

บทที่ 3

ข้อมูลการกักกร่อนเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน

ข้อมูลการกักกร่อนที่ผิวภายนอกของเครื่องแลกเปลี่ยน และค่าความต้านทานความร้อนของฟาวลิงที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ ได้มาจากผลการทดลอง (ขวัญชัย ไกรทอง, 2541), (Terdtoon et al., 1999), (ถนัด เกษประดิษฐ์, 2543), (ประชา ยืนยงกุล, 2541) โดยทดสอบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนกับไอเสียร้อนที่อุณหภูมิเฉลี่ย 225 องศาเซลเซียส ซึ่งได้จากการเผาไหม้น้ำมันเตาเกรด A ผสมกับน้ำมันดีเซล 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ทำการทดสอบวันละ 16 ชั่วโมง โดยพิจารณาผลของความสัมพันธ์การกักกร่อนที่มีต่อเทอร์โมไซฟอนที่ได้รับการป้องกันและไม่ป้องกันการกักกร่อนเทียบกับเวลา และผลของความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการส่งถ่ายความร้อนเนื่องจากฟาวลิงที่เกาะที่ผิวของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเทียบกับเวลา สำหรับการป้องกันการกักกร่อนภายในได้ทำการจำลองสภาวะการทำงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (ปิยะนันท์ เจริญสวรรค์, 2541) เพื่อพิจารณาผลของการกักกร่อนซึ่งเกิดขึ้นภายในท่อโดยไม่ป้องกันการกักกร่อนเทียบกับการป้องกันการกักกร่อนโดยการเติมสารยับยั้ง Na_2HPO_4 ลงในสารทำงาน 20 ppm. และเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง รายละเอียดของการกักกร่อนทั้งภายในและภายนอก และผลของความต้านทานความร้อนเนื่องจากฟาวลิงสามารถแยกได้ดังนี้

3.1 การกักกร่อนที่ผิวภายนอกของเทอร์โมไซฟอน

3.1.1 การป้องกันการกักกร่อนโดยการเคลือบสีทนความร้อนที่ผิวเทอร์โมไซฟอน

จากการทดลองของ Terdtoon et al. (1999) ทำการทดสอบต่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนผิวท่อเรียบที่ทำจากท่ออะลูมิเนียม ท่อทองแดง และท่อเหล็ก ตามลำดับ เทอร์โมไซฟอนเคลือบสีทนความร้อนเคลือบสีด้วย 3 ความหนา ซึ่งการเคลือบผิวภายนอกด้วยสีทนความร้อน (Hi-temp) เป็นวิธีที่สะดวกและราคาต้นทุนสำหรับเคลือบน้อยกว่าอานาเมลมาก แต่ระยะเวลาในการป้องกันการกักกร่อนจะสั้นกว่าอานาเมล ส่วนประกอบของสีประเภทนี้ส่วนใหญ่ได้แก่ Resin ความคงทนของสีที่เคลือบขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้งาน เวลาที่ใช้สำหรับการทดสอบรวม 1,000 ชั่วโมง จากผลการทดสอบพบว่าการกักกร่อนที่วัดจากภาพถ่ายภาคตัดขวางของเทอร์โมไซฟอนที่ทำจากท่ออะลูมิเนียม ทองแดงและเหล็ก ที่ไม่เคลือบสี เท่ากับ 174.86, 165.71 และ 167.14 ไมครอน ตามลำดับ และสีที่เหมาะสมในการนำมาใช้สำหรับท่ออะลูมิเนียม ท่อทองแดง และเหล็ก คือ สีทนความร้อน ที่ความหนา 280 ไมครอน และสีทนความร้อน 300 ไมครอน ตามลำดับ สำหรับผลการศึกษาเกี่ยวกับความสัมพันธ์ของความต้านทานความร้อนของฟาวลิงกับเวลาแสดงดังตาราง 3.1

ประชา ยืนยงกุล(2541) ได้ศึกษาการป้องกันการกักกร่อนโดยใช้สีเคลือบผิวท่อ โดยทดสอบกับเทอร์โมไซฟอนมีทั้งหมด 4 ชุด แต่ละชุดประกอบด้วยเทอร์โมไซฟอนที่ทำจากท่อเหล็กครึ่งเหล็ก ท่อทองแดง ครึ่งอะลูมิเนียม และท่ออะลูมิเนียมครึ่งอะลูมิเนียม ที่ไม่เคลือบและเคลือบสีทนความร้อน 3 ความหนาในส่วนทำระเหยของเทอร์โมไซฟอน โดยทำการทดสอบเป็นเวลา 1,000 ชั่วโมง จากผลการทดสอบพบว่าการกักกร่อนระหว่างส่วนที่เป็นท่อและครึ่งไม้มีความแตกต่างทางสถิติ ตำแหน่งด้านหน้ารับไอเสียร้อนและความหนาสีทนความร้อนไม่มีผลต่อการกักกร่อนหรือความหนาเขม่าการใช้งานเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเทอร์โมไซฟอนที่

