



เทคนิคการเติมสารทำความเย็นด้วยวิธีการอัดไอสำหรับท่อความร้อน

ธนาพล สุขชนะ

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

วินัส ทัดเนียม*

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0 2104 9099 ต่อ 8833 อีเมล: thadniam@hotmail.com DOI: 10.14416/j.kmutnb.2018.11.007

รับเมื่อ 15 สิงหาคม 2560 แก้ไขเมื่อ 18 พฤษภาคม 2561 ตอรับเมื่อ 30 พฤษภาคม 2561 เผยแพร่ออนไลน์ 26 พฤศจิกายน 2561

© 2019 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

การศึกษาเชิงทดลองในครั้งนี้ เป็นการทดลองการเติมสารทำงานสำหรับท่อความร้อนด้วยไออิมตัวของสารทำความเย็น เพื่อหาจุดเหมาะสมของตัวแปรปริมาตรไออิมตัวและอุณหภูมิการหล่อเย็นที่เหมาะสม โดยท่อทดสอบทำด้วยทองแดงมีความจุเท่ากับ 40 มล. ทำการทดสอบกับสารทำความเย็น 4 ชนิด ได้แก่ R22, R-134a, R32 และ R404A โดยใช้ปริมาตรของไออิมตัว ในการทดสอบเท่ากับ 50, 100, 150, 200 และ 300 มล. และอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นเพื่อการควบแน่นเท่ากับ 0, 5, 10, 15, 20 และ 25°C ใช้หลักการในการอัดไออิมตัวด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิกเพื่อให้ไออิมตัวของสารทำความเย็นเกิดการควบแน่น ภายในท่อ ผลการทดลองพบว่าการเติมสารทำความเย็นด้วยวิธีการอัดไอสามารถใช้เติมสารทำความเย็นเป็นสารทำงานให้กับท่อความร้อนโดยลดการสูญเสียของสารทำความเย็นได้เป็นอย่างดี ซึ่งมีความไม่แน่นอนเชิงมวลเฉลี่ยเพียง 3% เมื่ออุณหภูมิหล่อเย็นอยู่ในช่วงระหว่าง 0 ถึง 5°C

คำสำคัญ: ท่อความร้อน, การเติมสารทำงาน, สารทำงาน, สารทำความเย็น, ไออิมตัว



A Technique of Heat Pipe Filling with the Refrigerants Vapor Compression Method

Thanaphol Sukckchana

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi, Phranakhon Si Ayutthaya, Thailand

Venus Thadniam*

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Pathumwan Institute of Technology, Bangkok, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 0 2104 9099 Ext. 8833, E-mail: thadniam@hotmail.com DOI: 10.14416/j.kmutnb.2018.11.007

Received 15 August 2017; Revised 18 May 2018; Accepted 30 May 2018; Published online: 26 November 2018

© 2019 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

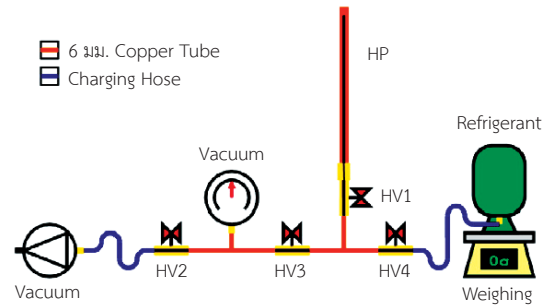
Abstract

This study focuses on heat pipe filling with the saturated vapor of refrigerants, aiming to investigate the appropriate point of the saturated vapor volume and cooling temperatures. The test pipe is made of straight copper tube with a 40-mL capacity. The experiments were conducted with four types of refrigerants i.e. R22, R-134a, R32 and R404A. The volume of saturated vapor for testing was 50, 100, 150, 200, and 300 mL and the cooling water temperature for condensation was set at 0, 5, 10, 15, 20, and 25°C respectively. The saturated vapor compression system was carried out using the hydraulic press machine, allowing the saturated vapor of refrigerants to condense in the test pipe. The experimental result shows that the compression technique was useful for heat pipe filling as it decreases the loss of refrigerants in the entire filling process. The average uncertainty of mass filling was 3% when cooling water temperature lies between 0 to 5°C.

