

การคำนวณสมรรถนะของเครื่องอุ่นอากาศแบบเทอร์โมไซฟอนโดยที่ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนไม่คงที่

Performance Analysis of Thermosyphon Air Preheater With Variable Heat Transfer Coefficient

อติพงศ์ นันทพันธุ์ และ จิรวรรณ เตียรธสุวรรณ
คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพมหานคร 10140

ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เชียงใหม่ 50200

Atipoang Nuntaphan and Jirawan Tiansuwan
School of Energy and Materials King Mongkut's University of Technology Thonburi Bangkok 10140

Tanongkiat Kiatsirirot
Department of Mechanical Engineering Chiang Mai University Chiang Mai 50200

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ ได้เสนอวิธีการในการคำนวณสมรรถนะของเครื่องอุ่นอากาศแบบเทอร์โมไซฟอน ซึ่งโดยทั่วไปจะตั้งสมมุติฐานว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแต่ละท่อในเครื่องอุ่นอากาศมีค่าคงที่ โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการเปรียบเทียบวิธีการคำนวณดังกล่าวกับวิธีการที่กำหนดให้อัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนในเครื่องอุ่นอากาศแปรเปลี่ยนไปตามสภาวะของอุณหภูมิอากาศที่มาแลกเปลี่ยนความร้อนกัน โดยทำการสร้างโปรแกรมจำลองสถานการณ์เพื่อคำนวณสมรรถนะของเครื่องอุ่นอากาศ โดยอาศัยหลักการทั้งสองแบบเปรียบเทียบกัน จากโปรแกรมจำลองสถานการณ์พบว่า การตั้งสมมุติฐานว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนมีค่าคงที่ จะใช้ได้ดีกับกรณีของเครื่องอุ่นอากาศแบบไหลสวนทางกันที่มีอัตราการไหลของอากาศร้อนและเย็นเท่ากัน ส่วนในกรณีของอัตราการไหลของอากาศร้อนและเย็นไม่เท่ากันและกรณีของเครื่องอุ่นอากาศแบบไหลตามกัน พบว่าสมมุติฐานดังกล่าว ให้การคำนวณสมรรถนะของเครื่องอุ่นอากาศคลาดเคลื่อน

Abstract

This research work presents an approach to calculate performance of the thermosyphon air preheater. Normally, the heat transfer rate of the thermosyphon in the air preheater is assumed constant. In this work, the heat transfer rate depends on the working conditions of the air in the thermosyphon heat exchanger. The simulated results had been compared with those of the conventional approach. It is found that both approaches had the same result for counter current flow with equal mass flow rates of hot and cold streams. For unbalance counter current flow and parallel flow, the conventional are showed oversized value.

1. บทนำ

เครื่องปรับอากาศแบบเทอร์โมไซฟอน เป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนชนิดหนึ่งที่นิยมใช้ในการทำความร้อนทั้งจากไอเสียที่เกิดจากการเผาไหม้ของหม้อไอน้ำ มาใช้ในการอุ่นอากาศก่อนเข้าห้องสันดาป ซึ่งเป็นการเพิ่มสมรรถนะของหม้อไอน้ำให้สูงขึ้น และนอกจากนี้เครื่องปรับอากาศแบบเทอร์โมไซฟอน ยังสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในระบบการทางอุตสาหกรรมต่างๆ ได้มากมาย ทั้งนี้เนื่องจากอุปกรณ์ดังกล่าวมีข้อดีหลายประการ อาทิเช่น ให้อัตราการถ่ายเทความร้อนสูง ความดันตกคล้อยน้อย ราคาถูก และสามารถติดตั้งได้ง่าย

ในการออกแบบเครื่องปรับอากาศแบบเทอร์โมไซฟอน โดยปกติแล้วจะตั้งสมมุติฐานให้อัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแต่ละท่อมามีค่าคงที่เท่ากัน [1] แต่ในทางปฏิบัติแล้ว อัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนในแต่ละตำแหน่งในเครื่องปรับอากาศจะมีค่าไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของอากาศที่มาแลกเปลี่ยนความร้อนกัน ดังนั้นการใช้สมมุติฐานข้างต้นอาจจะไม่ถูกต้องนัก ทำให้การคำนวณออกแบบขนาดของเครื่องปรับอากาศเกิดความผิดพลาด ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ จะทำการทดสอบสมมุติฐานดังกล่าวว่าสามารถใช้ได้ในลักษณะใดบ้าง โดยจะทำการออกแบบโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการคำนวณสมรรถนะของเครื่องปรับอากาศ ทั้งในกรณีของการใช้สมมุติฐานอัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนมีค่าคงที่ และในกรณีของอัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแปรเปลี่ยนไปตามสภาวะของอุณหภูมิอากาศที่มาแลกเปลี่ยนความร้อนกัน เพื่อศึกษาถึงความเหมาะสมในการนำเอาสมมุติฐานอัตราการถ่ายเทความร้อนคงที่ มาใช้ในการออกแบบเครื่องปรับอากาศแบบเทอร์โมไซฟอน

