บทที่ 1
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของการวิจัย

พลังงานเป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้องนำมาใช้ในชีวิตประจำวันไม่ว่าจะเป็นการใช้งานในด้านการขนส่ง เกษตรกรรม อุตสาหกรรม และที่อยู่อาศัย ล้วนแล้วแต่ใช้พลังงานจำนวนมากและพลังงานที่ใช้ส่วนหนึ่งถูกปล่อยทิ้งไป เช่น ในด้านอุตสาหกรรม ซึ่งพลังงานที่ถูกปล่อยทิ้งเหล่านี้ ยังมีค่าพลังงานสูง ซึ่งสามารถนำกลับมาใช้ให้เป็นประโยชน์ได้ อุปกรณ์ชนิดหนึ่งที่นำมาประยุกต์ใช้งานเพื่อการดึงพลังงานที่สูญเสียเหล่านี้กลับและเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน ก็คือ เทอร์โมไซฟอน (Thermosyphon) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ถ่ายเทความร้อนที่มีประสิทธิภาพ โดยมีการนำมาใช้ในงานหลายประเภทด้วยกัน เช่น ใช้ในระบบดึงความร้อนกลับ ใช้เป็นเครื่องถ่ายเทความร้อนเฉพาะที่ใช้ในการลดอุณหภูมิแม่พิมพ์ และใช้ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยเฉพาะเทอร์โมไซฟอนที่นำมาใช้ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนนั้นมักจะทำมาจากโลหะหลายชนิดด้วยกันที่พบมากที่สุดคือทองแดง เหล็ก และอะลูมิเนียม โดยที่ภายในท่อจะบรรจุของเหลวที่เหมาะสมไว้ เช่น น้ำ และเมื่อใช้งานไปนานๆ ก็จะเกิดการกัดกร่อนขึ้นทั้งภายในและภายนอกท่อ ทำให้ประสิทธิภาพของการส่งผ่านความร้อนลดลง ซึ่งการศึกษาเกี่ยวกับการลดการเกิดการกัดกร่อนภายในเทอร์โมไซฟอนยังมีน้อยและทำการศึกษาเฉพาะบางวัสดุเท่านั้น

ในงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นถึงการศึกษาการกัดกร่อนภายในของเทอร์โมไซฟอนซึ่งทำให้มีก๊าซที่ไม่ควบแน่นเกิดขึ้นในท่อและมีผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนเกิดขึ้นบนพื้นผิวภายในท่อด้วย จึงมีผลทำให้ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของเทอร์โมไซฟอนลดลง ดังนั้นการที่จะเพิ่มสมรรถนะในการถ่ายเทความร้อนจึงกระทำได้ด้วยการลดการเกิดการกัดกร่อนภายในท่อ โดยการศึกษาหาวิธีการป้องกันการกัดกร่อนที่เหมาะสมและหาวัสดุที่ใช้ทำเทอร์โมไซฟอนซึ่งเข้ากับสารทำงานได้ดี

1.2 สรุปสาระสำคัญจากเอกสารที่เกี่ยวข้อง

1.2.1 การศึกษาการกัดกร่อนภายในท่อความร้อนที่ยังไม่ได้รับการป้องกันการกัดกร่อน

Kojima and Murakami (1990) ได้ทำการทดสอบอายุการใช้งานของท่อความร้อนที่ทำจากท่อทองแดง 2 ชนิดคือ Phosphorous deoxidized copper และ Oxygen-free copper ที่ผิวภายในท่อเป็นร่องตามแนวยาวและมีน้ำเป็นสารทำงาน โดยได้ทำการทดสอบอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 3600 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิท่อเท่ากับ 160°C และทำการศึกษาเกี่ยวกับก๊าซที่ไม่ควบแน่น สารแปลกปลอมที่เกิดขึ้นบนผิวภายในท่อ และการสังเกตผิวภายในของท่อความร้อนซึ่งมีลักษณะ