Keywords: Heat Pipe, Filling, Working Fluid, Refrigerant, Saturated Vapor

1. บทนำ

ท่อความร้อนเป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ที่อาศัยหลักการในการระเหยของสารทำงานที่บรรจุอยู่ภายในท่อ ซึ่งปริมาณของสารทำงานที่เหมาะสมเป็นส่วนสำคัญอย่างหนึ่งต่อสมรรถนะในการถ่ายโอนความร้อนของท่อความร้อน ในขณะที่มวลของสารทำงานนั้นมีผลโดยตรงกับประสิทธิภาพในการทำงานของท่อความร้อน ดังเช่นงานวิจัยของ Ong and Alahi [1] ได้ศึกษาทดสอบท่อความร้อนที่เติม R-134a เป็นสารทำงานในปริมาณ 80% ของส่วนอีวาโปเรเตอร์ Dobson และ Pakkies [2] เติม R-134a แบบของเหลว ด้วยอัตราการเติม 12, 25, 50 และ 100% ของส่วนอีวาโปเรเตอร์ Hagens *et al.* [3] ได้ทดสอบประสิทธิภาพของท่อความร้อนโดยการเติม R-134a 19 และ 59% ของส่วนอีวาโปเรเตอร์ นอกจากนี้ Grooten and Geld [4] ทดสอบท่อความร้อนโดยการเติม R-134a เป็นสารทำงาน Jiao *et al.* [5] เติมไนโตรเจนเหลว เป็นสารทำงานสำหรับท่อความร้อนเพื่อทดสอบสมรรถนะการทำงาน [6], [7] ศึกษาทดลองผลกระทบของอัตราการเติม ไนโตรเจน ต่อสมรรถนะของท่อความร้อนซึ่งไม่ระบุวิธีการหรือเทคนิคในการเติม นอกจากนี้การเติมสารทำความเย็น FC-48, FC-77 และ FC-3283 เป็นสารทำงานสำหรับท่อความร้อนได้ถูกนำเสนอโดย Jouhara และ Robinson [8], Payakaruk *et al.* [9] ได้ทดสอบท่อความร้อนโดยบรรจุ R-22, R-123 และ R-134a ด้วยอัตราการเติมที่แตกต่างกัน จากผู้วิจัยที่ใช้สารทำความเย็นเป็นสารทำงานสำหรับท่อความร้อนทั้ง 9 ท่านที่กล่าวมานั้นไม่ได้ระบุวิธีการหรือเทคนิคในการเติมสารทำความเย็นเป็นสารทำงานแต่อย่างใด Yau และ Foo [10] ได้แสดงไดอะแกรมในการเติมสาร R-134a, R-22 และ R-410A ด้วยสถานะของเหลวเป็นสารทำงานสำหรับท่อความร้อนที่พวกเขาได้ทดสอบ สัมพันธ์ [11] ได้เสนอวิธีการและขั้นตอนในการเติมสารทำงานสำหรับท่อความร้อนไว้ในหนังสือเทคโนโลยีท่อความร้อน ซึ่งเป็นการเติมสารทำความเย็นที่เป็นสถานะของเหลวด้วยวิธีการคว่ำถัง เพื่อให้ส่วนที่อยู่ในสถานะของเหลวไหลเข้าไปยังท่อความร้อนและกำหนดอัตราการเติมโดยการชั่งมวล Peterson [12] ได้ระบุวิธีในการเติมสารทำงานไว้ 4 วิธีด้วยกัน คือ 1) Evacuation



รูปที่ 1 ไดอะแกรมการเติมสารทำความเย็น R-134a, R-22 และ R-410A แบบของเหลว [10]

and Back-filling technique, 2) Liquid Fill and Vapor Generation Technique, 3) Solid Fill and Sublimation Technique และ 4) Supercritical Vapor Technique ซึ่งในแต่ละวิธีต่างก็มีความเหมาะสมกับสารทำงานที่ต่างชนิดกัน สำหรับการเติมสารทำความเย็นเพื่อเป็นสารทำงานสำหรับท่อความร้อนนั้นสามารถทำได้สะดวกจะเป็นวิธีที่ 1 และ 2 เนื่องจากสารทำความเย็นจะมีสองสถานะในสภาวะปกติที่บรรจุภายในถังทั่วไปซึ่งจะประกอบด้วยไออิมตัวและของเหลว สำหรับการเติมสารทำความเย็นที่อยู่ในของเหลว [10], [11] ดังรูปที่ 1 จากวงจรการเติมสารทำงานจะเห็นได้ว่า จะมีช่องว่าง HV3, HV4 และ HV1 ซึ่งจะทำให้สารทำความเย็นที่อยู่ในสถานะของของเหลวถูกปล่อยทิ้งสู่บรรยากาศอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้หลังสิ้นสุดกระบวนการเติมสารทำงานให้ท่อความร้อนแต่ละท่อ

จากการศึกษาวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการเติมสารทำความเย็นเป็นสารทำงานในท่อความร้อน ไม่มีนักวิจัยท่านใดกล่าวถึงการสูญเสียสารทำความเย็นหลังสิ้นสุดกระบวนการเติม ทั้งนี้ด้วยสมบัติของสารทำความเย็นที่ปริมาตรเท่ากันนั้นของเหลวจะมีมวลสูงกว่ามวลของไออิมตัวเฉลี่ยไม่น้อยกว่า 50 เท่า ซึ่งหากสามารถเติมสารทำความเย็นเป็นสารทำงานให้กับท่อความร้อนด้วยสถานะไออิมตัวได้ จะส่งผลให้เกิดทั้งความประหยัดและมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยลงได้ รวมถึงการหลีกเลี่ยงอันตรายจากการปล่อยสารทำความเย็นทิ้งในสถานะของของเหลวเมื่อสิ้นสุดกระบวนการเติมสาร การศึกษาเชิงทดลองเทคนิคใน

การเติมสารทำความเย็นแบบอัดไอเป็นสารทำงานสำหรับท่อความร้อนในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์ในการสร้างอุปกรณ์และทดสอบการเติมสารทำความเย็นแบบอัดไอเพื่อหาจุดเหมาะสมของตัวแปรปริมาตรไออัมตัวและอุณหภูมิของการหล่อเย็นที่เหมาะสม