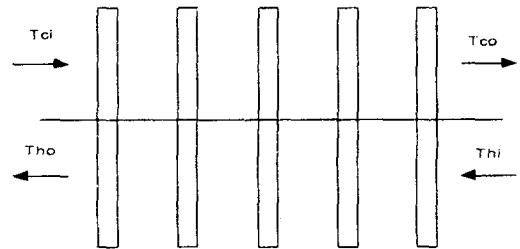
2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

การคำนวณการถ่ายเทความร้อนของเครื่องปรับอากาศแบบเทอร์โมไซฟอน สามารถพิจารณาได้ดังรูปที่ 1 ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

อัตราการถ่ายเทความร้อนรวมของเครื่องปรับอากาศแบบเทอร์โมไซฟอนสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$Q = (UA)_t \Delta T_{lmt} \quad [1]$$

โดยที่ Q คืออัตราการถ่ายเทความร้อนรวม $(UA)_t$ คือค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมพื้นที่ ของเครื่องปรับอากาศ ΔT_{lmt} คือ อุณหภูมิแตกต่างเชิงล็อก



รูปที่ 1 การถ่ายเทความร้อนของเครื่องปรับอากาศแบบเทอร์โมไซฟอน

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมพื้นที่ ของเครื่องปรับอากาศแบบเทอร์โมไซฟอนสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \frac{1}{(UA)_t} = & \frac{1}{h_{ev,o} A_{ev,ot}} + \frac{1}{h_{cd,o} A_{cd,ot}} \\ & + \frac{1}{h_{ev,i} A_{ev,it}} + \frac{1}{h_{cd,i} A_{cd,it}} \\ & + \frac{\ln(r_o/r_i)}{2\pi k_m L_{ev,t}} + \frac{\ln(r_o/r_i)}{2\pi k_m L_{cd,t}} \end{aligned} \quad [2]$$

Kiatsirirot et.al. [2] ได้ทำการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของการเดือดในท่อเทอร์โมไซฟอน ที่ใช้น้ำเป็นสารทำงาน และได้สร้างสมการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของการเดือด โดยดัดแปลงสมการของ Roshenow ดังนี้

$$\begin{aligned} h_{ev,i} = & \frac{18.688}{\Delta T_{ev} C_1} \left[\left(\frac{\Delta T_{ev}}{C_2} \right)^3 \right]^{0.3572} \\ C_1 = & \frac{1}{\mu_{wl} \lambda_w} \sqrt{\frac{g_c \sigma_w}{g(\rho_{wl} - \rho_{ww})}} \\ C_2 = & \frac{\lambda_w Pr_{wl}}{Cp_{wl}} \end{aligned} \quad [3]$$

โดยที่ ΔT_{ov} คืออุณหภูมิแตกต่างระหว่างผิวและสารทำงานที่ส่วนระเหยของท่อความร้อน

นอกจากนี้ยังได้ทำการสร้างสมการเอมไพริคัลเพื่อคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของการควบแน่นภายในท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนที่ใช้น้ำเป็นสารทำงาน โดยดัดแปลงมาจากสมการของ Nusselt ดังนี้

$$h_{cd,i} = 0.943 \left(\frac{\rho_{wl}^2 g \lambda_w k_{wl}^3}{\mu_{wl} L_{cd} \Delta T_{cd}} \right)^{0.233} \quad [4]$$

โดยที่ ΔT_{cd} คืออุณหภูมิแตกต่างระหว่างผิวและสารทำงานที่ส่วนควบแน่นของท่อความร้อน

ESDU [3] ได้เสนอสมการในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของอากาศร้อนที่ไหลผ่านกลุ่มท่อติดครีบบนแบบไหลตามขวาง (cross flow) ดังนี้

$$h = \frac{\overline{Nu} k_a}{D_o} \quad [5]$$

$$\overline{Nu} = 0.242 Re^{0.658} \left(\frac{f_s}{f_h} \right)^{0.297} \left(\frac{S_t}{S_l} \right)^{-0.091} Pr^{0.333}$$

