ME-NETT23 The 23rd Conference of the Mechanical Engineering Network of Thailand

TSF-022426

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23
4 – 7 พฤศจิกายน 2552 จังหวัดเชียงใหม่

ผลของสารทำงานของท่อความร้อนสำหรับการระบายความร้อนน้ำมันไฮดรอลิกส์

Effect of Working Fluid of Heat Pipe for Hydraulics Oil Cooling

จิระพล กลิ่นบุญ[1,*] และ สุรเดช วงษ์วิไลวารินทร์[1]

[1] สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
เลขที่ 2 ถนนนางลิ้นจี่ แขวงทุ่งมหาเมฆ เขตสาทร กทม. 10120
*E-mail: jirapol9@hotmail.com เบอร์โทรศัพท์: 02-2863991-5 ต่อ 2201

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เน้นที่จะศึกษาอิทธิพลของสารทำงานของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนประยุกต์เพื่อระบายความร้อนให้แก่น้ำมันไฮดรอลิกส์ โดยใช้สารทำงาน คือ น้ำ R123 และ R 134a โดยใช้กับท่อความร้อนที่ทำมาจากท่อทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 25.4 mm ยาว 500 mm นำไปติดตั้งกับถังพักน้ำมันไฮดรอลิกส์ ขนาดกว้าง 300 mm ยาว 600 mm โดยกำหนดให้ท่อความร้อนแบ่งออกเป็นสองส่วนคือส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นซึ่งมีความยาวทั้งสองส่วนเท่าๆ กันคือ 250 mm ให้ส่วนควบแน่นของท่อความร้อนส่งถ่ายความร้อนสู่แหล่งรับความร้อนเป็นแบบพาธรรมชาติ ผลการทดสอบพบว่า ท่อความร้อนที่ใช้สารทำงาน R134a สามารถถ่ายความร้อนได้สูงกว่าท่อความร้อนที่ใช้สารทำงานเป็น น้ำ และ R123 โดยสามารถถ่ายเทความร้อนได้ 244 W และสามารถลดอุณหภูมิน้ำมันไฮดรอลิกส์ จาก 80°C เป็น 57°C ซึ่งเป็นอุณหภูมิเหมาะสมที่ระบบจะสามารถทำงานได้มีประสิทธิภาพดีที่สุด

คำหลัก: สารทำงาน, ท่อความร้อน, การระบายความร้อนน้ำมันไฮดรอลิกส์

Abstract

This research is investigating effect of working fluids of heat pipe for hydraulics oil cooling, by use R134a, R123 and water as working fluids. Heat pipe made from copper tube, has outside diameter 25.4 length of 500mm. Heat pipes are install with hydraulics oil tank, which has 300mm of wide, 600mm of length. The heat pipes are divided in to two parts; it is consist of evaporator section and condenser section. Condenser section transfer heat to heat sink by natural convection. The experiment result, found that heat pipe heat exchanger use R134a as working fluid can transfer heat higher than heat pipe with R123 and water. Its can transfer heat about 244W and reduce hydraulics oil temperature from 80°C to 57°C which is optimum temperature for hydraulics system work has a high efficiency.

