

สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนและการไหลของสารทำความเย็น R-134a
ที่ไหลผ่านอุปกรณ์ระบายความร้อนที่มีครีบบางขนาดเล็ก
Heat transfer performance and flow feature of refrigerant R-134a
flowing through miniature pin-fin heat sinks

ทแก้ว เยี่ยมสวัสดิ์ และ วีระพันธ์ ดั่งวงทองสุข*

¹ สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
19/1 ถนนเพชรเกษม แขวงหนองค้างพลู เขตหนองแขม กรุงเทพฯ 10160

*ติดต่อ: weerapund@sau.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนและความดันลดจากการไหลแบบสองสถานะของสารทำความเย็น R-134a ที่ไหลผ่านอุปกรณ์ระบายความร้อนแบบครีบบางขนาดเล็ก โดยอุปกรณ์ระบายความร้อนแบบครีบบางที่ใช้ในการทดลองนี้จะทำมาจากทองแดง และมีครีบบาง 2 แบบ คือ แบบครีบบางสี่เหลี่ยมข้าวหลามตัดและแบบวงรี สำหรับฝากรอบอุปกรณ์ระบายความร้อนแบบครีบบางทั้งสองแบบนี้ทำจากอะคริลิกใสเพื่อสังเกตลักษณะการไหลแบบสองสถานะที่เกิดขึ้น สำหรับการจำลองภาระความร้อนที่เกิดขึ้นที่อุปกรณ์ระบายความร้อนนั้นทำได้โดยใช้ฮีทเตอร์ไฟฟ้าขนาด 100 วัตต์ และสามารถปรับภาระความร้อนนี้ได้โดยใช้อุปกรณ์ปรับแรงดันไฟฟ้า เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของฟลักซ์ความร้อนและคุณภาพไอที่มีต่อสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนและพฤติกรรมการไหลแบบสองสถานะที่ไหลผ่านอุปกรณ์ระบายความร้อนทั้งสองแบบ

คำหลัก: การไหลสองสถานะ; อุปกรณ์ระบายความร้อน; สารทำความเย็น; สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

Abstract

This research presents the two-phase heat transfer and pressure drop characteristics of refrigerant R-134a flowing through heat sink with different miniature pin fin structures, experimentally. Heat sinks with rhombus and oval miniature pin-fin structures are investigated and compared. They are made from copper material. Acrylic material is used to make the cover plate in order to monitor the two-phase flow behavior while passing the test section. In order to supply heat load to the test section, a 100 watts electric heater with voltage regulator is used. Effects of heat flux and vapor quality on the heat transfer performance and pressure drop of R-134a flows in two different heat sinks are reported

Keywords: two-phase flow; heat sink; refrigerant; heat transfer coefficient

1. บทนำ

ด้วยความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีการผลิตทางด้านอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในปัจจุบัน สามารถที่จะผลิตอุปกรณ์ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งส่งผลให้เกิดการพัฒนาอุปกรณ์เครื่องมือต่างๆที่เกี่ยวข้องหรือมีส่วนประกอบของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ให้มี

ประสิทธิภาพสูงขึ้นไปพร้อมๆกัน โดยแนวทางในการพัฒนานั้นจะมุ่งเน้นไปที่การเพิ่มสมรรถนะการทำงานให้มีความสูงขึ้น โดยขณะที่ควบคุมให้มีขนาดหรือพื้นที่การติดตั้งที่เล็กลง หรืออาจจะกล่าวได้ว่าออกแบบให้มีขนาดเล็กโดยที่สมรรถนะการทำงานยังคงเท่าเดิม อย่างไรก็ตามกลับพบว่าอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่พัฒนาตามแนวทาง

ดังกล่าวเมื่อในไปใช้งานจริงจะประสบกับปัญหาทางด้าน ความร้อนหรือมีอุณหภูมิการทำงานที่สูงขึ้นอัน เนื่องมาจากในการเพิ่มสมรรถนะการทำงานนั้นมักจะ ตามมาด้วยความต้องการพลังงานไฟฟ้าที่มากขึ้น โดย พลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นส่วนหนึ่งจะถูกเปลี่ยนเป็นความร้อน และมากไปกว่านั้นพื้นที่การถ่ายเทความร้อนที่มีอยู่ อย่างจำกัดอันเนื่องมาจากการออกแบบให้มีขนาดของ อุปกรณ์ที่เล็กลง จะส่งผลให้มีค่าความร้อนต่อพื้นที่เพิ่ม สูงขึ้นไปอีก ความร้อนหรืออุณหภูมิที่สูงขึ้นจะส่งผล กระทบโดยตรงต่อค่าความต้านทานทางไฟฟ้า ซึ่งเป็น สาเหตุหนึ่งที่สำคัญที่ทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของ อุปกรณ์ลดต่ำลงหรือมีความไม่เสถียรภาพเกิดขึ้น และ ความร้อนสะสมภายในอุปกรณ์ที่เกิดจากการใช้งานอย่าง ต่อเนื่อง อาจก่อให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ได้ ดังนั้น เพื่อให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีสมรรถนะสูงและมีขนาด สามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องด้วยไม่ประสบปัญหา ทางด้านความร้อนสะสม อุปกรณ์ระบายร้อนจึงมีความ จำเป็นที่จะต้องถูกนำมาใช้

อุปกรณ์ระบายความร้อนแบบของไหลสถานะเดียว (single-phase flow heat sink) เป็นที่นิยมนำมาใช้กับ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากมีส่วนประกอบที่ไม่ ซับซ้อน ง่ายต่อการติดตั้ง โดยของไหลที่ใช้ในการถ่ายเท ความร้อนมีทั้งสถานะก๊าซและของเหลว เช่น อากาศ น้ำ เอธิลีนไกลคอล เป็นต้น รวมถึงลักษณะการขับเคลื่อนที่มี ทั้งแบบธรรมชาติและแบบบังคับ โดยจะอาศัยการถ่ายเท ความร้อนในรูปของความร้อนสัมผัส (Sensible heat) แต่เพียงเท่านั้น หากเปรียบเทียบระหว่างสารทำงานที่เป็น สถานะของเหลวกับสถานะก๊าซแล้ว ก็จะพบสารทำงาน โดยทั่วไปที่เป็นของเหลวจะมีค่าความจุความร้อนที่สูงกว่า ซึ่งถ้าต้องการเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนให้มีค่าสูง ควรจะต้องเลือกใช้ของไหลทำงานในสถานะของเหลว นั้น หมายความว่าจำเป็นต้องเพิ่มพลังงานเพื่อสำหรับใช้ขับเคลื่อน (Pumping power) ให้มากขึ้นตามไปพร้อมๆกันด้วย นอกเหนือจากการเลือกใช้ของไหลทำงานที่มีค่าความจุ ความร้อนที่ดีแล้ว การเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนหรือ สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนให้กับอุปกรณ์ระบายความ ร้อนแบบสถานะเดียวยังทำได้ในอีกหลายแนวทาง เช่นดัง ตัวอย่างที่ปรากฏอยู่ในงานวิจัยต่างๆ ต่อไปนี้ การพัฒนา ปรับปรุงรูปแบบของพื้นที่ผิวถ่ายเทความร้อนและ ช่องทางการไหล เช่น พัฒนาออกแบบให้มีช่องทางการ ไหลขนาดเล็กมาก [1-4] หรือใช้ครีบบางระบายความ