3. โปรแกรมการจำลองสถานการณ์

โปรแกรมการจำลองสถานการณ์ที่ใช้ในการคำนวณสมรรถนะของเครื่องอุ่นอากาศแบบเทอร์โมไซฟอนในงานวิจัยนี้ สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ โปรแกรมที่สร้างขึ้นจากสมมติฐานอัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนคงที่ และไม่คงที่ (ขึ้นกับสภาวะของอากาศที่มาแลกเปลี่ยนความร้อน) โดยลักษณะของเครื่องอุ่นอากาศที่ใช้ในการคำนวณมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

จำนวนท่อความร้อน	49	ท่อ
จำนวนแถวของท่อความร้อน	7	แถว
การจัดเรียง	แบบเหลื่อมกัน	
S_t	0.053	m
S_l	0.046	m
S_d	0.053	m
ขนาดท่อความร้อน	0.027	m
ความยาวของส่วนระเหย	0.4	m
ความยาวของส่วนควบแน่น	0.4	m

สารทำงาน

น้ำ

ลักษณะของครีบบ

แบบวงกลม

ความหนาแน่น

10 ครีบบ/inch

ความสูงครีบบ

0.01 m

วัสดุ (ท่อและครีบบ)

stainless 304

อุณหภูมิขาเข้าของอากาศร้อน

200 °C

อุณหภูมิขาเข้าของอากาศเย็น

30 °C

Flow-charts ของโปรแกรมในการคำนวณสมรรถนะของเครื่องอุ่นอากาศแบบเทอร์โมไซฟอน ในกรณีของการใช้สมมติฐานอัตราการถ่ายเทความร้อนเท่ากัน และสมมติฐานที่อัตราการถ่ายเทความร้อนไม่เท่ากัน ในกรณีของการไหลสวนทางและไหลตามกัน แสดงในรูปที่ A1-A3 ในภาคผนวกตามลำดับ โดยในงานวิจัยนี้ จะใช้โปรแกรม Turbo Pascal for Windows 1.5 ในการคำนวณสมรรถนะของระบบ

รูป ก1 ซึ่งแสดง Flow-chart ในการคำนวณสมรรถนะของเครื่องอุ่นอากาศแบบไหลสวนทางหรือแบบไหลตามกัน โดยกำหนดให้ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนมีค่าเท่ากันทุกท่อ ซึ่งเป็นการคำนวณแบบวนลูป เพื่อหาค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนรวมและอุณหภูมิขาออกของอากาศร้อนและเย็น

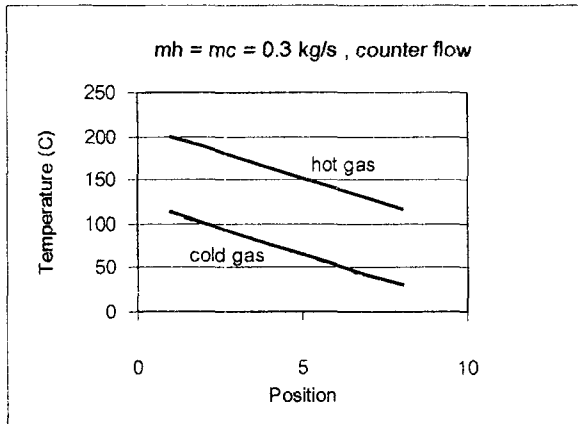
รูป ก2-3 เป็นการคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนในเครื่องอุ่นอากาศที่ละแถว เพื่อหาค่าอุณหภูมิของอากาศด้านเข้าและออกจากท่อความร้อนตลอดจนอัตราการถ่ายเทความร้อนในแต่ละแถว

