# การเพิ่มประสิทธิภาพเครื่องปรับอากาศโดยใช้ท่อความร้อนชนิดสั่นวงรอบที่ติดตั้งวาล์วกันกลับ

# Performance Improvement of Air Conditioner by using Closed-loop Oscillating Heat Pipe with Check Valves

อนุมัติ ศิริเจริญพานิชย์,[1] สัมพันธ์ ฤทธิเดช,[2*] บพิธ บุปผโชติ[3]

Anumut Siricharoenpanich,[1] Sampan Rittidech,[2*] Bopit Bubphachot [3]

Received: 30 April 2013; Accepted: 20 July 2013

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลการปรับปรุงสมรรถนะของระบบปรับอากาศ โดยใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อความร้อนชนิดสั่นวงรอบที่ติดตั้งวาล์วกันกลับ (CLOHP/CV) ในการลดอุณหภูมิสารทำความเย็นที่ทางออกคอมเพรสเซอร์กับเครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วนขนาด 13,000 Btu/hr ท่อความร้อนทำจากท่อทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.03 mm ประกอบเป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ในการทดลองใช้สาร R134a, R123 และ Ethanol เป็นสารทำงาน ตัวแปรหลักที่ทำการศึกษาได้มุ่งเน้นไปที่ สัมประสิทธิ์สมรรถนะ การใช้กำลังไฟฟ้า และอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงาน และนำไปเปรียบเทียบกับกรณีก่อนการปรับปรุง จากการทดลองพบว่าเครื่องปรับอากาศที่ปรับปรุงโดยใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ (CLOHP/CV) ที่ใช้สารทำงาน R134a มีประสิทธิภาพดีที่สุด โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (COP) และค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงาน (EER) เพิ่มขึ้น 21.98%, 20.72% ตามลำดับ และมีการใช้กำลังไฟฟ้าลดลง 5.6% ซึ่งผลของการศึกษานี้คาดว่าจะเป็นแนวทางที่ช่วยในการพัฒนาระบบปรับอากาศได้

**คำสำคัญ**: ท่อความร้อน สัมประสิทธิ์สมรรถนะ อัตราส่วนประสิทธิภาพ

## Abstract

This paper presents the results of improving an air conditioning system by using a closed loop oscillating heat pipe with check valve (CLOHP/CV) heat exchanger to reduce the temperature of the refrigerant at the outlet of the compressor. The split type air conditioner rating used in this study was 13,000 Btu/hr. The heat pipe was made of a copper tube having an inner diameter of 2.03 mm. In the experiment R134a, R123, and Ethanol were used as the working fluids. The main parameters for study focused on the coefficient of performance, energy consumption and energy efficiency ratio. A comparison was made between the original system and the improved system. It was found that the air conditioning was improved by using the CLOHP/CV heat exchanger that used R134a as the working fluid. It had the best coefficient of performance (COP), and the energy efficiency ratio (EER) was increased by 21.98%, 20.72% respectively. The power consumption was reduced up to 5.6%. The results of this study are expected to lead to guidelines that will allow for further development of this type of conditioning system.

**Keywords:** heat pipe, coefficient of performance, energy efficiency ratio

*[1] นิสิตปริญญาโท, [2] รองศาสตราจารย์, [3]ผู้ช่วยศาสตราจารย์ หน่วยวิจัยท่อความร้อนและออกแบบอุปกรณ์ทางความร้อน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม เบอร์โทรศัพท์ 0-4375-4322 Email s.rittidech@hotmail.com*

*[1] Master degree, [2] Associate Prof, [3]Assissiant. Prof, Heat pipe and Thermal tools design Research Unit, Faculty of Engineering, Mahasarakham University. Tel. 0-4375-4322 Email s.rittidech@hotmail.com*

