

**การประยุกต์ใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลตามขวางดัดแปลงจาก
คอนเดนเซอร์ระบบปรับอากาศรถยนต์: กรณีศึกษาการดึงความร้อนที่
จากน้ำร้อนมาใช้อุ่นอากาศ**
ขวัญชัย ไกรทอง^{a,*} และ อติพงศ์ นันทพันธุ์^b

**Application of Cross Flow Heat Exchanger Modified from Automobile
Air-conditioning Condenser: A Case Study of Waste Heat Recovery
from Hot Water for Air Preheating**
Kwanchai Kraitong^{a,*} and Atipong Nuntaphan^b

^aภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อ. เมือง จ. พิษณุโลก 65000

^bกองศูนย์ฝึกอบรมแม่เมาะ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย อ. แม่เมาะ จ. ลำปาง 52220

^aDepartment of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Naresuan University, Phitsanulok 65000, Thailand.

^bMaemoe Training Center, Electricity Generating Authority of Thailand, Maemoe, Lamphang 52220, Thailand.

*Corresponding author. E-mail address: kwanchaik@nu.ac.th (K. Kraitong)

Received 27 August 2004; accepted 9 February 2005

บทคัดย่อ

คอนเดนเซอร์ของระบบปรับอากาศรถยนต์มีลักษณะทางกายภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีราคาถูก และสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรมได้เช่นเดียวกับหม้อน้ำรถยนต์ งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาถึงคุณลักษณะเชิงความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลตามขวางซึ่งดัดแปลงจากคอนเดนเซอร์ของระบบปรับอากาศรถยนต์ โดยอุปกรณ์ดังกล่าวได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างน้ำร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 65°C กับอากาศที่อุณหภูมิห้อง พารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ได้แก่ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศซึ่งอยู่ในช่วง 0.1 และ 0.4 กก./วินาที จำนวนคอนเดนเซอร์ 1-3 ชุด และทิศทางการไหลของน้ำร้อนและอากาศสองแบบ คือ แบบไหลสวนทางและไหลตามกัน จากการศึกษาพบว่า ค่าประสิทธิผลของการแลกเปลี่ยนความร้อนอยู่ระหว่าง 0.4 และ 0.9 ซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ จำนวนคอนเดนเซอร์ และทิศทางการไหลของน้ำและอากาศ และนอกจากนี้ในงานวิจัยนี้ได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ประเมินค่าประสิทธิผลของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งพบว่าแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นสามารถทำนายผลการทดลองได้ทั้งหมดในช่วง $\pm 10\%$ จากการเปรียบเทียบสมรรถนะและราคากับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบปกติ พบว่าอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นมีความเป็นไปได้ในการนำมาใช้เชิงปฏิบัติสูง

คำสำคัญ: คอนเดนเซอร์รถยนต์ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลตามขวาง การทดสอบสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

Abstract

The condenser of an automobile air-conditioning system has the physical characteristics of low price heat exchanger, and it can be applied effectively and economically to industrial work. The thermal characteristics of a cross flow heat exchanger, modified from the condenser of an automobile air-conditioning system, were investigated in this research work. This apparatus was used for exchanging heat between 65°C hot water and ambient air. Parameters considered in this investigation were the mass flow rate of air stream, which ranged between 0.1 and 0.4 kg/s; the number of condensers which were 1-3 sets; and the flow patterns of hot water and ambient air with two variations, i.e., counter flow and parallel flow. It was found that the calculated effectiveness was between 0.4 and 0.9 depending on the mass flow rate of air, the number of condensers used and the flow pattern of water and air. In addition to the above apparatus, a mathematical model was built to predict the effectiveness of the heat exchanger. It was found that the model could predict all of the experimental value within $\pm 10\%$. From the comparison with the conventional heat exchanger it was found that the developed heat exchanger had high possibility for real application.

Keywords: automobile condenser, cross flow heat exchanger, performance testing of heat exchanger

บทนำ

อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญในกระบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ ในปัจจุบันได้มีการพัฒนารูปแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมากมายเพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งาน โดยอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลตามขวาง (cross flow heat exchanger) เป็นอุปกรณ์ประเภทหนึ่ง ที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม ทั้งนี้เนื่องจากมีสมรรถนะสูงและสามารถผลิตขึ้นเองได้ภายในประเทศ อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนประเภทนี้มักใช้แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างอากาศกับอากาศหรืออากาศกับน้ำ อย่างไรก็ตามวัสดุที่ใช้สร้างอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลตามขวางมีราคาค่อนข้างสูงซึ่งส่งผลให้ต้นทุนในการผลิตเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

