การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 14
2 – 3 พฤษจิกายน 2543 โรงแรม โนโวเทล เชียงใหม่

ผลของการเคลือบอินาเมลในการป้องกันการกัดกร่อนบนผิวภายนอกท่อครีบของเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเทอร์โมไซฟอน

Effect of Enamel Coating in Corrosion Protection on External Surfaces of Finned – Tube Thermosyphon Economizers

ถนัด เกษประดิษฐ, ประดิษฐ์ เทอดทูล, ภัทราพร ตันตาคม, วีระ ฟ้าเฟื่องวิทยากุล และอภิวันท์ พลชัย
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เชียงใหม่ 50200

บทคัดย่อ

บทความนี้ทำการศึกษาผลของการเคลือบอินาเมลที่มีต่อการป้องกันการกัดกร่อนบนผิวภายนอกของเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเทอร์โมไซฟอน เทอร์โมไซฟอนที่ใช้ในการทดสอบทำจากท่อเหล็กและท่อทองแดงที่ไม่เคลือบ และเคลือบอินาเมลด้วยความหนา 3 ค่าในส่วนทำระเหยของเทอร์โมไซฟอน ทดสอบโดยผ่านไอเสียร้อนจากการเผาไหม้ของน้ำมันเตาเกรด A ผสมกับน้ำมันดีเซล 4:1 โดยปริมาตร ที่อุณหภูมิ 225°C เข้าไปปะทะกับท่ออย่างต่อเนื่อง ทำการเก็บข้อมูลการกัดกร่อน การเกาะตัวเขม่า ความต้านทานความร้อนของเขม่าที่เวลา 500, 1,000 และ1,500 ชั่วโมง จากผลการทดสอบพบว่าตำแหน่งด้านหันรับไอเสียร้อนและความหนาอินาเมลไม่มีผลต่อค่าการกัดกร่อนหรือความหนาเขม่าและพบว่าที่เวลา 1,500 ชั่วโมง การกัดกร่อนของท่อเหล็กครีบเหล็กและท่อทองแดงครีบทองแดงที่เคลือบอินาเมลมีความหนาเท่ากันคือ 0.043 มม. ตรวจพบว่าเขม่ามีสารประกอบคือ $CaSO_4$ อยู่เป็นส่วนใหญ่ซึ่งเกิดจากสารแปลกปลอมในน้ำมันเชื้อเพลิง นอกจากนี้พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างการกัดกร่อนกับเวลาของท่อเหล็กครีบเหล็กไม่เคลือบ และเคลือบอินาเมลเป็นดังสมการ $Cr = 0.0104t^{0.4}$ และ $Cr = 0.0105t^{0.187}$ ตามลำดับ ส่วนท่อทองแดงครีบทองแดงมีความสัมพันธ์ระหว่างการกัดกร่อนกับเวลาของท่อที่ไม่เคลือบ และเคลือบอินาเมลดังสมการ $Cr = 0.0188\, t^{0.31}$ และ $Cr = 0.0105\, t^{0.184}$ ตามลำดับและพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างความหนาเขม่ากับเวลาของท่อเหล็กครีบเหล็กและท่อทองแดงครีบทองแดงคือ $R_{fouling} = 22.57(1 - e^{-0.010t})$ ตามลำดับ ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานความร้อนของเขม่ากับเวลาคือ $Z_{fouling} = 1.146(1 - e^{-0.006t})$

Abstrac

The purpose of this paper is to study the effects of using enamel as a protection against *corrosion on* external surfaces of thermosyphon economizer. The thermosyphons used in the experiment were made of uncoated and coated steel tube with steel fins and uncoated and coated copper tube with copper fins. The thermosyphon were coated with three different coating thicknesses of enamel on the evaporator section. The test was done using exhaust combustion gas at a temperature of 225°C, generated from a mixture of heavy A grade fuel and diesel at 4:1 *ratio* by *volume*. Data was recorded on the thermosyphon' s corrosion, the fouling and the fouling themal resistance at 500, 1,000 and 1,500 hours. It was found that either the direction of tube facing nor the thickness of the enamel coating affected the corrosion,the fouling thickness, or the average rate of fouling. On completion of the experiment, the average corrosion of both uncoated fined steel and uncoated fined copper tube was 0.043 *mm. The inorganic* compound found *in* the fouling on the thermosyphon's surface was $CaSO_4$ which came from impurity in the fuel. Thus the fouling on the

