การระบายความร้อนด้วยท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน

Thermosyphons Heat Pipe Cooling

จิระพล กลิ่นบุญ[1]

1. บทนำ

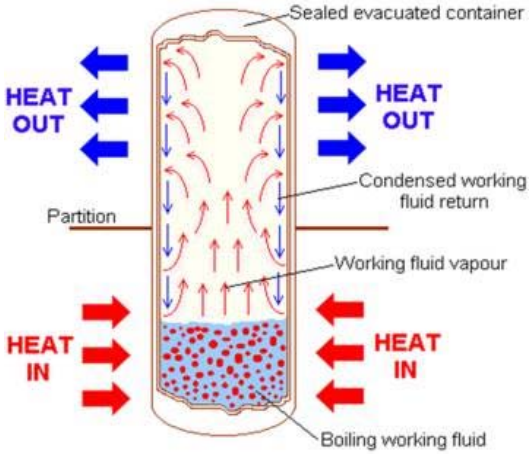
ท่อความร้อน เป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งมีการนำความร้อนสูงมาก R.S.Gaugler เป็นคนแรกที่เสนอความคิดที่เกี่ยวกับท่อความร้อนในปี 1942 อย่างไรก็ดีผู้ที่ประดิษฐ์ท่อความร้อนจนนำมาใช้งานได้จริงคือ G.M. Grover ซึ่งทำขึ้นในช่วงปี 1960 ตั้งแต่นั้นเป็นต้นมาคุณสมบัติอันโดดเด่นสามารถถ่ายเทความร้อนได้ขณะที่ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิแหล่งจ่ายความร้อนและอุณหภูมิแหล่งรับความร้อนแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย โดยเฉพาะท่อความร้อนแบบธรรมดา ท่อความร้อนที่รู้จักกันทั่วไปคือท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน (Thermosyphon) นอกจากนี้ข้อดีท่อความร้อนนี้คือไม่ต้องมีต้นกำลังขับซึ่งทำให้ต้นทุนการจัดสร้างต่ำ และสามารถส่งถ่ายพลังงานความร้อนได้ดี อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าหลักการทำงานหรือคุณสมบัติของท่อความร้อนจะรู้จักกันมานานแล้ว แต่ที่ผ่านมาการนำท่อความร้อนไปใช้ให้ได้ผลยังอยู่ในวงจำกัด เนื่องจากความสามารถในการนำความร้อนที่จำกัด อุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพก็อยู่ภายใต้ลิขสิทธิ์ ในปัจจุบันมีผู้นำเทคโนโลยีนี้ไปใช้งานในรูปแบบต่างๆ และเชื่อว่าในอนาคตอันใกล้นี้จะเป็นที่แพร่หลายมากขึ้น ดังเช่น ที่พบเห็นในปัจจุบันนี้ก็ได้มีการนำท่อความร้อนมาใช้ประโยชน์หลายอย่างกล่าวคือ การใช้ในระบบดึงความร้อนกลับมาใช้ใหม่ (Heat Recovery) ซึ่งสามารถที่จะนำไปใช้เก็บความร้อนที่ทิ้งกลับนำมาใช้ใหม่ได้อีก เช่น การใช้เป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนให้กับอากาศเพื่ออุ่นอากาศก่อนเข้าเตาอบ(Air Pre-heater)[3] หรือ ทำไปใช้ ในการดึงความร้อนจากแก๊สไอเสียจากหม้อไอน้ำ (Boiler) นำมาอุ่นน้ำป้อนให้แก่หม้อไอน้ำ (Economizer) [2,4]