ปัจจุบันมีนักวิจัยหลายท่านได้ประยุกต์ใช้งานอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้ในรถยนต์ (automobile heat exchanger) มาใช้เป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลตามขวางในอุตสาหกรรม โดยได้ดัดแปลงหม้อน้ำรถยนต์มาใช้ในกระบวนการดึงความร้อนทิ้งจากเตาอบขนมเพื่อใช้ในการอุ่นน้ำ (เจนจิรา, 2545) และได้มีการดัดแปลงหม้อน้ำรถยนต์มาใช้เป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนในการดึงความร้อนทิ้งจากก๊าซไอเสียของหม้อไอน้ำมาใช้อุ่นน้ำป้อน (ทนงเกียรติ, 2547) นอกจากนี้ยังมีการดัดแปลงหม้อน้ำรถยนต์เป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน (thermosiphon heat exchanger) เพื่อใช้ดึงความเย็นทิ้งจากระบบปรับอากาศกลับมาใช้ทำความเย็นสำหรับอากาศก่อนเข้าเครื่องส่งลมเย็น (fan coil) (อติพงศ์ และทนงเกียรติ, 2547, สิงหาคม) และพัฒนาเพื่อมาใช้ในการดึงความร้อนทิ้งกลับมาใช้ประโยชน์ (อติพงศ์ และทนงเกียรติ, 2547, ตุลาคม)

จากงานวิจัยข้างต้นพบว่า จุดเด่นของการใช้หม้อน้ำรถยนต์มาดัดแปลงเป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลตามขวางหรืออุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนประเภทอื่น คือ มีสมรรถนะสูงและราคาถูก เมื่อเทียบกับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบปกติ อย่างไรก็ตามอุปกรณ์ดังกล่าวไม่เหมาะสมที่จะทำงานภายใต้อุณหภูมิสูงกว่า 150°C

คอนเดนเซอร์ของระบบปรับอากาศรถยนต์ (automobile air-conditioning condenser) เป็นอุปกรณ์อีกประเภทหนึ่ง ซึ่งมีลักษณะทางกายภาพคล้ายกับหม้อน้ำรถยนต์ รวมทั้งมีราคาถูก ซึ่งคาดว่าจะสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมได้เช่นเดียวกันกับหม้อน้ำรถยนต์ อย่างไรก็ตาม ยังไม่มีข้อมูลที่แน่ชัดเกี่ยวกับสมรรถนะของอุปกรณ์ดังกล่าว ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะศึกษาสมรรถนะของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ดัดแปลงจากคอนเดนเซอร์ของระบบปรับอากาศรถยนต์ ซึ่งข้อมูลที่ได้รับคาดว่าจะจะเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนในอนาคต

รูปแบบการใช้งานคอนเดนเซอร์ระบบปรับอากาศรถยนต์ในงานวิจัยนี้ จะเป็นกรณีศึกษาการดึงความร้อนทิ้งจากน้ำซึ่งมีอุณหภูมิสูง เช่น น้ำระบายจากระบบการผลิตต่าง ๆ ในอุตสาหกรรมมาใช้อุ่นอากาศในกระบวนการผลิต รวมทั้งทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบต้นทุนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ดัดแปลงจากคอนเดนเซอร์ระบบปรับอากาศรถยนต์กับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบปกติเพื่อศึกษาความเป็นไปได้เชิงเศรษฐศาสตร์ของการนำไปใช้ประโยชน์ในเชิงปฏิบัติ

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

อัตราการถ่ายเทความร้อนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลตามขวางซึ่งแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างน้ำซึ่งมีอุณหภูมิสูงและอากาศซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่า สามารถคำนวณได้จาก

$$Q = \dot{m}_a C_{p_a} (T_{ao} - T_{ai}) \quad (1)$$

$$Q = \dot{m}_w C_{p_w} (T_{wi} - T_{wo}) \quad (2)$$

$$Q = (UA) \Delta T_{LMTD} \quad (3)$$

- โดย Q คือ อัตราการถ่ายเทความร้อน (W)
 A คือ พื้นที่ (m²)
 U คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (W/m²K)

Cp_a	คือ	ค่าความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ (J/kgK)
Cp_w	คือ	ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ (J/kgK)
\dot{m}_a	คือ	อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ (kg/s)
\dot{m}_w	คือ	อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำ (kg/s)
T_{ai}	คือ	อุณหภูมิอากาศด้านเข้า ($^{\circ}\text{C}$)
T_{ao}	คือ	อุณหภูมิอากาศด้านออก ($^{\circ}\text{C}$)
T_{wi}	คือ	อุณหภูมิน้ำด้านเข้า ($^{\circ}\text{C}$)
T_{wo}	คือ	อุณหภูมิน้ำด้านออก ($^{\circ}\text{C}$)
ΔT_{LMTD}	คือ	อุณหภูมิแตกต่างเชิงล็อก ($^{\circ}\text{C}$)

ในการคำนวณจะกำหนดให้ (UA) ในสมการ (3) เป็นค่าที่รวมแฟกเตอร์แก้ (correction factor) ของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่มีได้เป็นแบบไหลสวนทางหรือไหลตามกันอย่างแท้จริงเข้าไว้ด้วยกัน ดังนั้นในกรณีนี้ค่าอุณหภูมิแตกต่างเชิงล็อก สามารถคำนวณได้จาก

กรณีไหลสวนทางกัน

$$\Delta T_{LMTD} = \frac{(T_{wi} - T_{ao}) - (T_{wo} - T_{ai})}{\ln\left(\frac{T_{wi} - T_{ao}}{T_{wo} - T_{ai}}\right)} \quad (4)$$