ทำงานกับอุณหภูมิเฉลี่ย 225 องศาเซลเซียส ความหนาที่เหมาะสมสำหรับการป้องกันการกักความร้อนโดยเคลือบสีทนความร้อนคือ 0.3 มม. สำหรับผลของการกักความร้อน และสมการความต้านทานความร้อนเนื่องจากฟาวลิงแสดงในตาราง 3.1

3.1.2 การป้องกันการกักความร้อนโดยการเคลือบอินามเมลที่ผิวเทอร์โมไซฟอน

ขวัญชัย ไกรทอง (2541) ได้ศึกษาถึงการป้องกันการกักความร้อนบนผิวภายนอกท่อเทอร์โมไซฟอนของเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเทอร์โมไซฟอนผิวเรียบด้วยการเคลือบอินามเมล ซึ่งการเคลือบอินามเมลเป็นการเคลือบทางเซรามิกชนิดหนึ่งที่ใช้เคลือบโลหะ เช่น เหล็ก ทองแดง เป็นต้น แล้วเผาหรืออบด้วยความร้อนไม่เกิน 900 องศาเซลเซียส ใช้เวลาประมาณ 5-10 นาที จนกระทั่งอินามเมลที่เคลือบและโลหะจับกันแน่น โลหะที่ผ่านการเคลือบผิวจะมีความทนทานต่อการกักความร้อนได้เป็นอย่างดี ส่วนประกอบของอินามเมลมีความซับซ้อนมากกว่าแก้ว ส่วนใหญ่เป็นจำพวก Borosilicate glass ซึ่งเป็นโลหะอัลคาไลน์ และซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลัก ส่วนประกอบของอินามเมลจะขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะ เช่น โครงสร้างของโลหะ จุดหลอมเหลว และอัตราขยายตัวเมื่อรับความร้อน สำหรับการเคลือบโลหะแต่ละชนิดที่แตกต่างกันวิธีการเคลือบก็มีความแตกต่างกันออกไปในการทดลองวัสดุที่ใช้ทำเทอร์โมไซฟอนคือ ท่อเหล็กและท่อทองแดง สำหรับท่ออะลูมิเนียมไม่สามารถเคลือบอินามเมลได้เนื่องจากกรรมวิธีการผลิต จากผลการทดลองพบว่าตำแหน่งด้านหันรับไอเสียร้อนและความหนาอินามเมลไม่มีผลต่อการกักความร้อนหรือความหนาของฟาวลิง ความสัมพันธ์ระหว่างการกักความร้อนกับเวลา และความสัมพันธ์การต้านทานความร้อนของฟาวลิงกับเวลาแสดงดังตาราง 3.1 นอกจากนี้ยังพบว่าค่าการนำความร้อนของอินามเมลคือ 1.1 W/m-K

ถนัด เกษประดิษฐ์ (2543) ได้ทำการทดลองเพื่อหาการกักความร้อนและความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของฟาวลิงกับเวลาของท่อเทอร์โมไซฟอนที่ทำจากเหล็กคืบเหล็กและท่อทองแดงคืบทองแดงซึ่งทำการป้องกันการกักความร้อนผิวโดยการเคลือบอินามเมลที่ความหนาแตกต่าง 3 ความหนา จากการทดลองพบว่า ความหนาของอินามเมลที่เคลือบผิวไม่มีผลต่อการกักความร้อนหรือความหนาของฟาวลิง สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างการกักความร้อนกับเวลาของท่อ และความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานความร้อนของฟาวลิงกับเวลาแสดงดังตาราง 3.1

