

การศึกษาการป้องกันการกัดกร่อนบนผิวภายนอกของท่อเทอร์โมไซฟอน แบบท่อครีบของเครื่องอุ่นน้ำป้อนโดยใช้สีเคลือบ

ประชา ยืนยงกุล, ประดิษฐ์ เทอดทูล, ภัทราพร ตันตาคม, วีระ ฟ้าเฟื่องวิทยากุล และ *สมชาย ทองเต็ม

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

*ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เชียงใหม่ 50200

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการป้องกันการกัดกร่อน บนผิวภายนอกท่อเทอร์โมไซฟอนแบบท่อครีบของ เครื่องอุ่นน้ำป้อนโดยใช้สีเคลือบ เทอร์โมไซฟอนที่จัดทำทดสอบทำจากท่อเหล็กครีบเหล็ก ท่อทองแดงครีบอะลูมิเนียม และท่ออะลูมิเนียมครีบอะลูมิเนียมที่ไม่เคลือบและเคลือบสีทนความร้อน 3 ความหนาในส่วนทำระเหยของเทอร์โมไซฟอน โดยติดชิ้นงานตัวแทนที่ตัดมาจากท่อของแต่ละโลหะ และแบ่งเป็น 2 ส่วนเท่าๆกัน นำไปติดตรงตำแหน่งด้านหน้ารับไอเสียร้อนและด้านตรงข้ามของเทอร์โมไซฟอน ทำการเคลือบสีทนความร้อนเฉพาะด้านที่เลือกเพื่อทดสอบผลกระทบในการกัดกร่อนเนื่องจากผลของทิศทางไหลเท่านั้น โดยทดสอบกับไอเสียร้อนที่อุณหภูมิ 225 °C ได้จากการเผาไหม้ของน้ำมันเตาเกรด A ที่มีน้ำมันดีเซลผสมอยู่ 20 % โดยปริมาตร ทำการทดสอบวันละ 16 ชั่วโมง รวมทั้งหมด 1,000 ชั่วโมง เก็บข้อมูลความร้อนส่งผ่านและอุณหภูมิแตกต่างของเครื่องอุ่นน้ำป้อนในช่วงการทำงานต่างๆ ข้อมูลการกัดกร่อนและเขม่าจากเทอร์โมไซฟอน และข้อมูลน้ำหนักจากชิ้นงานตัวอย่าง ที่เวลา 250, 500, 750 และ 1,000 ชั่วโมง ทำการวิเคราะห์ผลโดยการวิเคราะห์การกัดกร่อนจากภาพถ่ายภาพตัดขวางท่อขยาย 25 เท่าที่ถ่ายโดยกล้องจุลทรรศน์ วิเคราะห์ผลจากการตรวจสอบสารประกอบอินทรีย์และสารประกอบอินทรีย์ในเขม่าโดยเครื่อง X-ray diffractometer และ Infra-red spectroscopy วิเคราะห์ความหนาเขม่าที่ได้จากการวัดที่ผิวท่อ วิเคราะห์อัตราการเกาะตัวของเขม่าเฉลี่ยจากน้ำหนักของชิ้นงานตัวแทนที่เพิ่มขึ้น วิเคราะห์ความต้านทานความร้อนของเขม่าที่ได้จากค่าความต้านทานความร้อนรวมของเครื่องอุ่นน้ำป้อนที่เปลี่ยนไป และวิเคราะห์ความเป็นได้ทางเศรษฐศาสตร์ที่ได้จากค่า

