

บทที่ 4

ผลการทดสอบและวิจารณ์ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบจะกล่าวถึงลักษณะการกัดกร่อนของเทอร์โมไซฟอน การสะสมก๊าซไฮโดรเจน ภายในท่อเทอร์โมไซฟอน และค่าความต้านทานการถ่ายเทความร้อนรวมของเทอร์โมไซฟอนตามลำดับ โดยสามารถอธิบายผลการทดสอบได้ตามหัวข้อดังต่อไปนี้

4.1 ลักษณะการกัดกร่อนของเทอร์โมไซฟอน

ลักษณะการกัดกร่อนจะเป็นผลจากหลายปัจจัยเช่น เวลาที่ทำการทดสอบ อุณหภูมิการใช้งาน วิธีการป้องกันการกัดกร่อนของเทอร์โมไซฟอน และวัสดุที่ใช้ทำเทอร์โมไซฟอน ซึ่งสามารถศึกษาได้จาก น้ำหนักของท่อที่หายไปหลังการทดสอบ กล้องจุลทรรศน์ เครื่อง X-ray diffractometer (XRD) และเครื่อง Infra-red spectroscopy (IR) ดังต่อไปนี้

4.1.1 อัตราการกัดกร่อนเฉลี่ย

ข้อมูลอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยที่ได้จากการทดลองมีมากมายตามชนิดโลหะ และวิธีการป้องกันการกัดกร่อน แต่เนื่องจากข้อมูลส่วนใหญ่มีลักษณะคล้ายคลึงกัน เพื่อเป็นตัวอย่างในการวิเคราะห์ข้อมูลในที่นี้จึงทำการเลือกชุดข้อมูลตัวอย่างของเทอร์โมไซฟอนที่เป็นท่อเหล็กที่เผาเป็นเวลา 2 ชั่วโมง และสารทำงานเป็นน้ำผสม Na_2HPO_4 ความเข้มข้น 20 ppm เพราะเป็นชุดข้อมูลที่มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยที่สุด (0.7060 mil/year) โดยข้อมูลดังกล่าวเป็นข้อมูลการทดลองที่อุณหภูมิการใช้งาน 150°C 250°C และ 350°C และมีระยะเวลาการทดสอบ 1000, 2500 และ 4000 ชั่วโมง ตามลำดับ ซึ่งอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยที่เวลาต่างๆ ได้แสดงไว้ในรูป 4.1 เพื่อที่จะประยุกต์ใช้แบบจำลองอาร์เร็นเนียส (Arrhenius model) ในการวิเคราะห์ข้อมูลจึงได้ทำการสร้าง Universal curve ของอัตราการกัดกร่อนนี้ โดยปรับค่าข้อมูลในรูป 4.1 เทียบกับสัดส่วนเวลาแล้วนำมาเขียนกราฟใหม่ดังรูป 4.2 ซึ่งเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยและผลคูณระหว่างเวลากับตัวคูณเลื่อนค่า (Shift factor, $F(T)$) ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงตามสมการต่อไปนี้

$$\text{Cr} = 298.15(t \cdot F(T))^{-0.6062} \dots\dots\dots(4.1)$$

โดยที่ Cr คือ อัตราการกัดกร่อนเฉลี่ย

t คือ เวลาการทดสอบ

T คือ อุณหภูมิการใช้งาน

จากรูป 4.2 จะสามารถสร้างแผนภาพอาร์เร็นท์เนียสซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างตัวคูณเลื่อนค่ากับเศษส่วนกลับของอุณหภูมิใช้งานได้ตามรูป 4.3 ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงตามสมการ

$$F(T) = 0.7802e^{(172.52/T)} \dots\dots\dots(4.2)$$

แทนค่า (4.2) ใน (4.1) จะได้ความสัมพันธ์ของอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยกับเศษส่วนกลับของอุณหภูมิเป็น

$$Cr = 298.15(t \cdot 0.7802e^{(172.52/T)} - 0.6062) \dots\dots\dots(4.3)$$

ข้อมูลทั้งหมดในส่วนของอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ย อัตราการกัดกร่อนสูงสุด และปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นจะวิเคราะห์ในแนวทางนี้ทั้งหมด