กรณีไหลตามกัน

$$\Delta T_{LMTD} = \frac{(T_{wi} - T_{ai}) - (T_{wo} - T_{ao})}{\ln\left(\frac{T_{wi} - T_{ai}}{T_{wo} - T_{ao}}\right)} \quad (5)$$

ดัชนีที่ใช้บ่งบอกสมรรถนะที่นิยมใช้ในปัจจุบันคือค่าประสิทธิผล (effectiveness) ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_{max}} \quad (6)$$

$$\varepsilon = \frac{Q}{(\dot{m}Cp)_{min} \Delta T_{max}} \quad (7)$$

โดย	ε	คือ	ประสิทธิผล
		คือ	อัตราการถ่ายเทความร้อน (W)
	Q_{max}	คือ	อัตราการถ่ายเทความร้อนมากที่สุด (W)
	$(\dot{m}Cp)_{min}$	คือ	ผลคูณของอัตราการไหลเชิงมวลกับความจุความร้อนจำเพาะของของไหลที่มีค่าน้อย
	ΔT_{max}	คือ	อุณหภูมิแตกต่างสูงสุด

อนึ่ง งานวิจัยนี้ได้ออกแบบการทดลองให้ค่าผลคูณระหว่างอัตราการไหลเชิงมวลและค่าความจุความร้อนจำเพาะที่น้อยที่สุดคือด้านของอากาศ และผลต่างของอุณหภูมิที่มากที่สุดคือผลต่างของอุณหภูมิด้านเข้าอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนของน้ำและอากาศ

โดยปกติแล้วค่าประสิทธิผลจะเป็นฟังก์ชันของจำนวนหน่วยถ่ายเท (number of transfer unit) และค่าอัตราส่วนระหว่างผลคูณของอัตราการไหลเชิงมวลกับความจุความร้อนจำเพาะของของไหลทั้งสองกระแส ดังนี้

$$\varepsilon = \text{function of } \{NTU, C^*\} \tag{8}$$

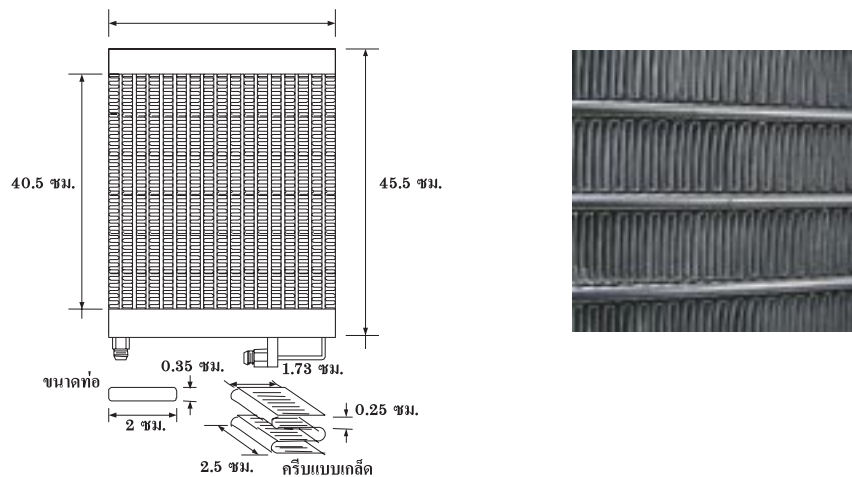
$$NTU = \frac{UA}{(\dot{m}Cp)_{min}} \tag{9}$$

$$C^* = \frac{(\dot{m}Cp)_{min}}{(\dot{m}Cp)_{max}} \tag{10}$$

โดย	ε	คือ	ประสิทธิภาพ
		คือ	จำนวนหน่วยถ่ายเท
	C^*	คือ	อัตราส่วนระหว่างผลคูณของอัตราการไหลเชิงมวลกับความจุความร้อนจำเพาะของของไหลทั้งสองกระแส
	A	คือ	พื้นที่ (m ²)
	U	คือ	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (W/m ² K)
	$(\dot{m}Cp)_{min}$	คือ	ผลคูณของอัตราการไหลเชิงมวลกับความจุความร้อนจำเพาะของของไหลที่มีค่าน้อย
	$(\dot{m}Cp)_{max}$	คือ	ผลคูณของอัตราการไหลเชิงมวลกับความจุความร้อนจำเพาะของของไหลที่มีค่ามาก

วัสดุอุปกรณ์และวิธีการ

ลักษณะและขนาดคอนเดนเซอร์ของระบบปรับอากาศรถยนต์ที่นำมาศึกษาในงานวิจัยนี้ (รูปที่ 1) มีลักษณะเป็นท่อแบบแบน (flat tube) และติดครีบบางเกล็ด (louver fin) เพื่อเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน คอนเดนเซอร์จำนวน 1 ชุด ประกอบด้วยท่อแบนจำนวน 16 ท่อ โดยแต่ละท่อจะเชื่อมต่อกัน ท่อแบนมีจุดเด่นคือสามารถลดการหมุนวนของอากาศ (air re-circulation) บริเวณด้านหลังท่อได้ทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าท่อกลม (Webb, 1993)