thermosyphon's surface did not depend on the material used in the tubes production, the coating or the operational time. In addition, it was found that the correlation between corrosion and time of the uncoated fined steel thermosyphon and the coated fined steel thermosyphon is $Cr = 0.0104t^{0.4}$ and $Cr = 0.0105t^{0.187}$ respectively, and the correlation between corrosion and time of the uncoated fined copper thermosyphon and the coated fined copper thermosyphon is $Cr = 0.0188t^{0.31}$ and $Cr = 0.0105t^{0.184}$ respectively. Form the result, it was found that the correlation between the fouling thickness and time of fined steel thermosyphon and fined copper thermosyphon is $R_{fouling} = 22.57(1-e^{-0.0101t})$ The equation of the fouling thermal resistance and time is $Z_{fouling} = 1.146(1-e^{-0.006t})$

1. บทนำ

เครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเทอร์โมไซฟอนเป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับดึงความร้อนกลับจากไอเสียร้อนของหม้อไอน้ำมาให้กับน้ำป้อนหม้อไอน้ำทำให้ประหยัดเชื้อเพลิงที่ใช้กับหม้อไอน้ำ เครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเทอร์โมไซฟอนเป็นอุปกรณ์ที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงสถานะของสารทำงานในท่อเป็นการถ่ายเทความร้อนโดยอาศัยความร้อนแฝงแต่ปรกติแล้วจะใช้งานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในไอเสียซึ่งจะมีปริมาณขี้เถ้าสูงทำให้เกิดปัญหาการสะสมตัวของเขม่า ยังผลให้เกิดการกัดกร่อนที่ผิวและค่าการส่งถ่ายความร้อนความร้อนลดลง ลักษณะการสะสมของเขม่ามีลักษณะเป็นแบบอะซิมโทติก Kern and Seaton [4] ได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการทำนายดังต่อไปนี้