ใช้จ่ายทั้งหมด จากผลการทดสอบพบว่า การกัดกร่อนระหว่างส่วนที่เป็นท่อและครีบไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ตำแหน่งด้านหน้ารับไอเสียร้อนและความหนาสีทนความร้อนไม่มีผลต่อการกัดกร่อนหรือความหนาเขม่าหรืออัตราการเกาะตัวของเขม่าเฉลี่ย การกัดกร่อนของท่อเหล็ก ท่อทองแดง และท่ออะลูมิเนียมที่เคลือบสีทนความร้อนจะมีค่าน้อยกว่าท่อที่ไม่เคลือบ 0.047 มม. 0.043 มม. และ 0.017 มม. ตามลำดับ ที่เวลา 1,000 ชั่วโมง ตรวจสอบสารประกอบอินทรีย์คือ CaSO_4 ส่วนสารประกอบอินทรีย์นั้นตรวจไม่พบจากเขม่าที่ได้จากผิวท่อโดยไม่ขึ้นกับชนิดชิ้นงานของวัสดุของท่อหรือการเคลือบหรือเวลา และพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างการกัดกร่อนกับเวลาของท่อเหล็กที่ไม่เคลือบและเคลือบสีเป็นไปตามสมการ $\text{Cr} = 0.0055t^{0.44}$ และ $\text{Cr} = 0.0055t^{0.3622}$ ตามลำดับ ส่วนท่อทองแดงความสัมพันธ์ระหว่างการกัดกร่อนกับเวลาของท่อที่ไม่เคลือบและเคลือบสีเป็นไปตามสมการ $\text{Cr} = 0.0105t^{0.3404}$ และ $\text{Cr} = 0.007t^{0.3264}$ และตามลำดับ ความสัมพันธ์ระหว่างการกัดกร่อนกับเวลาของท่ออะลูมิเนียมที่ไม่เคลือบ และเคลือบสีเป็นไปตามสมการ $\text{Cr} = 0.0137t^{0.3373}$ และ $\text{Cr} = 0.001t^{0.6998}$ ตามลำดับ

ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานความร้อนของเขม่ากับเวลาเป็นไปตามสมการ $Z_{\text{fouling}} = 1.038(1 - e^{-0.0034t})$

Abstract

The purpose of this paper is to study the effects of using paint as a protection against corrosion on external surfaces of thermosyphon economizers. The thermosyphons used in the experiment were made of standard and paint coated tubes of 3 different kinds of

metal: steel, copper and aluminum. Three different thicknesses of paint were employed on the evaporator section. The thermosyphons were made of steel tubes with steel fins, aluminum tubes with aluminum fins and copper tubes with aluminum fins. The thermosyphons were installed in a modified economizer. The test was conducted by using flue gas generated from a mixture of heavy grade A fuel and diesel oil at a ratio of 20% by volume. It was found from the results that, neither the direction of the flow of the flue gas nor the thickness of the paint coating significantly affected the fouling thickness, or the average rate of fouling. The results also showed that, the average corrosion of aluminum; copper and iron thermosyphons was 129, 89 and 100 microns respectively. An inorganic compound CaSO_4 , which was due to the combustion of the fuel, was detected by XRD (X-ray Diffractometer) but no organic compound was detected. In addition, it was found that the corrosion which occurred between the fins and tube's surface, as well as the front and back side of the thermosyphon was not significantly different after being tested for 1,000 hours. The correlation between corrosion and operating time for this experiment was $\text{Cr} = 0.0055t^{0.44}$ for the standard steel thermosyphon, $\text{Cr} = 0.0055t^{0.3622}$ for the coated mild steel thermosyphon, $\text{Cr} = 0.0105t^{0.3404}$ for the standard copper thermosyphon, $\text{Cr} = 0.007t^{0.3264}$ for the coated copper thermosyphon, $\text{Cr} = 0.0137t^{0.3373}$ for the standard aluminum thermosyphon and $\text{Cr} = 0.001t^{0.6968}$ for the coated aluminum thermosyphon. In addition, it was found that the correlation between fouling resistance and operating time was $Z_{\text{fouling}} = 1.038(1 - e^{-0.0034t})$

1. บทนำ

เครื่องอุ่นน้ำป้อน เป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้ในการดึงความร้อนจากไอเสียของการเผาไหม้จากการต้มน้ำ เพื่อผลิตไอน้ำของหม้อไอน้ำก่อนที่จะปล่อยไปสู่บรรยากาศ ทางปล่องควันเครื่องอุ่นน้ำป้อนจะดึงความร้อนมาให้กับน้ำก่อนเข้าหม้อไอน้ำ เพื่อเป็นการเพิ่มอุณหภูมิให้น้ำเป็นการ