นอกจากนี้ เทคโนโลยีนี้ได้ถูกนำไปใช้ในโครงการอวกาศของ นาซาด้วย ในส่วนที่เกี่ยวข้องกับพลังงานแสงอาทิตย์นั้น ท่อความร้อนได้ถูกนำไปใช้ในแผงรับพลังงานแสงอาทิตย์รุ่นใหม่ที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอก ซึ่งเมื่อรับพลังงานแสงอาทิตย์แล้วจะรวมพลังงานแสงอาทิตย์เข้าสู่แกนกลางของกระบอกที่มีแท่งท่อความร้อนอยู่ แท่งท่อความร้อนนี้ก็จะนำความร้อนที่ได้ไปใช้ สำหรับในส่วนของภาคการเกษตรได้มีการนำท่อความร้อนมาใช้ในกระบวนการอบเมล็ดพืช ซึ่งจะทำให้สามารถอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำและใช้เวลาน้อยในการอบแห้ง สำหรับประเทศไทย ได้มีการนำไปใช้ในการอบแห้งลำไย ข้าวเปลือก เป็นต้น อย่างไรก็ตามความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนนี้ยังจะสามารถประยุกต์ใช้งานด้านอื่น ๆอีกมากมาย และมีข้อดีที่เห็นได้ชัดคือ มีราคาไม่แพงเมื่อเทียบกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนอื่น ๆ และไม่ยุ่งยากในการดูแลรักษา

2. หลักการทำงานของเทอร์โมไซฟอน

ท่อความร้อนแบบธรรมดาหรือท่อความร้อนแบบเทอร์โม-ไซฟอน (Thermosyphon) เป็นอุปกรณ์ถ่ายเทความร้อนโดยท่อความร้อนใช้หลักการส่งถ่ายความร้อนจากความร้อนแฝงของสารทำงานภายในท่อ ลักษณะของท่อความร้อนจะเป็นท่อปลายปิดทั้งสองด้าน ภายในเป็นสุญญากาศซึ่งจะบรรจุสารทำงานไว้ สารทำงานจะอยู่ในรูปของของเหลวโดยท่อความร้อนจะประกอบด้วยส่วนทำระเหย (Evaporator section) และส่วนควบแน่น (Condenser section) แต่บางกรณีอาจมี ส่วนกันความร้อน (Adiabatic section) แหล่งให้ความร้อนและแหล่งรับความร้อน

[1] อาจารย์, สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ.



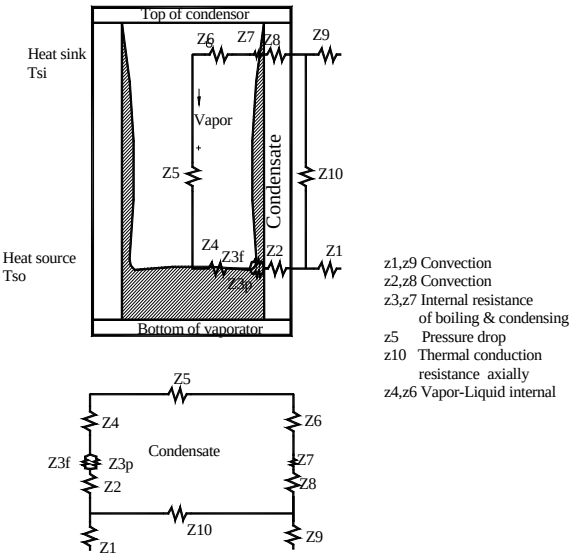
รูปที่ 1 ท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน

อยู่ห่างกันมาก โดยการทำงานจะเริ่มที่ส่วนทำระเหยสารทำงานทำหน้าที่รับความร้อนในส่วนทำระเหยโดยการรับความร้อนจากแหล่งความร้อน แล้วระเหยกลายเป็นไอเคลื่อนที่ไปยังส่วนควบแน่น ถ่ายเทความร้อนโดยการควบแน่นพร้อมกับไหลกลับมายังส่วนทำระเหย ดังแสดงไว้ในรูปที่ 1

ประสิทธิภาพในการส่งถ่ายความร้อนของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนนั้นขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยด้วยกัน โดยมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อความร้อน ความยาวของท่อความร้อนทั้งในส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่น ชนิดหรือวัสดุที่ใช้ทำท่อความร้อน ชนิดของสารทำงาน อุณหภูมิของแหล่งให้ความร้อนและแหล่งระบายความร้อน และลักษณะการติดตั้งท่อความร้อน รวมถึงขีดจำกัดการทำงานต่างๆของท่อความร้อนเป็นต้น