3.2 การกักความร้อนที่ผิวภายในของท่อเทอร์โมไซฟอน

ข้อมูลจากการป้องกันการกักความร้อนภายในได้การศึกษาการป้องกันการกักความร้อนภายในจาก ปิยะนันท์ เจริญสวรรค์ (2541) ทำการศึกษาถึงการกักความร้อนภายในท่อของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนที่ใช้กับระบบดึงความร้อนสูญเสีย โดยศึกษาจากท่อเทอร์โมไซฟอนที่ทำจาก ท่ออะลูมิเนียม ท่อทองแดง ท่อเหล็ก ทำการป้องกันการกักความร้อนด้วยการเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง และทำการเติมสารยับยั้ง Na_2HPO_4 ด้วยความเข้มข้น 20 ppm. ลงในสารทำงานทดสอบเทียบกับท่อธรรมดา ใช้เวลาในการทดสอบเป็นเวลา 4,000 ชั่วโมง จากผลการทดลองพบว่า การกักความร้อนเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น และความสัมพันธ์ระหว่างค่าการกักความร้อนกับเวลา แสดงดังตาราง 3.2

ตาราง 3.1 สมการความร้อนสูญเสียเนื่องจากฟาวลิง และสมการการกัดกร่อน

ที่มา : ขวัญชัย ไกรทอง (2541), ประชา ชื่นขงกุล (2541), ถนัด เกษประดิษฐ์ (2543), Terdtoon et.al. (1999)

หมายเลข	ประเภทท่อ	สมการความร้อนสูญเสีย เนื่องจาก Fouling	สมการการกัดกร่อน ภายนอก
1	ท่อเหล็กธรรมดา	$0.0925(1-\exp(-0.003t))$	$0.008t^{0.4578}$
2	ท่อครีบทเหล็ก	$1.16(1-\exp(-0.006t))$	$0.0013t^{0.701}$
3	ท่อทองแดงธรรมดา	$0.0925(1-\exp(-0.003t))$	$0.0231t^{0.2938}$
4	ท่อครีบททองแดง	$1.16(1-\exp(-0.006t))$	$0.0105t^{0.3404}$
5	ท่อธรรมดาอะลูมิเนียม	$0.0925(1-\exp(-0.003t))$	$0.0137t^{0.3373}$
6	ท่อครีบทอะลูมิเนียม	$1.16(1-\exp(-0.006t))$	$0.0137t^{0.3373}$
7	ท่อเหล็กธรรมดาเคลือบสี	$0.02365(1-\exp(-0.0012t))$	$0.013t^{0.701}$
8	ท่อครีบทเหล็กเคลือบสี	$1.038(1-\exp(-0.0034t))$	$0.0055t^{0.3622}$
9	ท่อทองแดงธรรมดาเคลือบสี	$0.02365(1-\exp(-0.0012t))$	$0.007t^{0.3264}$
10	ท่อครีบททองแดงเคลือบสี	$1.038(1-\exp(-0.0034t))$	$0.007t^{0.3264}$
11	ท่อธรรมดาอะลูมิเนียมเคลือบสี	$0.02365(1-\exp(-0.0012t))$	$0.0137t^{0.3373}$
12	ท่อครีบทอะลูมิเนียมเคลือบสี	$1.038(1-\exp(-0.0034t))$	$0.001t^{0.6968}$
13	ท่อเหล็กธรรมดาเคลือบอีนาเมล	$0.0925(1-\exp(-0.003t))$	$0.0073t^{0.2431}$
14	ท่อครีบทเหล็กเคลือบอีนาเมล	$1.16(1-\exp(-0.006t))$	$0.0105t^{0.187}$
15	ท่อทองแดงธรรมดาเคลือบอีนาเมล	$0.0925(1-\exp(-0.003t))$	$0.03474t^{0.0202}$
16	ท่อครีบททองแดงเคลือบอีนาเมล	$1.16(1-\exp(-0.006t))$	$0.00188t^{0.307}$
17	ท่อธรรมดาอะลูมิเนียมเคลือบอีนาเมล	Not Available	Not Available
18	ท่อครีบทอะลูมิเนียมเคลือบอีนาเมล	Not Available	Not Available

เมื่อ t คือ เวลาการทำงาน

จากตาราง 3.1 พบว่าท่อธรรมดาที่ทำจากอะลูมิเนียมเคลือบอีนาเมลและท่อครีบทอะลูมิเนียมเคลือบอีนาเมลจะไม่มีข้อมูลเนื่องจากท่ออะลูมิเนียมไม่สามารถเคลือบผิวด้วยอีนาเมลได้

ตาราง 3.2 สมการการกัดกร่อนภายในท่อเทอร์โมโซโฟน

ที่มา : ปิยะนันท์ เจริญสวรรค์ (2541)