ดังรูป 1.1 จะพบว่าการกัดกร่อนเกิดขึ้นในส่วนทำระเหยแต่ไม่เกิดขึ้นในส่วนควบแน่น และที่ระยะเวลาการทดสอบยาวนานขึ้นจะมีการกัดกร่อนเพิ่มมากขึ้น และพบว่าท่อทองแดงที่ทำจาก Oxygen-free copper จะเกิดการกัดกร่อนน้อยกว่า ส่วนสารที่เกิดขึ้นภายในท่อนั้นจะเป็นสารอินทรีย์พวกพันธะ O-H, พันธะ C-O-C, กลุ่มฟีนิล และวงแหวนเบนซีน สำหรับก๊าซที่ไม่ควบแน่นนั้นยังไม่สามารถตรวจจับได้มากนัก

Xi and Pan (1994) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการเข้ากันได้ของเหล็ก สเตนเลส ทองแดงกับ Naphthalene โดยได้ทำการทดสอบระบบปิดของเหล็ก สเตนเลส ทองแดงกับ Naphthalene ที่อุณหภูมิ 430°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง พบว่าสเตนเลสและทองแดงเข้ากันได้ดีกับ Naphthalene เนื่องจากอัตราการกัดกร่อนเป็น 0 mm/year ส่วนอัตราการกัดกร่อนของเหล็กจะเป็น 0.0038 mm/year ซึ่งน้อยมาก เนื่องจากเหล็กถูกกัดกร่อนด้วยออกซิเจนไม่ได้ถูกกัดกร่อนด้วย Naphthalene แต่เนื่องจากเป็นระบบปิดจึงมีก๊าซออกซิเจนเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

Baker (1973) ได้ทำการทดสอบอายุการใช้งานของท่อความร้อนที่ทำจากโลหะสเตนเลสและมีน้ำเป็นสารทำงาน เป็นเวลา 2 ปี ที่อุณหภูมิ 100°F, 200°F และ 300°F โดยทำการศึกษาจากปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นภายในท่อ ซึ่งพบว่าที่เวลาการทดสอบยาวนานขึ้นจะเกิดการสะสมก๊าซไฮโดรเจนเพิ่มมากขึ้น และที่อุณหภูมิสูงขึ้นมวลของก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นในท่อความร้อนจะมากขึ้นด้วย

1.2.2 การศึกษาการกัดกร่อนภายในท่อความร้อนที่ได้รับการป้องกันการกัดกร่อนด้วยการเคลือบผิวภายในของท่อ

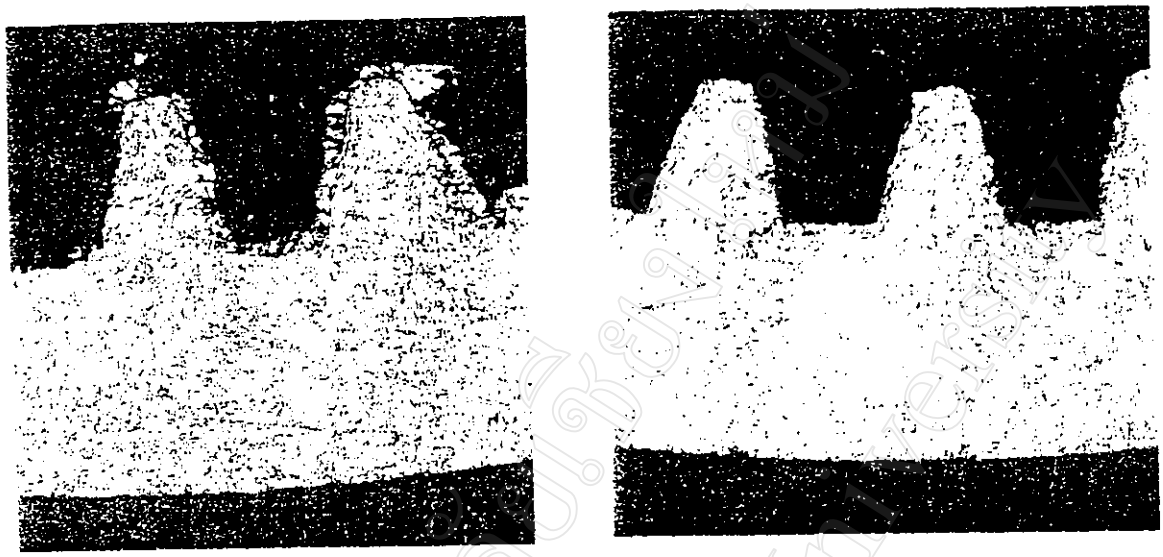
Mou et al. (1990) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับอายุการใช้งานของท่อความร้อนที่ทำจากเหล็กและมีน้ำเป็นสารทำงาน จะพบว่าจากการที่เหล็กกับน้ำเข้ากันไม่ได้ ทำให้ท่อความร้อนเกิดการกัดกร่อนและเกิดก๊าซไฮโดรเจนขึ้น โดยที่ปฏิกริยาหลักซึ่งเกิดขึ้นระหว่างเหล็กกับน้ำ คือ ปฏิกริยาไฟฟ้าเคมี ดังนี้