3. ทฤษฎีของเทอร์โมไซฟอน

คุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนแสดงดังรูปที่ 1 ซึ่งแสดงให้เห็นความต้านทานความร้อนในส่วนต่างๆ ของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน โดยคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนนั้นสามารถชี้ชัดได้ด้วยค่าการถ่ายเทความร้อนจริง (Q_{thermo}) ซึ่งสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ของผลต่างระหว่างอุณหภูมิของแหล่งให้ความร้อนกับแหล่งรับความร้อน (ΔT) กับค่าความต้านทานความร้อนรวม (Z_{total}) ดังสมการที่ (1)



รูปที่ 2 ความต้านทานความร้อนของส่วนต่างๆ ของท่อความร้อน[5]

$$Q_{thermal} = \frac{\Delta T}{Z_{total}} \quad (1)$$

โดยที่

$$\Delta T = T_{so} - T_{si} \quad (2)$$

T_{so} = อุณหภูมิจากแหล่งให้ความร้อน (K)
T_{si} = อุณหภูมิจากแหล่งรับความร้อน (K)

$$Z_{total} = Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 + Z_5 + Z_6 + Z_7 + Z_8 + Z_9 \quad (3)$$

(K/W)

Z_1 และ Z_9 คือความต้านทานความร้อนระหว่างแหล่งความร้อนกับผิวนอกของส่วนทำระเหยและระหว่างผิวนอกของส่วนควบแน่นกับส่วนระบายความร้อนตามลำดับ

$$Z_1 = \frac{1}{h_{eo} S_{eo}} \quad (4)$$

$$Z_9 = \frac{1}{h_{co} S_{co}} \quad (5)$$

เมื่อ h_{eo} คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ส่วนรับความร้อนภายนอกท่อความร้อน $\left(\mathrm{W/m^2K}\right)$

h_{co} คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ส่วนระบายความร้อนภายนอกท่อความร้อน $\left(\mathrm{W/m^2K}\right)$

s_{eo} คือ พื้นที่ผิวทั้งหมดของส่วนทำระเหย $\left(\mathrm{m^2}\right)$

s_{co} คือ พื้นที่ผิวทั้งหมดของส่วนควบแน่น $\left(\mathrm{m^2}\right)$

Z_2 และ Z_8 คือ ความต้านทานความร้อนความหนาของท่อในส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่น สำหรับค่าความต้านทานการนำความร้อนของท่อ (Z_2 และ Z_8) ใช้สมการ

$$Z_2 = \frac{\ln(D_0 / D_i)}{2\pi l_e k} \quad (6)$$

$$Z_8 = \frac{\ln(D_0 / D_i)}{2\pi l_c k} \quad (7)$$

เมื่อ D_i คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อความร้อน $\left(\mathrm{m}\right)$

D_o คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกท่อความร้อน $\left(\mathrm{m}\right)$

l_e คือ ความยาวส่วนทำระเหยของท่อความร้อน $\left(\mathrm{m}\right)$

l_c คือ ความยาวส่วนควบแน่นของท่อความร้อน $\left(\mathrm{m}\right)$

Z_3 และ Z_7 คือความต้านทานความร้อนภายใน ของการเดือดและการควบแน่นของสารทำงานในท่อ โดยคำนวณค่า Z_3 ได้ 2 กรณีจากสมการ แต่เริ่มต้นการคำนวณเรายังไม่ทราบค่า Z จากความต้านทานความร้อนภายใน ดังนั้น

$$Z = Z_1 + Z_2 + Z_8 + Z_9 \quad (8)$$

และ $$Q = \frac{\Delta T}{Z} \quad (9)$$

Z_{3p} คือ ความต้านทานความร้อนเนื่องการเดือดที่เกิดขึ้นของแหล่งของเหลวของท่อความร้อนคำนวณได้จากสมการที่ (10) โดยใช้ค่า Q จากสมการที่ (9)

$$Z_{3p} = \frac{1}{\Phi_3 g^{0.2} Q^{0.4} \left(\pi D_i l_e\right)^{0.6}} \quad (10)$$