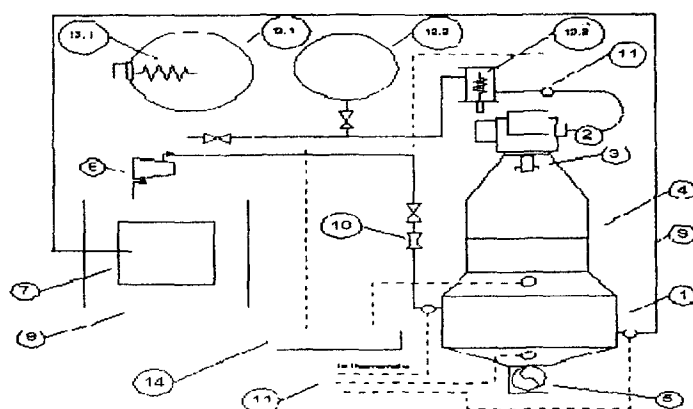
ประหยัดเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ เครื่องอุ่นน้ำป้อนที่ใช้สำหรับการทดลองนี้ คือแบบที่ใช้เทอร์โมไซฟอน เทอร์โมไซฟอนจะถ่ายเทความร้อนโดยอาศัยหลักการเปลี่ยนสถานะของสารทำงานภายในท่อ วิธีนี้สามารถประหยัดพลังงานที่ใช้ป้อนให้กับหม้อต้ม สะดวกในการติดตั้งและบำรุงรักษา อย่างไรก็ตามปัญหาที่พบในเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบที่ใช้เทอร์โมไซฟอน คือการกัดกร่อน และเขม่าที่เกิดขึ้นบนผิวภายนอกท่อเทอร์โมไซฟอนในด้านทำระเหย การกัดกร่อนและเขม่าทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องอุ่นน้ำป้อนลดลง สามารถทำนายการสะสมของเขม่าโดยสมการของ Kern and Seaton คือ

$$R_{\text{fouling}} = \frac{\phi_d}{\beta} (1 - e^{-\beta t}) \quad (1)$$

เมื่อ R_{fouling} = คือความหนาของเขม่า
 ϕ_d = อัตราการสะสมของเขม่า
 β = อัตราการหลุดร่วงของเขม่า
 t = เวลาทดสอบ

Bubenicek และคณะ [3] พบว่าปัจจัยที่ผลต่ออัตราการสะสมของเขม่า คือ อุณหภูมิ ส่วนผสมของเชื้อเพลิง ลักษณะการไหล ความเร็วในการไหล ส่วนประกอบของก๊าซร้อน วัสดุที่ใช้ทำท่อ อุณหภูมิและความร้อนที่ผิว

วิธีป้องกันการกัดกร่อนบนผิวภายนอกท่อมีหลายวิธีด้วยกัน Novotna และคณะ [4] พบว่าหลังจากการทดสอบเป็นเวลา 10,000 ชั่วโมง ไม่มีการกัดกร่อนสำหรับท่อเหล็ก Polasek and Stule [5] พบว่าท่อความร้อนที่ทำจากเหล็กและเคลือบอีนาเมลจะต้านทานการกัดกร่อนได้ดีกว่าท่อสแตนเลส ขวัญชัยและคณะ [1] ทดสอบการป้องกันการกัดกร่อนบนผิวภายนอกท่อเทอร์โมไซฟอนของท่อเหล็กและทองแดง โดยเคลือบอีนาเมล ทดสอบเป็นเวลา 1,000 ชั่วโมง พบว่าการกัดกร่อนของท่อเหล็กและทองแดงที่ไม่เคลือบอีนาเมลสูงกว่าท่อที่เคลือบอีนาเมล 4.45 เท่า และ 4.9 เท่า ตามลำดับ ชาตรี และสิทธิกร [2] ป้องกันการกัดกร่อนบนผิวภายนอกท่อเทอร์โมไซฟอนโดยใช้สี Red lead Red oxide และสีทนความร้อนสูง ทดสอบกับท่อเหล็กทองแดงและอะลูมิเนียมพบว่าหลังจากทดสอบเป็นเวลา 1,000 ชั่วโมง การกัดกร่อนของท่อที่ไม่เคลือบสีสูงกว่าท่อที่เคลือบสีประมาณสองเท่า เพราะฉะนั้นสรุปได้ว่าการเคลือบสีสามารถลดการกัดกร่อนได้



1 ตัวเครื่องสูบน้ำป้อนแบบเทอร์โมไซฟอน	9 ท่อน้ำเข้าและออกจากเครื่องสูบน้ำป้อน
2 หัวเผา	10 เครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำ
3 พัดลมดูดอากาศ	11 สายเทอร์โมคัปเปิล
4 ช่วงห้องเผาไหม้และทางเดินไอเสียร้อนก่อนเข้าเครื่องสูบน้ำป้อน	12.1 ชั่งน้ำหนัก
5 ปล่องไอเสียร้อนออกจากเครื่องสูบน้ำป้อนสู่บรรยากาศ	12.2 ชั่งน้ำหนัก
6 ป้อนน้ำ	13.1 เครื่องทำความร้อนตัวที่ 1
7 เหมะ บาดความร้อน	13.2 เครื่องทำความร้อนตัวที่ 2