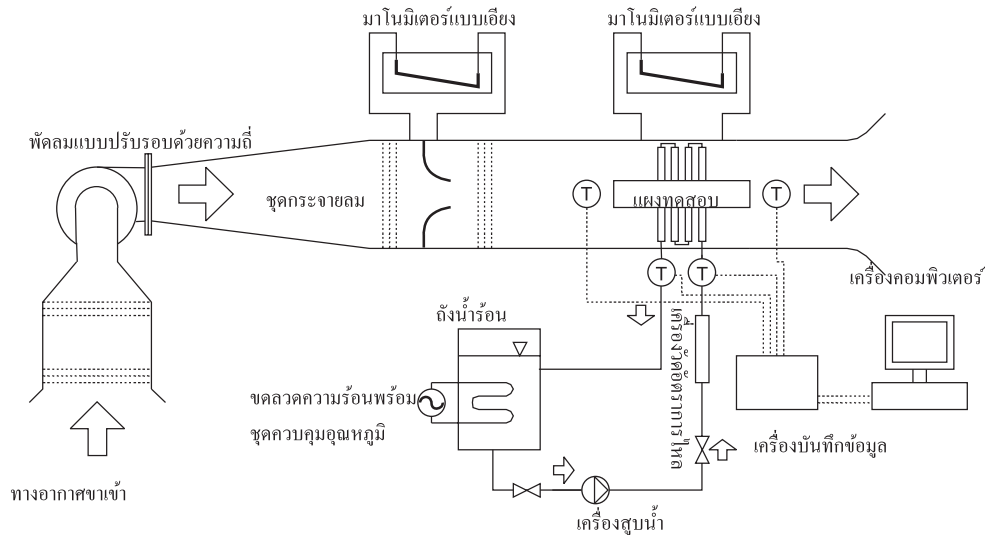


รูปที่ 1 ก) ขนาดของคอนเดนเซอร์ที่ทดสอบ

ข) ลักษณะของคอนเดนเซอร์ที่ทดสอบ

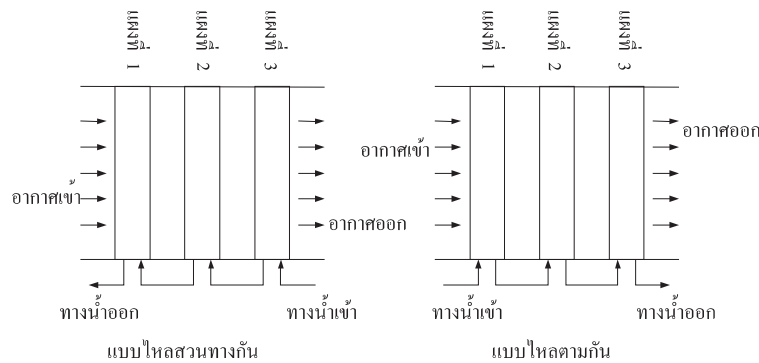
ในการทดสอบสมรรถนะของระบบยึดตามมาตรฐานเป็นหลัก (ANSI/ASHRAE 41.1, 1986; ANSI/ASHRAE 41.2, 1987; ANSI/ASHRAE 41.3, 1989) โดยอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ศึกษาจะแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างอากาศกับน้ำร้อนภายในอุโมงค์ลม (รูปที่ 2) ซึ่งอุปกรณ์การวิจัยประกอบด้วยอุปกรณ์หลัก คือ ท่อส่งอากาศขนาดหน้าตัด 0.5x0.5 ตารางเมตร โดยมีพัดลม (air blower) ขนาด 2 hp

ทำหน้าที่ส่งอากาศอุณหภูมิห้องเข้าไปแลกเปลี่ยนความร้อนที่คอนเดนเซอร์รถยนต์ อัตรการไหลของอากาศจะถูกวัดโดย Standard nozzle และ มานอมิเตอร์แบบเอียง (incline manometer) โดยในการวิจัยนี้อัตรการไหลของอากาศอยู่ในช่วง 0.1-0.4 กก./วินาที โดยที่อุณหภูมิของอากาศด้านเข้ากลุ่มท่อมีค่าประมาณ 25°C



รูปที่ 2 ลักษณะของอุปกรณ์การวิจัย

น้ำร้อนอุณหภูมิ 65°C มีอัตรการไหล 7 ลิตร/วินาที ถูกส่งจากถังน้ำร้อนเข้าไปไหลเวียนภายในกลุ่มท่อเพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนกับอากาศ และทำการวัดอุณหภูมิของอากาศและน้ำด้านเข้าและออกจากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนโดยใช้เทอร์โมคัปเปิล (thermocouple) ชนิด K และวัดค่าความดันตกคร่อมกลุ่มท่อโดยใช้มานอมิเตอร์แบบเอียง งานวิจัยนี้จะทดสอบสมรรถนะของคอนเดนเซอร์จำนวน 1-3 แผงต่ออนุกรมกัน (รูปที่ 3) โดยทิศทางการไหลของอากาศและน้ำเสมือนหนึ่งเป็นแบบไหลสวนทาง (counter flow) และไหลตามกัน (parallel flow)