ปฏิกริยาที่ขั้ว Anode :

$$Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^{-} \quad \cdots\cdots(1.1)$$

ปฏิกริยาที่ขั้ว Cathode :

$$2H^{+} + 2e^{-} \rightarrow H_2 \quad \cdots\cdots(1.2)$$



Heating section Condensing section

Phosphorous deoxidized copper pipe

Heating section Condensing section

Oxygen-free copper pipe

รูป 1.1 แสดงภาพตัดขวางของท่อความร้อนหลังการทดสอบ (Kojima and Murakami,1990)

ปฏิกริยาขั้นที่สอง :

$$Fe^{2+} + 2OH^- \rightarrow Fe(OH)_2 \cdots\cdots(1.3)$$

$$\text{หรือ } Fe^{2+} + 2OH^- \rightarrow FeO + H_2O \cdots\cdots(1.4)$$

และพบว่าการ Pretreatment ผิวภายในท่อจะช่วยป้องกันเหล็กจากการเกิดการกัดกร่อนในน้ำ และช่วงอุณหภูมิการใช้งานที่ให้ผลของการ Pretreatment ในแบบต่างๆ ได้ดีที่สุด ก็จะแตกต่างกัน ดังรูป 1.2 ส่วนการสะสมของก๊าซไฮโดรเจนในท่อความร้อน จะมีแนวโน้มไปในทางคงตัวหลังจากใช้งานไป 60 วัน โดยที่ค่าคงตัวของขนาดก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นในท่อความร้อนจะเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิการใช้งานเท่านั้นคือ

$$M = 0.119\exp\left(1.3102 \times 10^3 / T'\right) \cdots\cdots (373\,K \le T' \le 523\,K) \cdots\cdots (1.5)$$