เมื่อ Φ_3 คือ คุณสมบัติทางกายภาพของการเดือด คำนวณได้จากสมการที่ (11)

$$\Phi_3 = 0.32 \frac{\rho_l^{0.65} k_l^{0.3} c_{pl}^{0.7}}{\rho_v^{0.25} h_{fg}^{0.4} \mu_l^{0.1}} \left[\frac{P_v}{P_a}\right] \quad (11)$$

เมื่อ h_{fg} คือ ค่าความร้อนแฝงของสารทำงาน $\left(\mathrm{kJ/kg}\right)$

Z_{3f} คือ ความต้านทานของของเหลวที่เกิดขึ้นจากฟิล์มของเหลวที่แหล่งของเหลวในส่วนทำระเหย คำนวณได้จากสมการที่ (12) โดยใช้ค่า Q จากสมการที่ (9)

$$Z_{3f} = \frac{CQ^{1/3}}{D_i^{4/3} g^{1/3} \Phi_2^{4/3}} \quad (12)$$

Φ_2 คือ คุณสมบัติทางกายภาพของการควบแน่น คำนวณได้จากสมการที่ (13)

$$\Phi_2 = \left(\frac{h_{fg} k_f^3 \rho_f^2}{\mu_f}\right)^{1/4} \quad (13)$$

ถ้า $Z_{3p} > Z_{3f}$ แล้ว

$$Z_3 = Z_{3p} \quad (14)$$

และเงื่อนไขในการใช้ค่า Z_{3p} และ Z_{3f} เพื่อใช้เป็นค่า Z_3 คือ

แต่ถ้า $Z_{3p} < Z_{3f}$ แล้ว

$$Z_3 = Z_{3p} F + Z_{3f}\left(1 - F\right) \quad (15)$$

เมื่อ F คือ อัตราการเติมสารทำงาน โดย

$$F = \frac{V_f}{Al_e} \quad (16)$$

V_f คือ ปริมาตรของสารทำงาน $\left(\mathrm{m}^3\right)$
A คือ พื้นที่หน้าตัดท่อความร้อน $\left(\mathrm{m}^2\right)$

Z_7 คือ ความต้านทานความร้อนของแผ่นฟิล์มของเหลวที่ควบแน่น สามารถคำนวณได้จากทฤษฎีของ Nusselt สำหรับท่อในแนวดิ่งคำนวณได้จากสมการที่ (17)

$$Z_7 = \frac{0.335Q^{1/3}}{D_i^{4/3} g^{1/3} l_c \Phi_2^{4/3}} \quad (17)$$

Z_4 และ Z_6 คือความต้านทานความร้อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากไอสารทำงานมีสถานะเป็นของผสมไอและของเหลวในส่วนของส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นตามลำดับซึ่งจะไม่นำมาคิดเพราะมีค่าน้อยมากจนสามารถตัดทิ้งได้

Z_5 คือ ผลของความต้านทานความร้อนอันเนื่องจากความดันไอตกคร่อม จากส่วนทำระเหยไปยังส่วนควบแน่น ซึ่งถ้าความดันไอตกคร่อมต่ำจะทำให้อุณหภูมิอิ่มตัวลดลงตามด้วย มีผลทำให้อัตราการควบแน่นลดลงด้วย Z_5 มีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับ Z_3 และ Z_7