รูปที่ 1 แสดงชุดทดสอบ

2. อุปกรณ์และชุดทดสอบ

เทอร์โมไซฟอนที่ทดสอบแสดงในรูป 1 ทดสอบกับน้ำมันเตาเกรดเอ ผสมกับน้ำมันดีเซลในอัตราส่วน 20% โดยปริมาตร ที่อุณหภูมิ 225 องศาเซลเซียส ในหัวเผา และไหลต่อไปยังเครื่องสูบน้ำป้อนจากนั้นผ่านออกไปทางปล่องควัน น้ำถูกปั๊มเข้าสู่เครื่องสูบน้ำป้อนต่อไปยังหอหล่อเย็นเพื่อลดอุณหภูมิลงก่อนที่จะลงสู่ถังเก็บทดสอบเป็นเวลาทั้งหมด 1,000 ชั่วโมงโดยจะทดสอบ 16 ชั่วโมง วัดความหนาของเขม่าทั้งด้านหน้าท่อและด้านหลังท่อเพื่อหาค่าความหนาของเขม่าเฉลี่ย ข้อมูลต่างๆจะเก็บทุกๆ 250 ชั่วโมง ถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์ขยาย 25 เท่า และวัดค่าการกักต้อนจากภาพถ่ายด้วยเวอร์เนียร์ ข้อมูลที่วัดได้นำไปทำนายอัตราการกักต้อนเทียบกับเวลาการทำงาน จากค่าการกักต้อนและความหนาสามารถหาความสัมพันธ์เพื่อหาความหนาที่ที่เหมาะสมที่ต้องการได้ วิเคราะห์หาสารประกอบของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ด้วยเครื่อง XRD และเครื่อง IR ตามลำดับ วัดความหนาของเขม่าทั้งด้านหน้าและด้านหลังของเทอร์โมไซฟอนเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของเขม่าและเวลาการทำงาน นำเขม่าที่เกิดขึ้นบนชิ้นตัวอย่างชั่งน้ำหนักเพื่อหาน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงเทียบกับเวลาการทำงาน โดยเก็บข้อมูลทั้งด้านหน้าและหลังท่อเทอร์โมไซฟอน อุณหภูมิของก๊าซร้อนจะวัด

ทุกๆ 5 ชั่วโมง เพื่อทำนายค่าความต้านทานความร้อนของเขม่าเทียบกับเวลาการทำงาน

3. ผลและการวิเคราะห์

ผลและการวิเคราะห์ของข้อมูลจะพิจารณาตามหัวข้อต่อไปนี้ คือการกักต้อนของผิวภายนอกท่อ การสะสมของเขม่าบนผิวภายนอกท่อ และค่าความต้านทานความร้อนของเขม่า

3.1 การกักต้อนบนผิวภายนอก

จากภาพถ่ายสีซึ่งขยาย 25 เท่าโดยกล้องจุลทรรศน์พบว่าหลังจากทดสอบเป็นเวลา 1,000 ชั่วโมง ไม่เหลือความหนาสีอยู่เลยเนื่องจากถูกกักต้อนจากก๊าซร้อน การกักต้อนของท่อเทอร์โมไซฟอนที่เคลือบสี แสดงในรูป 2 ลักษณะการกักต้อนจะเริ่มเกิดขึ้นจากชั้นเคลือบของสีไปยังเนื้อโลหะ พบว่าการกักต้อนระหว่างท่อและครีบไม่มีความแตกต่างทางสถิติ หลังจากทดสอบเป็นเวลา 1,000 ชั่วโมง เพราะฉะนั้นข้อมูลทั้งหมดจะใช้ข้อมูลจากท่อเป็นข้อมูลตัวแทน พบว่าการกักต้อนระหว่างด้านหน้าท่อและด้านหลังท่อไม่มีความแตกต่างทางสถิติ เนื่องจากการสะสมของเขม่ามีผลต่อการกักต้อนน้อย ดังนั้นการกักต้อนที่เกิดขึ้นจะใช้ข้อมูลตัวแทนจากด้านหน้าของท่อเทอร์โมไซฟอน

