

การออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน โดยใช้สมการ สหสัมพันธ์ (Ku)

Thermosyphon Heat Exchanger Design by Ku Correlations

นำพน พิพัฒน์ไพบูลย์¹, ณรงค์ หุชัยภูมิ¹, อมร ดอนเมือง¹

Received: September, 2011; Accepted: October 2012

บทคัดย่อ

ปัจจุบันมีการใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน (Thermosyphon Heat Exchanger) ในอุตสาหกรรมต่างๆ ในงานวิจัยและพัฒนา แต่ปัญหาที่พบส่วนใหญ่ในการนำท่อเทอร์โมไซฟอน (Thermosyphon) ไปใช้งานนั้น ขาดการคำนวณในการออกแบบ ซึ่งการคำนวณก่อนการออกแบบนั้น จะนำไปสู่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่เหมาะสมในการใช้งานนั้นๆ ในแง่ของขนาดของเครื่องแลกเปลี่ยน ความร้อนที่เหมาะสมประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนความร้อน ต้นทุนในการสร้างเครื่องแลกเปลี่ยน ความร้อน และเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสามารถใช้งานได้ตรงตามจุดประสงค์ในการสร้างเพื่อใช้งาน อย่างแท้จริง ดังนั้น บทความนี้จึงมุ่งเน้นที่จะนำเสนอขั้นตอนการออกแบบและสร้างเครื่องแลกเปลี่ยน ความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน ตั้งแต่การตั้งสมมติฐานในการออกแบบ การเลือกวัสดุในการสร้างท่อ เทอร์โมไซฟอน การเลือกสารทำงานให้เหมาะสมกับอุณหภูมิในการทำงาน และการคำนวณหาจำนวนท่อ เทอร์โมไซฟอนในการใช้งาน เพื่อให้สามารถสร้างและใช้งานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน ได้อย่างถูกต้องเหมาะสม และเกิดประสิทธิภาพสูงสุดในการใช้งานโดยใช้สมการ Kutateladze Number, Ku ต่างๆ ที่นักวิจัยได้สร้างและพัฒนาสมการขึ้นมาช่วยในการออกแบบ และทำนาย ค่าการถ่ายเทความร้อน

คำสำคัญ : เทอร์โมไซฟอน, เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน, สมการสหสัมพันธ์

¹ คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตสกลนคร

E - mail : pipatpaiboon@hotmail.com

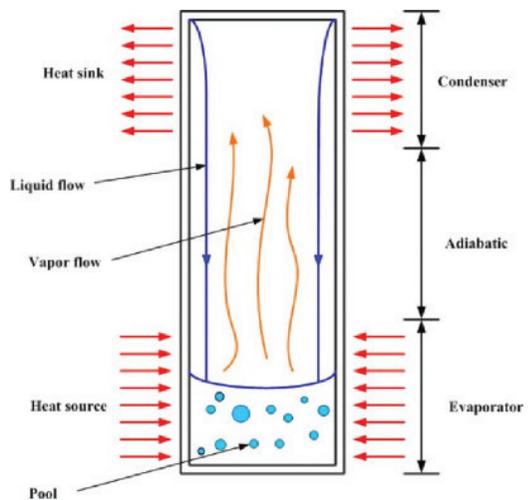
Abstract

Nowadays thermosyphon heat exchanger is widely used in many industries, research and development but the problem of applications was deficiency of proper calculations and design. The calculation and design appropriate to the heat exchanger, high efficiency and low cost, are accompanied by objective. This article aims to present process of design and construct thermosyphon heat exchanger such as the selection of materials, working fluid and calculations of the number of thermosyphon. To construct a process, use a thermosyphon heat exchanger correctly and maximize efficiency. Kutateladze number (Ku) is used to design and predict heat transfer rates.

Keyword : Thermosyphon, Heat Exchanger, Correlations

บทนำ

ท่อความร้อนแบบธรรมชาติหรือเทอร์โมไซฟอน (Thermosyphon) จัดเป็นอุปกรณ์ชนิดหนึ่งที่สามารถถ่ายเทความร้อนได้ โดยไม่ต้องอาศัยพลังงานภายนอก ทำงานโดยใช้หลักการส่งถ่ายความร้อนจากความร้อนแฝงของสารทำงาน (Working fluids) ภายในท่อซึ่งสารทำงานระเหยโดยการรับความร้อนจากแหล่งความร้อนและถ่ายเทความร้อน โดยการควบแน่นหลังจากถ่ายเทความร้อนให้กับแหล่งความเย็น (Dunn P.D, Reay D.A., 1982; Dunn P.D, Reay D.A., 1994.) รูปที่ 1 แสดงส่วนประกอบของท่อความร้อนแบบธรรมชาติ ซึ่งมีลักษณะเป็นสุญญากาศที่มีสารทำงานภายใน มีลักษณะเป็นท่อระบบปิดภายในเป็นสุญญากาศ ประกอบด้วย 3 ส่วน คือ ส่วนทำระเหย (Evaporator section) ส่วนกันความร้อน (Adiabatic section) และส่วนควบแน่น (Condenser section) ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ลักษณะส่วนประกอบของเทอร์โมไซฟอน