ร้อนขนาดเล็ก [5-8] การศึกษาปรับปรุงคุณสมบัติการ ถ่ายเทความร้อนและคุณสมบัติของของไหลทำงาน เช่น การใช้ของไหลนาโน (Nano fluid) [9-12]

จากที่กล่าวข้างต้นก็จะเห็นได้ว่าอุปกรณ์ระบายความ ร้อนแบบสถานะเดียวที่อาศัยกลไกแลกเปลี่ยนร้อนความ ร้อนสัมผัสยังมีข้อจำกัดอยู่ ดังนั้นอุปกรณ์ระบายความ ร้อนแบบของไหลทำงานสองสถานะที่อาศัยการถ่ายเท ความร้อนในรูปของความร้อนแฝง (Latent heat) จึงถูก พิจารณาเลือกใช้แทนแบบสถานะเดียว ด้วยอัตราการ ถ่ายเทความร้อนที่สูงกว่าเนื่องจากการเปลี่ยนสถานะของ สารทำงาน ก็อาจจะกล่าวได้ว่าความต้องการปริมาณการ ไหลของสารทำงานจะมีค่าต่ำกว่าแบบสถานะเดียวเมื่อ เทียบที่อัตราการถ่ายเทความร้อนเท่ากัน หรือหมายถึงจะ ใช้พลังงานในการขับเคลื่อนสารทำงานในระบบที่ต่ำกว่า อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าอุปกรณ์ระบายความร้อนแบบสาร ทำงาน 2 สถานะจะมีสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนที่สูง กว่าแบบสารทำงานสถานะ ใดอย่างใดก็ตามก็ยังมีข้อจำกัดที่จะ หยุดการพัฒนาได้ มันยังคงมีความจำเป็นที่ต้อง ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้ทันต่อการพัฒนา อย่างรวดเร็วของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในปัจจุบันที่มี ขนาดเล็กลงและมีการใช้พลังงานเพิ่มขึ้น แนวทางหรือ วิธีการหนึ่งในการพัฒนาเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความ ร้อนให้กับอุปกรณ์ระบายความร้อนแบบสารทำงาน 2 สถานะที่ใช้ในอุปกรณ์ขนาดเล็กก็คือ การใช้วิธีการขยาย พื้นที่ผิวถ่ายเทความร้อนด้วยการทำให้ช่องทางการไหลมี ขนาดเล็กหรือการใช้ครีบบางระบายความร้อนขนาดเล็ก จาก การค้นคว้างานวิจัยในอดีตผ่าน พบว่าในช่วงแรกๆของ การศึกษาวิจัยนั้น นักวิจัยจะมุ่งเน้นไปที่การออกแบบให้ อุปกรณ์ระบายความร้อนที่ใช้ช่องทางการไหลขนาดเล็ก [13-16] ซึ่งก็ให้ผลลัพธ์ที่ดีของการเพิ่มขึ้นของอัตราการ ถ่ายเทความร้อนซึ่งเป็นผลอันเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของ พื้นที่ผิวการถ่ายเทความร้อนและรูปแบบการไหลของของ ไหลแบบใหม่ๆในระดับไมโคร(micro scale) อย่างไรก็ตามอีกวิธีการหนึ่งที่ได้รับ ความสนใจจากนักวิจัยใน ปัจจุบัน ก็คือ การใช้ครีบบางระบายความร้อนขนาดเล็ก (Mini/Micro pin fin) ซึ่งคาดว่าพื้นที่ผิวการถ่ายเทความ ร้อนที่มีมากขึ้นและซับซ้อนกว่าแบบช่องทางการไหล ขนาดเล็กแต่เพียงอย่างเดียวจะช่วยเพิ่มพื้นที่ก่อการ เตือด (Nucleation site) ของสารทำงาน ซึ่งอาจจะเป็น การช่วยสามารถเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนให้ดี ยิ่งขึ้น ดังตัวอย่างงานวิจัยที่เกี่ยวกับอุปกรณ์ระบายความ

ร้อนแบบครีบบางขนาดเล็กที่ใช้สารทำงาน 2 สถานะมีดังนี้

Honda และคณะ [17] ได้ศึกษาการถ่ายเทความร้อนของอุปกรณ์ระบายความร้อนแบบครีบบางสี่เหลี่ยมขนาดเล็ก โดยครีบบางมีขนาดกว้าง 100 μm , สูง 60 μm จัดเรียงแบบแถวตรง อุณหภูมิ sub-cooling ของสารทำงานชนิด FC-72 ในเท่ากับ 45°C และค่าอัตราการความร้อนต่อพื้นที่คือ 620 kW/m^2 ผลการศึกษาพบว่า การถ่ายเทความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้น และผู้วิจัยให้เหตุผลว่าเป็นผลมาจากเกิดกลุ่มไอก๊าซเกาะระหว่างครีบบาง ซึ่งเป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ก่อนการเดือด

Lie และคณะ [18] ศึกษาพฤติกรรมการเดือดบนพื้นที่ผิวถ่ายเทความร้อนแบบครีบบางสี่เหลี่ยมของสารทำงาน FC-72 ไหลผ่าน โดยครีบบางมีด้วยกัน 2 ขนาด คือ ขนาด 200 μm , ระยะห่างครีบบาง 400 μm และขนาด 100 μm , ระยะห่างครีบบาง 200 μm และสูง 70 μm เท่ากันทั้งสองขนาด ลักษณะการวางเป็นแบบแถวเรียง อัตราความร้อนต่อพื้นที่คือ 1 ถึง 100 kW/m^2 และอัตราการไหลต่อพื้นที่ของสารทำงานคือ 287 ถึง 431 $\text{kg/m}^2\text{s}$ ผลการทดลองพบว่าอัตราการไหลของสารทำงานต่อพื้นที่ที่มีผลต่ออุณหภูมิเริ่มต้นของการเดือดเป็นไอ แต่ไม่มีผลต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน แลพบว่าครีบบางที่มีขนาดเล็กกว่าสามารถถ่ายเทความร้อนดีกว่าครีบบางขนาดใหญ่กว่า