รูป 3 แสดงความสัมพันธ์การกัดกร่อนบนผิวภายนอก เทียบกับเวลาทำงาน ของท่อทองแดงที่ไม่เคลือบและเคลือบ สีทนความร้อน อัตราการกัดกร่อนของท่อทองแดงที่เคลือบ สีทนความร้อน เป็นไปตามสมการ

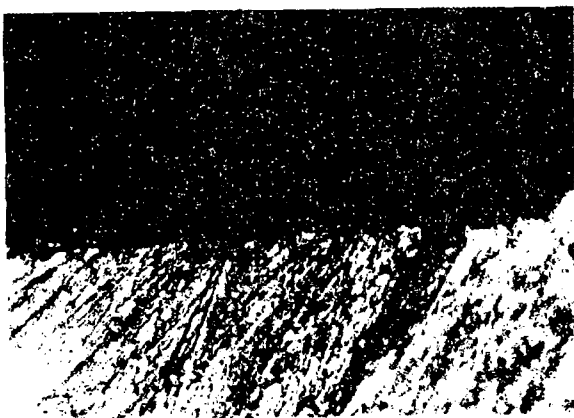
$$Cr = 0.007t^{0.3264} \quad (2)$$

และการกัดกร่อนของท่อทองแดงที่ไม่ได้เคลือบสีทนความร้อน จะหาได้จากสมการ

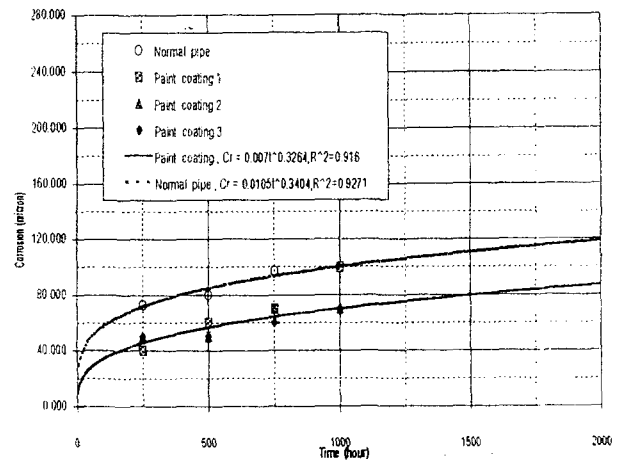
$$Cr = 0.0105t^{0.3404} \quad (3)$$

พบว่า การกัดกร่อนของท่อทองแดงที่ไม่เคลือบสีทนความร้อน สูงกว่าท่อที่เคลือบสีทนความร้อน 37 % หลังจาก ทดสอบเป็นเวลา 1,000 ชั่วโมง แสดงว่าการเคลือบสีทน ความร้อนสามารถลดการกัดกร่อนได้ 37 % ที่ 1,000 ชั่วโมง

การกัดกร่อนของท่อเหล็กที่ไม่เคลือบสีทนความร้อน สูงกว่าท่อที่เคลือบสีทนความร้อน 41 % และการกัดกร่อน ของท่ออะลูมิเนียมที่ไม่เคลือบสีทนความร้อนสูงกว่าท่อที่ เคลือบสีทนความร้อน 14 % หลังจากทดสอบเป็นเวลา 1,000 ชั่วโมง

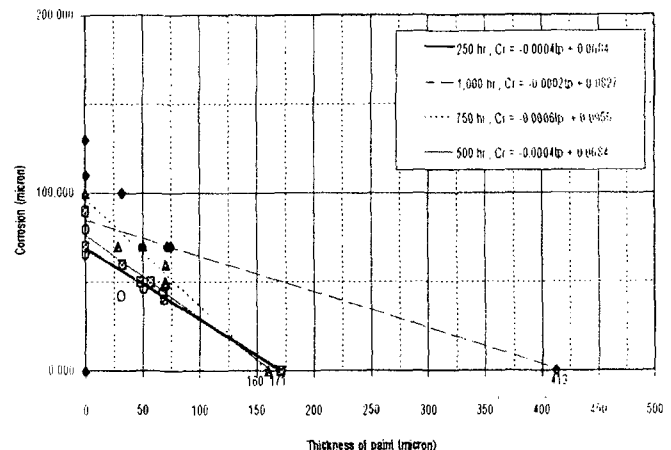


รูป 2 รูปถ่ายขยาย 25 เท่าโดยกล้องจุลทรรศน์



รูป 3 ตัวอย่างการกัดกร่อนเทียบกับเวลาทำงาน ของท่อทองแดงที่ไม่เคลือบและเคลือบสีทนความร้อน