Z_{10} คือความต้านทานความร้อนตามแนวแกนของท่อหรือการนำความร้อนขึ้นกับชนิดความหนาของวัสดุที่ใช้ทำท่อ คำนวณได้จาก

$$Z_{10} = \frac{0.5l_e + l_a + 0.5l_c}{A_x \lambda_x} \quad (18)$$

โดยที่
l_a คือ ความยาวส่วนกันความร้อน $\left(\mathrm{m}\right)$
A_x คือ พื้นที่หน้าตัดของท่อบรรจุ $\left(\mathrm{m}^2\right)$
λ_x คือ ค่าการนำความร้อนของวัสดุที่ใช้ทำท่อ $\left(\mathrm{W/mK}\right)$
เกณฑ์ในการกำหนดค่าความต้านทานความร้อนคือ

$$\frac{Z_{10}}{Z_2 + Z_3 + Z_5 + Z_7 + Z_8} > 20 \quad (19)$$

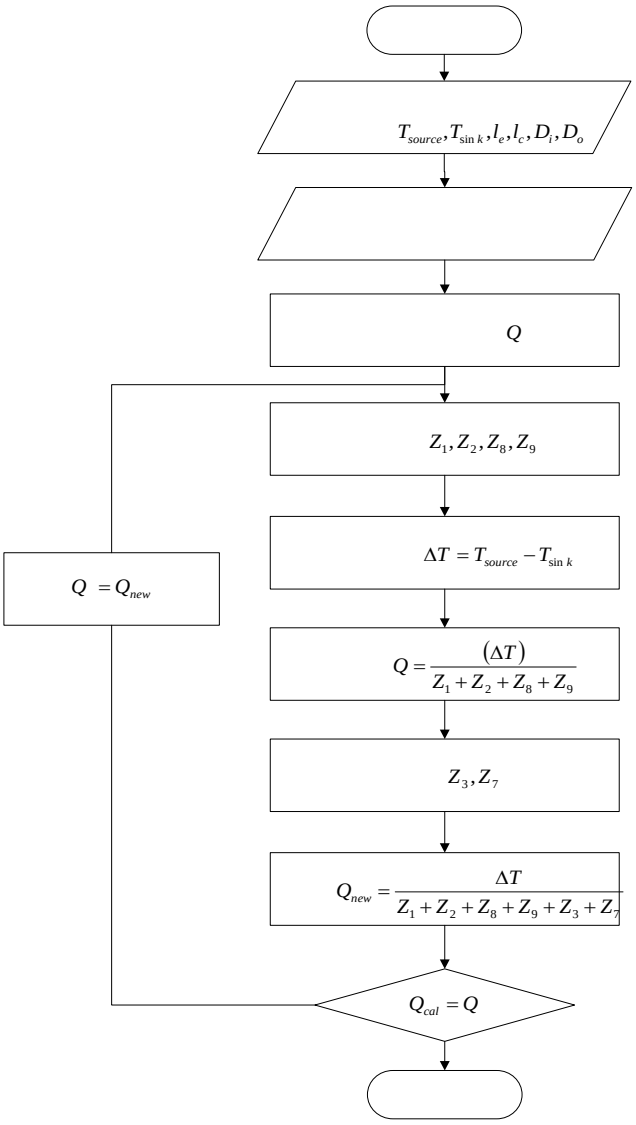
หากไม่เป็นไปตามสมการที่ (19) ค่าความต้านทานทางความร้อนรวมจะเป็น

$$Z_{total} = Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_5 + Z_7 + Z_8 + Z_9 \quad (20)$$

หากเป็นไปตามสมการที่ (20) ค่าความต้านทานทางความร้อนรวมจะเป็น

$$Z_{total} = Z_1 + [(Z_2 + Z_3 + Z_5 + Z_7 + Z_8)^{-1} + 1/Z_{10}]^{-1} + Z_9 \quad (21)$$