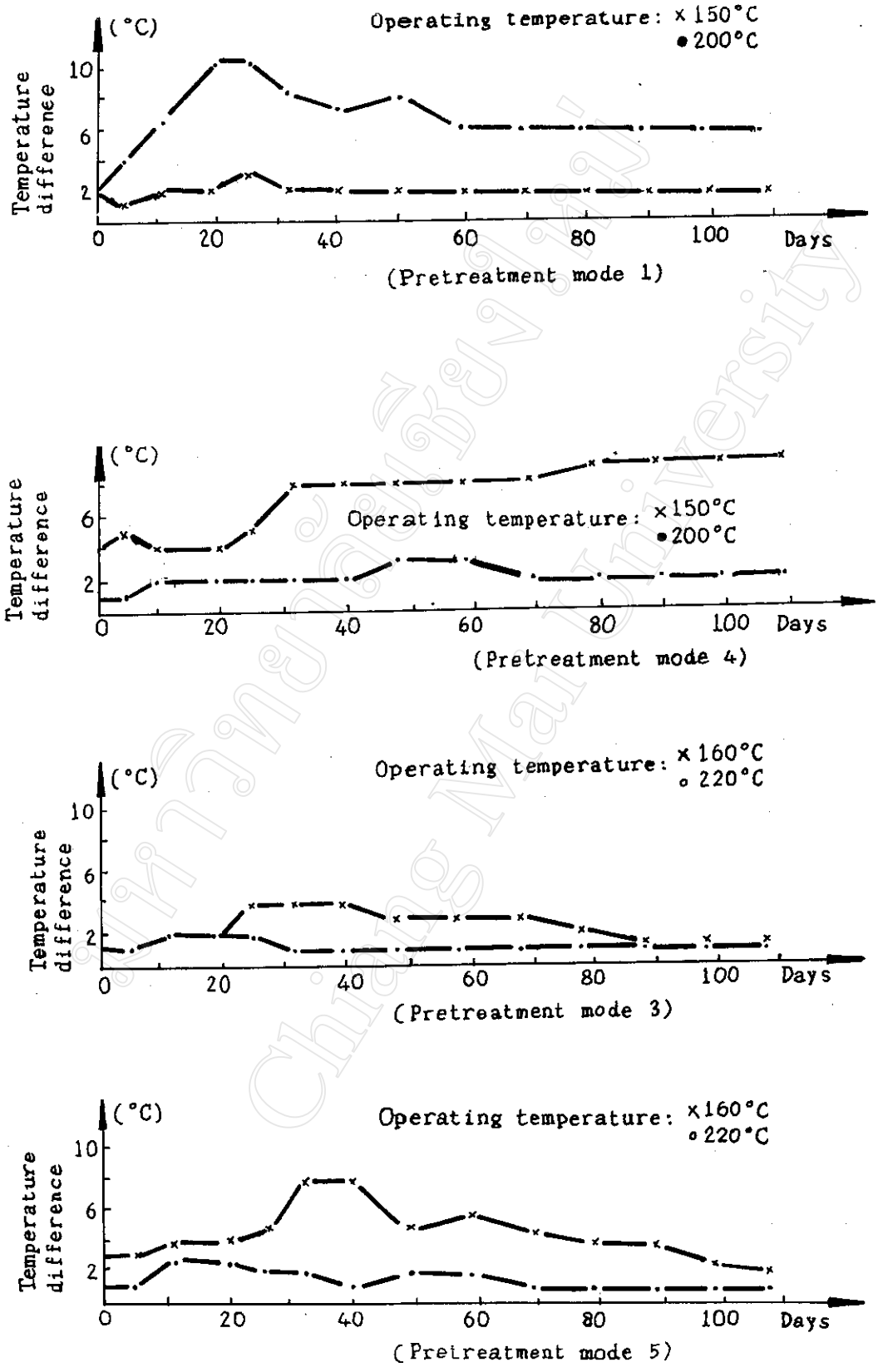
โดยที่ M คือค่าคงตัวของขนาดก๊าซไฮโดรเจน

T' คืออุณหภูมิการใช้งานของท่อความร้อน

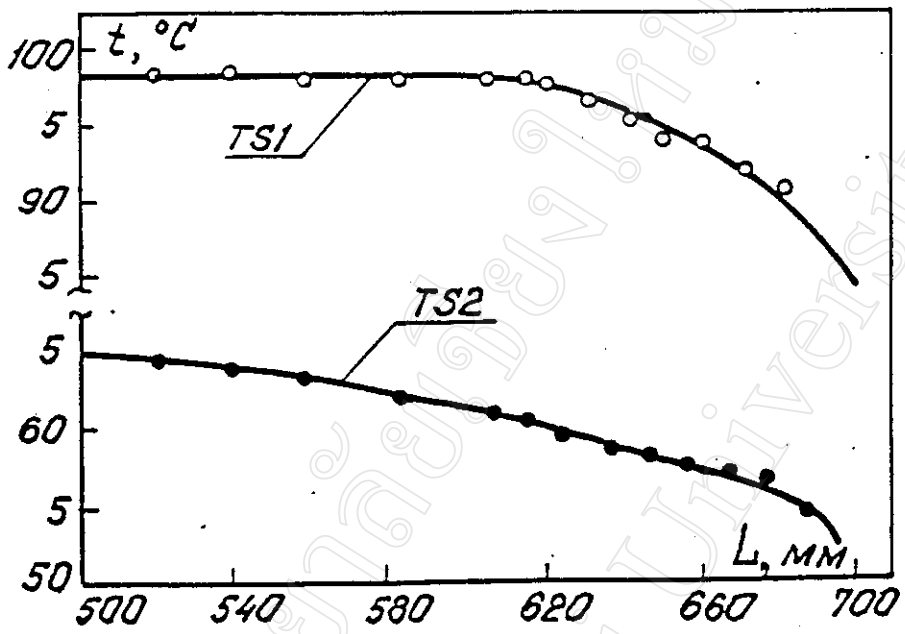
ดังนั้นการ Pretreatment ที่ผิวภายในท่อจะกำจัดก๊าซไฮโดรเจนในท่อความร้อนได้ เนื่องจากมวลของก๊าซไฮโดรเจนในท่อความร้อนจะคงที่ในที่สุดจึงใช้ Pretreatment เป็นตัวดูดซับก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้น

1.2.3 การศึกษาการกัดกร่อนภายในท่อความร้อนที่ได้รับการป้องกันการกัดกร่อนด้วยการเติมสารยับยั้งลงในสารทำงาน

Nishchik et al. (1995) ได้ทำการค้นคว้าเกี่ยวกับการกัดกร่อนในระบบปิดของโลหะสเตนเลสกับน้ำ โดยทำการทดสอบอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 1000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 90 - 95°C พบว่าในเวลาเริ่มต้นอัตราการกัดกร่อนจะสูง แต่ต่อมาจะค่อยๆ ลดลง และที่อุณหภูมิการใช้งาน สูงกว่าการกัดกร่อนจะรุนแรงมากกว่า และได้ศึกษาเกี่ยวกับวิธีการป้องกันการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นในระบบปิดของเหล็กและน้ำ โดยทำการทดสอบกับเทอร์โมไซฟอนที่ทำจากเหล็กและมีน้ำเป็นสารทำงานที่อุณหภูมิ 100 - 105°C ซึ่งแบ่งเป็นเทอร์โมไซฟอนที่ไม่มีการเติมสารยับยั้งลงในน้ำ (TS2) และเทอร์โมไซฟอนที่มีการเติมสารยับยั้งลงในน้ำ (TS1) จะพบว่าปริมาณก๊าซที่ไม่ควบแน่นที่ได้จากขบวนการกัดกร่อนใน TS1 จะน้อยกว่า TS2 ดังรูป 1.3



รูป 1.2 แสดงการเปลี่ยนแปลงของผลต่างของอุณหภูมิในส่วนควบแน่น (Mou et al., 1990)



รูป 1.3 แสดงการกระจายอุณหภูมิในส่วนควบแน่นของเทอร์โมไซฟอนที่เวลา 4000 ชั่วโมง (Nishchik et al., 1995)

Barantsevich and Barkova (1995) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการต้านทานการกัดกร่อนในท่อความร้อนที่ทำจากท่ออะลูมิเนียมและมีแอมโมเนียเป็นสารทำงาน ซึ่งมีการใช้สารยับยั้งในการต้านทานการกัดกร่อน โดยทำการศึกษาจากค่าความลึกของการกัดกร่อนแบบ Pitting จะพบว่า Ammonia nitrate (NH_4NO_3) เป็นสารยับยั้งที่ดีที่สุด โดยมีค่าความลึกของร่องที่เกิดจากการกัดกร่อนต่ำสุดเท่ากับ 0.032 มิลลิเมตร