Kosar และ Peles [19] ทำการทดลองพฤติกรรม การเดือดของสารทำงาน R-123 ที่ไหลบนครีบบางรูปทรง Hydrofoil ขนาดความกว้าง 100 μm , ยาว 500 μm , สูง 243 μm และเส้นขอบเปียก (Wetted perimeter) ยาว 1.03 mm และความดันที่ทดลองอยู่ในช่วง 486 – 539 kPa ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าพฤติกรรม การเดือดในช่วงการก่อกำเนิดฟองก๊าซมีค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนที่สูงกว่าในช่วงการเดือดแบบการพาความร้อน (Convective boiling) และยังพบอีกว่าฟลักซ์ความร้อนและความเร็วในการไหลของสารทำงานมีผลต่อรูปแบบการไหลที่เกิดขึ้น

Krishnamurthy และ Peles [20] ได้ทดลองและสังเกตพฤติกรรม การไหลของน้ำ และสารผสมไนโตรเจน-เอทานอลที่ไหลผ่านครีบบางระบายความร้อนที่จัดเรียงแบบสลับฟันปลา ครีบบางมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 μm , สูง 10 μm และแต่ละแถวมีระยะห่างระหว่างกัน 150 μm จากการศึกษาทดลองพบว่าผลของแรงตึงผิวมี

อิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการไหลและความดันตกคร่อม โดยค่าความดันตกคร่อมที่เกิดขึ้นเมื่อใช้น้ำเป็นสารทำงานจะมีค่าที่สูงกว่าสารผสมไนโตรเจน-เอทานอลอันเป็นผลมาจากสารผสมไนโตรเจน-เอทานอลค่าแรงตึงผิวที่ต่ำกว่า

Qu และ Siu-Ho [21] ศึกษาค่าความดันลดในอุปกรณ์ระบายความร้อนแบบครีบบางสี่เหลี่ยมจัดรูสลับเป็นผลจากการเดือดของน้ำที่ไหลผ่านด้วยอัตราการไหล 183 – 420 $\text{kg/m}^2\text{s}$ โดยครีบบางมีขนาดกว้าง 200 μm , สูง 670 μm จำนวน 1950 ครีบบาง จัดเรียงแบบสลับฟันปลา มีระยะห่างระหว่างแถว 400 μm ในการทดลองอุณหภูมิ sub-cooling เท่ากับ 10 และ 70 K ฟลักซ์ความร้อนมีค่า 23.7 – 248.5 W/cm^2 ผลการทดลองพบว่าค่าคุณภาพโอของสารทำงานมีผลอย่างมากต่อค่าความดันลด และพบว่าในช่วงการเดือดแบบอิ่มตัวค่าความดันลดจะมีค่าสูงช่วงอื่น

Chang และคณะ [22] ทำการวิจัยเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนในการเดือดแบบไหลของ FC-72 บนอุปกรณ์ชิปอิเล็กทรอนิกส์ซิลิกอน (Silicon chip) โดยชุดครีบบางระบายความร้อนและเงื่อนไขการทดลองต่างๆ เหมือนกับที่ใช้ในงานของ Lie และคณะ [17] โดยในการศึกษาได้พิจารณาเพิ่มเติมถึงอุณหภูมิ Sub-cooling ในช่วง 2.3 ถึง 4.3°C จากการทดลองพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของอุปกรณ์ระบายแบบครีบบางมีค่าสูงกว่าแผ่นระบายความร้อนที่ไม่มีครีบบางเด่นชัด และพบว่าเมื่อเพิ่มค่าของอัตราการไหลต่อพื้นที่และอุณหภูมิ sub-cooling ที่ทางเข้าจะส่งผลให้ขนาดเฉลี่ยของฟองก๊าซที่หลุดลอยจากผิวความร้อนและความหนาแน่นของฟองก๊าซของบริเวณกำเนิดฟองก๊าซมีค่าลดลง

McNeil และคณะ [23] ศึกษาค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนและความดันตกคร่อมของสารทำงาน R-113 ในอุปกรณ์ระบายความร้อนที่ใช้ครีบบางสี่เหลี่ยมจัดรูสลับขนาด 1 mm, สูง 1 mm ระยะห่าง 2 mm การจัดเรียงของครีบบางเป็นแบบแถวเรียง ฟลักซ์มวลอยู่ในช่วง 100-500 kg/m^2 และมีค่าฟลักซ์ความร้อน 10 – 135 kW/m^2 ผลการทดลองพบว่าค่าฟลักซ์ความร้อนมีอิทธิพลต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของการเดือดแบบอิ่มตัว (Saturated boiling) แต่เพียงอย่างเดียว ขณะที่ค่าฟลักซ์มวลไม่มีผลแต่อย่างใด

Xue และคณะ [24] ทำศึกษาเปรียบเทียบระหว่างการถ่ายเทความร้อนของสารทำงาน FC-72 บนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบชิพซิลิกอนที่ติดตั้งครีบบางสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาดกว้าง 30 μm , สูง 60 μm กับกรณีที่ไม่มีการติดตั้งครีบบาง สารทำงานไหลที่มีความเร็ว 1 m/s อุณหภูมิ sub-cooling เท่ากับ 25 และ 35°C ผลการทดลองพบว่าการใช้ครีบบางระบายความร้อนขนาดเล็กสามารถเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนให้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้ดีกว่าไม่มีการติดตั้งครีบบาง