Keyword : working fluid, heat pipe, hydraulics oil cooling

1. บทนำ

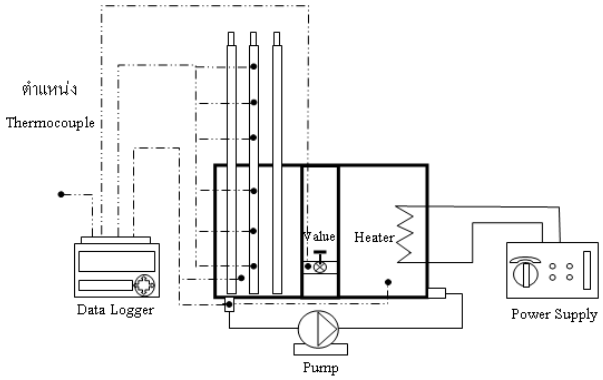
ในปัจจุบันมีเครื่องจักรกลมากมายที่ใช้ร่วมกับระบบไฮดรอลิกส์ และมักพบปัญหาเกี่ยวกับการชำรุดเสียหายเร็วกว่าปกติ อันเนื่องมาจากการรั่วซึมน้ำมันไฮดรอลิกส์ ซึ่งโดยปกติแล้วระบบไฮดรอลิกส์จะใช้น้ำมันเป็นตัวซีล ดังนั้นถ้าน้ำมันร้อนก็มักจะประปัญหารั่วซึมได้ง่ายและทำให้ สมรรถนะการทำงานของระบบไฮดรอลิกส์ลดลง นอกจากนี้ยังอาจทำให้เกิดความเสียหายแกอุปกรณ์ได้ ดังนั้นเพื่อป้องกันปัญหาดังกล่าวการที่มีชุดระบายความร้อนให้แกน้ำมันไฮดรอลิกส์ ซึ่งปัจจุบันจะใช้ น้ำหล่อเย็น และระบบปรับอากาศที่ประยุกต์ใช้ ซึ่งทั้งวิธีนั้นต้องเสียค่าใช้จ่ายมากเพื่อจะควบคุมอุณหภูมิของน้ำมันไฮดรอลิกส์ ให้เหมาะสมซึ่งปกติอุณหภูมิทำงานของนำมันประมาณ 50-60 $^{\circ}$C อย่างไรก็ดี ยังมีอุปกรณ์ที่สามารถระบายความร้อนได้นั่นคือ ท่อความร้อน (Heat Pipe) มาเป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นวิธีการหนึ่งที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในต่างประเทศและบ้านเรา โดยเฉพาะท่อความร้อนแบบธรรมดาหรือท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน (Thermosyphon) เนื่องจากมีข้อดีคือ เป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ไม่ต้องมีต้นกำลังขับถือว่าเป็นระบบการทำงานแบบ Passive ต้นทุนการจัดสร้างต่ำ สามารถส่งถ่ายพลังงานความร้อนได้ดีแม้กระทั่งผลต่างของอุณหภูมิระหว่างแหล่งให้และระบายความร้อนมีค่าน้อยๆ ซึ่งได้มีการศึกษาวิจัยมาก่อนหน้านี้ เช่น Dupe et al. (1996) ได้ทำการสร้างเครื่องอุ่นอากาศจำลองเพื่อทดสอบค่าประสิทธิผลของเครื่องอากาศแบบเทอร์โมไซฟอน พบว่าค่าประสิทธิผลของเครื่องอุ่นอากาศแบบท่อความร้อนนี้มีค่าขึ้นอยู่กับตัวแปรต่างๆคือ ชนิด ขนาด คุณสมบัติของวัสดุและมุมเอียงของท่อความร้อน ชนิดและปริมาณของสารทำงานภายในท่อความร้อน รูปแบบการจัดวาง และจำนวนของท่อความร้อน Ong et al. (2003) ได้ทำการศึกษาสมรรถนะการส่งถ่ายความร้อน ของเทอร์โมไซฟอน ที่บรรจุสารทำงานคือ R-134a พบว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลเชิงมวลของสารหล่อเย็น อัตราส่วนการเติมและอุณหภูมิแตกต่างระหว่างแอ่งของเหลวกับส่วนควบแน่น ทวีศักดิ์ ทวีวิทยาการ (2541) ได้ทำการศึกษาถึงการออกแบบและทดสอบเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบท่อความร้อน (เทอร์โมไซฟอน) สำหรับหม้อไอน้ำขนาดกำลังผลิตไอน้ำ 1 ตันต่อชั่วโมง ผลการทดลองดังกล่าว ได้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่สามารถดึงความร้อนจาก ก๊าซร้อนของหม้อไอน้ำมาให้กับ น้ำดิบก่อนป้อนเข้าสู่หม้อไอน้ำซึ่งได้ค่าความร้อนที่ดึงกลับ 12.34 $\pm$ 1.8 kW ส่วนในปีต่อมา พัฒนพงศ์ ขันทา (2542) ได้ทำการศึกษาถึงการออกแบบและสร้างเครื่องอุ่นอากาศแบบท่อความร้อนและการประยุกต์ใช้งานในการอบแห้งยิปซั่ม ขนาดกำลังผลิตไอน้ำ 920 ตันต่อชั่วโมง ผลการทดลองดังกล่าวได้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่สามารดึงความร้อนจากไอเสียของหม้อไอน้ำมาให้กับอากาศก่อนสันดาป ค่าความร้อนที่ดึงกลับได้เท่ากับ 73.4 kW ค่าประสิทธิผลด้านของไหลอุณหภูมิต่ำเท่ากับ 0.708 ที่อุณหภูมิไอเสีย 170.5 $^{\circ}$C อุณหภูมิอากาศ 45.6 $^{\circ}$C ต่อมา พลเดช ทองขุนคำ (2543) ได้ทำการศึกษาถึงการออกแบบ สร้างและทดสอบอีโคโนไมเซอร์ แบบท่อความร้อนสำหรับหม้อไอน้ำสำเร็จรูป ขนาดกำลังผลิตไอน้ำไม่เกิน 1 ตันต่อชั่วโมง ซึ่งอัตราการผลิตไอน้ำเพื่อใช้งาน 0.166 ตันต่อชั่วโมงที่ความดันสูงสุด 150 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ผลการทดลองดังกล่าวได้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่สามารถดึงความร้อนจากไอเสียของหม้อไอน้ำมาให้กับอากาศก่อนสันดาป ค่าความร้อนที่ดึงกลับ 8.75 kW ธวัส สมนา(2551) ได้ทำการ การออกแบบสร้าง และทดสอบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อความร้อน สำหรับระบายความร้อนน้ำมันในห้องเกียร์ของระบบสายพาน โดยนำข้อมูลอุณหภูมิน้ำมันในห้องเกียร์ของระบบสายพานที่เหมืองแม่เมาะ ซึ่งมีอุณหภูมิน้ำมันสูงสุด 80°C ที่อุณหภูมิของบรรยากาศไม่เกิน 40°C มาเป็นข้อมูลพื้นฐานในการจำลองสภาพ มีเงื่อนไขเพื่อต้องการควบคุมอุณหภูมิน้ำมันในห้องเกียร์ให้ได้อุณหภูมิใช้งานประมาณ 60°C พบว่าอุณหภูมิของน้ำมันในห้องเกียร์ที่ได้คือ 61°C ค่าการ