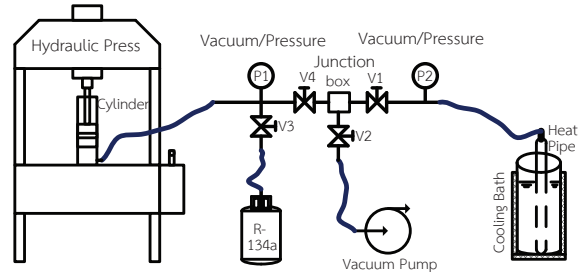
2. อุปกรณ์การทดลอง

2.1 อุปกรณ์การเติมแบบอัดไอ

อุปกรณ์การทดลองดังรูปที่ 2 ประกอบด้วย แท่นอัดระบบไฮดรอลิกสำหรับใช้อัดไอ กระจกสูบสำหรับบรรจุไออัมตัวของสารทำความเย็นซึ่งมีความจุสูงสุดเท่ากับ 1000 มล. ซึ่งในการทดลองใช้บรรจุไออัมตัวสูงสุดเท่ากับ 300 มล. ที่อุณหภูมิห้องประมาณ 27°ซ ชุดวาล์วควบคุม ป้อนสุญญากาศถึงสารทำความเย็นชนิดต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง ระบบทำน้ำเย็นกับการควบคุมอุณหภูมิของน้ำเย็น และท่อสำหรับทดลอง สารทำความเย็นที่ใช้ในการทดลองคือ R-134a, R32 และ R404A ซึ่งมีจุดเดือดต่ำและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและอีกชนิดคือ R22 ซึ่งเป็นสารทำความเย็นที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมแต่มีอุณหภูมิจุดวิกฤติสูง และเพื่อให้เห็นว่าหากมีความจำเป็นที่จะต้องใช้ R22 ก็ควรจะหาวิธีการในการบรรจุสารทำงานที่เหมาะสม เพื่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด

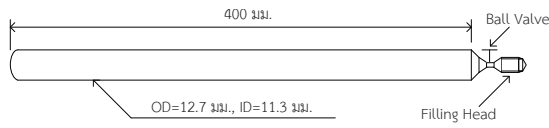
2.2 การทดลองและเงื่อนไขการทดลอง

หลังจากประกอบอุปกรณ์ในการเติมสารทำงานแบบอัดไอดังรูปที่ 2 เริ่มต้นการทดลองด้วยการเปิดเครื่องทำน้ำเย็นให้ได้อุณหภูมิคงที่ตามต้องการ ($\pm 1^{\circ}\text{ซ}$) วัดอุณหภูมิในการทดลองด้วยเทอร์โมคัปเปิลชนิด K ที่มีค่าความคลาดเคลื่อน 0.1% ร่วมกับเครื่องบันทึกอุณหภูมิด้วยเครื่องบันทึกอุณหภูมิ (Data Logger) ที่มีค่าความคลาดเคลื่อน 0.1% ซึ่งในการทดลองครั้งนี้ใช้อุณหภูมิน้ำเย็น 0, 5, 10, 15 และ 20°ซ (สำหรับน้ำอุณหภูมิ 0°ซ นั้นใช้น้ำแข็งผสมน้ำแทนการทำน้ำเย็นด้วยระบบทำความเย็น) เมื่ออุณหภูมิน้ำหล่อเย็นคงที่ตามต้องการแล้วเปิดวาล์วทั้ง 4 ตัว (V1, V2, V3, และ V4) โดยปิดวาล์วที่ส่วนหัวของถังบรรจุสารทำความเย็นเอาไว้ แล้วตั้ง



รูปที่ 2 ไดอะแกรมและประกอบต่างๆ ของอุปกรณ์สำหรับเติมสารทำความเย็นให้ท่อความร้อนแบบอัดไอ

ระยะอัดของก้านสูบ (Rod) ด้วยสกรูที่ปลายก้านสูบซึ่งมีระยะพิทเกลียวเท่ากับ 1 มม. ให้ได้ปริมาตรของไอเท่ากับ 50, 100, 150, 200 และ 300 มล. ตามเงื่อนไขการทดลอง ซึ่งระยะอัดของก้านสูบสามารถคำนวณได้จากปริมาตรการบรรจุของกระจกสูบ (Cylinder) โดยเมื่อก้านสูบเคลื่อนที่ออก 10 มม. จะได้ปริมาตรช่องว่างภายในกระจกสูบเท่ากับ 50.26 มล. จากนั้นเปิด Vacuum Pump โดยสามารถทำแรงดันสัมบูรณ์ได้สูงสุด 5 กิโลปาสคาล เพื่อสร้างสุญญากาศของระบบประมาณ 2-5 นาที เนื่องจากวงจรการเติมสารทำงานเป็นระบบขนาดเล็ก ปิด V1 และ V2 จากนั้นเปิดวาล์วหัวถังสารทำความเย็นเพื่อให้ไออัมตัวของสารทำความเย็นไหลเข้าสู่ระบบการเติมสารแบบอัดไอจนเต็มโดยสังเกตได้จากแรงดัน P1 จะคงที่ แสดงว่าไออัมตัวของสารทำความเย็นภายในถังไหลเข้าสู่ระบบเต็มความจุที่ต้องการโดยใช้เวลาเพียง 3-5 วินาที ซึ่งแรงดัน P1 เป็นแรงดันไออัมตัวของสารทำความเย็นแต่ละชนิดที่อยู่ภายในถังบรรจุ อุณหภูมิห้องในการทดลอง เช่น R-134a ที่อุณหภูมิห้อง 27°ซ จะมีแรงดันไออัมตัวภายในถังบรรจุประมาณ 700 กิโลปาสคาล ต่อมาปิด V3 ปล่อยให้ไออัมตัวของสารทำความเย็นไหลเข้าท่อความร้อนด้วยการเปิด