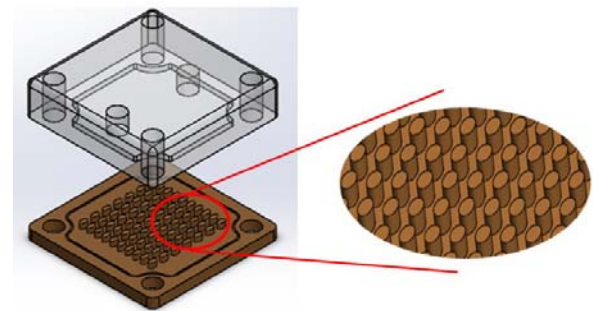
McNeil และคณะ [25] ทำการศึกษาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและค่าความดันตกของสารทำงาน R 113 ในอุปกรณ์ระบายความร้อนแบบครีบบางสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยครีบบางมีขนาดหน้าตัด 1 mm, สูง 1mm จัดแถวแบบขนานกัน อัตราการไหลอยู่ในช่วง 200–600 $\text{kg/m}^2\text{s}$ และค่าความร้อนต่อพื้นที่ 5–80 kW/m^2 ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนไม่ขึ้นอยู่กับค่าพลาซึมวลและคุณภาพไอ แต่จะขึ้นอยู่กับค่าพลาซึมวลความร้อนในบางค่า

จากตัวอย่างงานวิจัยที่ทำการสำรวจข้างต้น พบว่างานวิจัยส่วนใหญ่จะมุ่งเน้นศึกษาไปที่ผลกระทบของสภาพการทำงานของสารทำงานหรือขนาดและการจัดวางของครีบบาง โดยผลลัพธ์ให้ผลไปในทิศทางที่ใกล้เคียงกัน การใช้ครีบบางระบายความร้อนขนาดเล็กสามารถช่วยเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนให้ดีขึ้นกว่าการใช้พื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่ปราศจากครีบบางหรือการใช้ครีบบางที่มีขนาดใหญ่ และความดันตกคร่อมพบว่าจะมีค่ามากขึ้นเช่นกันมากไปกว่านั้น การศึกษาโดยส่วนมากรูปทรงและลักษณะครีบบางมีความคล้ายคลึงกัน ซึ่งการศึกษาที่มุ่งเน้นไปที่ผลของรูปทรงลักษณะของครีบบางขนาดเล็กยังคงมีอยู่จํานวนน้อยและข้อมูลมีอย่างจำกัด และมันควรจะได้รับการศึกษาไปพร้อมกับปัจจัยอื่นๆ เพราะอาจจะเป็นตัวแปรตัวหนึ่งที่สำคัญและมีผลต่อทั้งการถ่ายเทความร้อนและพฤติกรรมการไหล อีกทั้งยังพบว่าไม่มีการใช้สารทำงานชนิดที่มีอุณหภูมิ/ความดันจุดเดือดที่มีค่าต่างๆ ในการศึกษาทดลองที่ผ่านมา ดังนั้นในการศึกษาวิจัยครั้งนี้จะมุ่งเน้นและให้ความสำคัญไปที่ลักษณะรูปทรงของครีบบางระบายความร้อนขนาดเล็ก โดยครีบบางรูปทรงวงรีจะถูกนำมาศึกษาเปรียบเทียบกับครีบบางรูปทรงสี่เหลี่ยมข้าวหลามตัด การถ่ายเทความร้อนเป็นแบบสองสถานะจากการเดือดที่มีการไหลของสารทำงานชนิด R134a โดยข้อมูลที่ได้รับความคาดว่าจะจะเป็นประโยชน์ต่อการนำไปใช้

ประกอบการใช้หรือออกแบบอุปกรณ์ระบายความร้อนขนาดเล็กที่สามารถประยุกต์ใช้ในงานจริง

2. อุปกรณ์การทดลอง

ในการศึกษาครั้งนี้ อุปกรณ์ถ่ายเทความร้อนแบบครีบบางระบายความร้อนชนิดครีบบางสี่เหลี่ยมข้าวหลามตัด (Rhombus fin) และชนิดครีบบางวงรี (Oval fin) ได้ถูกนำมาใช้ โดยทั้งสองทำจากทองแดงและผ่านกรรมวิธีผลิตด้วยเครื่องจักรที่ควบคุมความละเอียดและความแม่นยำสูง เพื่อตัดผลกระทบเนื่องจากขนาดของครีบบางที่อาจจะมีผลต่อการทดลอง จึงได้ออกแบบให้มีค่าเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกของครีบบาง, ความสูง และระยะห่างหรือช่องว่างการไหลระหว่างครีบบางให้มีขนาดที่เท่ากัน คือผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกของครีบบางเท่ากับ 1 mm ความสูง 1 mm และช่องว่างระหว่างครีบบางเท่ากับ 1 mm โดยครีบบางสี่เหลี่ยมข้าวหลามตัดนั้นเมื่อรวมพื้นที่ผิวด้านข้างของครีบบางและพื้นที่ฐานครีบบางแล้วจะมีพื้นที่ผิวแลกเปลี่ยนความร้อนโดยรวมเท่ากับ 1450.57 mm^2 สำหรับครีบบางวงรี มีพื้นที่ผิวแลกเปลี่ยนความร้อนรวมเท่ากับ 1438.12 mm^2 ลักษณะรูปร่างของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนทั้งสองแสดงไว้ดังรูปที่ 1