4. ผลการจำลองสถานการณ์และการวิเคราะห์

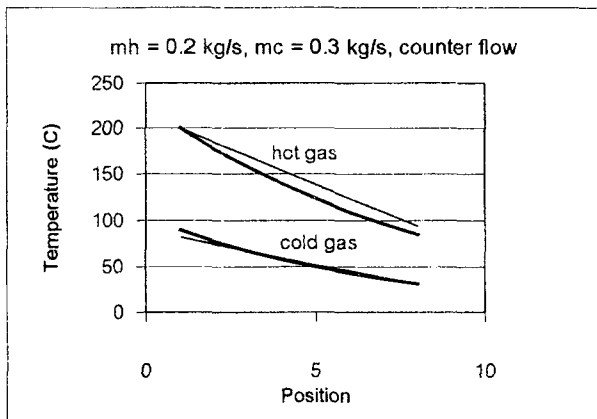
รูปที่ 2 ก-ง แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิของอากาศร้อนและเย็นที่ได้จากผลการจำลองสถานการณ์ในกรณีของการใช้สมมติฐานอัตราการถ่ายเทความร้อนคงที่และไม่คงที่ ในกรณีของเครื่องอุ่นอากาศแบบไหลสวนทางกัน ที่มีอัตราการไหลของอากาศร้อนและเย็นเท่ากัน จากรูปจะพบว่าอุณหภูมิของอากาศร้อนและเย็นที่ได้จากการคำนวณทั้งสองแบบมีค่าเท่ากัน ซึ่งหมายถึงในกรณีนี้การใช้สมมติฐานแบบเดิมให้การคำนวณที่ถูกต้องแม่นยำ

รูปที่ 2ข-ง เป็นกรณีของอุณหภูมิของอากาศร้อนและเย็นในกรณีของเครื่องอุ่นอากาศแบบไหลสวนทางกันโดยอัตราการไหลของอากาศร้อนและเย็นไม่เท่ากัน และในกรณีของเครื่องอุ่นอากาศแบบไหลตามกัน ทั้งในกรณีของอัตราการไหลของอากาศแบบเท่ากันและไม่เท่ากันตามลำดับ ในกรณีดังกล่าวนี้จะพบว่าการใช้สมมติฐานที่ว่าอัตราการถ่ายเท

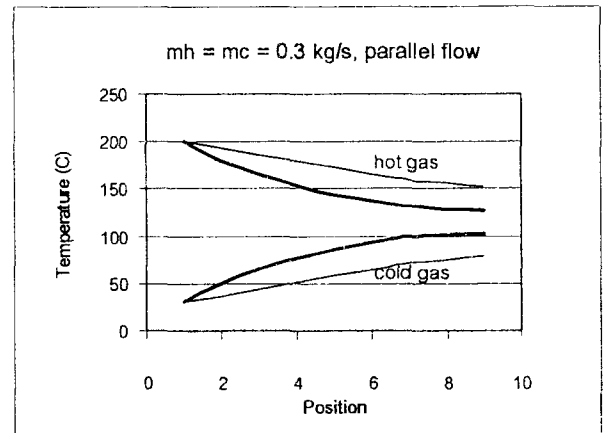
ความร้อนคงที่จะให้ความคลาดเคลื่อนในการคำนวณอุณหภูมิของอากาศสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีของเครื่องอุ่นอากาศแบบไหลสวนทางกัน ซึ่งส่งผลให้การคำนวณอุณหภูมิขาออกของอากาศร้อนและเย็นที่ได้สูงและต่ำกว่าความเป็นจริง ซึ่งถ้านำไปใช้ในการออกแบบเครื่องอุ่นอากาศจะทำให้ได้เครื่องอุ่นอากาศที่มีขนาดใหญ่เกินความจำเป็น



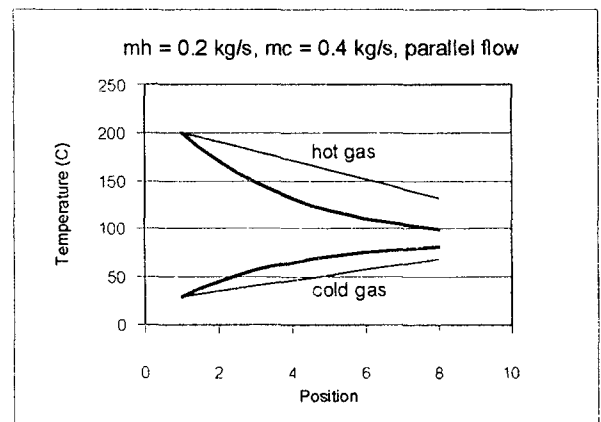
- ก. อุณหภูมิของอากาศร้อนและเย็นในกรณีของเครื่องอุ่นอากาศแบบไหลสวนทางกัน โดยมีอัตราการไหลของอากาศร้อนและเย็นเท่ากัน



- ข. อุณหภูมิของอากาศร้อนและเย็นในกรณีของเครื่องอุ่นอากาศแบบไหลสวนทางกัน โดยมีอัตราการไหลของอากาศร้อนและเย็นไม่เท่ากัน



- ค. อุณหภูมิของอากาศร้อนและเย็นในกรณีของเครื่องอุ่นอากาศแบบไหลตามกัน โดยมีอัตราการไหลของอากาศร้อนและเย็นเท่ากัน