1.2.4 การศึกษาการกัดกร่อนภายในท่อความร้อนที่ได้รับการป้องกันการกัดกร่อนด้วยการเคลือบผิวภายในของท่อและเติมสารยับยั้งลงในสารทำงาน

Novotna et al. (1994) ได้ทำการทดสอบเพื่อมุ่งจะลดการกัดกร่อนภายในท่อความร้อนซึ่งจะผลิตก๊าซที่ไม่ควบแน่นออกมาทำให้สมรรถนะของท่อความร้อนเปลี่ยนแปลงไป โดยทำการศึกษากับท่อความร้อนที่ทำจากเหล็กและมีน้ำเป็นสารทำงาน ซึ่งได้รับการป้องกันการกัดกร่อน 3 วิธี คือ

1. การเติมสารยับยั้ง Potassium chromate (K_2CrO_4) ลงในสารทำงานในอัตราส่วน Potassium chromate 5 กรัมต่อน้ำ 1 ลิตร ซึ่งค่าความเป็นกรดด่างจะเท่ากับ 7.87

2. การเคลือบผิวภายในท่อความร้อนด้วย Magnetite (Fe_3O_4) คือการทำให้ผิวท่อกลายเป็นออกไซด์ด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 550°C

3. รวม 2 วิธีข้างบนเข้าด้วยกัน

จากการทดสอบอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 6000 ชั่วโมง และให้ความร้อนแก่ส่วนทำระเหยของท่อจนมีอุณหภูมิเท่ากับ 200°C จะเกิดการกัดกร่อนของเหล็กในน้ำด้วยปฏิกริยาไฟฟ้าเคมีซึ่งจะเกิดขึ้นเล็กน้อยเมื่อขาดก๊าซออกซิเจนและสามารถอธิบายได้ดังนี้

ปฏิกริยาที่ขั้ว Anode :

$$Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^{-} \quad \cdots\cdots(1.6)$$

ปฏิกริยาที่ขั้ว Cathode :

$$2H_2O + O_2 + 4e^{-} \rightarrow 4OH^{-} \quad \cdots\cdots(1.7)$$

$$\text{หรือ } 2H_2O + 2e^{-} \rightarrow H_2 + 2OH^{-} \quad \cdots\cdots(1.8)$$

ปฏิกริยาขั้นต่อมา :

$$Fe^{2+} + 2OH^{-} \rightarrow Fe(OH)_2 \quad \cdots\cdots(1.9)$$

$$\text{หรือ } 2Fe(OH)_2 + H_2O + 1/2O_2 \rightarrow 2Fe(OH)_3 \quad \cdots\cdots(1.10)$$

และเมื่อนำท่อมาวิเคราะห์ในส่วนของสารทำงาน ก๊าซที่ไม่ควบแน่นหรือก๊าซไฮโดรเจน วัตถุที่ผิวท่อและการกระจายของอุณหภูมิในส่วนควบแน่นของท่อความร้อน จะพบว่าวิธีที่ดีที่สุดคือวิธีที่ 3 รองลงมาคือวิธีที่ 1 ดังแสดงในตาราง 1.1 แม้ว่าวิธีที่ 3 จะดีที่สุด แต่ต้องใช้เทคโนโลยีและต้นทุนในการผลิตที่สูงกว่าวิธีที่ 1 ดังนั้น วิธีที่ 1 จึงเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงและเหมาะสำหรับการใช้งานเป็นระยะเวลานานได้