หลักการทำงานคือความร้อนจากส่วนทำระเหยจะทำให้สารทำงานซึ่งมีสถานะเป็นของเหลวเปลี่ยนแปลงสถานะกลายเป็นไอและลอยขึ้นสู่ด้านบนไปยังส่วนควบแน่น ซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่า

ทำให้เกิดการควบแน่น และไหลกลับสู่ส่วนทำ-
ระเหยด้วยแรงโน้มถ่วง เนื่องจากความร้อนแฝง
ของการกลายเป็นไอของสารทำงานมีค่าสูงมาก
ดังนั้น สารทำงานจึงสามารถถ่ายเทความร้อน
จากปลายด้านหนึ่งไปสู่อีกด้านหนึ่งได้ โดยที่
อุณหภูมิระหว่างส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่น
แตกต่างกันเพียงเล็กน้อย (Dunn P.D, Reay
D.A., 1982; Dunn P.D, Reay D.A., 1994.)
ความสามารถในการส่งผ่านความร้อนของท่อ
เทอร์โมไซฟอนนั้น ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยด้วยกัน
เช่น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ ชนิดของวัสดุ
ในการสร้างท่อ ลักษณะการติดตั้ง (มุมเอียง
ในการทำงาน) ชนิดของสารทำงาน อุณหภูมิของ
แหล่งความร้อนและแหล่งความเย็น เป็นต้น ซึ่ง
ปัจจัยที่กล่าวมาทั้งหมดนี้ มีความสำคัญมาก
ในการนำมาตัดสินใจในการคำนวณและออกแบบ
เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน
(Thermosyphon heat exchanger) ดังนั้น
เพื่อให้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนนั้น สามารถ
ใช้งานได้อย่างเหมาะสมและประสิทธิภาพในการ-
ทำงาน และต้นทุนในการผลิตที่เหมาะสม โดย
การคำนวณและออกแบบสร้างเครื่องแลกเปลี่ยน
ความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนนั้น ต้องอาศัยสมการ
สหสัมพันธ์ (Correlations) ที่เหมาะสมหรือ
สมการที่ถูกสร้างขึ้นมา เพื่อทำนายการถ่ายเท
ความร้อนของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน
หรือท่อความร้อนชนิดนั้นโดยเฉพาะ ซึ่งสมการ
ที่กล่าวถึงนี้ จะถูกสร้างขึ้นจากข้อมูลการทดลอง
เป็นจำนวนมาก มาหาความสัมพันธ์ที่ละตัวแปร
จนได้สมการที่เหมาะสม และใช้ในการคำนวณ
เพื่อทำนายการถ่ายเทความร้อนของท่อชนิดนั้น ๆ
ได้อย่างแม่นยำ เช่น Kutateladze Number,
Ku เป็นต้น

สมการสหสัมพันธ์

สมการสหสัมพันธ์ในที่นี้ หมายถึง สมการที่ถูก-
สร้างขึ้นจากข้อมูลการทดลองใด ๆ แล้วนำข้อมูล
ที่ได้มาวิเคราะห์ โดยที่ Y และ X มีความสัมพันธ์
เชิงเส้นตรงต่อกัน วิธีการตรวจสอบในเบื้องต้น
อาจใช้วิธีกราฟ โดยทำ Scatter Plot เพื่อดู
ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร หรือตรวจสอบ
โดยวิธีทางสถิติอื่น ๆ เช่น $(F - Test) = H_0 = \beta_1$
 $= \beta_2 = \dots = \beta_k = 0$ ที่มีโปรแกรมทางสถิติในปัจจุบัน
สามารถช่วยในการวิเคราะห์ได้ และ X แต่ละตัว
จะต้องไม่สัมพันธ์กัน หรือเป็นอิสระต่อกัน เช่น
 X_1 แทนค่าที่ได้จากการถ่ายเทความร้อนที่เกิดจาก
การพาความร้อน X_2 แทนค่าที่ได้จากการถ่ายเท
ความร้อนที่เกิดจากการนำความร้อน และ X
ตัวอื่น ๆ ก็จะเป็นค่าที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อน
ในแต่ละกรณี ที่สัมพันธ์กับระบบที่ต้องการสร้าง-
สมการมาทำนายค่าการถ่ายเทความร้อน โดยนำ
ความสัมพันธ์ของข้อมูลที่ละคู่มาพิจารณา คู่ที่มี
ความสัมพันธ์กันก็จะทำการนำ X นั้น ๆ มาพิจารณา
ในการสร้างเป็นสมการ เพื่อใช้ทำนายค่าการถ่ายเท
ความร้อนต่อไป โดยสมการสหสัมพันธ์จะอยู่ในรูป
ของเลขยกกำลังใช้วิธีการถดถอยแบบเชิงเส้น
(Linear Regression) Decha - amphai
(Rittidech, S. and others, 2003) ในการสร้าง
สมการขึ้นมาใช้ เพื่อทำนายค่าต่าง แต่ก่อนที่จะ
ทำนายนั้น จะต้องทำการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการ-
ทำนาย และการทดสอบจริงมาทำการพิจารณา
กลุ่มข้อมูล โดยการพล็อตกราฟ แกน Y เป็น
ค่าที่ได้จากการทดลอง และแกน X เป็นค่า
ที่ได้จากการทำนายจากสมการ ดังแสดงขั้นตอน
การพิจารณา

ขั้นตอนการสร้างสมการสหสัมพันธ์ (KU)

1. ทำการกำหนดขอบเขตตัวแปร การทดลองที่สนใจจะสร้างสมการสหสัมพันธ์

2. ทำการทดลอง เก็บข้อมูลผลการทดลองโดยใช้ระเบียบวิธีวิจัยที่ถูกต้อง

3. นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาเปรียบกับตัวแปร (X) ที่เรา เช่น ทำการเปรียบเทียบค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกับการถ่ายเทความร้อนโดยการพล็อตกราฟเปรียบเทียบ แกน X เป็นค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ใช้ในการทดลอง แกน Y เป็นค่าการถ่ายเทความร้อนจากการทดลอง เช่นกัน เมื่อพิจารณารูปแบบลักษณะเส้นกราฟแล้วพบว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนอย่างมีนัยสำคัญ X ที่ หมายถึง ขนาดท่อ ก็จะถูกนำไปรวมเข้ากับสมการสหสัมพันธ์ต่อไป

4. ทำซ้ำขั้นตอนที่ 3 กับตัวแปรอื่นๆ ที่สนใจจะศึกษา เช่น ความยาว มุมเอียง ตัวแปรไรมิติอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง หากตัวแปรใดมีความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์อย่างมีรูปแบบ และเส้นกราฟเพิ่มขึ้นลดลงอย่างมีนัยสำคัญแล้วตัวแปรนั้นจะถูกนำมาใช้ในการทำนายค่า Y ต่อไป

5. ความสัมพันธ์ของ X และ Y ในรูปของเลขยกกำลัง คือ

$$Y = aX^b \quad (1)$$

ดังนั้น ค่า X ต่าง ๆ ที่เราสนใจนั้นจะถูกนำมาจัดรูปความสัมพันธ์ใหม่คือ

$$Y = a [X_1^{C_1} X_2^{C_2} X_3^{C_3} X_n^{C_n}]^b \quad (2)$$

6. ซึ่งจะสังเกตได้ว่า X จะมีจำนวนเท่าไรก็ได้ ขึ้นอยู่กับตัวแปร X ที่เราสนใจ และตัวแปร X นั้น ๆ มีผลโดยตรงกับค่า Y

7. จากนั้นใช้วิธี trial and error เพื่อหาค่าคงที่ a, C¹, C², C³, Cⁿ และ b แล้วนำค่าจากวิธี trial and error มาแทนค่าในสมการเพื่อคำนวณค่า Y ให้ใกล้เคียงกับการทดลองมากที่สุด จากนั้นก็สามารถนำสมการที่ได้ไปใช้ทำนายค่าแกน Y ที่เราสนใจซึ่งในบทความนี้ หมายถึง Ku และนำค่า Ku จากการทำนายไปคำนวณหาค่าการถ่ายเทความร้อนและใช้ทำนายค่าการถ่ายเทความร้อนต่อไปดังแสดงในสมการ (3) - (8)

ตัวอย่างสมการสหสัมพันธ์ที่ได้ที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลการทดลอง

Pipatpaiboon, 2005 สร้างสมการที่สามารถนำมาใช้ในการทำนายค่าการถ่ายเทความร้อนของชุด CLOHP/CV ที่ใช้ R123 Ethanol และ Water เป็นสารทำงาน ที่มุมการทำงาน 90° ได้โดยมีความผิดพลาด ± 30 %

$$Ku_{90} = 0.0001 \left[Bo^{2.2} Fr^{1.42} Ja^{1.2} Pr^{1.02} \left[\frac{\rho V}{\rho} \right]^{0.98} Rcv^{1.4} We^{0.8} \left[\frac{L_c}{D_i} \right]^{-0.5} \right]^{0.138} \quad (3)$$