** Corresponding author: Email s.rittidech@hotmail.com*

## บทนำ

การปรับอากาศ (Air Conditioning) เป็นกระบวนการควบคุมสภาวะอากาศ ให้เหมาะสมกับสภาพการใช้งาน เช่น ความสุขสบายของมนุษย์ในที่อยู่อาศัย อาคารสำนักงาน อาคารพาณิชย์ รวมทั้งการควบคุมคุณภาพสินค้าในงานอุตสาหกรรม เพื่อช่วยควบคุมผลผลิต ให้ได้ผลตรงตามที่ต้องการ ประเทศไทยมีอุณหภูมิเฉลี่ยประมาณ 30°C และความชื้นสัมพัทธ์ประมาณ 70-80% โดยค่าอุณหภูมิและความชื้นดังกล่าวมีค่าค่อนข้างสูง ซึ่งจะมีผลทำให้การเป็นอยู่ของมนุษย์ไม่สบายเท่าที่ควรระบบปรับอากาศจึงเข้ามามีบทบาทในการควบคุมให้สภาพอากาศโดยจะควบคุมอุณหภูมิและความชื้นให้อยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะกับความต้องการการนำระบบปรับอากาศมาใช้งานจะพบได้ตั้งแต่การปรับอากาศในพื้นที่ขนาดเล็กเช่น ในห้องนอน ห้องทำงาน ไปจนถึงงานขนาดใหญ่เช่น หอประชุม อาคารสำนักงาน และในโรงงานอุตสาหกรรมเป็นต้น และจากผลการศึกษาที่ผ่านมาจะพบว่าในระบบปรับอากาศจะใช้พลังงานไฟฟ้า ประมาณ 50-70% ของพลังงานที่ใช้ในอาคารทั้งหมด[1]

## วิธีการศึกษา

งานวิจัยนี้ทำการศึกษา และทดสอบเครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วนชนิดอัดไอ (Vapor Compression Split-Type Air Conditioner) ที่ติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อความร้อนชนิดสั่นวงรอบที่ติดตั้งวาล์วกันกลับ (CLOHP/CV) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องปรับอากาศ ซึ่งเป็นระบบที่ช่วยลดอุณหภูมิของสารทำความเย็น ที่ออกจากคอมเพรสเซอร์ก่อนที่จะผ่านไประบายความร้อนที่คอนเดนเซอร์ ในการทดสอบจะควบคุมอุณหภูมิของอากาศภายในห้องปรับอากาศไว้ที่ 15°C โดยทำการทดสอบวันที่มีสภาพอากาศภายนอกใกล้เคียงกันมากที่สุดเพื่อนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับเครื่องปรับอากาศก่อนการปรับปรุง และศึกษาเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (Coefficient of Performance, COP) อัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงาน (Energy Efficiency Ratio, EER) กำลังไฟฟ้าที่ใช้ (Power Consumption) ของระบบปรับอากาศ

### อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

เครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วน ชนิดอัดไอที่มีขนาดการทำความเย็น 13,000 Btu/hr ใช้สำหรับทดสอบ เพื่อติดตั้งกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ (CLOHP/CV) ที่ประกอบด้วยท่อทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.03 mm พันขดรอบท่อสารทำความเย็นไปมาจำนวน 40 โค้งเลี้ยว ซึ่งประกอบไปด้วย 3 ส่วน คือ ส่วนทำระเหย ส่วนกันความร้อน และส่วนควบแน่น และมีจำนวนวาล์วกันกลับ 2 ตัว เพื่อบังคับทิศทางของสารทำงานภายในท่อความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนให้ไหลไปในทิศทางเดียวกันโดยใช้สารทำงาน R134a อัตราการเติมสารทำงาน 50% ของปริมาตรทั้งหมดลักษณะของชุดทดลอง[2] ดังภาพที่ 1