3.2 ความหนาสีที่เหมาะสม



รูป 4 ตัวอย่างการกัดกร่อนและความหนาสีของท่อทองแดงที่ไม่เคลือบและเคลือบด้วยสีทนความร้อน

รูป 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกัดกร่อนและความหนาสีของท่อทองแดง ที่ช่วงเวลาทดสอบ 1,000 ชั่วโมง จุดตัดแกนของแกน x คือค่าของความหนาสีที่เหมาะสม ความหนาสีที่เหมาะสมของท่อทองแดงที่เวลาทดสอบ 1,000 ชั่วโมง คือ 413 ไมครอน ส่วนความหนาสีที่เหมาะสมของท่อเหล็กและท่ออะลูมิเนียมที่เวลาทดสอบ 1,000 ชั่วโมง คือ 621 และ 359 ไมครอน ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบทั้ง 3 โลหะ พบว่าเหล็กเป็นโลหะที่เคลือบสีหนาที่สุดชาติรี และสิทธิกร[2] ทดสอบการกัดกร่อนกับท่อซึ่งไม่ได้ติดครีบ พบว่าความหนาสีที่เหมาะสมของ ท่อเหล็กทองแดงและอะลูมิเนียม คือ 280 218 และ 101 ไมครอน ตามลำดับ ดังนั้นแสดงว่าความหนาสีของท่อซึ่งติดครีบมีความหนาสีที่หนากว่าท่อที่ไม่ได้ติดครีบ เพราะฉะนั้นสรุปได้ว่า

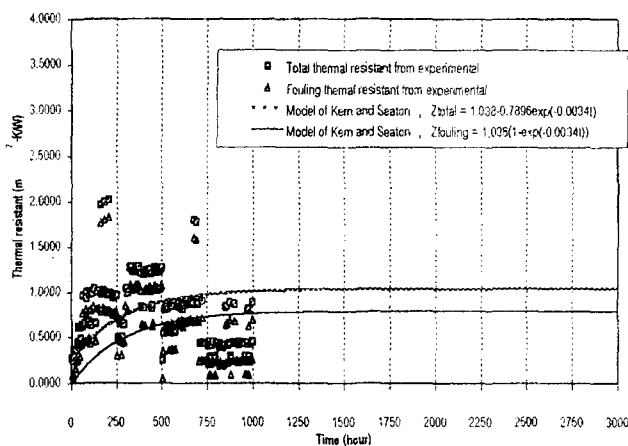
ความหนาที่ป้องกันการกัดกร่อนของท่อทองแดง เหล็ก และอะลูมิเนียม ที่ 1,000 ชั่วโมง คือ 413 ,621 และ 359 ไมครอน ตามลำดับ

3.3 ความต้านทานความร้อนของเขม่า

จากสมการของ Kern and Seaton สามารถทำนาย สมการความต้านทานความร้อนของเขม่าจากการทดลอง หลังจากทดลองเป็นเวลา 1,000 ชั่วโมง ได้ดังนี้

$$Z_{fouling} = 1.038(1-\exp(-0.0034t)) \quad (4)$$

จากสมการ (4) และรูป 5 พบว่าค่าความต้านความร้อนของเขม่าสูงที่สุด คือ $1.038 \text{ m}^2\text{-K/W}$ ที่เวลาทดสอบ 2,800 ชั่วโมง หลังจากนั้นค่าความต้านความร้อนของเขม่าจะเริ่มคงที่ เพราะฉะนั้นแสดงว่าเวลาที่ควรทำความสะอาดท่อคือที่ทุกๆ 2,800 ชั่วโมง



รูป 5 ค่าความต้านทานความร้อนรวมของเขม่าในเครื่องอุ่นน้ำป้อน เทียบกับเวลาการทำงาน

ขวัญชัยและคณะ [1]พบว่าเครื่องอุ่นน้ำป้อนซึ่งติดตั้งเทอร์โมไซฟอนที่เคลือบผิวภายนอกด้วยอิโนเมล มีค่าความต้านความร้อนของเขม่าสูงที่สุด คือ $0.78 \text{ m}^2\text{-K/W}$ ที่เวลาทดสอบ 2,800 ชั่วโมง เพราะฉะนั้นเมื่อเปรียบเทียบที่เวลาเดียวกัน เครื่องอุ่นน้ำป้อนซึ่งติดตั้งเทอร์โมไซฟอนที่เคลือบผิวภายนอกด้วยสแตนเลสความร้อนจะมีค่าความต้านความร้อนของเขม่าสูงกว่าเครื่องอุ่นน้ำป้อนซึ่งติดตั้งเทอร์โมไซฟอนที่เคลือบผิวภายนอกด้วยอิโนเมล