ส่งถ่ายความร้อนได้เท่ากับ 315 วัตต์ ค่าประสิทธิผลของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีค่าเท่ากับ 0.367

จากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นนั้นทำให้เราเชื่อได้ว่าท่อความร้อนมีศักษภาพที่สูงในการถ่ายเทความร้อน และมีต้นทุนในสร้างต่ำ และ สะดวกในการติดตั้งกับอุปกรณ์ ดังนั้น จึงสนใจที่จะ นำเอาท่อความร้อนมาเป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อเป็นอุปกรณ์ระบายความร้อนให้กับน้ำมัน ไฮดรอลิกส์ โดยจะทำการศึกษาผลของสารทำงานที่ใช้ในท่อความร้อนว่ามีผลกระทบอย่างไรต่อการถ่ายเทความร้อนให้แก่น้ำมันไฮดรอลิกส์

2. ชุดทดสอบและกระบวนการทดสอบ

สร้างชุดทดสอบโดยการจำลองถังพักน้ำมันไฮดรอลิกส์ กว้างขนาด 300 mm ยาว 600 mm สูง 250 mm ส่วนท่อความร้อน โดยได้มีการสร้างห้องสร้างห้องจำลองสภาพน้ำมันร้อนที่กลับจากการใช้งานโดยใช้ heater เป็นตัวให้ความร้อนแสดงดังรูปที่ 1 ท่อความร้อน มีความยาว 500 mm เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 25.4 mm ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่น โดยแต่ละส่วนมีความยาวเท่ากัน คือ 250 mm สารทำงานที่ใช้ค่าความร้อนแฝงต่างกัน คือ น้ำ R123 และ R134a



รูปที่ 1 ชุดทดสอบระบายความร้อนน้ำมันไฮดรอลิกส์ด้วยท่อความร้อน

ทำการตรวจสอบอุณหภูมิที่ด้วยการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิ้ล Type K ในจุดต่างๆ เช่น ที่ท่อความร้อน 6 จุด ที่ทางเข้าของน้ำมันร้อน 1จุด และทางออกจากชุดระบายความร้อน 1 จุด นอกจากนั้นวัดอุณหภูมิ ที่ผนังของถังทดสอบ 3 จุด และอุณหภูมิแวดล้อม อีก 1 จุด และใช้เครื่องบันทึกอุณหภูมิยี่ห้อ Yokokawa รุ่น Fx112 ใช้ขดลวดความร้อนให้ความให้ร้อนแก่น้ำมันไฮดรอลิกส์