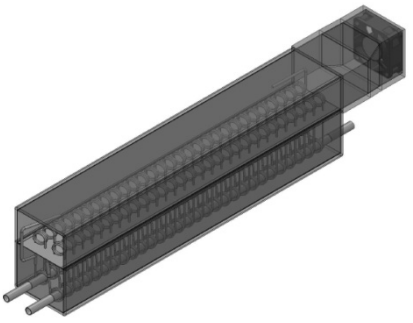

**Figure 1** Close loop oscillating heat pipe with check valve (CLOHP/CV) heat exchanger

ระบบปรับอากาศ จะถูกติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ (CLOHP/CV) ที่ตำแหน่งของท่อสารทำความเย็นทางออกคอมเพรสเซอร์ของระบบปรับอากาศ เพื่อลดอุณหภูมิของสารทำความเย็น ก่อนที่จะไหลเข้าไประบายความร้อนที่คอนเดนเซอร์ และทำการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดดังภาพที่ 2 โดยวัดค่าอุณหภูมิสารทำความเย็นและความดันก่อนเข้าและหลังออกจากเครื่องเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน อุณหภูมิอากาศก่อนเข้า และออกจากคอนเดนเซอร์ กำลังไฟฟ้าของคอมเพรสเซอร์และระบบ

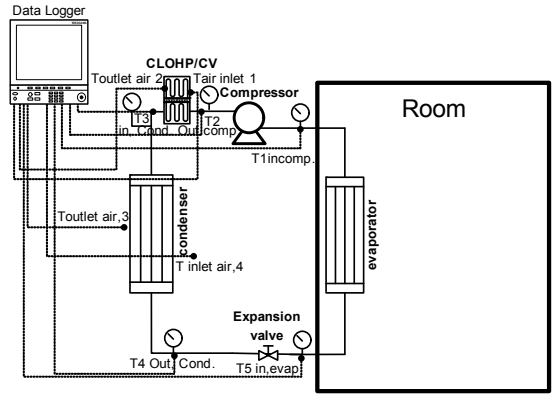


**Figure 2** The diagrams of air conditioning and equipment

### ขั้นตอนการเก็บรวบรวมข้อมูล

ในการทดสอบเครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วนที่ติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ (CLOHP/CV) จะควบคุมอุณหภูมิของอากาศภายในห้องปรับอากาศไว้ที่ 15°C โดยทำการทดสอบวันที่มีสภาพอากาศภายนอกใกล้เคียงกันมาก

ที่สุด โดยทำการทดสอบต่อเนื่องกันตลอด 24 ชั่วโมง และทำการเก็บบันทึกผลการวัดค่าต่างๆ ทุก 15 นาที โดยใช้เครื่องเก็บบันทึกข้อมูล อัตโนมัติ ในการทดสอบแต่ละเงื่อนไขการทดลองจะทำซ้ำ 3 ครั้ง และหาค่าเฉลี่ยเพื่อใช้ในการคำนวณเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะและประสิทธิภาพของระบบ

**สมการที่ใช้ในการคำนวณ**

การทดสอบค่าประสิทธิภาพของระบบปรับอากาศจะใช้สมการคำนวณค่าต่างๆ ดังต่อไปนี้

**ความสามารถในการทำความเย็น สามารถคำนวณโดยใช้สมการ**

$$Q_{evap} = \dot{m}_r (h_{evap,o} - h_{evap,i}) \quad (1)$$

โดย $Q_{evap}$ คือ ความสามารถในการทำความเย็น, W

$\dot{m}_r$ คือ อัตราการไหลเชิงมวลของสารทำความเย็นอีแวปอเรเตอร์, kg/s

$h_{evap,o}$ คือ เอนทัลปีส่วนอีแวปอเรเตอร์ขาออก, kJ/kg

$h_{evap,i}$ คือ เอนทัลปีส่วนอีแวปอเรเตอร์ขาเข้า, kJ/kg

**อัตราการระบายความร้อนของคอนเดนเซอร์ สามารถคำนวณโดยใช้สมการ**

$$Q_{cond} = \dot{m}_r (h_{cond,o} - h_{cond,i}) \quad (2)$$

โดย

$Q_{cond}$ คือ อัตราการระบายความร้อนของ คอนเดนเซอร์, W

$h_{cond,o}$ คือ เอนทัลปีส่วนคอนเดนเซอร์ขาออก, kJ/kg

$h_{cond,i}$ คือ เอนทัลปีส่วนคอนเดนเซอร์ขาเข้า, kJ/kg

**กำลังงานที่เกิดขึ้นจากคอมเพรสเซอร์ สามารถคำนวณโดยใช้สมการ**

$$W_{com} = VI_{com}\cos\theta \quad (3)$$

โดย

$W_{com}$ คือ กำลังที่สารทำความเย็นได้รับจากคอมเพรสเซอร์, W

$I_{com}$ คือ ค่ากระแสไฟฟ้า, A

$V$ คือ ค่าแรงดันไฟฟ้า, V

$\cos\theta$ คือ Power factor

**สัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็นสามารถคำนวณโดยใช้สมการ**

$$COP = \frac{Q_{evap}(kW)}{W_{com}(kW)} \quad (4)$$

โดย COP คือ สัมประสิทธิ์สมรรถนะของเครื่องปรับอากาศ

**อัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงาน สามารถคำนวณโดยใช้สมการ**

$$EER = \frac{Q_{evap}(Btu/hr)}{W_{total}(W)} \quad (5)$$

โดย EER คือ อัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานของเครื่องปรับอากาศ $\frac{(Btu/hr)}{(W)}$

$W_{total}$ คือ กำลังไฟฟ้าของระบบทั้งหมด, W

**กำลังไฟฟ้าของระบบที่ใช้ สามารถคำนวณโดยใช้สมการ**

$$W_{total} = W_{com} + W_{fan} + W_{heat,pipe} = V(I_{com} + I_{fan} + I_{heat,pip})\cos\theta \quad (6)$$

โดย $W_{fan}$ คือ กำลังไฟฟ้าจากส่วนพัดลม, W

$V$ คือ ค่าแรงดันไฟฟ้า, Volt

$I_{com}$ คือ ค่ากระแสไฟฟ้าจากส่วนคอมเพลสเซอร์, Amp

$I_{fan}$ คือ ค่ากระแสไฟฟ้าจากส่วนพัดลม, Amp

$I_{heat,pip}$ คือ ค่ากระแสไฟฟ้าจากส่วนท่อความร้อน, Amp

$W_{heat,pipe}$ คือ กำลังไฟฟ้าจากท่อความร้อน, W

## ผลการวิจัยและอภิปราย

จากผลการทดสอบเครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วน ที่ติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ (CLOHP/CV) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพลดอุณหภูมิสารทำความเย็นที่มีอุณหภูมิสูงก่อนที่ไหลเข้าสู่คอนเดนเซอร์เพื่อระบายความร้อนนั้น โดยการวัดค่าอุณหภูมิ ความดัน ความเร็วลม และกำลังไฟฟ้า ในระบบปรับอากาศ และสามารคำนวณค่าประสิทธิภาพของระบบ

โดยการเปรียบเทียบระหว่างระบบปรับอากาศก่อนการติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ (CLOHP/CV) และหลังการติดตั้ง Figure 3 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิสารทำความเย็นทางเข้า และทางออกเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ (CLOHP/CV) พบว่าอุณหภูมิของสารทำความเย็นที่ทางเข้ามีค่าลดลง เมื่อใช้สารทำงานต่างชนิดกัน ทั้งนี้เพราะว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของสารทำงานมีค่าแตกต่างขึ้นอยู่กับชนิดของสารทำงานภายในท่อความร้อน[3]