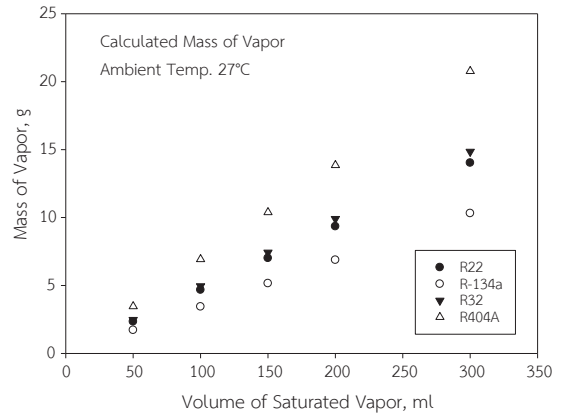


รูปที่ 3 ท่อทองแดงที่ใช้สำหรับทดลองการเติมสารทำงานแบบอัตโนมัติ

V1 ซึ่งขนาดของท่อความร้อนที่ใช้ทดลองมีลักษณะดังรูปที่ 3 สามารถจุของเหลวได้ 40 มล. โดยมวลของสารทำงานที่ทดลองบรรจุนั้น คำนวณได้จากความหนาแน่นของไออิมตัวและปริมาตรในการเติมของสารทำความเย็นแต่ละชนิดตามเงื่อนไขการทดลอง จากนั้นใช้เครื่องอัดไฮดรอลิกกดก้านสูบของกระบอกสูบที่บรรจุไอของสารทำความเย็น จะทำให้แรงดันของไออิมตัวสูงขึ้นและเกิดการควบแน่นภายในท่อความร้อนด้วยการหล่อเย็น ซึ่งทำให้สารทำความเย็นภายในท่อความร้อนประกอบด้วยส่วนของของเหลวในส่วนกลางและไออิมตัวในส่วนบน เช่นเดียวกันกับในถังบรรจุ สังกะสีแรงดัน P2 จะคงที่ซึ่งแรงดัน P2 จะเป็นแรงดันของไออิมตัวภายในระบบและในท่อความร้อน ของสารทำความเย็นแต่ละชนิด ณ อุณหภูมิของการหล่อเย็น เช่น R-134a หล่อเย็นด้วยอุณหภูมิ 0°ซ จะมีแรงดันในระบบประมาณ 290 กิโลปาสคาล จากนั้นปิดวาล์ว V4 และปิดวาล์วของท่อทดสอบ พร้อมทั้งถอดสายเติมออกจากท่อทดสอบ แล้วจึงนำไปซึ่งเพื่อหามวลของสารทำงานในท่อซึ่งประกอบด้วยสถานะของเหลวและไออิมตัวรวมกันด้วยเครื่องชั่งแบบตัวเลขที่สามารถอ่านค่าละเอียดได้ถึง 0.01 กรัม มีย่านการวัด 1,000 กรัม ซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อน 1% ซึ่งผลต่างของมวลก่อนเติมกับหลังเติมก็คือมวลของสารทำความเย็นที่ถูกเติมเข้าในท่อความร้อน ทั้งนี้ค่าความไม่แน่นอนของพารามิเตอร์ในการทดลองครั้งนี้ได้แสดงไว้ในตารางที่ 1 ซึ่งสามารถคำนวณได้จากค่าความคลาดเคลื่อน (Error) ของเครื่องมือวัดอุณหภูมิ เครื่องชั่ง และเครื่องมือวัดขนาด

$$m = \rho_g V_g \quad (1)$$

โดยที่ m คือ มวลของไออิมตัวที่คำนวณได้ (กก.) V_g คือ ปริมาตร



รูปที่ 4 มวลของสารทำความเย็นจากการคำนวณ

ไออิมตัวของสาร (m^3) และ ρ_g คือ ความหนาแน่นของไออิมตัว (กก./ m^3)

ตารางที่ 1 ค่าความไม่แน่นอนของพารามิเตอร์จากการวัดในการทดลอง

Parameters	Max. Uncertainties
Temperature	$\pm 0.14^\circ\text{ซ}$
Mass of Refrigerant	$\pm 1.10\%$
Volume of Saturated Vapor	± 5.03 มล.

2.3 ปริมาตรการเติมด้วยไออิมตัว

รูปที่ 4 ผลการคำนวณมวลไออิมตัวของสารทำความเย็นเมื่อมีปริมาตรตามเงื่อนไขการทดลอง 50–300 มล. ด้วยสมการที่ (1) โดยกำหนดให้ไออิมตัวของสารทำความเย็นมีแรงดันที่อุณหภูมิห้องเท่ากับ 27°ซ ซึ่งสารทำความเย็นแต่ละชนิดจะมีแรงดันไออิมตัวที่อยู่ภายในถังบรรจุไม่เท่ากัน จะเห็นได้ว่าปริมาตรของไออิมตัวมีความสัมพันธ์กันแบบเชิงเส้นกับมวลของสารทำความเย็นทั้ง 4 ชนิด ที่จะนำมาทดสอบการเติมด้วยวิธีการอัดไอ ซึ่งสารทำความเย็นแต่ละชนิดนั้นมีค่าความหนาแน่นของไออิมตัวที่อุณหภูมิต่างๆ ที่จะทำการทดสอบดังตารางที่ 2 [13]

เนื่องจากความหนาแน่นไออิมตัวของสารทำความเย็นแต่ละชนิดมีค่าไม่เท่ากัน เพราะฉะนั้นในการเติมสารทำงาน

ตารางที่ 2 ความหนาแน่นของไออิมตัวของสารทำความเย็น ทั้ง 4 ชนิด ในการทดลอง

Temp. °C	Density (ρ_g), kg/m ³			
	R22	R-134	R32	R404A
0	21.23	14.43	22.08	30.46
5	24.79	17.14	25.08	35.69
10	28.82	20.23	30.22	41.66
15	33.36	23.77	34.14	48.49
20	38.48	27.79	40.84	56.30
27	46.73	34.36	49.51	69.22