2.1 กระบวนการทดสอบ

การทดสอบสมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อน โดยการขดลวดความร้อนแก่น้ำมันแล้วควบคุมให้อุณหภูมิคงที่อยู่ที่ 80 °C แล้วปล่อยให้น้ำมันทางเข้าชุดระบายด้วยท่อความร้อน วัดอุณหภูมิของน้ำมันที่ขาออกชุดระบายความร้อน นำค่าที่วัดได้ไปหาค่าการถ่ายเทความร้อนของชุดแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อความร้อนด้วยการประมาณจากสมการดังต่อไปนี้

$$Q_{transfer} = \overset{o}{m} Cp(T_oil_{in} - T_oil_{out}) \quad (1)$$

โดยที่ T_oil_{in} และ T_oil_{out} อุณหภูมิของน้ำมันไฮรอลิกเข้าและออกชุดระบายความร้อนตามลำดับ

แต่เนื่องจากชุดการทดลองนี้ไม่ได้มีการห่อหุ้มด้วยฉนวนในส่วนของชุดระบายความร้อน ดังนั้นในการหาค่าส่งถ่ายความร้อนจึงมีความร้อนบางส่วนส่งถ่ายผ่านผนังชุดระบายความร้อนซึ่งถือว่าเป็นความร้อนสูญเสียซึ่งสามารถประมาณได้จากสมการ

$$Q_{loss} = kA\frac{(T_{wi} - T_{wo})}{dx} \quad (2)$$

โดยที่ T_{wi} และ T_{wo} อุณหภูมิของผนังด้านในและอุณหภูมิผนังด้านนอกชุดระบายความร้อนตามลำดับ

ดังนั้นสามารถหาค่าความร้อนที่ป้อนให้แก่ชุดระบายความร้อนได้ดังนี้

$$Q_{input} = Q_{transfer} + Q_{loss} \quad (3)$$

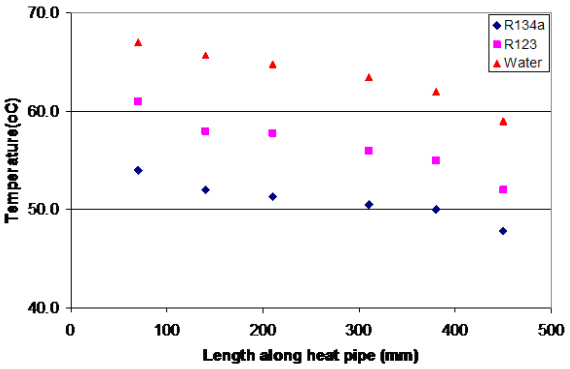
อย่างไรก็ดี อาจมีความร้อนรั่วไหลหรือสะสมตัวอยู่ในชุดระบายความร้อนบางส่วน งานวิจัยจะไม่นำมาคิดเพราะถือว่ามีค่าน้อย

3. ผลและการวิจารณ์ผล

จากผลการทดสอบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อความร้อนสามารถนำเสนอดังต่อไปนี้

3.1 ผลของการกระจายตัวของอุณหภูมิตลอดความยาวท่อความร้อน

จากรูปที่ 2 แสดงผลของการกระจายตัวของอุณหภูมิตลอดความยาวท่อความร้อน โดยท่อความร้อนที่นำเอาการกระจายตัวของอุณภูมิมาสดงนั้นเป็นตัวแทนของท่อความร้อนซึ่งตำแหน่งกึ่งกลางของชุดแลกเปลี่ยนความร้อน จากรูปที่ 2 จะพบว่าในทุก ๆ สารทำงานการกระจายตัวของอุณหภูมิจะมีแนวโน้มเดียวกัน ผลต่างอุณหภูมิระหว่างส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นมีค่าอยู่ระหว่าง 6-8°C ซึ่งโดยปกติแล้วยิ่งผลต่างของอุณหภูมิทำระเหยและส่วนควบแน่นมีค่ามากค่าการส่งถ่ายความร้อนดี แต่เนื่องจากชุดทดสอบนี้กำหนดให้ส่วนควบแน่นความร้อนถ่ายความให้แก่แหล่งรับความร้อนแบบพาโดยธรรมชาติ ดังนั้นความร้อนในท่อความร้อนจึงถ่ายเทความร้อนได้ดีหรือไม่นั้นส่วนหนึ่งก็จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิขิงแล่งรับความร้อนซึ่งเป็นอากาศแวดล้อม (อุณหภูมิแวดล้อมอยู่ระหว่าง 37-39°C) แต่อย่างไรก็ดีก็จะพบว่าค่าของอุณหภูมิของท่อความร้อนที่เป็นน้ำนั้นมีค่าสูงสุด เมื่อเปรียบเทียบกับ R123 และ R134a เหตุที่เป็นเช่นนี้นั้นเพราะค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของสารแต่ละชนิดไม่เท่ากัน ซึ่งจะเห็นได้ว่าสารที่มีค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอสูง การเดือดจะต้องใช้อุณหภูมิสูงในการเดือด นั้นจึงทำให้อุณหภูมิของท่อความร้อนที่ใช้น้ำเป็นสารทำงานมีอุณหภูมิสูง กว่า R123 และ R134a ตามลำดับ