$$R_{fouling} = \frac{\Phi d}{\beta}(1-e^{-\beta t}) \qquad (1)$$

Φd = อัตราการสะสมเขม่า

β = ค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการหลุดร่วงของเขม่า

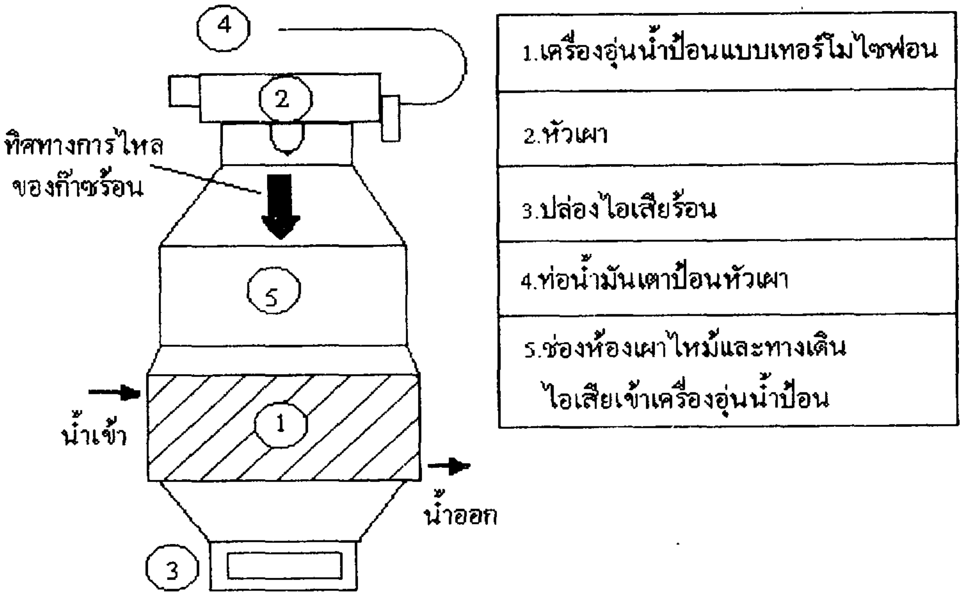
t = เวลาการทำงาน

Luan and Jin [5] พบว่า อัตราการการเพิ่มของการกัดกร่อนจะลดลงเมื่อเวลาการทำงานมากขึ้น และค่าการส่งถ่ายความร้อนจะลดลง 10.20 % เมื่อเวลาผ่านไป 18 เดือน Bubenicek et al.[3] ได้พบว่าปัจจัยในการเกิดเขม่ามีหลายอย่าง คือ สารประกอบในไอเสีย อุณหภูมิของไอเสีย ชนิดการไหล ความเร็ว ความสกปรกของไอเสีย วัสดุทำท่อ และอุณหภูมิที่ผิวท่อ สำหรับการป้องกันการกัดกร่อนที่ผิวภายนอกของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนนั้นสามารถทำได้หลายวิธี Novotna et al.[6] ได้ทำการทดสอบท่อความร้อนที่ทำจากท่อเหล็กและอะลูมิเนียม พบว่าเมื่อเวลาผ่านไป 6,000 ชั่วโมงเกิดการกัดกร่อนที่ผิวท่อเหล็กแต่ในกรณีของอะลูมิเนียมแม้เวลาผ่านไป 10,000 ชั่วโมงก็ไม่เกิดการกัดกร่อนที่ผิวแต่อย่างใด ชาตรีและสิทธิกร [2]ได้ทำการป้องกันการกัดกร่อนท่อความร้อนโดยการเคลือบผิวสีทนความร้อนหลังจากการทำงาน 1,000 ชั่วโมงพบว่าการกัดกร่อนเกิดขึ้นน้อยกว่าท่อที่ไม่ได้ทำการเคลือบ 2 เท่า และ ขวัญชัย [1] ได้ทำป้องกันผิวภายนอกของท่อความร้อนแบบธรรมดาโดยการเคลือบผิวภายนอกด้วยอินาเมล พบว่าสามารถป้องกันการกัดกร่อนของท่อได้ดีมาก แต่เนื่องจากผิวท่อหลังจากทำการเคลือบอินาเมลมีความมันจึงทำให้การดึงความร้อนกลับของเครื่องแลกเปลี่ยนทำได้ไม่เต็มที่ งานวิจัยนี้จึงมีจุดประสงค์ที่จะศึกษาผลของการเคลือบอินาเมลเพื่อป้องกันการกัดกร่อนบนผิวภายนอกครีบโดยจะมุ่งเน้นที่

- การกัดกร่อนที่ผิวภายนอกของท่อเทอร์โมไซฟอนแบบท่อครีบธรรมดา และท่อครีบเคลือบอินาเมล
- ความหนาของเขม่าที่เกาะบนผิวท่อครีบทั้งสองประเภท
- ศึกษาค่าความต้านทานความร้อนของเขม่าโดย ใช้แบบจำลองของ Kern and Seaton

2. อุปกรณ์และวิธีทำการทดลอง

เครื่องอุ่นน้ำป้อนที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วยเทอร์โมไซฟอนจำนวน 4x16 ท่อ เป็นท่อครีบแบบธรรมดาและเคลือบอินาเมลที่ 3 ความหนาในส่วนทำระเหย เทอร์โมไซฟอนทำจากท่อเหล็กครีบเหล็กและท่อทองแดงครีบทองแดงมีเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 21.7 มม. และ 19.05 มม.ตามลำดับ ท่อทั้งสองชนิดมีความสูงของครีบ 10 มม. ความยาวทั้งหมดของแต่ละท่อ 630 มม. มีส่วนทำระเหยยาว 420 มม. ส่วนไม่ถ่ายเทความร้อน 10 มม. และส่วนควบแน่นยาว 200 มม.รายละเอียดของชุดทดสอบแสดงดังรูปที่ 1 ทำการทดสอบด้วยชุดทดสอบเครื่องอุ่นน้ำป้อนที่ไอเสียร้อนได้จากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงผสม ระหว่างน้ำมันเตาเกรด A และน้ำมันดีเซล โดยอัตราส่วน 4:1 โดยปริมาตร ทำการทดสอบ