แบบอัดไอสำหรับการใช้งานจริงนั้นจะต้องมีการคำนวณหาปริมาณของไออิมตัวตามอัตราการเติมที่ต้องการ จากตารางที่ 3 และ 4 ซึ่งเป็นตัวอย่างปริมาตรจำเพาะของของเหลวและไออิมตัวของสารทำความเย็น R-134a จะเห็นได้ว่าปริมาตรจำเพาะของไออิมตัวลดลงเมื่ออุณหภูมิไอสูงขึ้น และความหนาแน่นของไออิมตัวลดลงเมื่ออุณหภูมิไอลดลง ดังนั้นมวลไออิมตัวของสารทำความเย็น สามารถคำนวณหาได้ด้วยปริมาตรจำเพาะของไออิมตัว V_g จากตารางสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำความเย็น เช่น หากต้องการบรรจุ R-134a เป็นสารทำงานภายในท่อความร้อน ด้วยความจุ 10 มล. (คิดเป็นปริมาตรของของเหลว) พิจารณา R-134a เป็นของเหลวปริมาตร 10 มล. ที่อุณหภูมิ 27°C พบว่ามีมวลเท่ากับ $\rho_f \cdot V_f = 10 \times 1.25 = 12.5g$ ซึ่ง R-134a ในสถานะของเหลวมีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 1,250 กก./ม.³ เมื่อได้มวลในรูปของของเหลวแล้ว จากนั้นเปลี่ยนให้มวลของสารทำงานอยู่ในรูปของไออิมตัวได้ด้วยสมการที่ (1) $V_g = \frac{m}{\rho_g} = 12.5 \times 0.0291 \times 10^3 = 363.75$ มล. ซึ่งเป็นปริมาตรของไออิมตัวที่จะต้องเติมเข้าในท่อความร้อนด้วยวิธีการอัดไอ เพื่อให้ได้มวลเท่ากับ 12.5 กรัม เมื่อมีอุณหภูมิแวดล้อมเท่ากับ 27°C

จะเห็นได้ว่าการเติมสารทำความเย็นเพื่อใช้เป็นสารทำงานสำหรับท่อความร้อนด้วยวิธีการอัดไอนั้น สามารถที่จะสร้างสมการเพื่อใช้ในการคำนวณหาปริมาณของไออิมตัวสำหรับการเติม โดยเริ่มต้นจากการคำนวณหาปริมาตรส่วน

ตารางที่ 3 ตัวอย่างสมบัติปริมาตรจำเพาะของสารทำความเย็น R-134a

Temp. °C	Pressure kPa	Volume, m ³ /kg	
		V_f	V_g
0	292.93	0.0008	0.0693
5	349.87	0.0008	0.0583
10	414.92	0.0008	0.0494
15	488.78	0.0008	0.0421
20	572.25	0.0008	0.0360
27	706.66	0.0008	0.0291

ตารางที่ 4 ตัวอย่างสมบัติความหนาแน่นจำเพาะของสารทำความเย็น R-134a

Temp. °C	Pressure kPa	Density, kg/m ³	
		ρ_f	ρ_g
0	292.93	1250	14.43
5	349.87	1250	17.14
10	414.92	1250	20.23
15	488.78	1250	23.77
20	572.25	1250	27.79
27	706.66	1250	34.36

อิวาโปเรเตอร์ที่ต้องการเติมสารทำงานในรูปของของเหลว (V_f) เปลี่ยนค่าการเติมโดยปริมาตรเป็นเชิงมวล (m) ด้วยค่าความหนาแน่นของของเหลว (ρ_f) จากนั้นคำนวณหาปริมาตรการเติมเป็นไออิมตัวด้วยปริมาตรจำเพาะ (V_g) โดยใช้สมการที่ (2)-(5) ซึ่งสมการที่ (5) นั้นจะได้ปริมาตรของไออิมตัวสำหรับการเติมด้วยเทคนิคการอัดไอ สำหรับการคำนวณหาปริมาณไออิมตัวของสารทำความเย็นแต่ละชนิดจะต้องใช้ค่าต่างๆ จากตารางสมบัติของสารทำงานโดยใช้อุณหภูมิแวดล้อมในขณะนั้นหรือเป็นอุณหภูมิห้องที่สามารถควบคุมได้

$$V_{\text{vapor}} = m \cdot V_g = \rho_f \cdot V_f \cdot V_g \quad (2)$$

โดย

$$\rho_f = \frac{1}{V_f} \quad (3)$$

และ

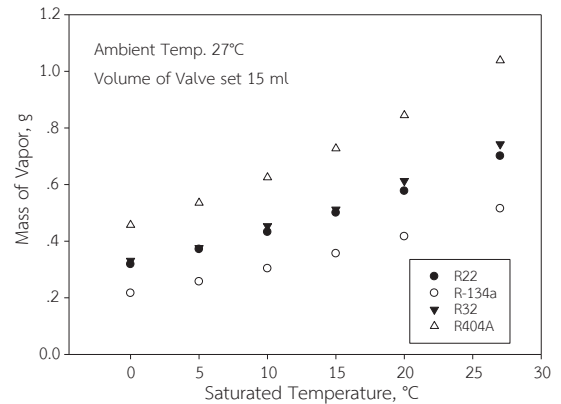
$$V_l = \frac{\pi \cdot d^2 \cdot l \cdot Fill_{ratio}}{4} \quad (4)$$

จะได้

$$V_{vapor} = \frac{\pi \cdot d^2 \cdot l \cdot Fill_{ratio}}{4} \cdot \frac{V_g}{V_f} \quad (5)$$

โดยที่ V_{vapor} คือ ปริมาตรไออิมตัวของสารทำความเย็นที่ต้องการบรรจุ (m^3) V_f คือ ปริมาตรจำเพาะของของเหลว (m^3/kg) V_g คือ ปริมาตรจำเพาะของไออิมตัว (m^3/kg) V_l คือ ปริมาตรส่วนอิวาโปรเตอร์ที่ต้องการเติม (m^3) l คือ ความยาวส่วนอิวาโปรเตอร์ (m) d คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ (m) และ $Fill_{ratio}$ คือ อัตราการเติมสารทำงาน (อัตราส่วนปริมาตรของสารทำงานต่อปริมาตรอิวาโปรเตอร์) ซึ่ง $Fill_{ratio}$ ได้จากการคำนวณด้วยเงื่อนไขการใช้งานของท่อความร้อนที่ต่างกัน