จะเห็นได้ว่าภายในสมการ Ku₉₀ นั้น มีตัวแปร X หลายตัวที่ไม่ซ้ำกัน นำเข้ามาไว้ในการพิจารณาสร้างเป็นสมการ เช่น Bo, Fr, Ja, Pr, [$\rho V / \rho$], Rcv, We และ [Le/Di] ซึ่งตัวแปรเหล่านี้ เป็นตัวแปรไรมิติที่แสดงถึงปรากฏการณ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นในขณะที่ CLOHP/CV ทำงานและส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนโดยตรงของชุดทดลอง จึงถูกนำมาวิเคราะห์และสร้างเป็นสมการขึ้นมาใช้ในการทำนายค่าการถ่ายเทความร้อนของชุดท่อความร้อน CLOHP/CV ซึ่งมีความแม่นยำในการทำนาย ± 30 %

Maneewan. A, 2002 ศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบสันนวงรอบ ซึ่งใช้สารทำงาน Mp39 และ Hp62 ใช้ท่อทองแดงขนาด 0.66, 1.06 และ 2.03 mm ความยาวส่วนทำระเหย 50, 100 และ 150 mm โดยสภาวะการทดสอบ คือ เปลี่ยนมุมเอียงเทียบกับแนวระดับจาก 0 ถึง 90° ผลการทดลองสรุปได้ว่า มุมเอียงการทำงานในช่วง 60 ถึง 90° จะให้ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุด ท่อขนาด 2.03 mm ให้ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุด และความยาวของส่วนทำระเหยขนาด 50 mm ให้ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุด ความยาวรวมของท่อขนาด 5 m ให้ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุด และสมการการทำนายหาค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนในรูปของตัวเลขคูทาเทลด์เซที่มุมเอียงการทำงาน 90° จะมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 24.39% และมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$Ku_{90=22.7} \left[\left(\frac{Di^{1.2}}{Le^{0.7} Li^{0.5}} \right) \left(\frac{\rho_v}{\rho_l} \right)^{0.01} \left(\frac{\sigma^2 \rho_v}{\mu_v^3 \omega} \right)^{0.001} Pr^{-1.2} N^{0.05} \right]^{1.25} \quad (4)$$

ที่มุมเอียงการทำงาน 0° จะมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 29.89% และมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$Ku_0 = 0.7 \left[\left(\frac{Di}{Le^{0.9} Li^{0.1}} \right) \left(\frac{\rho_v}{\rho_l} \right)^{0.1} \left(\frac{\sigma^2 \rho_v}{\mu_v^3 \omega} \right)^{0.01} Pr^{-1.2} N^{0.2} \right]^{1.34} \quad (5)$$

และที่มุมเอียงการทำงาน -90° จะมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 30.29% และมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$Ku_{-90} = 0.019 \left[\left(\frac{Di^{0.7}}{Le^{0.6} Li^{0.1}} \right) \left(\frac{\rho_v}{\rho_l} \right)^{0.07} \left(\frac{\sigma^2 \rho_v}{\mu_v^3 \omega} \right)^{0.05} Pr^{-1.2} N^{0.3} \right]^{1.52} \quad (6)$$

Rittidech, S. and Others, 2003 ศึกษาถึงผลของมุมเอียง ความยาวส่วนทำระเหย และสารทำงานที่มีต่อคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบสันนวงรอบโดยใช้ท่อทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน

2.03 mm ความยาวส่วนทำระเหย, ส่วนกันความร้อน และส่วนควบแน่นมีค่าเท่ากัน คือ 50 และ 150 mm ความยาวรวม 10 m และสารทำงาน คือ เอทานอล, R123 และน้ำ พบว่า ท่อความร้อนแบบสันนวงรอบปิดสามารถถ่ายเทความร้อนได้ดีที่สุดที่มุมเอียง 80 ถึง 85° จากแนวระดับ และเมื่อความยาวส่วนทำระเหยเพิ่มขึ้น ค่าการถ่ายเทความร้อนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และได้เสนอสมการสหสัมพันธ์ทำนายค่าการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบสันนวงรอบที่มุมการทำงาน 0° จากแนวระดับ ดังสมการ (7) ซึ่งมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 30%

$$Ku_0 = 0.0052 \left[\left(\frac{Di^{4.3} Li^{0.1}}{Le^{4.4}} \right) n^{0.5} \left(\frac{\rho_v}{\rho_l} \right)^{-0.2} Pr_v^{-25} \right]^{0.116} \quad (7)$$