รูปที่ 1 รายละเอียดของชุดทดสอบ

กับไอเสียร้อนที่อุณหภูมิ 225 °C วันละ 16 ชั่วโมง เป็นเวลาทั้งหมด 1,500 ชั่วโมง ทำการเก็บข้อมูลทุก 500 ชั่วโมง โดยทำการวิเคราะห์การกัดกร่อนจากภาพถ่ายหน้าตัดขวางของท่อจากกล้องจุลทรรศน์ ที่มีกำลังขยาย 25 เท่า วิเคราะห์สารประกอบอนินทรีย์จากตัวอย่างของเขม่าที่เกาะบนผิวท่อโดยใช้เครื่อง X–ray diffractometer และ Infra-red spectroscopy วัดความหนาของเขม่าที่ผิวท่อด้วยเวอร์เนีย และเก็บข้อมูลความร้อนส่งผ่านจากอุณหภูมิแตกต่างของเครื่องอุ่นน้ำป้อน เพื่อหาค่าความต้านทานความร้อนของเขม่า และใช้สมการของ Kern and Seaton ในการทำนายหาสมการความต้านทานความร้อนของเขม่า

3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการทดลองจะกล่าวถึงการกัดกร่อนที่ผิวภายนอก การสะสมเขม่าที่ผิวภายนอก และค่าความต้านทานความร้อนรวมของระบบ ตามลำดับดังนี้

3.1 การกัดกร่อนที่ผิวภายนอกและการวิเคราะห์สารประกอบ ในเขม่า

3.1.1 ค่าการกัดกร่อนที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์

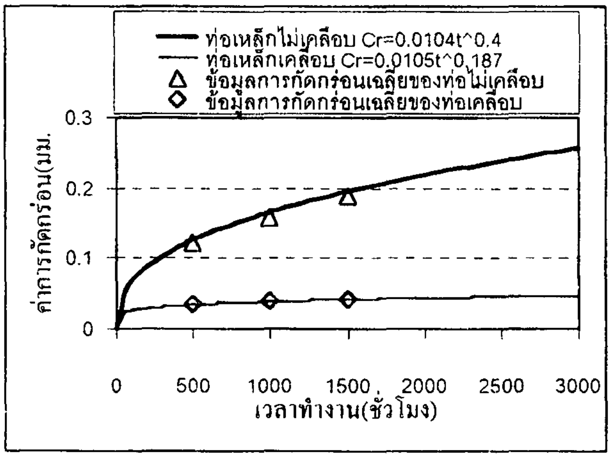
จากภาพถ่ายหน้าตัดขวางขยาย 25 เท่า พบว่าการกัดกร่อนที่ท่อและที่ครีบมีค่าใกล้เคียงกัน และการกัดกร่อนที่ด้านรับไอเสียร้อนและด้านหลังของท่อเทอร์โมไซฟอนทุกชนิดมีค่าไม่แตกต่างกันในทางสถิติ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะเกิดการเกาะตัวของเขม่าปกคลุมผิวท่อทั้งด้านหน้าและหลังอย่างรวดเร็ว เมื่อเวลาผ่านไป 1,500 ชั่วโมงการกัดกร่อนของท่อเหล็กครีบเหล็ก และทองแดงครีบทองแดงที่เคลือบผิวด้วยอินาเมลทั้ง 3 ความหนา มีค่าไม่แตกต่างกันในทางสถิติ เนื่องจากการกัดกร่อนจะเกิดขึ้นเฉพาะที่ผิวอินาเมลชั้นนอกเท่านั้นโดยมีค่าการกัดกร่อนเฉลี่ยเป็น 0.043 มม. ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับการทดลองของ ขวัญชัย[1] แต่การกัดกร่อนที่เกิดจากท่อครีบเคลือบอินาเมลมีมากกว่าทั้งนี้เกิดจากการสะสมตัวของเขม่าที่ครีบทำให้เกิดการกัดกร่อนแบบ Erosion ในอัตราที่สูงกว่า รูปที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกัดกร่อนของท่อเหล็กครีบเหล็กแบบธรรมดาและเคลือบอินาเมลที่ความหนาต่างๆ จากรูปพบว่าการกัดกร่อนของท่อครีบธรรมดามีค่ามากขึ้นตามเวลาการทำงาน โดยความสัมพันธ์ของการกัดกร่อนกับเวลาทำงานของเทอร์โมไซฟอนที่ทำจากท่อเหล็กครีบเหล็กบแบบธรรมดาเป็นไปดังสมการ