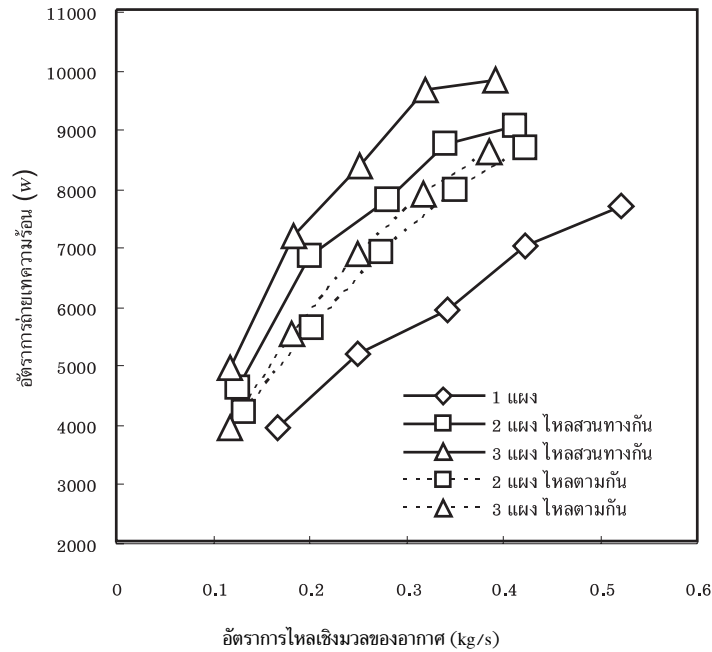


รูปที่ 3 ลักษณะทิศทางการไหลของน้ำและอากาศ

ผลการศึกษาและวิจารณ์ผลการศึกษา

จากการทดสอบพบว่า ค่าอัตรการถ่ายเทความร้อนของคอนเดนเซอร์ของระบบปรับอากาศรถยนต์มีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตรการไหลเชิงมวลของอากาศ และจำนวนแผงของคอนเดนเซอร์ ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ปกติของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนทั่วไป นอกจากนี้ยังพบว่า กรณีกำหนดทิศทางการไหลของน้ำและอากาศเป็นแบบไหลสวนทางกันให้ค่าสมรรถนะที่สูงกว่าการไหลแบบตามกันทั้งในกรณีจำนวนแผงของคอนเดนเซอร์เท่ากับ 2 และ 3 แผง ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวเป็นไปตามทฤษฎีของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนโดยการไหล

แบบไหลสวนทางกันและมีพื้นที่ไม่จำกัดของไหล ที่มีค่าผลคูณของอัตราการไหลเชิงมวลและความจุความร้อนจำเพาะต่ำสามารถเพิ่มหรือลดอุณหภูมิให้ใกล้เคียงหรือเท่ากับอุณหภูมิด้านเข้าของของไหลที่มีค่าผลคูณของอัตราการไหลเชิงมวลและความจุความร้อนจำเพาะสูงได้ ซึ่งหมายถึงมีอัตราการถ่ายเทความร้อนที่สูง แต่ในกรณีของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลตามกัน ของไหลทั้งสองกระแสจะไหลเข้าและออกจากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนในด้านเดียวกัน ดังนั้นจึงไม่มีโอกาสที่อุณหภูมิด้านออกจากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนของไหลกระแสใดกระแสหนึ่งจะมีค่าเท่ากับอุณหภูมิด้านเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของของไหลอีกกระแสหนึ่ง ทำให้ในทางปฏิบัติพบว่า อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลสวนทางกันมีสมรรถนะที่สูงกว่าอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลตามกัน (รูปที่ 4)



รูปที่ 4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของคอนเดนเซอร์กับอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศแบบการไหลตามกัน และการไหลสวนทางกัน ที่จำนวนแฉงคอนเดนเซอร์ 1 แฉง 2 แฉง และ 3 แฉง

ค่าผลคูณของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมและพื้นที่ที่อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศมีผลที่ได้สอดคล้องกับค่าอัตราการถ่ายเทความร้อน คือ ค่าดังกล่าวแปรผันตามอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ และจำนวนแฉงคอนเดนเซอร์ รวมทั้งกรณีของการไหลสวนทางกันมีค่าผลคูณของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมและพื้นที่สูงกว่ากรณีไหลตามกัน (รูปที่ 5) ส่วนค่าประสิทธิผลของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนพบว่ามีค่าลดลงเมื่ออัตราการไหลเชิงมวลของอากาศเพิ่มขึ้น สำหรับผลของจำนวนแฉงหม้อน้ำรถยนต์ทิศทางการไหลของน้ำและอากาศต่อค่าประสิทธิผลมีลักษณะสอดคล้องกับการมีผลต่อค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนและค่าผลคูณของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมและพื้นที่ นอกจากนี้ยังพบว่าคอนเดนเซอร์รถยนต์มีค่าประสิทธิผลที่ประมาณ 0.4-0.9 ซึ่งมีค่ามากเมื่อเทียบกับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลตามขวางทั่วไป ซึ่งประเด็นนี้ถือว่าเป็นจุดเด่นของอุปกรณ์ประเภทนี้ (รูปที่ 6)