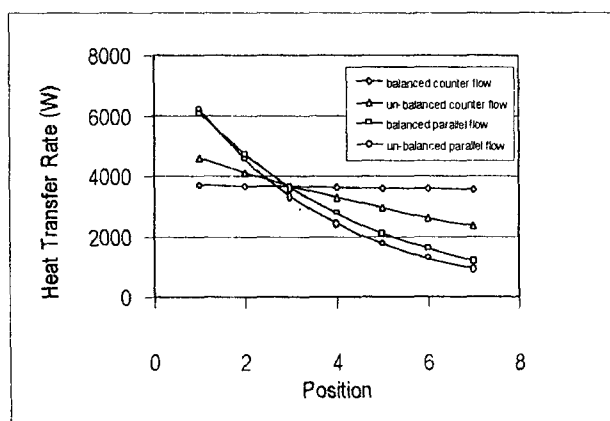
- ง. อุณหภูมิของอากาศร้อนและเย็นในกรณีของเครื่องอุ่นอากาศแบบไหลตามกัน โดยมีอัตราการไหลของอากาศร้อนและเย็นไม่เท่ากัน

รูปที่ 2 อุณหภูมิของอากาศร้อนและเย็นของเครื่องอุ่นอากาศแบบต่างๆ ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้สมมุติฐานทั้งสองแบบ

note : ——— อัตราการถ่ายเทความร้อนคงที่
 ————— อัตราการถ่ายเทความร้อนไม่คงที่

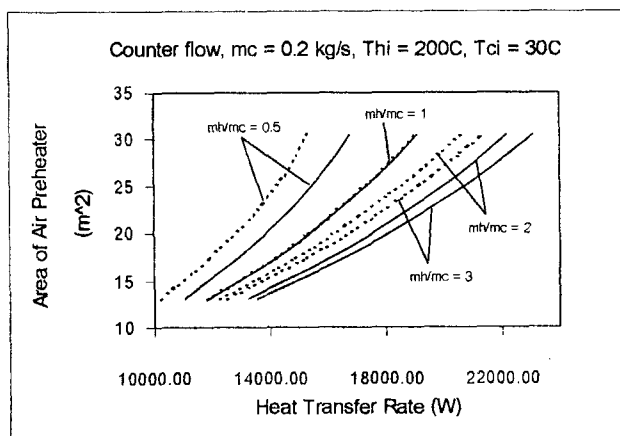
รูปที่ 3 แสดงอัตราการถ่ายเทความร้อนของเครื่องอุ่นอากาศแบบไหลสวนทางและไหลตามกันทั้งในกรณีอัตราการไหลของอากาศเท่ากันและไม่เท่ากัน จากรูปพบว่า ในกรณีของเครื่องอุ่นอากาศแบบไหลสวนทางกันที่มีอัตราการไหลของอากาศร้อนและเย็นเท่ากัน จะมีค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนในแต่ละแถวของท่อความร้อนคงที่ ซึ่งส่งผลให้ผลต่าง

ของอุณหภูมิอากาศร้อนและเย็นที่ตำแหน่งต่างๆ ในเครื่องอุ่นอากาศประเภทนี้มีค่าคงที่ สำหรับในกรณีอื่นๆ พบว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนมีค่าไม่คงที่ ดังนั้นการใช้สมมุติฐานอัตราการถ่ายเทความร้อนคงที่สำหรับในกรณีนี้เป็นสิ่งที่ไม่ถูกต้อง



รูปที่ 3 อัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนในแต่ละแถวของเครื่องอุ่นอากาศแบบต่างๆ

รูปที่ 4 แสดงพื้นที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อนของเครื่องอุ่นอากาศแบบเทอร์โมไซฟอนแบบไหลสวนทางกัน ที่ได้จากการคำนวณทั้งสองแบบ จากรูปพบว่า ในกรณีของอัตราการไหลของอากาศร้อนและเย็นไม่เท่ากัน การใช้สมมุติฐานอัตราการถ่ายเทความร้อนคงที่ จะทำให้พื้นที่ ที่ได้จากการคำนวณมีค่าสูงเกินความจำเป็น สำหรับในกรณีอัตราการไหลเท่ากัน พบว่าพื้นที่ที่ได้จากการคำนวณทั้งสองแบบมีค่าเท่ากัน