โดยที่ลำดับขั้นตอนในการคำนวณออกแบบท่อความร้อนสามารถแสดงไว้ในรูปที่ 3 ดังนี้



รูปที่ 3 ลำดับขั้นตอนในการคำนวณออกแบบท่อความร้อน

4. การประยุกต์หลักการทฤษฎีการของเทอร์โมไซฟอน

มีนักวิจัยมากมายที่นำหลักการและทฤษฎีของท่อความร้อนไปออกแบบสร้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยเทอร์โมไซฟอนในรูปแบบต่างๆ เช่น ทวัส สมนา [5] ได้ทำงานออกแบบเทอร์โม-ไซฟอน เพื่อใช้ระบายความร้อนให้เกียร์บล็อกของสายพานลำเลียงถ่านหินในโรงไฟฟ้าแม่เหมาะ พบว่า เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อความร้อนที่ออกแบบและสร้างขึ้น สามารถส่งถ่ายความร้อนได้ประมาณ 300 วัตต์ โดยที่สามารถลดอุณหภูมิของน้ำมันในห้องเกียร์ จาก 80 ^{o}C เป็น 61 ^{o}C ทำให้เกียร์บล๊อกสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพดังผลการเปรียบเทียบดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการจำลองสภาพและจากการทดสอบ [5]

ตัวแปรที่ใช้ในการทดสอบ	ค่าที่ได้จากการจำลองสภาพ	ค่าที่ได้จากการทดสอบ
อุณหภูมิของน้ำมัน (ºC)	60	61
ค่าการส่งถ่ายความร้อน (W)	308	315
ค่า Effectiveness	0.491	0.367
ค่า NTU	0.675	0.457

นอกจากนี้ จิระพล กลิ่นบุญ และสรุเดช วงศ์วิไลวารินทร์ [6] ได้ประยุกต์และนำหลักการทฤษฎีของเทอร์โมไซฟอน ไปออกแบบเครื่องระบายความร้อนแก่น้ำมันไฮดรอลิกส์ พบว่า ท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนสามารถใช้ระบายความร้อนให้แก่น้ำมันไฮดรอลิกส์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยสามารถถ่ายเทความร้อนได้ 244 W และลดอุณหภูมิของน้ำมันได้ จาก 80 ºC เป็น 57 C ซึ่งส่งผลให้ช่วยยืดเครื่องจักรไฮดรอลิกส์ได้และสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพอีกด้วย ดังแสดงดังรูปที่ 4

รูปที่ 4 เครื่องระบายความร้อนน้ำมันไฮดรอลิกส์ [6]

5. สรุป

การศึกษาหลักการทำงานของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน พบว่าเมื่อนำหลักการออกแบบในทางทฤษฎีมาใช้ในการออกแบบแล้วนี้สามารถนำไปปฏิบัติจริงได้ สามารถนำไปสร้างเป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อใช้งานในการระบายความร้อนให้อุปกรณ์หรือได้อย่างมีประสิทธิภาพ และถือว่าเป็นอีกทางเลือกในการช่วยลดต้นทุนและประหยัดพลังงานอีกด้วย

เอกสารอ้างอิง

1 ประดิษฐ์ เทอดทูล, ท่อความร้อน, เชียงใหม่, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล, คณะวิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2536.

2 ทวีศักดิ์ ทวีวิทยาการ, การออกแบบและทดสอบเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบท่อความร้อน, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, วิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2541.

3 พัฒนพงศ์ ขันทา, เครื่องอุ่นอากาศแบบท่อความร้อนและการประยุกต์ใช้งานในการอบแห้งยิปซั่ม. วิทยานิพนธ์, วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตวิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2542.

4 พลเดช ทองขุนดำ, ออกแบบสร้างและทดสอบอีโคโนไมเซอร์แบบท่อความร้อนสำหรับหม้อไอน้ำสำเร็จรูป, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, วิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัยมหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2543.

5 ธวัช สมนา, การออกแบบ สร้าง และทดสอบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อความร้อนสำหรับระบายความร้อนน้ำมันในห้องเกียร์ของระบบสายพาน วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, วิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2551.

6 จิระพล และ สุรเดช วงษ์วิไลวารินทร์, ผลของสารทำงานของท่อความร้อนสำหรับการระบายความร้อนน้ำมันไฮดรอลิกส์, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 23, เชียงใหม่, 4-7 พฤศจิกายน 2552, หน้า 308.