มีบทความมากมายที่กล่าวถึงการศึกษาการกัดกร่อนภายในท่อความร้อน แต่การศึกษาเกี่ยวกับการลดการเกิดการกัดกร่อนจะกระทำกับบางวัสดุเท่านั้น และทำการทดสอบที่อุณหภูมิใดอุณหภูมิหนึ่ง โดยที่ไม่มีการแปรเปลี่ยนวิธีการป้องกันการกัดกร่อน ดังนั้นในงานวิจัยที่จะทำขึ้นนี้จึงทำการศึกษาการกัดกร่อนภายในท่อเหล็ก ทองแดง และอะลูมิเนียม ที่อุณหภูมิ 150°C, 250°C และ 350°C ตามลำดับ โดยมีการค้นคว้าหาวิธีการป้องกันการกัดกร่อนที่ดีที่สุดสำหรับวัสดุต่างๆ ด้วย

ตาราง 1.1 แสดงผลการวิเคราะห์ท่อความร้อนที่ได้ทำการทดสอบเป็นเวลา 6000 ชั่วโมง (Novotna et al.,1994)

Pipe code	Surface treatment	Working fluid	pH	Inhibitor Concentration	Δt_e °C	Amount of H_2	X-ray analysis
ϕ	-	H_2O	8.32	-	33.2	maximum	Fe slightly Fe_3O_4
a	-	Inhibitor	10.52	0.04	6	traces	Fe , implication Fe_3O_4
b	oxidation with vapour at temperature 550°C	H_2O	8.01	-	10	traces	Fe , strongly Fe_3O_4
c_1	oxidation with vapour at temperature 550°C	Inhibitor	9.05	0.30	3	0	Fe , strongly Fe_3O_4 , slightly $(Fe,Cr)_2O_3$
c_2	oxidaton with vapour + $(NH_4)_2MoO_4$ at temperature 550°C	Inhibitor	7.01	0.45	13	traces	Fe , strongly Fe_3O_4

Δt_e temperature difference along the condensation part of the heat pipe

inhibitor 0.5 % aqueous solution of potassium chromate , pH = 7.87

1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.3.1 เพื่อศึกษาถึงสภาพของการกัดกร่อนที่ผิวด้านในของเทอร์โมไซฟอนที่ทำจาก เหล็ก ทองแดง และอะลูมิเนียม ซึ่งเป็นโลหะที่ใช้กันแพร่หลาย และมีน้ำกลั่นเป็นสารทำงาน โดยพิจารณาจาก

1.3.1.1 การตรวจดูลักษณะที่ผิวด้านในของท่อ

1.3.1.2 การวิเคราะห์หาก๊าซที่ไม่ควบแน่น ซึ่งจะเป็นดัชนีบอกถึงการเกิดปฏิกริยาการกัดกร่อนภายในท่อ

1.3.1.3 การวิเคราะห์หาธาตุหรือสารประกอบที่เกิดขึ้นบนผิวภายในท่อ

1.3.1.4 ค่าการนำความร้อน ผลต่างของอุณหภูมิในส่วนควบแน่น และค่าความต้านทานการถ่ายเทความร้อนรวม

1.3.1.5 อัตราการกัดกร่อน

1.3.2 เพื่อศึกษาถึงวิธีการป้องกันการกัดกร่อนภายในท่อที่เหมาะสมสำหรับเทอร์โมไซฟอนแต่ละชนิด

1.3.2.1 การเคลือบผิวภายในท่อ

1.3.2.2 การเติมสารยับยั้งลงในสารทำงาน

1.3.2.3 การเคลือบผิวภายในท่อและเติมสารยับยั้งลงในสารทำงาน

1.3.3 เพื่อศึกษาถึงผลของอุณหภูมิการใช้งานที่มีต่อสภาพการกัดกร่อนภายในของเทอร์โมไซฟอนแต่ละชนิด

1.3.4 การใช้แบบจำลองอาร์เรนห์เนียสหาความสัมพันธ์ของปริมาณก๊าซที่ไม่ควบแน่นและอัตราการกัดกร่อนกับอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ทดสอบ