รูปที่ 4 พื้นที่ผิวของเครื่องอุ่นอากาศที่ได้จากการคำนวณทั้งสองแบบ

----- Q constant ————— Q un-constant

5. สรุปผลการวิจัย

การออกแบบเครื่องอุ่นอากาศแบบไหลสวนทางกันโดยมีอัตราการไหลของอากาศร้อนและเย็นคงที่ สามารถใช้สมมุติฐานอัตราการถ่ายเทความร้อนคงที่ได้ แต่ในกรณีของอัตราการไหลของอากาศร้อนและเย็นไม่เท่ากัน หรือในกรณีของเครื่องอุ่นอากาศแบบไหลสวนทางกัน การใช้สมมุติฐานดังกล่าวจะมีความคลาดเคลื่อนในการคำนวณสูง

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยที่ให้ทุนอุดหนุนในการทำวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

1. Engineering Science Data Unit, "Heat Pipe Performance of Two Phase Closed Thermosyphons", Item No. 81038, UK., 1981
2. Kiatsiriroat T., Nuntaphan A. and Tiansuwan J., "Thermal Performance Enhancement of Thermosyphon Heat Pipe with Binary Working Fluids" Experimental Heat Transfer, Vol 13, No 2, 2000
3. Hewitt G.F., Shires G.L. and Bott T.R., "Process Heat Transfer", CRC Press., 1994

รายการสัญลักษณ์

- A = Area (m^2)
 Cp = Heat capacity (J/kgK)
 D = Diameter of pipe (m)
 f_h = Fin height (m)
 f_s = Gap between fins (m)
 g = Gravitational acceleration ($9.81 m/s^2$)
 g_c = Constant ($1kgm/Ns^2$)
 h = heat transfer coefficient (W/m^2K)
 k = Thermal conductivity (W/mK)
 L = Length (m)
 m = mass flow rate (kg/s)
 Nu = Nusselt number
 Pr = Prandtl number
 Q = Heat transfer rate (W)

Re = Renold number

S_d = Pitch of tubes on the diagonal plane (m)

S_l = Pitch of tubes in direction of flow (m)

S_t = Pitch of tubes in plane perpendicular to flow (m)

T = Temperature ($^{\circ}C$)

ΔT_{lmd} = Log mean temperature difference ($^{\circ}C$)

subscript

a = air

c = cold air

cd = condenser

ev = evaporator

h = hot air

i = inlet, inside

l = liquid phase

m = metal

o = outlet, outside

s = surface

t = total

v = vapor phase

w = water

Greek Letters

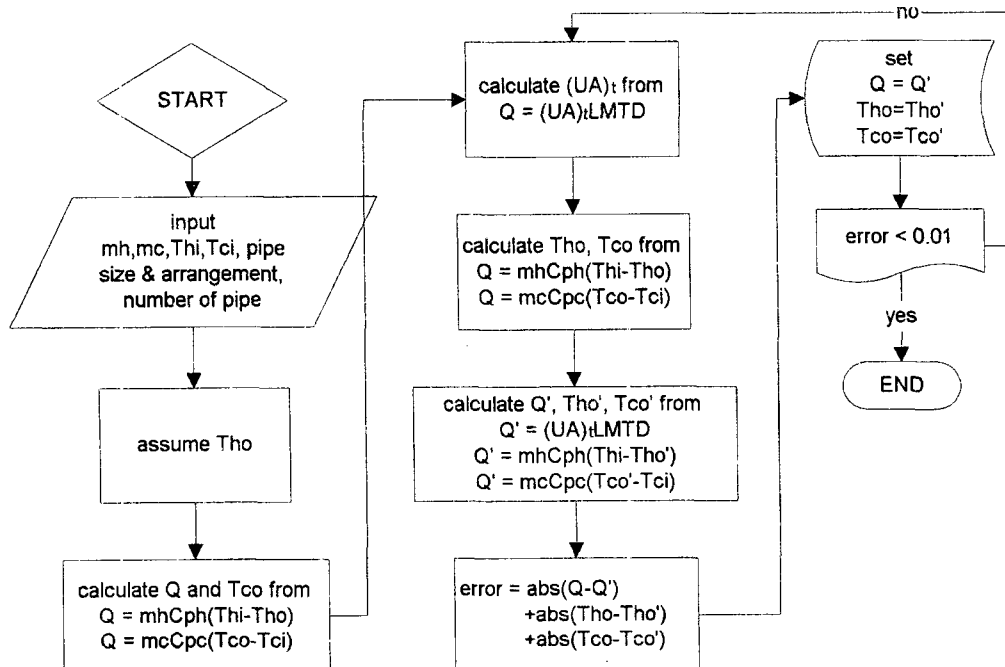
μ = Viscosity (kg/ms)