Charoensawan, P. and Others, 2000 ศึกษาถึงผลของมุมเอียง อัตราส่วนการเติม และความยาวรวมที่มีต่อคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบสันนวงรอบโดยใช้ท่อทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.03 mm ความยาวส่วนทำระเหย, ส่วนกันความร้อน และส่วนควบแน่นมีค่าเท่ากัน คือ 50 และ 150 mm ความยาวรวมเท่ากับ 5, 11.15 และ 17.5 m อัตราส่วนการเติมอยู่ระหว่าง 30 ถึง 80 % ของปริมาตรรวมภายในท่อความร้อน พบว่าอัตราส่วนการเติมดีที่สุดที่ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อน คือ 50 % และเมื่อความยาวรวมเพิ่มขึ้น ค่าการถ่ายเทความร้อนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และได้เสนอสมการสหสัมพันธ์ทำนายค่าการส่งถ่ายความร้อนของท่อความร้อนแบบสันนวงรอบที่มุมเอียงการทำงานมากกว่า 30° จากแนวระดับ และมีจำนวนโค้งเลี้ยว 10 และ 28 turn ดังสมการ (8)

$$Ku_{(pre)} = 0.54 Ka^{0.47} Ja^{1.43} Pr^{0.27} n^{0.27} (\exp(\beta))^{0.48} \quad (8)$$

Rittidech S., 2007 ได้ทำการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนชนิดสั้นวงรอบที่ติดตั้งวาล์วกันกลับ (CLOHP/CV) นำข้อมูลการทดลองและตัวแปร X ทั้งหมดที่ผลต่อการถ่ายเทความร้อน มาหาความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์พบว่าความสัมพันธ์ของตัวแปร X ที่สนใจศึกษามีความสัมพันธ์กันในลักษณะเชิงเส้น จึงได้ใช้รูปแบบสมการถดถอยสร้างสมการสหสัมพันธ์สำหรับการทำนายค่าการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบที่ติดตั้งวาล์วกันกลับ (CLOHP/CV) พบว่าสมการที่สร้างขึ้นมีความแม่นยำในการทำนาย $\pm 30\%$

Katpradit T., 2005 ทำการศึกษาคูณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบสั้นปลายปิด (CEOHP) ที่สภาวะการทำงานวิกฤติ และรวบรวมข้อมูลผลการทดลองที่สภาวะวิกฤติ มาสร้างสมการสหสัมพันธ์เพื่อใช้ในการทำนาย การถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบสั้นปลายปิดที่สภาวะวิกฤติโดยเฉพาะ เพื่อความแม่นยำในการคำนวณและออกแบบชุดแลกเปลี่ยนความร้อน จากการศึกษาพบว่าสมการที่ออกแบบด้วยวิธีการดังกล่าว มีความแม่นยำในการทำนายค่าการถ่ายเทความร้อน $\pm 29\%$ และสามารถใช้อ้างอิงในการใช้งานเรื่อยมา หลังจากนั้นมาไม่นานมีการออกแบบสมการสหสัมพันธ์ในลักษณะคล้ายกัน แต่กำหนดตัวแปรและสภาวะตำแหน่งที่ต้องการทำนายให้แคบลงไปอีก สมการสหสัมพันธ์ที่ใช้ทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่สภาวะคาร์บอนไดออกไซด์วิกฤติ ในท่อนาโนที่วางในแนวนอน (Hoo-Kyo oh, 2010) และสมการสหสัมพันธ์สำหรับทำนายค่าการถ่ายเทความร้อนของการเดือดแบบแอ่งที่ผิวท่อทรงกระบอกแนวนอน (Samar P.K., 2010) ซึ่งขั้นตอนการออกแบบ

และสร้างสมการที่กล่าวมาจะมีขั้นตอนการสร้างในลักษณะและขั้นตอนเหมือนกับที่กล่าวมาในบทความนี้

การนำสมการสหสัมพันธ์มาใช้งานในการออกแบบและสร้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน

ก่อนการคำนวณสร้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนนั้น ต้องทำการเก็บข้อมูลสถานที่ที่จะนำชุดแลกเปลี่ยนความร้อนไปใช้งาน แบ่งออกเป็นข้อมูลเป็นกลุ่มข้อมูลดังนี้

- ข้อมูลอุณหภูมิในระบบ และข้อมูลที่ต้องการลดหรือเพิ่มเมื่อผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน
- ข้อมูลอัตราการไหลของของไหลที่จะไหลผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน
- ข้อมูลวัสดุที่ใช้ในโรงงานที่เหมาะสมกับโรงงาน
- ข้อมูลขนาดพื้นที่ที่จะทำการติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