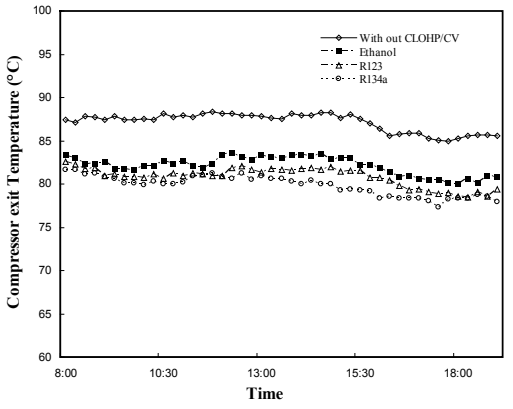


**Figure 3** The refrigerant temperature change at inlet the condenser

Figure 3 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิสารทำความเย็นทางเข้าคอนเดนเซอร์ พบว่าอุณหภูมิสารทำความเย็นทางเข้ามีค่าลดลง เมื่อสารทำความเย็นไหลผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ (CLOHP/CV) ทั้งนี้เพราะว่า สารทำความเย็นเกิดการแลกเปลี่ยนความกับชุดท่อความร้อนก่อนจะไหลเข้าคอนเดนเซอร์ ส่งผลให้อุณหภูมิสารทำความเย็นมีค่าลดลง นอกจากนี้ยังพบว่า ชุดท่อความร้อนที่ใช้ R134a เป็นสารทำงานมีผลทำให้อุณหภูมิสารทำความเย็นทางเข้าคอนเดนเซอร์มีค่าต่ำกว่า เนื่องจากสารทำงาน R134a มีความร้อนแฝงของการเป็นไอต่ำกว่าสารทำงาน R123 และ Ethanol จึงสามารถถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่า Figure 4 ของการเปรียบเทียบค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของสารทำงานที่ได้จากผลการทดลอง[4]

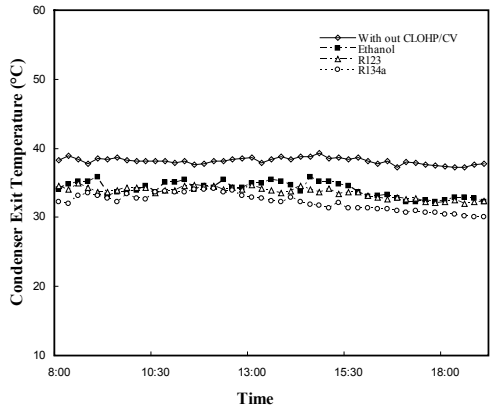


**Figure 4** The comparison of refrigerant temperature at outlet the condenser

Figure 4 พบว่าอุณหภูมิสารทำความเย็นทางออกคอนเดนเซอร์มีค่าต่ำลง เนื่องจากสารทำความเย็นทางเข้ามีอุณหภูมิลดลง ทำให้เป็นการช่วยลดภาระการระบายความร้อนของคอนเดนเซอร์ จึงส่งผลให้อุณหภูมิสารทำความเย็นทางออกคอนเดนเซอร์ที่ผ่านการควบแน่นลดลงตามไปด้วย ดังภาพที่ 4 แสดงการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิสารทำความเย็นทางออกคอนเดนเซอร์ที่ได้จากการทดลอง