$$Cr = 0.0104t^{0.4} \qquad (2)$$

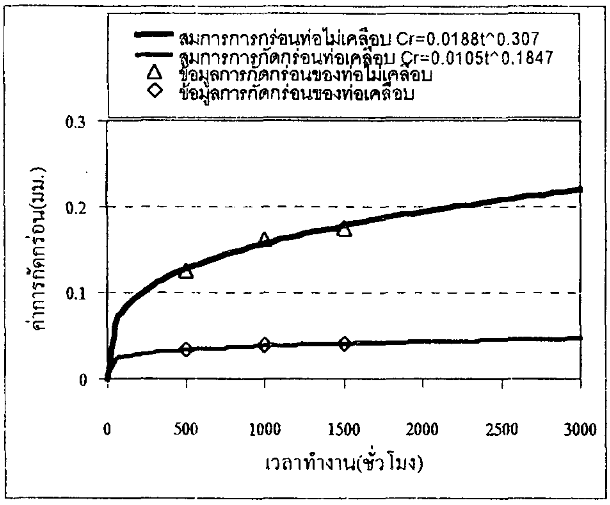
และการกัดกร่อนของท่อเหล็กครีบเหล็กเคลือบอินาเมลทั้ง 3 ความหนา มีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$Cr = 0.0105t^{0.187} \quad (3)$$

นอกจากนี้พบว่าที่เวลาผ่านไป 1,500 ชั่วโมงค่าการกัดกร่อนที่ได้จากสมการที่ 3 จะมีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากสมการที่ 2 ถึง 0.147 มม. ซึ่งแสดงว่าอินาเมลสามารถป้องกันการกัดกร่อนได้เป็นอย่างดี



รูปที่ 2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกัดกร่อนกับเวลาของท่อเหล็กครีบเหล็กธรรมดาและเคลือบอินาเมล



รูปที่ 3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกัดกร่อนกับเวลาของท่อทองแดงครีบทองแดงธรรมดาและเคลือบอินาเมล

จากรูปที่ 3 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกัดกร่อนของท่อทองแดงครีบทองแดงแบบธรรมดาและเคลือบอินาเมลที่ความหนาต่างๆ จากรูปพบว่าการกัดกร่อนของท่อครีบธรรมดามีค่ามากขึ้นตามเวลาการทำงาน โดยความสัมพันธ์ของการกัดกร่อนกับเวลาทำงานของเทอร์โมไซฟอนที่ทำจากท่อเหล็กครีบเหล็กบแบบธรรมดาเป็นไปดังสมการ

$$Cr = 0.0188t^{0.31} \quad (4)$$

และการกัดกร่อนของท่อทองแดงครีบทองแดงเคลือบอินาเมลทั้ง 3 ความหนา มีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$Cr = 0.0105t^{0.184} \quad (5)$$

นอกจากนี้พบว่าที่เวลาผ่านไป 1,500 ชั่วโมงค่าการกัดกร่อนที่ได้จากสมการที่ 3 จะมีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากสมการที่ 2 ถึง 0.134 มม. ซึ่งแสดงว่าอินาเมลสามารถป้องกันการกัดกร่อนได้เป็นอย่างดี สมการการกัดกร่อนของท่อเหล็กครีบเหล็กมาเปรียบเทียบกับสมการการกัดกร่อนของท่อทองแดงครีบทองแดงทุกชนิดมีค่าไม่แตกต่างกันในทางสถิติจึงสามารถนำข้อมูลของท่อทั้ง 2 ชนิดมารวมกันได้จะได้สมการกัดกร่อนของท่อครีบแบบธรรมดาคือ