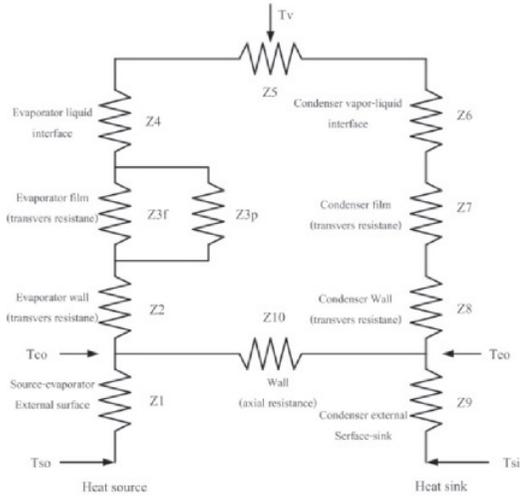
ขั้นตอนการนำสมการ KU มาใช้งานในการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน

เริ่มต้นจากการนำข้อมูลของวัสดุและระบบที่กำหนดไว้ในระบบมาคำนวณหาค่าพลังค์ความร้อน (q) ของท่อเทอร์โมไซฟอนที่สามารถถ่ายเทความร้อนได้ต่อจำนวนท่อเทอร์โมไซฟอน 1 ท่อเป็นอันดับแรก โดยอาศัยสมการดังนี้

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

$$q = \frac{Q}{A} \quad (10)$$

Q คือ ค่าการถ่ายเทความร้อน, ΔT คือ ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างส่วนระเหยกับส่วนควบแน่น, Z คือ ค่าความต้านทานความร้อนรวมในวงจรไฟฟ้าสมมูล, q คือ ฟลักซ์ความร้อนของท่อเทอร์โมไซฟอน, A คือ พื้นที่ผิวส่วนควบแน่นของท่อเทอร์โมไซฟอน



รูปที่ 2 วงจรไฟฟ้าสมมูลสำหรับหาอัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบ

$$Z_{total} = Z_1 + [(Z_2 + Z_3 + Z_4 + Z_5 + Z_6 + Z_7 + Z_8)^{-1} + (Z_{10})^{-1}]^{-1} + Z_9 \quad (11)$$

เมื่อ

Z_1 = ค่าความต้านทานความร้อนจากการพาความร้อนที่ผิวภายนอกของท่อความร้อนส่วนระเหย

Z_2 = ค่าความต้านทานความร้อนจากการนำความร้อนที่ผนังท่อของท่อความร้อนส่วนระเหย

Z_3 = ค่าความต้านทานความร้อนจากการเดือดของสารทำงานภายในท่อของส่วนระเหย

Z_4 = ค่าความต้านทานความร้อนที่เกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสระหว่างของเหลวและไอสารทำงานภายในท่อของท่อส่วนระเหยไปยังท่อของท่อส่วนควบแน่น

Z_5 = ค่าความต้านทานความร้อนที่เกิดจากความดันตกเนื่องจากการไหลของไอสารทำงานภายในท่อของท่อส่วนระเหยไปยังท่อของท่อส่วนควบแน่น

Z_6 = ค่าความต้านทานความร้อนที่เกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสระหว่างของเหลวและไอสารทำงานภายในท่อของท่อส่วนควบแน่น

Z_7 = ค่าความต้านทานความร้อนจากการควบแน่นของสารทำงานภายในท่อของท่อส่วนควบแน่น

Z_8 = ค่าความต้านทานความร้อนจากการนำความร้อนที่ผนังท่อของท่อส่วนควบแน่น

Z_9 = ค่าความต้านทานความร้อนจากการพาความร้อนที่ผิวภายนอกของท่อส่วนควบแน่น

Z_{10} = ค่าความต้านทานความร้อนจากการนำความร้อนที่ผนังท่อในแนวตามยาวจากท่อส่วนระเหยถึงท่อส่วนควบแน่นในทางปฏิบัติค่า Z_4, Z_6 มีค่าน้อยมากจะตัดทิ้ง และถ้าค่า Z_5 มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับค่าของ Z_3, Z_7 ก็ตัดทิ้ง และถ้า

$$Z_{total} = \frac{Z_{10}}{Z_2 + Z_3 + Z_5 + Z_7 + Z_8} > 20 \quad (12)$$

ค่า Z_{10} ก็ตัดทิ้งได้ตั้งนั้นจากวงจรไฟฟ้าสมมูลจะได้ว่า

$$Z_{total} = Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_7 + Z_8 + Z_9 \quad (11)$$