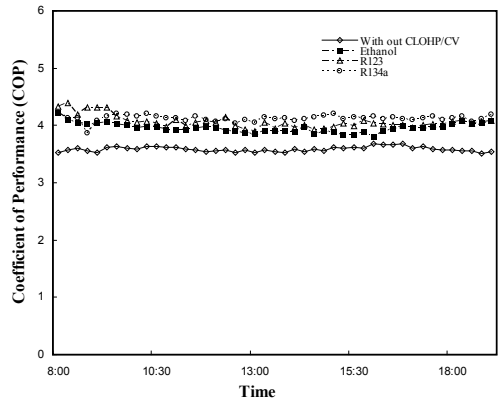


**Figure 5** The comparison of coefficient of performance of air condition system

Figure 5 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (COP) ของระบบปรับอากาศที่มีการติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ (CLOHP/CV ) มีค่าเฉลี่ยสูงกว่าระบบปรับอากาศที่ไม่มีการติดตั้งถึง 21.98% เนื่องจาก อุณหภูมิของสารทำความเย็นทางเข้าคอนเดนเซอร์มีอุณหภูมิลดลง จึงช่วยลดภาระการระบายความร้อนของคอนเดนเซอร์ ทำให้ระบายความร้อนได้ดีขึ้น ทั้งนี้ยังส่งผลให้อุณหภูมิสารทำความเย็นที่ควบแน่นบริเวณทางออกคอนเดนเซอร์มีอุณหภูมิลดลง ส่งผลให้อัตราการไหลเชิงมวลของสารทำความเย็นในระบบเพิ่มขึ้น และมี

อัตราการทำความเย็นที่สูงขึ้น จึงทำให้ค่า COP ของระบบเพิ่มขึ้นเนื่องจากค่าCOP ของระบบ เป็นการคำนวณจาก $Q_{Evap}$ / $W_{com}$ ของสมการที่ (4)

Figure 6 พบว่าค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงาน (EER) ของระบบปรับอากาศที่มีการติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ (CLOHP/CV) มีค่าเฉลี่ยสูงกว่าระบบปรับอากาศที่ไม่มีการติดตั้งถึง 20.72% ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของสันติ ในปี พ.ศ. 2530 เนื่องจากอุณหภูมิของสารทำความเย็น และความดันของระบบมีค่าลดลง ส่งผลให้ระบบมีการใช้กำลังไฟฟ้าลดลง และค่า COP ของระบบปรับอากาศมีค่าสูงขึ้น จึงส่งผลทำให้ค่า EER ของระบบค่าการใช้พลังงานในระบบปรับอากาศมีค่าลดลง มีค่าเพิ่มขึ้น[5]

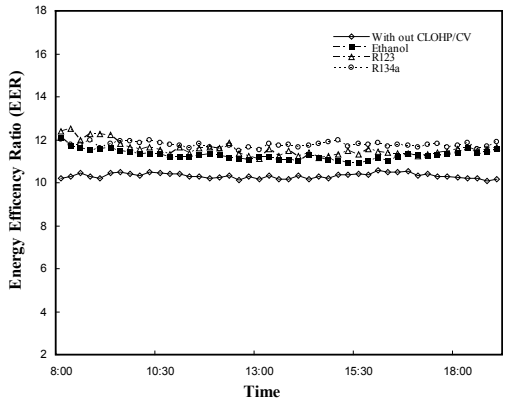


**Figure 6** The comparison of energy efficiency ratio of air condition system

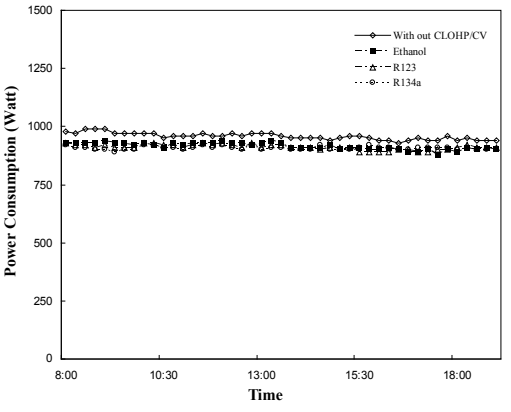


**Figure 7** The comparison of power consumption of air condition system

Figure 8 พบว่าสารทำงานที่มีค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดคือ R134a, R123 และ Ethanol ตามลำดับ เนื่องจากสารทำงานที่มีเอนทัลปีเพิ่มมาก ที่อัตราความเร็วลมเท่ากัน ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนจะมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากคุณสมบัติของสารทำงานที่มีค่าเอนทัลปีสูง จะมีแรงตึงผิวของสารทำงานมากขึ้นตามไปด้วย ส่งผลให้ปริมาณของฟองไอภายในท่อเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนลดลง ทำให้การส่งถ่ายความร้อนจึงทำได้ไม่ดีเมื่อเทียบกับสารที่มีค่าเอนทัลปีต่ำกว่า[6,7]