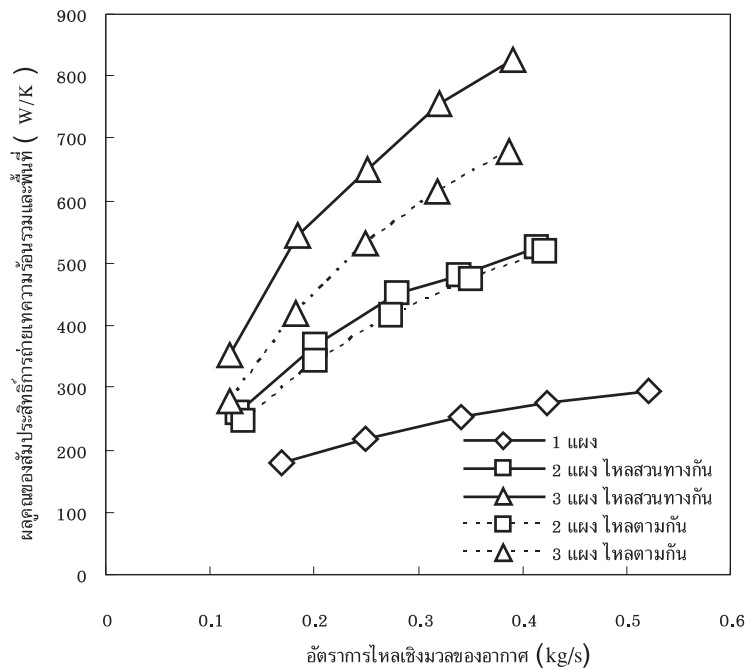
นอกจากนี้ ในงานวิจัยนี้ยังได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ขึ้นมา เพื่อใช้คำนวณค่าประสิทธิผลของคอนเดนเซอร์สำหรับกรณีศึกษาในงานวิจัยนี้ โดยเป็นฟังก์ชันของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องต่างๆ ดังต่อไปนี้

$$\epsilon = 0.617NTU^{0.887} C^{*0.020} n^{-0.388} d^{-0.127} \quad (11)$$

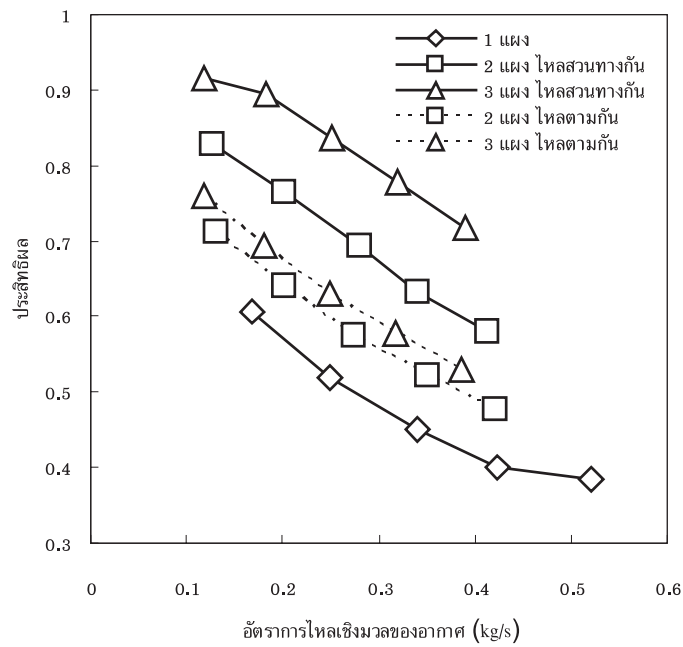
โดย	ε	คือ	ประสิทธิภาพ
		คือ	จำนวนหน่วยถ่ายเท
	C^*	คือ	อัตราส่วนของ Heat capacity flow rate
	d	คือ	ทิศทางการไหลของอากาศและน้ำ
	n	คือ	จำนวนแผงคอนเดนเซอร์รถยนต์

โดยในที่นี้จะกำหนดให้ ε มีค่าเท่ากับ 1 กรณีที่มีจำนวนแผงคอนเดนเซอร์ 1 แผง และ d มีค่าเท่ากับ 2 และ 3 กรณีที่มีจำนวนแผงคอนเดนเซอร์มากกว่า 1 แผง ซึ่งมีทิศทางการไหลของอากาศและน้ำเป็นแบบสวนทางและไหลตามกัน ตามลำดับ