ρ = Density (kg/m^3)

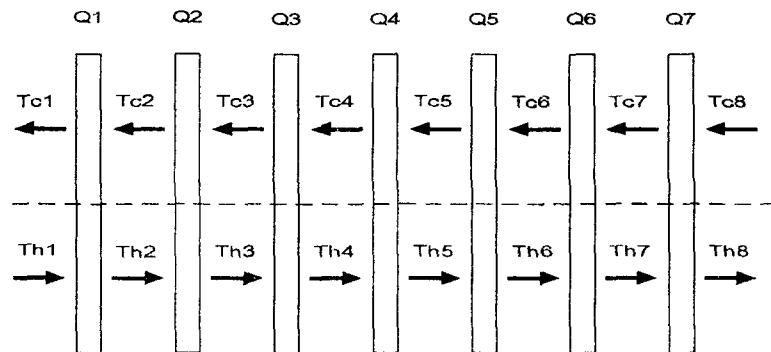
λ = Latent heat of vaporization (J/kg)

σ = Surface Tension (N/m)

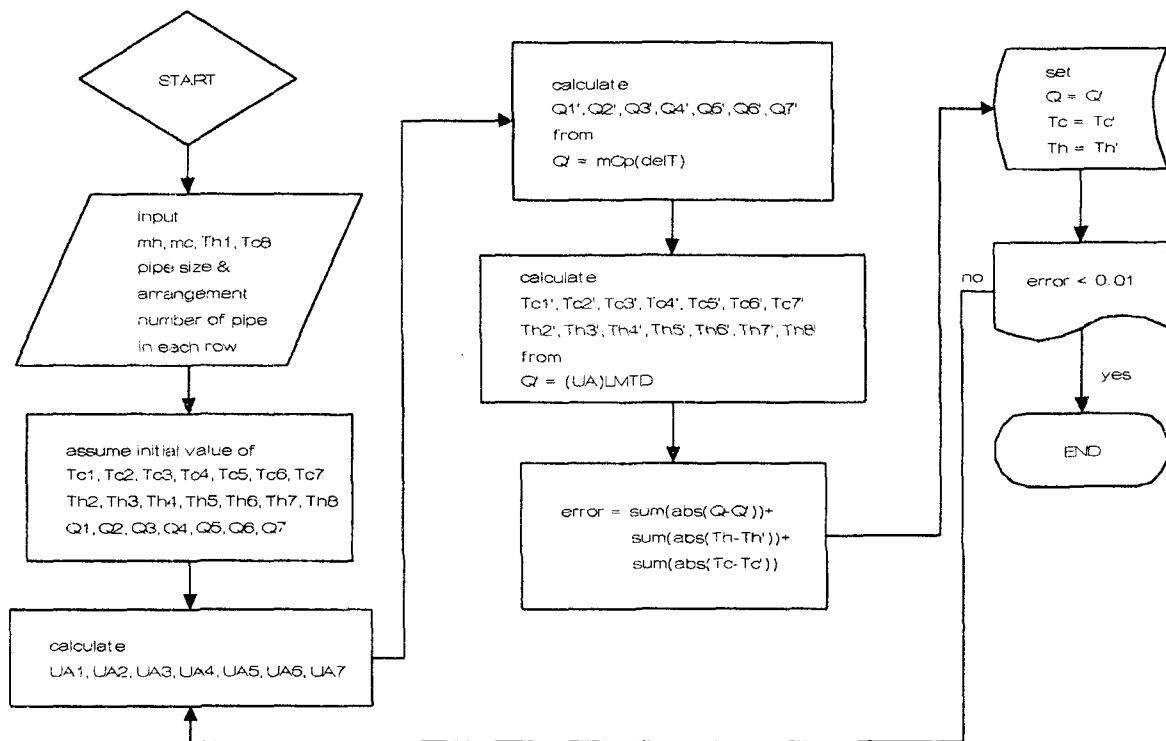
ภาคผนวก



รูปที่ ก1 แผนภาพในการคำนวณสมรรถนะของเครื่องปรับอากาศแบบเทอร์โมไซฟอน
ในกรณีของอัตราการถ่ายเทความร้อนคงที่