ชนิดวัสดุ	วิธีป้องกัน	สมการการกัดกร่อน
ท่อเหล็ก	ไม่ป้องกัน	$25.66t^{(-0.3286)}$
	เติมสารยับยั้ง	$1.12t^{(-0.0029)}$
	เผาท่อ	$735.54t^{(-0.9262)}$
ท่อทองแดง	ไม่ป้องกัน	$844.96t^{(-0.7918)}$
	เติมสารยับยั้ง	$1090.74t^{(-0.9801)}$
	เผาท่อ	$1025.39t^{(-0.8515)}$
อะลูมิเนียม	ไม่มีวิธีที่เหมาะสม	-

แปลงหน่วยเป็น mm. โดยคูณผลของค่าที่ได้จากคำนวณจากสมการด้วย $2.89 \times 10^{(-6)}$

ซึ่งข้อมูลจากหัวข้อ 3.1 และ 3.2 สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในโปรแกรมป้องกันการกัดกร่อนและแนะนำการป้องกันการกัดกร่อนโดยแบ่งตามข้อมูลได้ดังนี้

- ข้อมูลการกัดกร่อน

จากข้อมูลของการกัดกร่อนทั้งภายในและภายนอกของท่อเทอร์โมไซฟอน สามารถนำไปใช้ในการคำนวณในโปรแกรมเพื่อใช้ในการทำนายอายุการใช้งานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยขึ้นอยู่กับ ชนิดของท่อ ความหนาของท่อ วิธีการป้องกันการกัดกร่อน อุณหภูมิ และเวลาที่ใช้งานของเครื่องแลกเปลี่ยนจากตาราง 3.1 และ 3.2 จะพบว่ามีการกัดกร่อนของวัสดุแต่ละชนิดซึ่งเป็นฟังก์ชันของเวลา เมื่อทราบเวลาที่ใช้งานทั้งหมด ดังนั้นจากการแทนค่าเวลาใช้งานในสมการจึงทำให้ทราบความลึกซึ่งเกิดจากการกัดกร่อนของวัสดุที่ใช้ทำเทอร์โมไซฟอนได้ จากนั้น โปรแกรมแนะนำการป้องกันการกัดกร่อนจะทำการเปรียบเทียบหาวิธีป้องกันการกัดกร่อนที่เหมาะสมสำหรับเวลาดังกล่าว

- ข้อมูลความต้านทานความร้อนเนื่องจากฟาวลิง

สำหรับข้อมูลของความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานความร้อนเนื่องจากฟาวลิงกับเวลา สามารถนำไปใช้คำนวณในโปรแกรมในส่วนของการหาค่าความสูญเสียเนื่องจากฟาวลิงเมื่อเวลาการทำงานของเครื่องแลกเปลี่ยนเพิ่มขึ้น เพราะเมื่อเวลาการทำงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพิ่มขึ้นจะทำให้ฟาวลิงเกาะที่ผิวของเครื่องแลกเปลี่ยนเพิ่มขึ้น ทำให้มีความต้านทานการส่งถ่ายความร้อนเพิ่มขึ้น จึงทำให้การส่งถ่ายความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนลดลง ดังนั้นความสัมพันธ์จากสมการความต้านทานความร้อนเนื่องจากฟาวลิงจึงเป็นสิ่งที่ต้องใช้หาเวลาที่เหมาะสมสำหรับการทำความสะอาดเครื่องแลกเปลี่ยนที่มีการป้องกันการกัดกร่อน และชนิดของท่อที่แตกต่างกัน จากสมการความร้อนสูญเสียเนื่องจากฟาวลิงในตาราง 3.1 เมื่อทราบเวลาการทำงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะสามารถหาค่าความต้านทานความร้อนของฟาวลิงได้ (Z_{fouling})

โดยนำเวลาการทำงานดังกล่าวไปแทนค่าในสมการ เมื่อทราบค่าความต้านทานความร้อนสูญเสียเนื่องจากฟาวลิงแล้ว นำไปแทนค่าใน (2.35) จะทำให้ได้ค่าการส่งถ่ายความร้อนของเทอร์โมไซฟอนเมื่อทำการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากสมการ (2.35) กับค่าที่ได้จากสมการ (2.1) จะทำให้ถึงค่าความร้อนสูญเสียของระบบ และนำค่าความร้อนสูญเสียที่ได้ไปคำนวณหาราคาที่ต้องจ่ายเนื่องจากความร้อนสูญเสียนี้ และหาเวลาการทำความสะอาดที่เหมาะสมของเครื่องแลกเปลี่ยน