4.1.1.1 ผลของเวลาที่ทำมาทดสอบ

จากชุดข้อมูลตัวอย่างในหัวข้อ 4.1.1 ได้ทำการเลือกชุดข้อมูลเฉพาะที่ 150°C และแสดงความสัมพันธ์ผลของเวลาทำการทดสอบที่มีต่อค่าอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยที่อุณหภูมิใช้งานนี้ ได้ผลตามรูป 4.4 ซึ่งจะเป็นความสัมพันธ์ของฟังก์ชันยกกำลัง (Power function) ตามสมการ

$$Cr = 301.64t^{(-0.6062)} \dots\dots\dots(4.4)$$

สัมประสิทธิ์ของสมการนี้ (คือค่า 301.64) จะแสดงถึงอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยที่เวลาทดสอบ 1 ชั่วโมง ในหน่วย mil/year และส่วนยกกำลัง (คือค่า 0.6062) จะแสดงถึงอัตราการลดลงของอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยที่จะมีค่าคงที่สำหรับเทอร์โมไซฟอนแต่ละประเภท ในหน่วย mil/year/hrs จากรูปจะเห็นว่าอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยลดลงอย่างต่อเนื่อง เพราะเทอร์โมไซฟอนเป็นระบบปิด ทำให้ปริมาณออกซิเจนที่จะเข้าทำปฏิกิริยาในการเกิดการกัดกร่อนมีปริมาณน้อยลง และเมื่อคำนวณจากสมการนี้พบว่า หากเวลาผ่านไป 281419 ชั่วโมง จะยังคงมีความหนาที่เหลืออยู่ (1.13 mm) มากกว่าความหนาที่น้อยที่สุดที่จะทนความดันทำงานที่อุณหภูมินี้ได้ โอกาสเกิด

ความเสียหายจึงน้อยมาก หากพิจารณาให้ละเอียดจากสมการ (4.4) จะพบว่ารูปทั่วไป (General form) คือ

$$Cr = At^B \dots\dots\dots(45)$$

แล้วจะสามารถแสดงค่าสัมประสิทธิ์ (A) และส่วนยกกำลัง (B) ของโลหะชนิดต่างๆ และวิธีการป้องกันแต่ละชนิด ได้ตามตาราง ก1 ซึ่งรวมผลการทดลองทั้งหมดไว้

เมื่อเทียบกับผลการทดลองของ Nishchik et al. (1995) และ Xi and Pan (1994) ซึ่งพิจารณาระบบปิดของสแตนเลสและน้ำที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง และท่อความร้อนเหล็กกับ Naphthalene ที่อุณหภูมิ 430°C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง ตามลำดับ พบว่าอัตราการกัดกร่อนก็ลดลงในทำนองเดียวกับการทดลองนี้ โดยท่อความร้อนเหล็กกับ Naphthalene มีอัตราการกัดกร่อน 0.15 mil/year ซึ่งน้อยกว่าการทดลองนี้มาก เพราะ Naphthalene ทำปฏิกิริยากับเหล็กได้น้อยกว่าน้ำกลั่น

สรุปได้ว่าเวลาที่ทำกรทดสอบมีผลกับอัตราการกัดกร่อนเฉื่อยนั้นคือ ที่เวลาการทดสอบมากขึ้น อัตราการกัดกร่อนเฉื่อยจะมีค่าลดลงเรื่อยๆ ซึ่งจะเป็นจริงสำหรับเทอร์โมไซฟอนทั้งหมดที่ใช้ในการทดสอบ โดยสำหรับเทอร์โมไซฟอนที่ทำจากท่อเหล็ก ซึ่งได้รับการป้องกันการกัดกร่อนด้วยการเผาท่อเป็นเวลา 2 ชั่วโมง และเติม Na_2HPO_4 ลงในสารทำงานที่ความเข้มข้น 20 ppm ที่อุณหภูมิการใช้งาน 150°C จะมีความสัมพันธ์ของค่าอัตราการกัดกร่อนเฉื่อยกับเวลาเป็น $Cr = 301.64t^{(-0.6062)}$

4.1.1.2 ผลของอุณหภูมิการใช้งาน

ในทำนองเดียวกับหัวข้อ 4.1.1.1 ผลของอุณหภูมิการใช้งานที่มีต่อค่าอัตราการกัดกร่อนเฉื่อย จะเป็นไปตามรูป 4.5 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกัดกร่อนเฉื่อยกับเศษส่วนกลับของอุณหภูมิใช้งานของเทอร์โมไซฟอนที่ทำจากท่อสแตนเลสที่ผิวภายในเป็นร่องและสารทำงานเป็นน้ำผสม Na_2HPO_4 ความเข้มข้น 20 ppm ที่ระยะเวลาการทดสอบ 1000 ชั่วโมง และความสัมพันธ์ที่ได้อยู่ในรูปฟังก์ชันชี้กำลัง (Exponential function) ตามสมการ