รูปที่ 5 แสดงผลการคำนวณมวลของไออิมตัวในชุดวาล์วควบคุมของอุปกรณ์การเติมสารทำงานแบบอัดอิตด้วยสมการที่ (1) กรณีปล่อยทิ้งสู่บรรยากาศหลังสิ้นสุดกระบวนการเติมสารทำงานในช่วงอุณหภูมิ 0–27°ซ ซึ่งปริมาตรของชุดวาล์วควบคุมวัดได้ 15 มล. จากกราฟจะเห็นได้ว่ามวลของสารทำความเย็นที่คำนวณได้จากค่าความหนาแน่นของไออิมตัวลดลงเมื่ออุณหภูมิของไออิมตัวลดลง เนื่องจากความหนาแน่นของไออิมตัวที่ลดลงของสารทำความเย็นด้วยอุณหภูมิที่ต่ำลง ซึ่งจะเป็นผลทำให้ปริมาณของสารทำความเย็นที่ถูกปล่อยทิ้งสู่บรรยากาศลดน้อยลง เมื่อควบคุมให้อุณหภูมิระหว่างเติมสารทำงานด้วยเทคนิคการเติมแบบอัดอิตให้ต่ำลง นอกจากนี้ยังพบว่า R404A มีมวลของไออิมตัวสูงกว่าสารทำความเย็นชนิดอื่นในการทดลอง เนื่องจากมีความหนาแน่นของไออิมตัวสูงกว่า R32, R22 และ R-134a ตามลำดับ



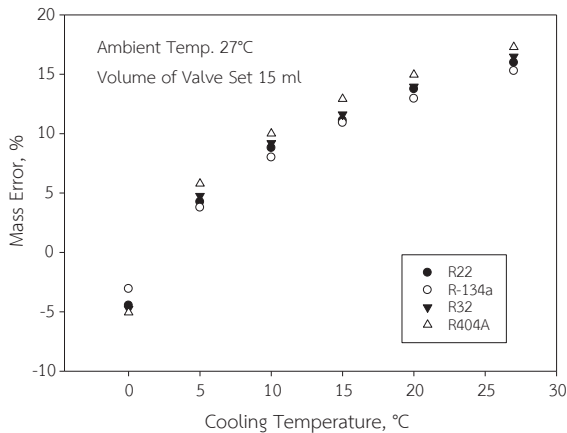
รูปที่ 5 มวลของสารทำความเย็นภายในชุดวาล์วสำหรับการเติมเมื่ออุณหภูมิแตกต่างกัน

2.4 การสูญเสียในรูปของของเหลวและไออิมตัว

ตารางที่ 5 แสดงการคำนวณการสูญเสียของสารทำความเย็นระหว่างการเติมแบบของเหลวกับแบบอัดอิตเมื่อปริมาตรของชุดวาล์วควบคุมเท่ากับ 15 มล. ซึ่งสามารถคำนวณได้ด้วยค่าความหนาแน่นของของเหลวที่อุณหภูมิ 27°ซ กรณีเติมสารทำงานแบบของเหลว และค่าความหนาแน่นของไออิมตัวที่อุณหภูมิ 0°ซ และ 27°ซ กรณีเติมสารทำงานแบบไออิมตัว จากค่าในตารางจะเห็นได้ว่าสามารถลดการสูญเสียสารทำความเย็นลงโดยมวลเฉลี่ยได้มากกว่าการเติมแบบของเหลว ซึ่งเป็นผลมาจากความหนาแน่นของไออิมตัวต่ำกว่าของเหลว และจะต่ำลงได้อีกเมื่ออุณหภูมิลดต่ำลง ซึ่งจะสามารถลดการสูญเสียและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้มากขึ้น

ตารางที่ 5 การสูญเสียสารทำความเย็นระหว่างการเติมแบบของเหลวกับแบบอัดอิตเมื่อ $V_e=15$ มล.

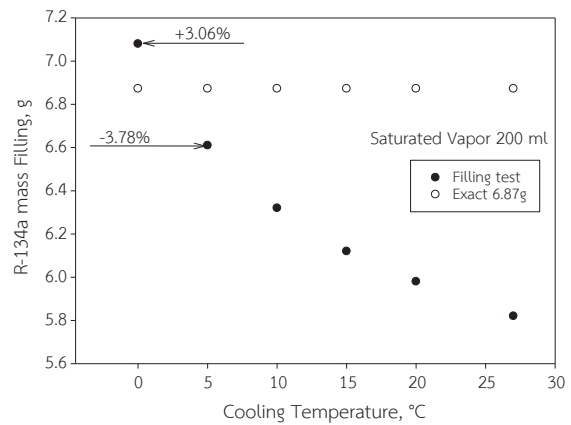
สารทำความเย็น	เติมแบบของเหลว, 27°ซ	เติมแบบอัดอิต, 27°ซ	เติมแบบอัดอิต, 0°ซ
	(g)	(g)	(g)
R22	17.741	0.7001	0.318
R-134	17.985	0.5154	0.216
R32	14.288	0.7426	0.331
R404A	15.562	1.0383	0.456