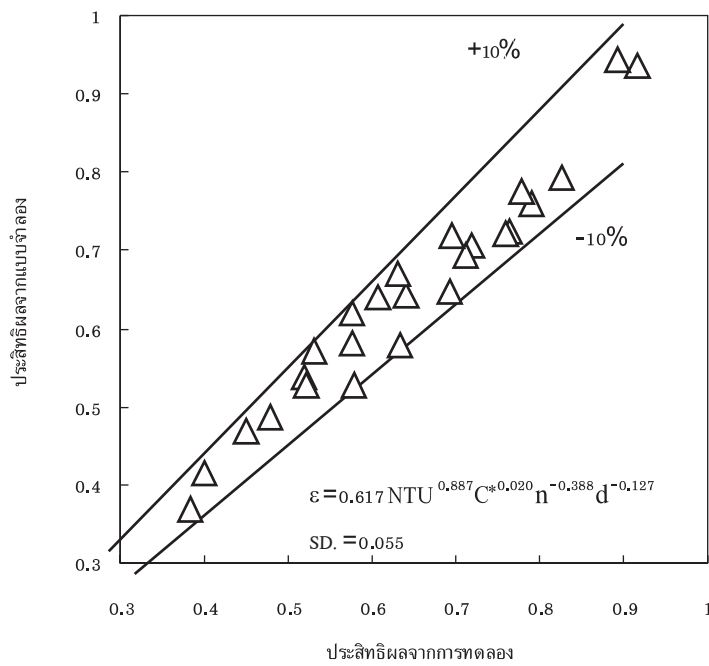
จากการทดลองพบว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นสามารถทำนายผลการทดลองได้ทั้งหมดในช่วง 10% โดยมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.055 (รูปที่ 7) ส่วนค่าความดันอากาศตกคร่อมที่ผ่านคอนเดนเซอร์พบว่าความดันอากาศตกคร่อมมีค่าไม่สูงมากนัก และแปรผันตามอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศและจำนวนแผงคอนเดนเซอร์ (รูปที่ 8)



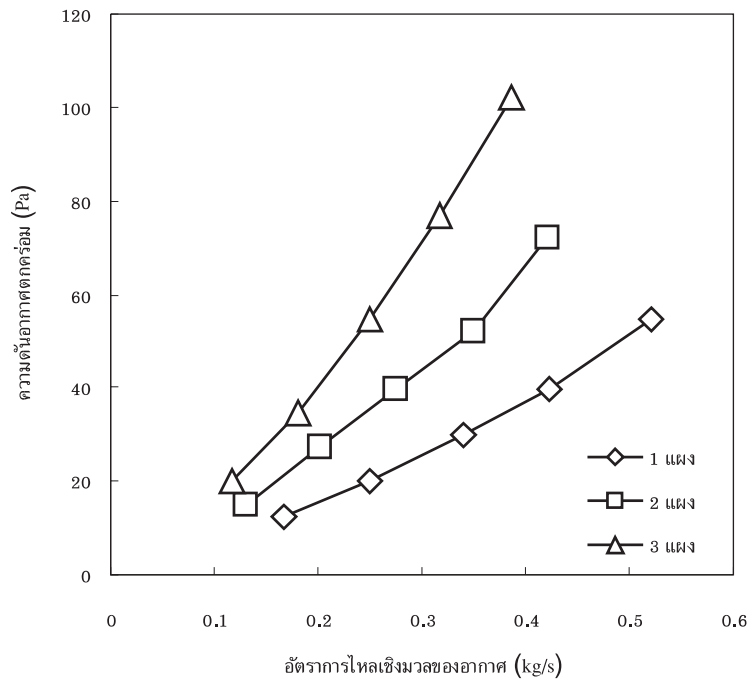
รูปที่ 5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าผลคูณของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมและพื้นที่ของคอนเดนเซอร์กับอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศและการไหลตามกันและการไหลสวนทางกัน ที่จำนวนแผงคอนเดนเซอร์ 1 แผง 2 แผง และ 3 แผง



รูปที่ 6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิภาพของคอนเดนเซอร์กับอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศแบบการไหลตามกัน และการไหลสวนทางกันที่จำนวนแผงคอนเดนเซอร์ 1 แผง 2 แผง และ 3 แผง



รูปที่ 7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิภาพของคอนเดนเซอร์จากแบบจำลองกับค่าประสิทธิภาพของคอนเดนเซอร์จากการทดลอง



รูปที่ 8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันอากาศตกคร่อมของคอนเดนเซอร์กับอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่จำนวนแผงคอนเดนเซอร์ 1 แผง 2 แผง และ 3 แผง

อนึ่ง งานวิจัยนี้ยังได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบราคาของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ดัดแปลงจากคอนเดนเซอร์ของระบบปรับอากาศกับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลตามขวาง (cross flow heat exchanger) ซึ่งใช้ท่อครีบบนเกลียวชนิดขอบหยัก (crimped spiral finned tube) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมทั่วไป (อดิพงษ์, 2547) ซึ่งพบว่า การนำคอนเดนเซอร์รถยนต์มาดัดแปลงเป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลตามขวางมีราคาต่ำกว่าการใช้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบปกติมาก รวมทั้งสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนที่ได้รับจะสูงกว่าเล็กน้อย (ตารางที่ 1)

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบสมรรถนะและราคาของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