$$Cr = 30.783e^{(-2174.7/T)} \dots\dots\dots(46)$$

สัมประสิทธิ์ของสมการนี้ (คือค่า 30.783) จะแสดงถึงอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยสูงสุด ในหน่วย mil/year และส่วนยกกำลัง (คือค่า 2174.7) จะแสดงถึงค่าการลดลงของอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ย ซึ่งจะมีค่าคงที่สำหรับเทอร์โมโซฟอนแต่ละประเภท มีหน่วยเป็น mil-R/year จากรูปจะเห็นว่าอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยจะมีค่าน้อยลง เนื่องจากปฏิกิริยาการกัดกร่อนเป็นปฏิกิริยาเคมีและไฟฟ้าเคมีที่จะเกิดขึ้นน้อยลงตามอุณหภูมิที่ต่ำลง ซึ่งเมื่อคำนวณจากสมการจะพบว่า ที่อุณหภูมิ -46°C ค่าอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยจึงจะมีค่าน้อยมาก (0.15 mil/year) แสดงว่าการใช้งานเทอร์โมโซฟอนในการอุ่นอากาศหรือน้ำป้อนเข้าสู่หม้อไอน้ำทั่วๆ ไป ยังคงมีอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยมากเสมอ หากพิจารณาสมการ (4.6) ในรูปทั่วไปคือ

$$Cr = Ce^{D/T} \dots\dots\dots (4.7)$$

แล้วจะสามารถแสดงค่าสัมประสิทธิ์ (C) และส่วนยกกำลัง (D) ของโลหะชนิดต่างๆ และวิธีการป้องกันแต่ละชนิด ได้ตามตาราง ก1 ซึ่งรวมผลการทดลองทั้งหมดไว้

จากงานวิจัยของ Mou et al. (1990) และ Nishchik et al. (1995) ซึ่งพิจารณาต่อความร้อนเหล็กกับน้ำและระบบปิดของโลหะสแตนเลสกับน้ำ ตามลำดับ พบว่าการกัดกร่อนส่วนใหญ่เกิดจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีและที่อุณหภูมิสูงขึ้นการกัดกร่อนจะรุนแรงมากขึ้นหรือมีอัตราการกัดกร่อนที่สูง ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้นี้

สรุปได้ว่าอุณหภูมิการใช้งานมีผลต่อค่าอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยนั้นคือ เมื่ออุณหภูมิการใช้งานมีค่าต่ำลง อัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยจะมีค่าลดลงด้วย ซึ่งจะเป็นจริงสำหรับเทอร์โมโซฟอนทั้งหมดที่ใช้ในการทดสอบ โดยที่ความสัมพันธ์ของค่าอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยกับส่วนกลับของอุณหภูมิการใช้งานสำหรับเทอร์โมโซฟอนที่ทำจากท่อสแตนเลสที่ผิวภายในเป็นร่อง ซึ่งได้รับการป้องกันการกัดกร่อนด้วยการเติม Na_2HPO_4 ลงในสารทำงาน 20 ppm ที่ระยะเวลาการทดสอบ 1000 ชั่วโมง คือ $Cr = 30.783e^{(-2174.7/T)}$

4.1.1.3 ผลของวิธีการป้องกันการกัดกร่อน

จากรูป 4.6 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยและวิธีการป้องกันการกัดกร่อนของเทอร์โมโซฟอนที่ทำจากท่อทองแดง ที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ กัน จะเห็นว่าข้อมูลส่วนใหญ่ดูคล้ายคลึงกัน ในที่นี้จึงเลือกข้อมูลตัวอย่างที่อุณหภูมิการใช้งาน 250°C และเวลาการทดสอบ 1000 ชั่วโมง เพราะเป็นชุดข้อมูลที่เห็นความแตกต่างชัดเจนที่สุด ซึ่งพบว่าอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยของเทอร์โมโซฟอนที่ได้รับการป้องกันการกัดกร่อนด้วยวิธีที่ 2 และ 4 จะไม่

แตกต่างจากเทอร์โมไซฟอนที่ไม่ได้รับการป้องกันการกัดกร่อน ส่วนเทอร์โมไซฟอนที่ได้รับการป้องกันการกัดกร่อนด้วยวิธีที่ 3, 5, 6, 7, 8, 9 จะมีค่าอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยต่ำกว่าของเทอร์โมไซฟอนที่ไม่ได้รับการป้องกันการกัดกร่อนเท่ากับ 1.37, 0.79, 2.45, 0.90, 1.83, 0.30 mil/year ตามลำดับ ดังนั้นเทอร์โมไซฟอนที่ได้รับการป้องกันการกัดกร่อนด้วยวิธีที่ 6 จะมีค่าอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยต่ำกว่าเทอร์โมไซฟอนที่ไม่ได้รับการป้องกันการกัดกร่อนมากที่สุดเท่ากับ 2.45 mil/year แสดงว่าวิธีการป้องกันการกัดกร่อนที่เหมาะสมที่สุดคือ วิธีที่ 6

สำหรับการวิเคราะห์เกี่ยวกับวิธีการป้องกันการกัดกร่อนและวัสดุที่ใช้ทำเทอร์โมไซฟอน ในส่วนข้อมูลอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ย อัตราการกัดกร่อนสูงสุด และปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้น ก็จะใช้แนวทางนี้ในการวิเคราะห์ทั้งหมด