รูปที่ 6 ผลของอุณหภูมิหล่อเย็นต่อค่าความไม่แน่นอนในการเติมเชิงมวล

3. ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

ผลการทดลองที่แสดงในรูปแบบของกราฟเป็นค่าที่ได้จากการเฉลี่ยของผลการทดลองจำนวน 10 ครั้งต่อ 1 เซ็นไซการทดลอง รูปที่ 6 ผลของอุณหภูมิในการหล่อเย็นต่อความร้อนขณะเติมสารทำความเย็นแบบอัดไอ ต่อค่าความไม่แน่นอนของมวลสารทำงานที่ต้องการเติม (ค่าความไม่แน่นอนหมายถึงความเป็นไปได้ทั้งทางบวกและทางลบของมวลสารทำงานที่ซึ่งได้เมื่อเทียบกับผลการคำนวณ) โดยการทดสอบที่อุณหภูมิแวดล้อมเท่ากับ 27°C ซึ่งกำหนดให้เป็นอุณหภูมิไออิมตัวเช่นกัน เติมด้วยปริมาตรไออิมตัวเท่ากับ 200 มล. สามารถคำนวณหามวลไออิมตัวที่อุณหภูมิ 27°C ของสารทำความเย็นแต่ละชนิดได้ด้วยสมการที่ (1) โดยต่อความร้อนสามารถบรรจุสารทำงานในรูปของของเหลวได้ 40 มล. ในขณะที่ปริมาตรของชุดวาล์วเติมสารเท่ากับ 15 มล. จากกราฟจะเห็นได้ว่าค่าความไม่แน่นอนในการเติมสารทำงานจะลดลง เมื่ออุณหภูมิของการหล่อเย็นต่ำลง และยังพบอีกว่าเมื่อหล่อเย็นที่อุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 0°C ค่าความไม่แน่นอนที่ได้มีค่าเป็นบวก ซึ่งแสดงว่ามวลของสารทำงานที่เติมเข้าไปในท่อความร้อนสูงกว่ามวลของไออิมตัวที่ได้จากการคำนวณเพื่อหาปริมาตรในการเติมแบบอัดไอ มวลที่เพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากไออิมตัวในชุดวาล์วควบคุมที่มีค่าคงที่เท่ากับ 15 มล. เกิดการกลั่นตัวเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของ

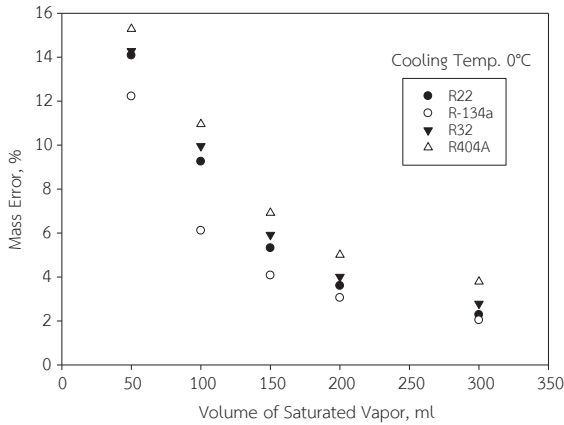


รูปที่ 7 ผลของอุณหภูมิหล่อเย็นต่อค่าความไม่แน่นอนเชิงมวลในการเติม R-134a ด้วยวิธีการอัดไอ

ไออิมตัวลดต่ำลง เช่น เมื่อคำนวณหาปริมาตรไออิมตัวได้ 200 มล. ในกระบวนการเติมจะมีไออิมตัวอยู่ในระบบเท่ากับ 215 มล. นอกจากนี้ยังพบว่าสารทำความเย็นที่มีความหนาแน่นของไออิมตัวสูง จะมีค่าความไม่แน่นอนในการเติมแบบอัดไอสูงขึ้นตามไปด้วย

รูปที่ 7 แสดงให้เห็นค่าความไม่แน่นอนของมวลที่ได้จากการเติมด้วยเทคนิคการเติมแบบอัดไอ แสดงเฉพาะ R-134a เนื่องจากมีแนวโน้มเหมือนกันทั้งหมด จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นที่อยู่ในช่วง 0-5°C มีผลต่อค่าความไม่แน่นอนในการเติม R-134a ต่ำสุดเฉลี่ยประมาณ 3% เนื่องจากมีการกลั่นตัวของไออิมตัวในชุดวาล์วสำหรับเติมสารทำงาน ซึ่งค่าของมวลที่ถูกต้องจากการคำนวณด้วยไออิมตัวในปริมาตร 200 มล. เท่ากับ 6.87 กรัม เพราะฉะนั้นการเติมสารทำความเย็นเป็นสารทำงานสำหรับท่อความร้อน เพื่อให้ได้มวลของสารทำความเย็นเป็นสารทำงานตามที่ต้องการนั้น จะต้องหล่อเย็นต่อความร้อนด้วยอุณหภูมิที่ต่ำ

รูปที่ 8 แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ของค่าความไม่แน่นอนเชิงมวลหลังการเติมสารทำความเย็นกับมวลของไออิมตัวที่ทำการทดลองเท่ากับ 50, 100, 150, 200 และ 300 มล. ภายใต้อุณหภูมิแวดล้อม 27°C และอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นเฉลี่ย 0°C จากการทดลองพบว่าค่าความไม่แน่นอนเชิงมวลมีค่าเป็นบวก (มวลที่ได้มากกว่าการคำนวณ) เฉลี่ย



รูปที่ 8 ผลของปริมาตรการเติมต่อค่าความไม่แน่นอนเชิงมวลของสารทำความเย็นที่ใช้ทดลอง