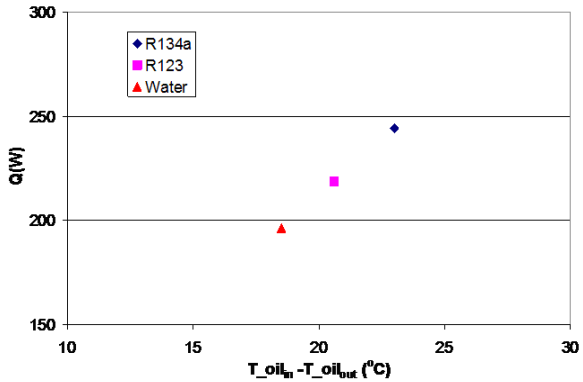


รูปที่ 2 ผลของการกระจายตัวของอุณหภูมิตลอดความยาวท่อความร้อน

3.2 ผลของผลต่างของอุณหภูมิของน้ำมันเข้าและออกต่อค่าการส่งถ่ายความร้อนของชุดระบายความร้อน

จากรูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างของอุณหภูมิเข้าและออกของน้ำมันกับค่าการถ่ายเทความร้อนของชุดระบายความร้อน ซึ่งพบว่าสารทำงานชุดท่อความร้อนที่ใช้สารทำงาน R134a สามารถสามารถถ่ายเทความร้อนได้ดีที่สุดซึ่งเห็นจากมีผลต่างจากอุณหภูมิระหว่างทางเข้าและออกของน้ำมันไฮดรอลิกส์มากที่สุดเท่ากับ 23 °C และส่งผลให้สามารถส่งถ่ายความร้อนได้สูงสุด 244 W ซึ่งสามารถส่งถ่ายความร้อนได้ดีกว่าชุดระบายความร้อนที่ใช้ สารทำงาน R123 และ น้ำ ตามลำดับ เหตุที่เป็นเช่นนี้อาจเป็นเพราะว่าท่อความร้อนอาศัยหลักการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวกลายเป็นไอของสารทำงานในการส่งถ่ายความร้อนไปยังแหล่งรับความร้อน(ส่วนควบแน่น) ทำให้สารทำงาน R134a มีจุดเดือดที่ต่ำกว่าทำให้สามารถระเหยการเป็นไอได้ง่ายกว่าสารทำงานอื่นที่ใช้ในการทดสอบทำให้สามารถส่งถ่ายความร้อนได้สูงสุด ซึ่งจะเห็นจากได้จากแนวโน้มของ

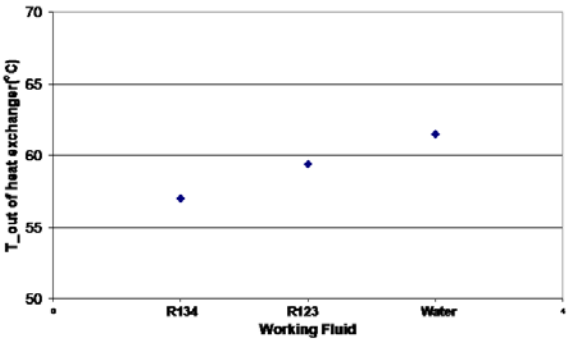
ค่าการส่งถ่ายความร้อนพบว่า ชุดท่อความร้อนที่ใช้น้ำเป็นสารทำงานซึ่งมีจุดเดือดสูงที่สุดในจำนวนสารทำงานที่เลือกใช้ในกับท่อความร้อนที่ทดสอบมีค่าการส่งถ่ายความร้อนได้น้อยที่สุด



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างของอุณหภูมิเข้าและออกของน้ำมันกับค่าการถ่ายเทความร้อนของชุดระบายความร้อน