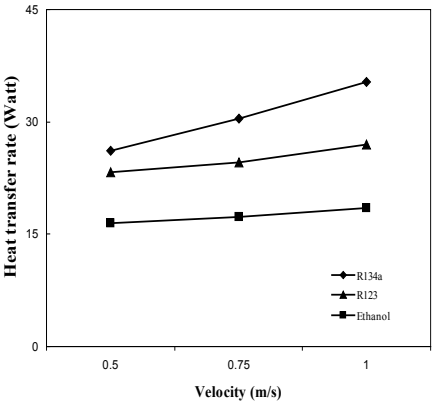


**Figure 8** The comparison of heat transfer rate of CLOHP/CV

## สรุป

จากการศึกษาการเพิ่มประสิทธิ์ภาพของเครื่องปรับอากาศโดยใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อความร้อนชนิดสั่นวงรอบที่ติดตั้งวาล์วกันกลับ (CLOHP/CV) เพื่อใช้ลดอุณหภูมิสารทำความเย็นทางออกคอมเพรสเซอร์ กับเครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วนขนาด 13,000 Btu/hr จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่า เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้สารทำงาน R134a ลดอุณหภูมิสารทำความเย็นทางออกคอมเพรสเซอร์ลดลงได้เฉลี่ยสูงสุดถึง 8.5°C ซึ่งจะให้ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็นเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 21.98% ค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 20.72% และกำลังไฟฟ้าของระบบโดยรวมมีค่าลดลงเฉลี่ย 5.6% ระบบนี้ สามารถทำให้อุณหภูมิของสารทำความเย็นทางออกคอมเพรสเซอร์ลดลง ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ในทางเทคนิค ที่จะพัฒนาระบบปรับอากาศนี้ให้ใช้ในเชิงพาณิชย์ และลดปัญหาสิ่งแวดล้อมได้อีกทาง[8]

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ภายใต้โครงการทุนวิจัยมหาบัณฑิต MRG545E047 ที่สนับสนุนทุนวิจัยในการดำเนินงานวิจัยนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

## เอกสารอ้างอิง

(1) เรืองฤทธิ์ ลำมะยศ. (2542) การปรับปรุง ประสิทธิภาพของเครื่องปรับอากาศโดยการหล่อเย็นที่แผงระบายความร้อน. วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

(2) สัมพันธ์ ฤทธิเดช. (2553) เทคโนโลยีท่อความร้อน. มหาสารคาม: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยมหาสารคาม.

(3) อัครเดช สินธุภัค. (2543) การปรับอากาศ. พิมพ์ครั้งที่ 5, กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

(4) Supirattanakul P, Rittidech S, Bubphachot B. (2011) Application of a closed-loop oscillating heat pipe with check valves (CLOHP/CV) on performance enhancement in air conditioning system. Energy and Buildings, 43(7): 1531–1535.

(5) kuakulkitjakarn S. (1987) Improving the energy efficiency ratio of room air conditioners [MEd thesis]. Bangkok. King Mongkut's University of Technology Thonburi.

(6) Naphon P. (2010) On the performance of air conditioner with heat pipe for cooling air in the condenser. Energy Conversion and Management, 51(11): 2362–2366.

(7) Hajidavalloo E. Eghtedari H. (2010) Performance improvement of air-cooled refrigeration system by using evaporative cooled air condenser. International journal of refrigeration, 33(5): 982–988.

(8) Rittidech S. Pipatpaiboon N. Terdtoon P. (2006) Heat-transfer characteristics of closed-loop oscillating heat pipe with check valves. Applied Energy, 84: 565–577.