation to predict heat-transfer characteristics of a vertical flat thermosyphon (VFT) at normal operating conditions**, International journal of Heat and Mass Transfer, 53 (2010) 5984-5987.
4. W. Srimuang and P. Amtachaya, **A review of the applications of heat pipe heat exchangers for heat recovery**, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16 (2012).

ผลงานหนังสือ

1. วสันต์ ศรีเมือง. ๒๕๕๑. **กลศาสตร์ของไหลประยุกต์**. กรุงเทพฯ. บริษัท แดเน็กซ์อินเตอร์คอร์ปอเรชั่น จำกัด. ๔๗๔ หน้า.
2. วสันต์ ศรีเมือง. ๒๕๕๑. **เทอร์โมไดนามิกส์**. นครราชสีมา. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน. ๔๑๙ หน้า.

วิศวกรที่ปรึกษาด้านอนุรักษ์พลังงานและการตรวจสอบอาคาร

1. บริษัทอิตันอินดัสทรี (ประเทศไทย) จำกัด จ. นครราชสีมา
2. บริษัท เคอาร์เอ็นจีเนียริง แอนด์อินสเปคชัน จำกัด

ใบอนุญาตประกอบวิชาชีพ

1. ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภา. ๒๐๓๐๖
2. ผู้ตรวจสอบอาคาร เลขที่ใบอนุญาต บ. ๒๐๘๕/๒๕๕๒

ภาคผนวก จ

เอกสารอื่นๆ