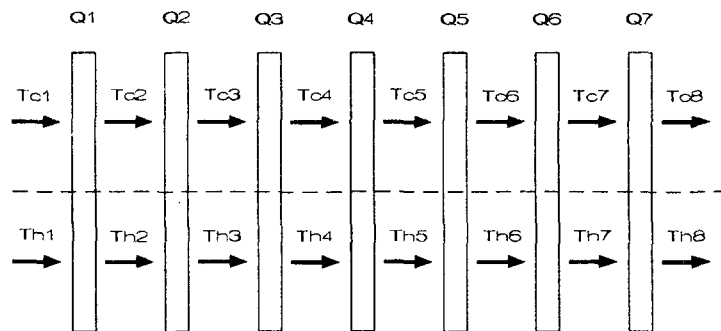


ก. ทิศทางการไหลของกระแสน้ำและเย็นในเครื่องอุ่นอากาศแบบไหลสวนทางกัน

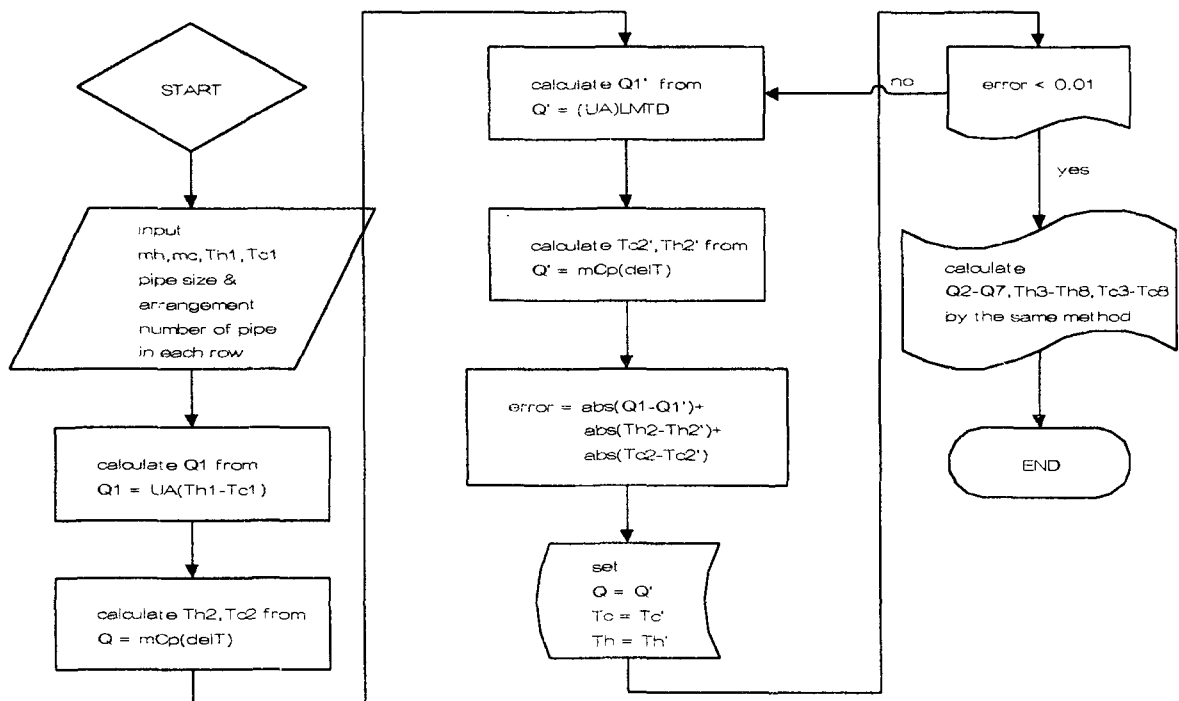


ข. แผนภาพในการคำนวณสมรรถนะของเครื่องอุ่นอากาศแบบไหลสวนทางกัน

รูปที่ ก2 แผนภาพในการคำนวณสมรรถนะของเครื่องอุ่นอากาศแบบเทอร์โมไซฟอนแบบไหลสวนทางกัน
ในกรณีของอัตราการถ่ายเทความร้อนไม่คงที่ดังที่



ก. ทิศทางการไหลของกระแสน้ำร้อนและเย็นในเครื่องอุ่นอากาศแบบไหลตามกัน



ข. แผนภาพในการคำนวณสมรรถนะของเครื่องอุ่นอากาศแบบไหลตามกัน

รูปที่ ก3 แผนภาพในการคำนวณสมรรถนะของเครื่องอุ่นอากาศแบบเทอร์โมไซฟอนแบบไหลตามกัน
ในกรณีของอัตราการถ่ายเทความร้อนไม่คงที่คงที่