เมื่อผ่านขั้นตอนนี้แล้ว จะได้ค่าการถ่ายเทความร้อนของท่อเทอร์โมไซฟอนจำนวน 1 ท่อที่สามารถทำได้ จากนั้นพิจารณาค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของระบบทั้งหมดที่ต้องการระบายทิ้ง โดยอาศัยสมการ KU ที่สร้างมาใช้กับท่อเทอร์โมไซฟอน โดยเฉพาะสมการที่สร้างหรือพัฒนามา จะถูกพัฒนามาจากสมการของคูทาเทลัดเซมเบอร์ (Kutateladze Number, Ku) ซึ่งเป็นอัตราส่วนของค่าฟลักซ์ (q) การถ่ายเท

ความร้อนที่ให้ออกค่าการถ่ายเทความร้อนวิกฤตของของไหลนั้น ดังแสดงในสมการที่ (13)

$$Ku = \frac{q}{\rho_v h_{fg} \left[\sigma g \left(\frac{\rho_l - \rho_v}{\rho_v^2} \right) \right]^{\frac{1}{4}}} \quad (13)$$

จากงานวิจัย (Paramet, T. and Others, 2010) ได้พัฒนาสมการสหสัมพันธ์ KU สำหรับทำนายค่าการถ่ายเทความร้อนของเทอร์โมไซฟอนที่ใช้สารทำงานผสมผงโลหะขนาดนาโน จากการทำการทดลองซ้ำๆ และเก็บข้อมูลมาวิเคราะห์สามารถสร้างสมการ KU ขึ้นมาใหม่สำหรับทำนายค่าการถ่ายเทความร้อนของท่อเทอร์โมไซฟอนที่ใช้สารทำงานผสมผงโลหะขนาดนาโนได้ ดังแสดงในสมการที่ (14)

$$Ku = 3.11 \left[\frac{Le^{2.1} Pr^{2.2} Bo^{2.5} Ja^{2.1} We^{1.4} Co^{2.5} Nu^{2.5}}{di Ar^{0.5} Gr^{0.5}} \right]^{0.13} \quad (14)$$

จากสมการที่ผ่านมาสามารถใช้ร่วมกันเพื่อใช้ทำนาย q ของระบบใดๆ ที่ต้องการทราบได้จากสมการที่ (15)

$$q = 3.11 \left[\frac{Le^{2.1} Pr^{2.2} Bo^{2.5} Ja^{2.1} We^{1.4} Co^{2.5} Nu^{2.5}}{Ar^{0.5} Gr^{0.5}} \right]^{0.13} \times \left[\rho_v h_{fg} \left(\frac{\rho_l - \rho_v}{\rho_v^2} \right) \right]^{\frac{1}{4}} \quad (15)$$

หลังจากนั้น นำค่าจากสมการที่ 10 มาเปรียบเทียบกับ เพื่อหาจำนวนท่อเทอร์โมไซฟอนที่เหมาะสมกับการใช้งานในระบบการถ่ายเทความร้อนนั้นๆ ต่อไป

รายการสัญลักษณ์

- Q Heat transfer rate (W)
- q ค่าฟลักซ์การถ่ายเทความร้อน (W / m²)
- \dot{m} Mass per unit time (Kg/s)
- C_p Specific heat capacity constant pressure (J/Kg °C)

- T_{out} Outlet temperature at condenser section (°C)
- T_{in} Inlet temperature at condenser section (°C)
- T_v Working Temperature (°C)
- h_{fg} Latent heat of vaporization (kJ/kg)
- k Thermal conductivity (W/m K)
- T อุณหภูมิ (°C)
- ΔT ค่าความแตกต่างอุณหภูมิ (°C)
- Z ค่าความต้านทานความร้อนของเทอร์โมไซฟอน (K/W)
- Z_{total} ค่าความต้านทานความร้อนรวมของเทอร์โมไซฟอน (K/W)
- A พื้นที่ (m²)
- L ค่าความร้อนแฝง (J/kg)
- P_p ค่าความดันอิมพัลส์ในแอ่งของเหลว (N/m²)
- φ₂ ค่าลักษณะสำหรับการควบแน่น
- φ₃ ค่าลักษณะสำหรับการเดือดแบบฟอง

Ar, Archimedes Number

$$Ar = \frac{g \times \rho_s \times L^3}{\mu^2} (\rho_s - \rho_f)$$

Bo, Bond number

$$D \left[g \frac{\rho_l - \rho_v}{\sigma} \right]^{\frac{1}{2}}$$

Co, Condensation Number

$$\frac{h}{k} \left[\frac{\mu^2}{g \rho^2} \right]^{\frac{1}{3}}$$

Fr, Froude number

$$\frac{Q^2}{\rho_v D^5 h_{fg}^2 g}$$

Ga, Grashof Number

$$\frac{L^3 \rho^2 \beta \Delta T C_p}{\mu^2}$$

Ja, Jacob number

$$\left(\frac{h_{fg}}{C_{p,l} T_v} \right)$$

Ku, Kutateladza number

$$\left[\frac{q}{\left[\rho_v h_{fg} \left(\frac{\rho_l - \rho_v}{\rho_v^2} \right) \right]^{1/4}} \right]$$