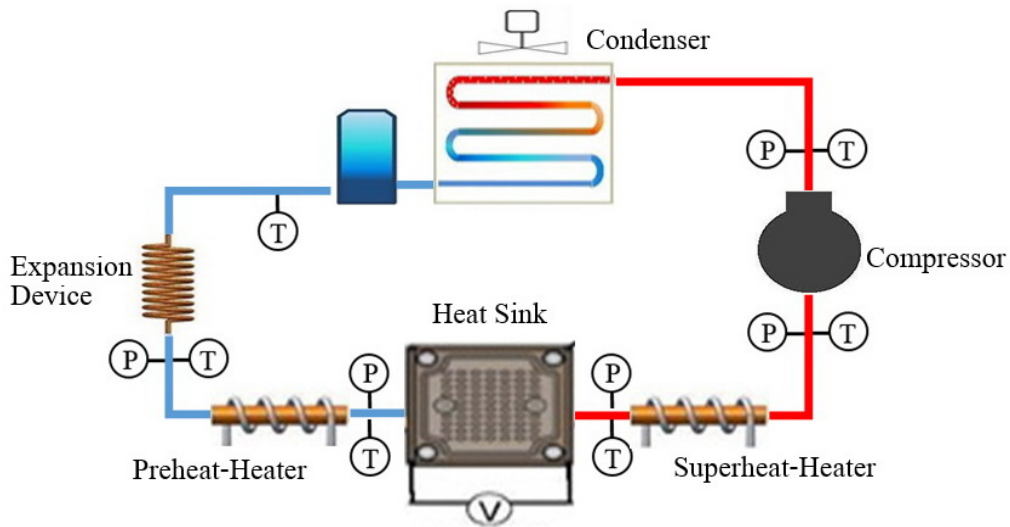


รูปที่ 1 ภาพขยายครีบบางระบายความร้อนแบบวงรี

รูปที่ 2 แสดงส่วนประกอบและวงจรการทำงานของอุปกรณ์การทดลอง โดยรายละเอียดการทำงานมีดังนี้ คอมเพรสเซอร์ดูดและอัดส่งสารทำงาน (สารทำความเย็น R-134a) ความดันสูงและอุณหภูมิสูงไปยังเครื่องควบแน่น โดยกำหนดให้สารทำงานควบแน่นเป็นของเหลวที่อุณหภูมิประมาณ 50°C จากนั้นสารทำงานจะถูกลดความดันโดยการไหลผ่านอุปกรณ์ลดความดัน (Expansion Valve) สารทำงานในสถานะของผสมที่มีความดันต่ำและอุณหภูมิต่ำจะถูกปรับค่าคุณภาพไอให้ได้ค่าตามที่ต้องการก่อนเข้าส่วนทดลองด้วยเครื่องอุ่นฮีตเตอร์ไฟฟ้า หลังจากนั้นที่ส่วนทดลอง ฮีตเตอร์ไฟฟ้าแบบ

แผ่น ขนาด 100 W จะเป็นตัวให้ภาระความร้อนแก่สารทำงานผ่านทางด้านล่างของพื้นผิวระบายความร้อน โดยที่อุปกรณ์ระบายความร้อนและฮีตเตอร์ไฟฟ้าถูกออกแบบให้สวมอยู่ในวัสดุพลาสติกที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนทางความร้อนเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนออกนอกระบบ สำหรับการควบคุมไม่ให้เกิดการถ่ายเทความร้อนที่พื้นที่ส่วนด้านบนของปลายครีบ จึงมีการใช้แผ่นอะคริลิกโปร่งใสปิดทับแนบสนิทกับส่วนบนของครีบ ป้องกันการไหลของสารทำความเย็นไหลท่วมหรือสัมผัสพื้นที่ด้านบนของครีบ และการเลือกใช้แบบโปร่งใสก็เพื่อให้สามารถสังเกตพฤติกรรมและรูปแบบการไหลได้ที่

ส่วนทดลองนี้สารทำความเย็นรับความร้อนแฝงทำให้เกิดการเปลี่ยนสถานะเป็นไอมากขึ้น แต่อาจจะยังคงอยู่ในสถานะของผสม ดังนั้นเพื่อป้องกันความเสียหายแก่คอมเพรสเซอร์เนื่องจากสารทำงานในสถานะของเหลวที่กลายเป็นไอไม่หมด ฮีตเตอร์ไฟฟ้าให้ความร้อนอีกชุดหนึ่งจึงถูกนำมาติดตั้งที่ทางออกของส่วนทดลองเพื่อทำให้สารทำความเย็นเปลี่ยนเป็นไอก๊าซทั้งหมด สำหรับอุปกรณ์วัดค่าอุณหภูมิและความดันของสารทำงานเพื่อใช้ในการประเมินสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน ได้ถูกนำมาติดตั้งที่ตำแหน่งต่างๆ ดังแสดงตามรูป



รูปที่ 2 วงจรการทำงานอุปกรณ์การระบายความร้อนแบบครีบ

3. การคำนวณ

เพื่อตัดผลกระทบจากความแตกต่างของขนาดครีบ ดังนั้นขนาดช่องทางการไหลถูกแทนด้วยเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (D_h) ซึ่งคำนวณได้จาก

$$D_h = \frac{4A}{P} \quad (1)$$

ซึ่ง A หมายถึงพื้นที่หน้าตัดของช่องทางการไหล (m^2) และ P คือ เส้นขอบเปียก (m)

ค่าคุณภาพไอของสารทำความเย็นที่เข้าสู่ชุดทดสอบ (x_{in}) สามารถคำนวณได้จากการเปลี่ยนแปลงพลังงานเอนทัลปีที่เครื่องอุ่นสารทำงานก่อนเข้าสู่ชุดทดสอบ ดังนี้

$$x_{in} = \frac{h_{TS,in} - h_{f-TS,in}}{h_{fg-TS,in}} \quad (2)$$

โดยที่ $h_{TS,in}$ คือ เอนทัลปีของสารทำความเย็นก่อนเข้าสู่ชุดทดสอบ (kJ/kg), $h_{f-TS,in}$ คือ เอนทัลปีของสารทำความเย็นที่สถานะของเหลวก่อนเข้าสู่ชุดทดสอบ (kJ/kg) และ $h_{fg-TS,in}$ หมายถึง เอนทัลปีของสารที่กลายเป็นไอของสารทำงานก่อนเข้าสู่ชุดทดสอบ (kJ/kg)

สำหรับค่าเอนทัลปีของสารทำความเย็นก่อนเข้าสู่ชุดทดสอบ ($h_{TS,in}$) สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$h_{TS,in} = h_{PH,in} + \frac{Q_{PH}}{\dot{m}_r} \quad (3)$$

โดยที่ $h_{PH,in}$ หมายถึง เอนทัลปีของสารทำความเย็นในสถานะของเหลวก่อนเข้าตัวอุ่น (kJ/kg), Q_{PH} คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนที่ตัวอุ่น (W) และ \dot{m}_r คือ อัตราการไหลของสารทำความเย็น (kg/s)

อัตราการถ่ายเทความร้อนที่อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนก่อนเข้าสู่ชุดทดสอบ (Q_{PH}) สามารถคำนวณได้จากกำลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้ ดังนี้

$$Q_{PH} = V \times I \quad (4)$$

เมื่อ V คือ ค่าแรงดันไฟฟ้า (Volt) และ I หมายถึง ค่ากระแสไฟฟ้า (Amp) ที่ป้อนให้กับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนก่อนเข้าสู่ชุดทดสอบ

ค่าคุณภาพไอของสารทำความเย็นที่ออกจากชุดทดสอบ (x_{out}) สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$x_{out} = \frac{h_{TS,out} - h_{f-TS,out}}{h_{fg-TS,out}} \quad (5)$$

โดยที่ $h_{TS,out}$ หมายถึง เอนทัลปีของสารทำความเย็นที่ไหลออกจากชุดทดสอบ (kJ/kg), $h_{f-TS,out}$ คือ เอนทัลปีของสารทำความเย็นในสถานะของเหลวที่ไหลออกจากชุดทดสอบ (kJ/kg) และ $h_{fg-TS,out}$ คือ เอนทัลปีของการกลายเป็นไอของสารทำความเย็นที่ไหลออกจากชุดทดสอบ (kJ/kg)