$$Cr = 0.014t^{0.35} \quad (6)$$

และสมการความสัมพันธ์ของท่อครีบแบบเคลือบอินาเมลดังต่อไปนี้

$$Cr = 0.011t^{0.1855} \quad (7)$$

3.1.2 การวิเคราะห์สารประกอบในเขม่า

ผลจากเครื่อง X-ray diffractometer พบว่าเขม่าที่เกาะผิวท่อเทอร์โมไซฟอนมีสารประกอบอนินทรีย์ประเภท $CaSO_4$ ซึ่งเป็นสารประกอบที่เหมือนกับการทดลองของขวัญชัย [1] แสดงว่าไม่มีการทำปฏิกิริยาระหว่างผิวท่อเทอร์โมไซฟอนกับไอเสียร้อนอย่างใด ส่วนผลวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Infra-red spectroscopy พบว่าไม่มีสารประกอบอินทรีย์เกิดขึ้นภายในเขม่าแต่อย่างใด

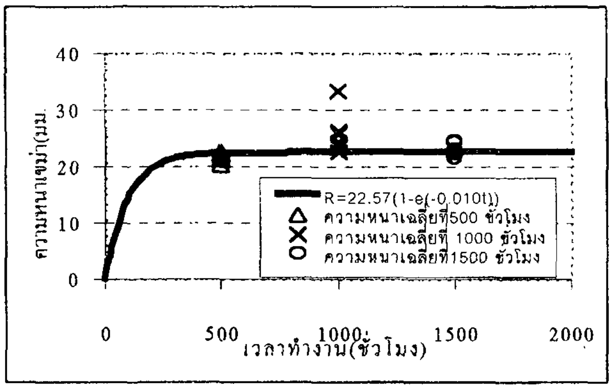
3.2 การสะสมเขม่าที่ผิวภายนอก

จากการวิเคราะห์เขม่าเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของเขม่ากับเวลาการทำงานของท่อเหล็กทุกประเภทโดยใช้แบบจำลองของ Kern and Seaton พบว่าความหนาเขม่าด้านรับไอเสียร้อนและด้านตรงข้ามของเทอร์โมไซฟอนทุกชนิดมีค่าไม่แตกต่างกันในทางสถิติ การสะสมตัวบนท่อที่เคลือบและไม่เคลือบของท่อทั้งสองชนิดไม่แตกต่างกัน และความหนาของอินาเมลที่เคลือบผิวของท่อครีบทุกชนิดไม่มีผลต่อการสะสมตัวของเขม่า รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาเขม่ากับเวลาการทำงานของเทอร์

โมไซฟอนที่ทำจากท่อครีบทุกชนิดสามารถหาความสัมพันธ์ได้ดังสมการ

$$R_{fouling} = 22.57(1 - e^{-0.010t}) \quad (8)$$

จากกราฟจะพบว่าความหนาเขม่าสูงสุดมีค่าเป็น 22.57 มม. และความหนาเริ่มคงที่ที่เวลาทำงาน 1,250 ชั่วโมง ซึ่งสามารถใช้เป็นเวลาทำความสะอาดท่อได้



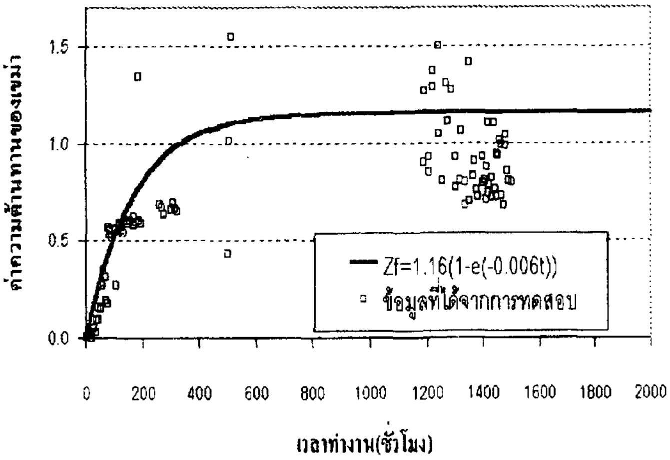
รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาเขม่ากับเวลา