Aspect ratio

$$\frac{L_c}{d_i}$$

Nu, Nusselt Number

$$\frac{hD}{k}$$

Pr, Prandtl Number

$$\left(\frac{\mu_l C_{p,l}}{k_l} \right)$$

We, Weber number

$$\frac{Q^2}{\rho_v D^3 h_{fg}^2 \sigma}$$

Greek symbols

ρ = density, kg/m³

μ = viscosity, Pa s

σ = surface tension, N/m

Subscripts

c = condenser

e = evaporator

a = adiabatic

l = liquid

v = vapor

สรุป

จากทั้งหมดที่อธิบายทำให้ทราบว่าสมการ Ku ที่พัฒนาโดยนักวิจัยนั้นสามารถนำมาใช้ คำนวณร่วมกับสมการ KU ดั้งเดิมได้และสามารถใช้ในการออกแบบสร้างชุดแลกเปลี่ยนความร้อนได้อย่างแม่นยำ เพราะค่าความแม่นยำของสมการที่สร้างขึ้นมานั้นมีความแม่นยำสูงมากบางสมการมีความแม่นยำถึง $\pm 5\%$ และสามารถใช้งานได้จริงกับการออกแบบชุดแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน ทั้งนี้หลักการที่กล่าวมาทั้งหมดนี้สามารถประยุกต์ใช้กับสมการ KU อื่นๆ ที่ถูกพัฒนาสำหรับทำนายค่าการถ่ายเทความร้อนในเงื่อนไขอื่น ๆ และต่อความร้อนชนิดอื่น ๆ ได้เช่นกัน

บรรณานุกรม

สัมพันธ์ ฤทธิเดช. (2010). เทคโนโลยีท่อความร้อน. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัทยมหาสารคาม.

Charoensawan, P., Terdtoon, P., Tantakom, P., Ingsuwan, P. and Groll, M. (2000). Effect of Inclination Angles, Filling Ratios and Total Lengths on Heat Transfer Characteristic of a Closed-Loop Oscillating Heat Pipe. Proceedings of the 6th International Heat Pipe Symposium. 422 - 430. Thailand.

Decha - amphai, P (2010) Numerical methods in engineering. Chula press, Thailand.

Dunn P.D, Reay D.A. Heat Pipes. 3rd ed. Pergamon Press; 1994.

Dunn P.D, Reay D.A. Heat Pipes. Oxford Pergamon Press; 1982.

- Hoo-Kyo oh. (2010). New correlation to predict the heat transfer coefficient intube cooling of supercritical CO₂ in horizontal macro-tubes. Experimental Thermal and Fluid Science. 34 : 1230 - 1241.
- Katpradit T. (2005). Correlation to predict heat transfer characteristics of a closed end oscillating heat pipe at critical state. Applied Thermal Engineering. 25 : 2138 - 2151.
- Manewan. A. (2002). Heat transfer characteristics of closed-looped oscillating heat-pipe Using Hp62 an Mp39 as working fluids. Master thesis, Energy Engineering. Faculty of Engineer of Chiangmai University, Thailand.
- Paramet Thanuwat, T. and others. (2010) A corre-lation to predict heat-transfer rates of a two-phase closed thermosyphon (TPCT) using silver nano fluid at normal operating conditions. International Journal of Heat and Mass Transfer. 53 : 4960 - 4965.
- Pipatpaiboon N. (2005). Correlation for predicting heat transfer of a closed-looped oscillating heat-pipe with Check valves (CLOHP/CVs). Master thesis, Energy Technology. Faculty of Engineering of Mahasarakham University, Thailand.
- Rittidech, S., Terdtoon P., Murakami M., Kamonpet P., Jompakdee W. (2003). Correlation to Predict Heat Transfer Characteristics of a Closed-end Oscillating Heat pipe. Appleied Thermal Engineering, Pergaman Science. 23 : 497 - 510.
- Rittidech S. (2007). Heat transfer characteristics of a closed-loop oscillating heat pipe with check valves. Applied Energy. 84 : 565 - 577.
- Samar P.K. (2010). Correlation for heat transfer in nucleate boiling on cylindrical surface. Heat Transfer Engineering. 31 : 446 - 457.