3.3 ผลของสารทำงานที่ใช้ในการทดสอบต่ออุณหภูมิทางออกของชุดระรายความร้อน

จากการศึกษาวิจัยนี้วัตถุประสงค์ที่สำคัญคือการลดอุณหภูมิของน้ำมันไฮดรอลิกส์ทำกลับสู่ถังพักหลังจากการทำงานในระบบแล้วซึ่งมีอุณหภูมิสูงประมาณ 80 °C ซึ่งโดยปกติแล้วอุณหภูมิทำงานของน้ำมันไฮดรอลิกส์จะมีค่าประมาณ 55-60 °C ดังนั้นจากผลการทดสอบนำท่อความร้อนมาใช้ในการระบายความร้อนให้แก่น้ำมันไฮดรอลิกส์โดยทดลองใช้สารทำงานที่มีความแตกต่างของค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ คือ R134a R123 และน้ำ จากรูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ท่อความร้อนที่ใช้สารทำงานแตกต่างกันกับอุณหภูมิน้ำมันที่ออกจากชุดแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งพบว่าชุดระบายความร้อนแบบท่อความร้อนที่ใช้ R134a สามารถลดอุณหภูมิน้ำมันไฮดรอลิกส์หลังจากการใช้งานจากอุณหภูมิ 80°C เป็น 57°C ซึ่งดีกว่า R123 และน้ำ ซึ่งสามารถลดอุณหภูมิได้ 59.4 และ 61.5 ตามลำดับ นั้นก็เป็นเพราะคุณสมบัติของสารทำงาน R134a ที่มีค่าความร้อนแฝงในการกลายเป็นไอต่ำกว่า R123 และน้ำทำให้สามารถถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่า



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ท่อความร้อนที่ใช้สารทำงานแตกต่างกันกับอุณหภูมิน้ำมันที่ออกจากชุดแลกเปลี่ยนความร้อน

4. สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาผลของสารทำงานของท่อความร้อนที่ใช้ระบายความร้อนน้ำมันไฮดรอลิกส์ โดยใช้สารทำงานเป็น R134a R123 และน้ำ พบว่าท่อความร้อนที่ใช้สารทำงาน R134a สามารถลดอุณหภูมิของน้ำมันไฮดรอลิกส์ได้ดีที่สุดคือสามารรถลดอุณหภูมิน้ำมันได้จาก 80°C เป็น 57°C และส่งถ่ายความร้อนได้ 244W

5. สัญลักษณ์และหน่วย

A	พื้นที่ส่งถ่ายความร้อน (m^2)
Q	ค่าการส่งถ่ายความร้อน (W)
T_oil_{in}	อุณหภูมิน้ำมันไฮดรอลิกส์เข้าสู่ชุดระบายความร้อน(°C)
T_oil_{out}	อุณหภูมิน้ำมันไฮดรอลิกส์ออกสู่ชุดระบายความร้อน(°C)
$\dot{m}^{o}$	อัตราการไหลของน้ำมัน (kg/s)

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยครั้งนี้สำเร็จลงได้ด้วยการสนับสนุนของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ที่ให้การสนับสนุนด้วยดีตลอดมา ทางผู้วิจัยจึงขอขอบคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

7. เอกสารอ้างอิง

[1] Ong, K.S., and Haider - E-Alahi, Md. (2003). Performance of R-134a-filled thermosyphon. *Applies Thermal Engineering*; 23: 2373-81.

[2] ทวีศักดิ์ ทวีวิทยาการ (2541). การออกแบบและทดสอบเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบท่อความร้อน. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. วิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2541.

[3] พัฒนพงศ์ ขันทา (2542). เครื่องอุ่นอากาศแบบท่อความร้อนและการประยุกต์ใช้งานในการอบแห้งยิปซั่ม. วิทยานิพนธ์.วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต วิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2542.

[4] พลเดช ทองขุนดำ(2543) . ออกแบบสร้างและทดสอบอีโคโนไมเซอร์แบบท่อความร้อนสำหรับหม้อไอน้ำสำเร็จรูป. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต.วิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2543.

[5] ธวัช สมนา (2551) .การออกแบบ สร้าง และทดสอบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อความร้อนสำหรับระบายความร้อนน้ำมันในห้องเกียร์ของระบบสายพาน วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. วิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2551.