ค่าเอนทัลปีของสารทำความเย็นไอที่ออกจากชุดทดสอบ ($h_{TS,out}$) สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$h_{TS,out} = h_{TS,in} + \frac{Q_{TS}}{\dot{m}_r} \quad (6)$$

เมื่อ Q_{TS} คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนที่ชุดทดสอบ (W) คำนวณได้จากกำลังงานไฟฟ้าที่ป้อนให้กับส่วนทดสอบ ดังนี้

$$Q_{TS} = V \times I \quad (7)$$

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการไหลสองสถานะของสารทำความเย็น (\tilde{h}_{TS}) สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\tilde{h}_{TS} = \frac{Q_{TS}}{A_s (T_{s,ave} - T_{r,ave})} \quad (8)$$

โดยที่ A_s คือ พื้นที่ผิวการถ่ายเทความร้อนของชุดทดสอบ (m^2), $T_{s,ave}$ หมายถึง อุณหภูมิผิวโดยเฉลี่ยของชุดทดสอบ (K) และ $T_{r,ave}$ คือ อุณหภูมิสารทำความเย็นโดยเฉลี่ยที่ไหลเข้าและออกจากชุดทดสอบ (K)

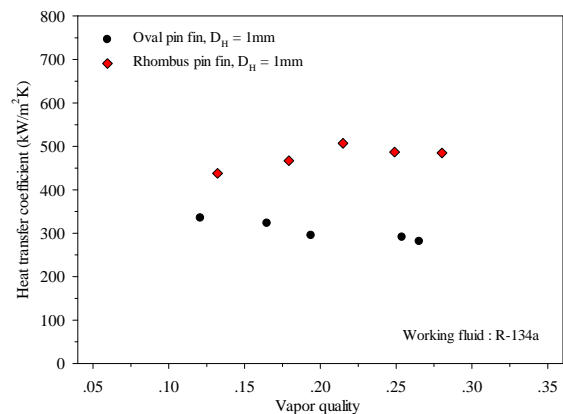
ค่าเลขเรโนลด์ สามารถคำนวณได้จาก

$$Re = \frac{GD_h}{\mu} \quad (9)$$

เมื่อ G คือ อัตราการไหลเชิงมวลต่อพื้นที่หน้าตัดของช่องทางการไหล ($kg/m^2 s$) และ μ คือ ความหนืดจลน์ของของไหลทำงาน ($kg/m s$)

4. ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

รูปที่ 3 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของอุปกรณ์ระบายความร้อนแบบครีบทังสี่เหลี่ยมข้าวหลามตัดกับครีบทังวงรีที่ค่าคุณภาพไอน้ำต่างๆ จากผลการทดลองเห็นได้ชัดว่าพบว่ามีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของอุปกรณ์ระบายความร้อนแบบครีบทังสี่เหลี่ยมข้าวหลามตัดให้ค่าที่สูงกว่าแบบทังวงรี โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ค่าคุณภาพไอน้ำสูงๆ อย่างไรก็ตามพบว่ามีความแตกต่างกันเมื่อพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงค่าคุณภาพไอในครีบทังแต่ละแบบ โดยพบว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของครีบทังสี่เหลี่ยมข้าวหลามตัดแปรผันตามความหนาแน่นเพิ่มขึ้นเมื่อค่าคุณภาพไอเพิ่มขึ้น แต่กลับพบว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของครีบทังวงรีมีแนวโน้มลดลงเมื่อค่าคุณภาพไอเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจจะเป็นผลมาจากการที่ไอสารทำงานที่ระเหยตัวรวมกันสะสมเป็นก้อนฟองก๊าซขนาดใหญ่และติดอยู่ในระหว่างครีบทังของช่องทางการไหล ซึ่งพบว่าปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นมากระหว่างการทดลองในกรณีที่ครีบทังเป็นวงรี

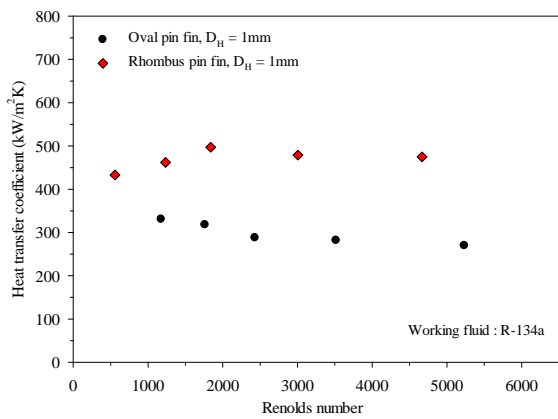


รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคุณภาพไอน้ำกับสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของอุปกรณ์ระบายความร้อนแบบครีบทังขนาดเล็ก

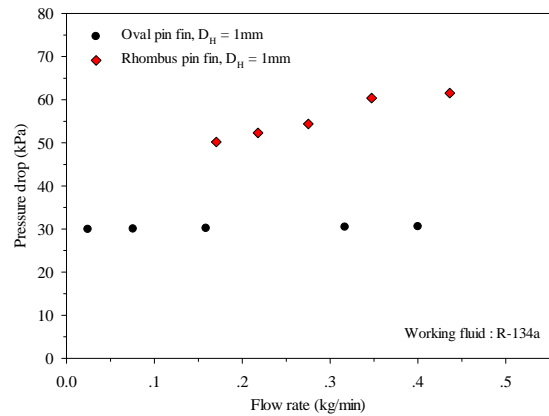
ผลของการไหลที่แสดงในรูปของค่าเลขเรโนลด์ที่มีผลต่อสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนได้แสดงไว้ดังรูปที่ 4 ซึ่งพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของครีบทังสี่เหลี่ยมข้าวหลามตัดแปรผันตามค่าเลขเรโนลด์ที่ค่าเลขเรโนลด์ต่ำๆ และดูเหมือนจะไม่เปลี่ยนแปลงที่ค่า

เลขเรโนลด์สูงๆ ขณะที่ครีบบางวงรีกลับพบว่า เมื่อค่าอัตราการไหลหรือค่าเลขเรโนลด์มีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีค่าลดลง ในส่วนของอิทธิพลของลักษณะรูปแบบครีบบาง ผลการทดลองในรูปแบบที่ 4 แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าครีบบางสี่เหลี่ยมข้าวหลามตัดมีค่าการถ่ายเทความร้อนที่สูงกว่าครีบบางสี่เหลี่ยมข้าวหลามตัดเมื่อพิจารณาที่ค่าเลขเรโนลด์เท่ากันเท่ากัน โดยเพิ่มขึ้นถึง 170% โดยประมาณ

นอกจากการศึกษาสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนแล้ว ค่าความดันตกที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์ระบายความร้อนได้ถูกทำการทดลองศึกษาด้วย ดังแสดงไว้ในรูปที่ 5 ซึ่งพบว่า ค่าความดันตกคร่อมของอุปกรณ์ระบายความร้อนแบบครีบบางขนาดเล็กชนิดครีบบางสี่เหลี่ยมข้าวหลามตัดมีค่าสูงกว่าครีบบางวงรีมากที่สุดถึงประมาณ 2 เท่า และเมื่อพิจารณาถึงผลกระทบของอัตราการไหลที่มีต่อค่าความดันตกคร่อมก็พบว่า ในกรณีครีบบางแบบสี่เหลี่ยมข้าวหลามตัดเมื่อเพิ่มอัตราการไหลจะส่งผลให้ความดันตกคร่อมมีแนวโน้มสูงขึ้น แต่ขณะที่ครีบบางวงรีนั้นพบว่าการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลไม่มีอิทธิพลต่อความดันตกคร่อมในอุปกรณ์



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเลขเรโนลด์กับสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ในอุปกรณ์ระบายความร้อนแบบครีบบางขนาดเล็ก



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเลขเรโนลด์กับค่าความดันตก ในอุปกรณ์ระบายความร้อนแบบครีบบางขนาดเล็ก

การอธิบายถึงสาเหตุที่ทำให้เกิดพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนในอุปกรณ์การถ่ายเทความร้อนของครีบบางทั้งสองแบบ อาจจะกล่าวได้ว่าสมรรถนะหรือค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของอุปกรณ์ระบายความร้อนแบบครีบบางสี่เหลี่ยมข้าวหลามตัดมีค่าสูงกว่าแบบครีบบางวงรีนั้น เป็นอิทธิพลมาจากรูปทรงของครีบบางข้าวหลามตัดที่เป็นมุมแหลมทางด้านหน้าที่ของไหลเข้าปะทะทำให้เกิดชั้นขอบเขตการไหล (boundary layer) ที่หนากว่าแบบวงรีและคาดว่าของไหลที่ไหลผ่านมุมครีบบางด้านข้างครึ่งหน้าไปแล้วจะเกิดเวคของการปั่นป่วน (Turbulent wake) อย่างมาก ทำให้เกิดการไหลผสมอย่างรุนแรงและปั่นป่วนของสารทำงานเป็นเพิ่มความสามารถในการพาความร้อน อีกทั้งหากพิจารณาครีบบางเป็นแถวๆ ก็คาดว่าจะได้ว่าครีบบางในแถวถัดไปสารทำงานที่เข้ามาปะทะก็จะเป็นของไหลที่มีความปั่นป่วนสูง แล้วก็จะทำให้ของไหลที่ผ่านครีบบางแต่ละแถวออกไปมีการไหลที่ผสมกันอย่างรุนแรงมากขึ้น ทำให้สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนเพิ่มสูงยิ่งขึ้นไปอีก ขณะที่ครีบบางวงรีคาดว่าเกิดการเกิด Turbulent wake ที่ปลายด้านหลังครีบบางมีความปั่นป่วนน้อยกว่าแบบครีบบางวงรี จึงส่งผลให้มีความสามารถในการถ่ายเทความร้อนที่ต่ำกว่า ในส่วนของความดันตกนั้น ก็คงจะให้เหตุผลได้เช่นเดียวกันกับความสามารถในการถ่ายเทความร้อน คือการที่อุปกรณ์ระบายความร้อนแบบครีบบางสี่เหลี่ยมข้าวหลามตัดมีค่าความดันตกที่มากกว่าแบบวงรี เป็นผลมาจากพฤติกรรมการไหลที่เกิด Turbulent wake มากกว่าความเร็วของอนุภาคสารทำงานที่เคลื่อนที่ข้ามชั้นการไหลมีมากกว่า จึงทำให้ค่าความดันตกคร่อมมีค่าสูง ดังนั้นใน

การนำไปประยุกต์ใช้งานจริงนั้น จะต้องคำนึงถึงค่าพลังงานที่เพิ่มขึ้นสำหรับขับเคลื่อนของไหลไปพร้อมๆกันกับค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนที่เพิ่มขึ้นด้วย เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพและความคุ้มค่าสูงสุด

5. สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนและความดันลดจากการไหลแบบสองสถานะของสารทำความเย็น R-134a ในอุปกรณ์ระบายความร้อนแบบครีบบางขนาดเล็กชนิดครีบลีเหลี่ยมข้าวหลามตัดและครีบบวงรีสามารถสรุปผลการศึกษาดทดลองได้ว่า เมื่อออกแบบให้ครีบบางทั้งสองลักษณะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกและความสูงที่เท่ากันนั้น อุปกรณ์ระบายความร้อนแบบครีบบางรูปทรงเหลี่ยมข้าวหลามตัดให้ค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนที่สูงกว่าครีบบางแบบรูปทรงวงรี และพบว่าครีบบางสี่เหลี่ยมข้าวหลามตัดจะมีค่าความดันลดที่มากกว่าครีบบางวงรีเช่นกัน ในส่วนผลของค่าคุณภาพไอพบว่าส่งผลต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของครีบบางทั้งสองแตกต่างกัน โดยพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของครีบลีเหลี่ยมข้าวหลามตัดแปรผันตามค่าคุณภาพไอ ขณะที่ของครีบบวงรีนั้นกลับแปรผกผันกับค่าคุณภาพไอ เช่นเดียวกันกับผลของอัตราการไหลหรือค่าเลขเรโนลด์ที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่พบว่า ผลการทดลองในครีบลีเหลี่ยมข้าวหลามตัดจะแปรผันตรงและจะแปรผกผันกันในกรณีครีบบวงรีสุดท้ายนั้นพบว่าอัตราการไหลไม่ส่งผลต่อค่าความดันตกคร่อมของของไหลในอุปกรณ์ที่ใช้ครีบบาง แต่อย่างไรก็ตามจะส่งผลกับครีบบางสี่เหลี่ยมข้าวหลามตัด โดยจะทำให้ค่าความดันตกคร่อมที่ไหลผ่านครีบลีเหลี่ยมข้าวหลามตัดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลมีค่าสูงขึ้น