3.3 การวิเคราะห์ความต้านทานความร้อนของเขม่า

จากข้อมูลความต้านทานความร้อนรวมของเครื่องอุ่นน้ำป้อน ที่เวลาใดๆจะสามารถคำนวณหา ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานความร้อนของเขม่ากับเวลาทำงาน โดยอาศัยแบบจำลองของ Kern and Seaton ได้ตามรูปที่ 5 และพบว่าสมการความสัมพันธ์ระว่างความต้านทานความร้อนของเขม่ากับเวลาทำงานเป็นดังนี้

$$Z_{fouling} = 1.146(1 - e^{-0.006t}) \quad (9)$$

จากกราฟพบว่า ค่าความต้านทานความร้อนของเขม่าสูงสุดมีค่า 1.146 $(m^2 - K/W)$ และเริ่มมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเวลา 1,500 ชั่วโมง แสดงว่าหากเวลาทำงานมากกว่านี้การส่งถ่ายความร้อนจะลดลงอีกไม่มากนัก ผลที่ได้สอดคล้องกับผลการทดลองของขวัญชัย [1] ซึ่งได้ค่าความต้านทานความร้อน 0.0925 $(m^2 - K/W)$ ที่เวลา 1,500 ชั่วโมงแต่ผลการทดลองนี้จะสูงกว่าเล็กน้อยเนื่องจากในการศึกษานี้ใช้ท่อครีบจึงทำให้ความหนาของเขม่ามีค่าเยอะกว่า



รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานความร้อนของเขม่ากับเวลาทำงาน

4. สรุปผลการทดลอง

จากการทดสอบผลของการเคลือบอินาเมลเพื่อป้องกันการกัดกร่อนบนผิวท่อครีบพบว่า

4.1 ตำแหน่งท่อที่หันรับไอเสียและความหนาของอินาเมลที่ใช้เคลือบผิวท่อ ไม่มีผลต่อการกัดกร่อน

4.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง การกัดกร่อนกับเวลาของเทอร์โมไซฟอนที่ทำจากเหล็กครีบธรรมดาทุกชนิดคือ $Cr = 0.014t^{0.35}$ และความสัมพันธ์ระหว่างการกัดกร่อนกับเวลาของเทอร์โมไซฟอนที่ทำจากท่อครีบเคลือบอินาเมลทุกชนิดคือ $Cr = 0.011t^{0.1855}$

4.3 สมการทำนายความหนาเขม่าของเทอร์โมไซฟอนเป็นไปดังสมการ $R_{fouling} = 22.57(1 - e^{-0.010t})$

4.4 สมการทำนายความต้านทานความร้อนของเขม่ากับเวลาเป็นไปดังสมการ $Z_{fouling} = 1.146(1 - e^{-0.006t})$

5. สัญลักษณ์

Cr = การกัดกร่อน

$R_{fouling}$ = ความหนาเขม่า

$Z_{fouling}$ = ค่าความต้านทานความร้อน

6. เอกสารอ้างอิง

[1] ขวัญชัย ไกรทอง, "การป้องกันการกัดกร่อนบนผิวภายนอกท่อของเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเทอร์โมไซฟอนด้วยการเคลือบอินาเมล",วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มช., NO.2, November 1999

[2] ชาตรี คอยแก่น และ สิทธิกร ถุงคำ " การศึกษาการกัดกร่อนภายนอกของท่อความร้อนที่ใช้กับเครื่องอุ่นน้ำป้อน",ปริญญานิพนธ์,ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร, คณะวิศวกรรมศาสตร์ ,มหาวิทยาลัยเชียงใหม่,1999

[3] Bubenicek,I.,Lodecky,R.,Polasek,F.,"Fouling of Heat Pipe Heat Exchangers and Prevention Proc.,9th International Heat Pipe conference,U.S.A.,1995

[4] Kern,D. and Senton,R. "Surface Fouling-How to Calculate Limits", Chem. Eng.Prog.,1988

[5] Luan,S.,and Jin,Y." Study on Abrasion,cacle off and decay of Heat Exchanging Performance of Heat Pipe for Steam Locomotive",3rd International Heat Pipe Symposium,Japan,1988

[6] Novotna, I., Nassler, J. and Zelko,M. "A Contribution to Service Life of Heat Pipe",4th International Heat Pipe Symposium,Japan,1994