ประมาณ 14% เมื่อปริมาตรของไออิมตัวเท่ากับ 50 มล. และลดลงเหลือเฉลี่ยประมาณ 3% เมื่อปริมาตรของไออิมตัวเท่ากับ 300 มล. เนื่องจากอัตราส่วนของปริมาตรชุดวาล์วควบคุมการเติมสารต่อปริมาตรไออิมตัวสำหรับการเติมลดลงทั้งนี้มวลของสารทำงานที่ได้มีค่ามากกว่าที่คำนวณไว้เนื่องจากเกิดการควบแน่นของสารทำความเย็นภายในชุดวาล์วควบคุมเข้าไปรวมกันภายในท่อความร้อนซึ่งมีอุณหภูมิต่ำ เมื่อคำนวณเป็นอัตราส่วนของมวลที่เพิ่มขึ้นต่อมวลของไออิมตัวด้วยปริมาตรของชุดวาล์วควบคุม พบว่าไออิมตัวในชุดวาล์วควบคุมเกิดการกลั่นตัวเฉลี่ยประมาณ 60% ของปริมาตร โดยกำหนดให้ปริมาตรชุดวาล์วควบคุมเป็น (V_v) จะสามารถปรับปรุงสมการในการคำนวณหาปริมาตรไออิมตัว (5) เป็นสมการที่ (6) เพื่อแก้ไขมวลของสารทำงานที่ได้มีค่ามากกว่าที่ต้องการ

$$V_{vapor} = \left[\frac{\pi \cdot d^2 \cdot J \cdot Fill_{ratio}}{4} \cdot \frac{V_g}{V_f} \right] - 0.6V_e \quad (6)$$

4. สรุป

จากการทดลองพบว่าอุปกรณ์การเติมสารทำความเย็นเป็นสารทำงานด้วยวิธีอัดไอ สามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพถึงแม้ว่าขั้นตอนจะมากกว่าการเติมแบบ

ของเหลวก็ตาม ทั้งนี้ค่าความไม่แน่นอนเชิงมวลเป็นบวกเฉลี่ย 3% ซึ่งการทดลองทางวิศวกรรมยอมรับได้ที่ 10% โดยสามารถลดมวลที่เกินได้ด้วยด้วยสมการที่ (6) หรือออกแบบให้ปริมาตรชุดวาล์วและท่อทางมีขนาดเล็กเพื่อลดปริมาตรไออิมตัวส่วนเกิน รวมทั้งสามารถหล่อเย็นอย่างง่ายโดยการใช้ น้ำแข็งผสมกับน้ำก็เพียงพอ ซึ่งจะทำให้ได้อุณหภูมิ น้ำหล่อเย็นเฉลี่ยอยู่ในช่วง 0–5°C นอกจากนี้ยังสามารถลดการสูญเสียสารทำความเย็นในระหว่างการเติมได้มากกว่าการเติมแบบของเหลวเฉลี่ยประมาณ 97%

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยปทุมธานี ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ อุปกรณ์ และสนับสนุนงบประมาณสำหรับการทำวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] K. S. Ong and Md. Haider-E-Alah, "Performance of R-134a-filled thermosyphon," *Applied Thermal Engineering*, vol. 23, pp. 2373–2381, 2003.
- [2] R. T. Dobson and S A Pakkies, "Development of an air-to-air R-134a refrigerant charged two-phase closed thermosyphon heat exchanger," presented at the 11th International Air Conditioning, Refrigeration & Ventilation Congress, Midrand, South Africa, 2002.
- [3] H. Hagens, F. L. A. Ganzevles, C. W. M. van der Geld, and M.H.M. Grooten, "Air heat exchangers with long heat pipes Experiments and predictions," *Applied Thermal Engineering*, vol. 27, pp. 2426–2434, 2007.
- [4] M. H. M. Grooten and C. W. M. van der Geld, "Predicting heat transfer in long R-134a filled thermosyphons," *Journal of Heat Transfer*, vol. 131, no.5, 2009.



- [5] B. Jiao, L. M. Qiu, X. B. Zhang, and Y. Zhang, "Investigation on the effect of filling ratio on the steady-state heat transfer performance of a vertical two-phase closed thermosyphon," *Applied Thermal Engineering*, vol. 28, no. 11-12, pp. 1417-1426, 2008.
- [6] Z. Q. Long and P. Zhang, "Impact of cooling condition and filling ratio on heat transfer limit of cryogenic thermosyphon," *Cryogenics*, vol. 52, no. 1, pp. 66-76, 2012.
- [7] S. Lips, F. Lefevre, and J. Bonjour, "Combined effects of the filling ratio and the vapour space thickness on the performance of a flat plate heat pipe," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 53, no. 4, pp. 694-702, 2010.
- [8] H. Jouhara and A. J. Robinson, "Experimental investigation of small diameter two-phase closed thermosyphons charged with water, FC-84, FC-77 and FC-3283," *Applied Thermal Engineering*, vol. 30, no. 2-3, pp. 201-211, 2010.
- [9] T. Payakaruk, P. Terdtoon, and S. Ritthidech, "Correlations to predict heat transfer characteristics of an inclined closed two-phase thermosyphon at normal operating conditions," *Applied Thermal Engineering*, vol. 20, no. 9, pp. 781-790, 2000.
- [10] Y. H. Yau and Y. C. Foo, "Comparative study on evaporator heat transfer characteristics of revolving heat pipes filled with R134a, R22 and R410A," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 38, no. 38, pp. 202-211, 2011.
- [11] S. Rittidech, *Heat Pipe Technology*. Bangkok: Maha Sarakham University Publishing Center, 2011 (in Thai).
- [12] G. P. Peterson, *An Introduction to Heat Pipes: Modelling Testing and Applications*. New York, John Wiley & Sons Inc., 1994.
- [13] ASHRAE, I-P ed., American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, GA, 2005, pp. 20.1-20.75.