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ “กองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน (แผนเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน)” สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน ภายใต้โครงการสนับสนุนทุนวิจัยแก่นักศึกษาระดับปริญญาตรี ประจำปี 2558 ที่ได้มอบงบประมาณสนับสนุนการทำวิจัยในครั้งนี้ และผู้เขียนขอขอบคุณ นายวัชรพล อินทรชนบท นายทิวัดต์ แซ่เฮ้ง นายวิศรุทธิ์ รินสันเทียะ นางสาวนุจรี ทรัพย์โทน นักศึกษาสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย

เอเชียอาคเนย์ ที่ได้ช่วยเหลือและมีส่วนร่วมในการทำงานวิจัยให้สำเร็จลุล่วง

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Kandlikar, S. and Grande, W. (2004). Evaluation of single-phase flow in microchannels for high heat flux chip cooling-thermohydraulic performance enhancement and fabrication technology, *Journal of Heat Transfer*, Vol.25 (8) 2004, pp. 5
- [2] Owhaib, W. and Palm, B. (2004). Experimental investigation of single-phase convective heat transfer in circular microchannels, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol.28 (2-3), 2004, pp.105-110
- [3] Li, J., Peterson, G. and Cheng, P. (2004). Three-dimensional analysis of heat transfer in a micro-heat sink with single-phase flow, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.47, 2004, pp.4215.
- [4] Lee, P. and Garimella, S. (2005). Investigation of heat transfer in rectangular microchannels, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.48, 2005, pp.1688
- [5] John, T.J., Mathew, B. and Hegab, H. (2010). Parametric study on the combined thermal and hydraulic performance of single phase micro pin-fin heat sinks part I: Square and circle geometries, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol.49 (11), 2010, pp.2177-2190
- [6] Ndao, S., Peles, Y. and Jensen, M.K. (2014). Effects of pin fin shape and configuration on the single-phase heat transfer characteristics of jet impingement on micro pin fins, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 70, 2014, pp.856-863
- [7] Liu, M., Liu, D., Xu, S. and Chen, Y. (2011). Experimental study on liquid flow and heat transfer in micro square pin fin heat sink, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 54 (25-26), 2011, pp.5602-5611

- [8] Abdoli, A., Jimenez, G. and Dulikravich, G.S. (2015). Thermo-fluid analysis of micro pin-fin array cooling configurations for high heat fluxes with a hot spot, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 90, 2015, pp.290-297
- [9] Duangthongsuk, W. and Wongwises, S. (2015). An Experimental Study on the Thermal and Hydraulic Performances of Nanofluids Flow in a Miniature Circular Pin Fin Heat Sink, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 66, September 2015, pp.28-35
- [10] Mohammadian, S.K. and Zhang, Y. (2014). Analysis of nanofluid effects on thermoelectric cooling by micro-pin-fin heat exchangers, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 70 (1), 2014, pp.282-290
- [11] Hasan, M.I. (2014). Investigation of flow and heat transfer characteristics in micro pin fin heat sink with nanofluid, *Applied Thermal Engineering*, Vol.63 (2), 2014, pp.598-607
- [12] Zhai, Y.L., Xia, G.D., Liu, X.F. and Li, Y.F. (2015). Heat transfer enhancement of $Al_2O_3-H_2O$ nanofluids flowing through a micro heat sink with complex structure, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 66, 2015, pp.158-166
- [13] Kos sar, A., Kuo, C.J. and Peles, Y. (2005). Reduced pressure boiling heat transfer in rectangular microchannels with interconnected reentrant cavities, *Journal of Heat Transfer*, Vol.127 (10), 2005, pp.1106
- [14] Kos sar, A., Kuo, C.J. and Peles, Y. (2005). Boiling heat transfer in rectangular microchannels with reentrant cavities, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.48, 2005, pp.4867.
- [15] Kandlikar, S.G. (2002). Two-phase flow patterns, pressure drop, and heat transfer during boiling in minichannels flow passages of compact evaporators, *Heat Transfer Engineering*, Vol.23 (1), 2002, pp.5
- [16] Qu, W. and Mudawar, I. (2003). Flow boiling heat transfer in two-phase microchannel heat sink: Part 1. Experimental investigation and assessment of correlation methods, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.46 (15), 2003, pp.2755
- [17] Honda, H., Takamastu, H. and Wei, J.J. (2002). Enhanced boiling of FC-72 on silicon chips with micro-pin-fins and submicron-scale roughness, *Journal of Heat Transfer*, Vol.24, 2002, pp.383-390.
- [18] Lie, Y.M., Ke, J.H., Chang, W.R., Cheng, T.C. and Lin, T.F. (2007). Saturated flow boiling heat transfer and associated bubble characteristics of FC-72 on a heated micro-pin-finned silicon chip, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.50, 2007, pp.3862-3876.
- [19] Kosar, A. and Peles, Y. (2007). Boiling heat transfer in a hydrofoil-based micro pin fin heat sink. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.50, 2007, pp.1018-1034
- [20] Krishnamurthy, S. and Peles, Y. (2008). Flow boiling of water in a circular staggered micro-pin fin heat sink, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.51, 2008, pp.1349-1364.
- [21] Qu, W. and Siu-Ho, A. (2009). Measurement and prediction of pressure drop in a two-phase micro-pin-fin heat sink, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.52, 2009, pp.5173-5184.
- [22] Chang, W.R., Chen, C.A., Ke, J.H. and Lin, T.F. (2010). Subcooled flow boiling heat transfer and associated bubble characteristics of FC-72 on a heated micro-pin-finned silicon chip, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.53, 2010, pp.5605-5621
- [23] McNeil, D.A., Raeisi, A.H., Kew, P.A. and Bobbili, P.R. (2010). A comparison of flow boiling heat-transfer in in-line mini pin fin and plane channel flows, *Applied Thermal Engineering*, Vol.30, 2010, pp.2412-2425



[24] Xue, Y., Yuan, Ma, M. A. and Wei, J. (2011). Enhanced boiling heat transfer by using micro-pin-finned surface in three different test systems, *Heat Transfer Engineering*, Vol.32, 2011, pp.1-8

[25] McNeil, D.A., Raeisi, A.H., Kew, P.A. and Hamed, R.S. (2013). Flow boiling heat-transfer in micro to macro transition flows, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.65, 2013, pp. 289-307