รายการ	อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลตามขวาง	คอนเดนเซอร์รถยนต์
ลักษณะกายภาพ	ท่อครีบบนเกลียวชนิดขอบหยัก	คอนเดนเซอร์รถยนต์ตามรูปที่ 1 จำนวน 1 แผง
จำนวนท่อ	36 ท่อ	
ความยาวท่อ	45 ซม.	
เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ	21.7 มม.	
ความสูงครีบบ	10.0 มม.	
ระยะห่างระหว่างครีบบ	3.85 มม.	
การจัดเรียงท่อ	แบบเหลื่อมกัน	
ลักษณะการทำงาน	แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างน้ำร้อนอุณหภูมิตั้ง 65°C กับอากาศที่อุณหภูมิห้อง	แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างน้ำร้อนอุณหภูมิตั้ง 65°C กับอากาศที่อุณหภูมิห้อง
อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ	0.1-0.4 กก./วินาที	0.1-0.4 กก./วินาที
อัตราการไหลของน้ำร้อน	8 ลิตร/วินาที	7 ลิตร/วินาที
อัตราการถ่ายเทความร้อน	3.0-6.5 กิโลวัตต์	4.0 - 8.0 กิโลวัตต์
ราคา (เฉพาะอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน)	9,000 บาท	1,000 บาท

จากกรณีศึกษาในงานวิจัยนี้ พบว่า การนำคอนเดนเซอร์รถยนต์มาดัดแปลงเป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนในอุตสาหกรรมมีความเป็นไปได้ในการนำมาใช้ประโยชน์เชิงปฏิบัติสูง รวมทั้งมีต้นทุนต่ำ แต่อย่างไรก็ตามอุปกรณ์ดังกล่าวมีข้อด้อยคือไม่สามารถทำงานภายใต้อุณหภูมิสูงเกิน 150°C ได้ ทั้งนี้เนื่องจากอาจส่งผลให้เกิดความชำรุดของท่อและครีบได้

สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาทำให้ได้ทราบถึงคุณลักษณะทางความร้อนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ดัดแปลงมาจากคอนเดนเซอร์รถยนต์ โดยพบว่าคุณลักษณะทางความร้อนอันได้แก่ ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อน ค่าประสิทธิผลซึ่งมีค่าระหว่าง 0.4-0.9 และค่าผลคูณของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมและพื้นที่ขึ้นอยู่กับอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ จำนวนแผงของคอนเดนเซอร์ และทิศทางการไหลของอากาศและน้ำ โดยทิศทางการไหลของอากาศและน้ำแบบไหลสวนทางกันมีสมรรถนะที่สูงกว่าการไหลแบบตามกัน ส่วนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นเพื่อใช้คำนวณค่าประสิทธิผลของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสามารถใช้ทำนายผลการทดลองได้ทั้งหมดในช่วง +10% และเมื่อเปรียบเทียบราคาของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ดัดแปลงกับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลตามขวางซึ่งใช้ท่อครีบแบบเกลียวชนิดขอบหยักพบว่า มีราคาต่ำกว่ามารวมทั้งสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนที่ได้รับจะสูงกว่าเล็กน้อย ดังนั้นอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นมีความเป็นไปได้ในการนำมาใช้ในเชิงปฏิบัติ

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ในความอนุเคราะห์ด้านทุนวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- เจนจิรา เปี่ยมดี. (2545). การออกแบบและสร้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่ ในกระบวนการอบแห้งขนม. วิทยานิพนธ์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- ทงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์. (2547). การใช้หม้อน้ำรถยนต์เป็นอุปกรณ์นำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่. กรุงเทพฯ: สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน.
- อดิพงษ์ นันทพันธุ์. (2547). การทดสอบสมรรถนะทางความร้อนของท่อติดครีบที่ผลิตในประเทศไทย. กรุงเทพฯ: สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย สำนักงานนายกรัฐมนตรี.
- อดิพงษ์ นันทพันธุ์ และ ทงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์. (2547, สิงหาคม). การประยุกต์ใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนในกระบวนการดึงความเย็นทิ้งของระบบปรับอากาศกลับมาใช้ประโยชน์. บทความวิชาการนำเสนอการประชุมวิชาการการถ่ายเทความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อน ครั้งที่ 3, เชียงใหม่.
- อดิพงษ์ นันทพันธุ์ และ ทงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์. (2547, ตุลาคม). สมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนดัดแปลงจากหม้อน้ำรถยนต์. บทความวิชาการนำเสนอการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 18, ขอนแก่น.
- ANSI/ARI 410-81. (1981). *Standard for forced circulation air-cooling and air-heating coils*. New York: American National Standard.
- ANSI/ASHRAE 41.1. (1986). *Standard method for temperature measurement*. New York: American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers Inc.
- ANSI/ASHRAE41.2. (1987). *Standard method for laboratory air-flow measurement*. New York: American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers Inc.
- ANSI/ASHRAE 41.3. (1989). *Standard method for pressure measurement*. New York: American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers Inc.

- Nuntaphan A. (2000). *Performance analysis of heat pipe heat exchanger using binary working fluids*. Unpublished doctoral dissertation, King Mongkut's University of Technology Thonburi.
- Wadowski, T., Akbarzadeh, A., & Johnson, P. (1991). Characteristics of a gravity assisted heat pipe based heat exchanger. *Heat Recovery System & CHP* , 11, 69-77.
- Webb, R.L. (1993). *Principles of enhanced heat transfer*. New York: John Wiley.