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1.4.1 สามารถเห็นถึงสภาพการกัดกร่อนบนผิวในของเทอร์โมไซฟอนแต่ละชนิดหลังการทดสอบว่ามีการผุกร่อนมากน้อยเพียงไร

1.4.2 ทำให้ทราบถึงปัญหาที่เกิดขึ้นกับเทอร์โมไซฟอนที่ใช้งานจริง เพื่อให้ผู้ที่สนใจสามารถนำผลที่ได้จากการทดสอบมาใช้เป็นแนวทางเบื้องต้นในการป้องกันการกัดกร่อน

1.4.3 สามารถนำผลการทดลองนี้ มาเป็นพื้นฐานในการปรับปรุงเทอร์โมไซฟอนให้มีความทนทานต่อการกัดกร่อนมากยิ่งขึ้น

1.4.4 เป็นแนวทางในการตัดสินใจของผู้ประกอบการณ์ที่สนใจ ในการเลือกใช้วัสดุสำหรับทำเทอร์โมไซฟอนที่มีน้ำกลั่นเป็นสารทำงาน รวมถึงวิธีการป้องกันการกัดกร่อนสำหรับเทอร์โมไซฟอนนั้นด้วย

1.5 ขอบเขตของการศึกษาวิจัย

1.5.1 การศึกษาจะศึกษาเฉพาะการกัดกร่อนภายในของเทอร์โมไซฟอนที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร (3/4 นิ้ว) ยาว 1 เมตร

1.5.2 วัสดุที่ใช้ทำท่อ จะต้องเป็นวัสดุที่มีใช้กันแพร่หลายทั่วไป คือ

1.5.2.1 ท่อทองแดงที่มีผิวภายในเรียบ

1.5.2.2 ท่อทองแดงที่มีผิวภายในเป็นร่องแบบ Spiral ซึ่งมีจำนวนร่องเกลียวเป็น 30 ต่อเมตร และความยาวของร่องเกลียวเป็น 76 มิลลิเมตร

1.5.2.3 ท่อเหล็กที่มีผิวภายในเรียบ

1.5.2.4 ท่อเหล็กที่มีผิวภายในเป็นร่องแบบ Spiral ซึ่งมีจำนวนร่องเกลียวเป็น 30 ต่อเมตร และความยาวของร่องเกลียวเป็น 76 มิลลิเมตร

1.5.2.5 ท่ออะลูมิเนียมที่มีผิวภายในเรียบ

1.5.3 อุณหภูมิการใช้งานแบ่งเป็น 3 ระดับ คือ 150°C, 250°C และ 350°C เพราะต้องการนำไปประยุกต์ใช้งานในเครื่องอุ่นอากาศหรือน้ำเพื่อป้อนเข้าสู่หม้อไอน้ำ ซึ่งมีระดับอุณหภูมิอยู่ในช่วง 120 - 400°C

1.5.4 สารทำงาน แบ่งเป็น

1.5.4.1 น้ำกลั่น

1.5.4.2 น้ำกลั่นผสม Na_2HPO_4 (Sodium hydrogen phosphate) ด้วยระดับความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร (Na_2HPO_4 เป็นสารยับยั้งที่นิยมใช้ผสมลงในน้ำที่ป้อนเข้าหม้อไอน้ำเพื่อยับยั้งการกัดกร่อน)

1.5.4.3 น้ำกลั่นผสม Na_2HPO_4 ด้วยระดับความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร

1.5.5 การเคลือบผิวภายในท่อ แบ่งเป็น

1.5.5.1 ไม่มีการเคลือบผิวภายในท่อ

1.5.5.2 การทำให้ผิวท่อกลายเป็นออกไซด์ด้วยการเผาท่อที่อุณหภูมิ 550°C ในเวลา 1 ชั่วโมง

1.5.5.3 การทำให้ผิวท่อกลายเป็นออกไซด์ด้วยการเผาท่อที่อุณหภูมิ 550°C ในเวลา 2 ชั่วโมง