4. สรุป

ได้ทำการทดสอบเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเทอร์โมไซฟอนที่ป้องกันการกัดกร่อนบนผิวภายนอกท่อด้วยการเคลือบสแตนเลสเป็นเวลา 1,000 ชั่วโมง พบว่าผลการทดสอบ เป็นดังนี้

4.1 ตำแหน่งด้านหน้ารับไอเสียร้อนและความหนาที่ทนความร้อนที่เคลือบท่อไม่มีผลต่อการกัดกร่อนหรือความหนาเขม่าหรืออัตราการเกาะตัวของเขม่าเฉลี่ย

4.2 การกัดกร่อนของท่อเหล็ก ท่อทองแดง และท่ออะลูมิเนียมที่เคลือบสแตนเลสเมื่อผ่านไป 1,000 ชั่วโมง มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 100, 89 และ 129 ไมครอน ตามลำดับ และการกัดกร่อนของท่อที่ไม่เคลือบสแตนเลสจะมีค่าการกัดกร่อนมากกว่าท่อที่เคลือบด้วยสแตนเลสประมาณ 2 เท่า

4.3 ตรวจพบสารประกอบอินทรีย์คือ CaSO_4 ซึ่งคาดว่ามาจากเขม่าที่เกิดจากการเผาไหม้ของน้ำมันเตา ส่วนสารประกอบอินทรีย์นั้นตรวจไม่พบ ชนิดของสารที่ผิวท่อจะไม่ใช่กับชนิดวัสดุของท่อหรือการเคลือบหรือเวลา

4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างการกัดกร่อนและเวลาทำงานของท่อเหล็กที่ไม่เคลือบและเคลือบสแตนเลส คือ

$Cr = 0.0055t^{0.44}$ และ $Cr = 0.0055t^{0.3622}$ ตามลำดับ ความสัมพันธ์ระหว่างการกัดกร่อนและเวลาทำงานของท่อทองแดงที่ไม่เคลือบและเคลือบสแตนเลส คือ

$Cr = 0.0105t^{0.3404}$ และ $Cr = 0.007t^{0.3264}$ ตามลำดับ ความสัมพันธ์ระหว่างการกัดกร่อนและเวลาทำงานของท่ออะลูมิเนียมที่ไม่เคลือบและเคลือบสแตนเลส คือ

$Cr = 0.0137t^{0.3373}$ และ $Cr = 0.001t^{0.6968}$ ตามลำดับ

4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานความร้อนของเขม่ากับเวลาการทำงาน คือ

$$Z_{fouling} = 1.038(1-\exp(-0.0034t))$$

5. สัญลักษณ์

Cr	การกัดกร่อน
t	เวลาการทำงาน
$Z_{fouling}$	ความต้านทานความร้อนของเขม่า
β	อัตราการหลุดร่วงของเขม่า
ϕ_d	อัตราการเกาะตัวของเขม่า

6. บรรณานุกรม

- [1] ขวัญชัย ไกรทอง, "การป้องกันการกัดกร่อนบนผิวภายนอกท่อของเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเทอร์โมไฮฟอนด้วยการเคลือบอีนาเมล", วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2541
- [2] ชาทรี คอยแก่ และ สิทธิกร ฤงคำ. "การศึกษาการกัดกร่อนภายนอกของท่อความร้อนที่ใช้กับเครื่องอุ่นน้ำป้อน", วิทยานิพนธ์, ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2541
- [3] Bubenicek, I., Lodecky, R., Polasek, F., and Stulc, P., "Fouling of Heat Pipe Heat Exchangers and Prevention", Proc., 9th International Heat Pipe conference, U.S.A., 1995
- [4.] Novatna, I., Nassler, J., and Zelko, M., "A Contribution to Service Life of Heat Pipes", Proc., 4th International Heat Pipe Symposium, Japan, 1994
- [5.] Polasek, F., and Stulc, P., " Porcelain Enamelled Steel and Plastic Heat Pipes for Heat Recovery Systems", Proc., 4th International Heat Pipe Symposium, 1994