ดังนั้นจึงพบว่าเทอร์โมไซฟอนที่ทำจากท่อเหล็กและท่อสเตนเลสที่ผิวภายในเป็นร่อง เมื่อได้รับการป้องกันการกัดกร่อนด้วยวิธีที่ 5 และ 3 จะมีค่าอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยต่ำกว่าเทอร์โมไซฟอนที่ไม่ได้รับการป้องกันการกัดกร่อนมากที่สุดเท่ากับ 0.83 และ 4.50 mil/year ตามลำดับ แสดงว่าวิธีการป้องกันการกัดกร่อนที่เหมาะสมสำหรับท่อเหล็กและท่อสเตนเลสที่ผิวภายในเป็นร่องคือวิธีที่ 5 และ 3 ตามลำดับ ส่วนเทอร์โมไซฟอนที่ทำจากท่อทองแดงที่ผิวภายในเป็นร่องไม่ว่าจะได้รับการป้องกันการกัดกร่อนด้วยวิธีใด ก็ยังมีค่าอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยสูงกว่าเทอร์โมไซฟอนที่ไม่ได้รับการป้องกันการกัดกร่อน แสดงว่าไม่มีวิธีใดช่วยลดอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยลงได้ สำหรับเทอร์โมไซฟอนที่ทำจากท่ออะลูมิเนียมเนื่องจากอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยของแต่ละวิธีมีค่าไม่แตกต่างกัน จึงไม่สามารถสรุปได้ว่าวิธีใดเหมาะสมที่สุด

จากงานวิจัยของ Mou et al. (1990), Nishchik et al. (1995), Barantsevich and Barkova (1995) และ Novotna et al. (1994) ซึ่งทำการศึกษาท่อความร้อนเหล็กและน้ำที่อุณหภูมิ 100°C ท่อความร้อนอะลูมิเนียมกับแอมโมเนีย และท่อความร้อนเหล็กกับน้ำที่อุณหภูมิ 200°C เป็นเวลา 6000 ชั่วโมง ตามลำดับ พบว่าการเคลือบผิวภายในท่อและเติมสารยับยั้งลงในสารทำงานจะช่วยลดการเกิดการกัดกร่อนลงได้เช่นเดียวกับการทดลองนี้ โดยที่สารยับยั้งที่ดีที่สุดในการต้านทานการกัดกร่อนของท่อความร้อนอะลูมิเนียมกับแอมโมเนียคือ Ammonia nitrate (NH_4NO_3) และวิธีการป้องกันการกัดกร่อนที่ดีที่สุดสำหรับท่อความร้อนเหล็กกับน้ำคือการเติมสารยับยั้ง Potassium chromate (K_2CrO_4) ลงในสารทำงานในอัตราส่วน 5 กรัมต่อน้ำ 1 ลิตร ร่วมกับการเคลือบผิวภายในท่อด้วย Magnetite (Fe_3O_4) ซึ่งจะตรงกับทดลองที่ได้จากเทอร์โมไซฟอนเหล็กกับน้ำ แต่สารยับยั้งและสารที่เคลือบผิวภายในท่อจะเป็น Na_2HPO_4 และออกไซด์ (OSO) แทน

จากที่กล่าวมาทั้งหมดสรุปได้ว่า วิธีการป้องกันการกัดกร่อนที่เหมาะสมที่สุดสำหรับท่อทองแดงและท่อเหล็กคือ การเผาท่อเป็นเวลา 1 ชั่วโมง และเติม Na_2HPO_4 ลงในสารทำงาน 20 และ 10 ppm ตามลำดับ และท่อสเตนเลสที่ผิวภายในเป็นร่องคือ การเติม Na_2HPO_4 ลงในสารทำงาน 20 ppm ส่วนท่อทองแดงที่ผิวภายในเป็นร่องพบว่าไม่มีวิธีใดช่วยลดการกัดกร่อนลงได้ สำหรับท่ออะลูมิเนียมนั้นไม่สามารถสรุปได้ว่าวิธีใดเหมาะสมที่สุด

4.1.1.4 ผลของวัสดุที่ใช้ทำเทอร์โมไซฟอน

จากการวิเคราะห์ในแบบเดียวกับวิธีการป้องกันการกัดกร่อน พบว่าเทอร์โมไซฟอนที่ได้รับการป้องกันการกัดกร่อนด้วยวิธีที่ 1 และ 9 เมื่อทำจากท่อทองแดงที่ผิวภายในเป็นร่องจะมีค่าอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยต่ำสุดเท่ากับ 2.30 ± 0.38 mil/year แสดงว่าวัสดุที่เหมาะสมสำหรับใช้ทำเทอร์โมไซฟอนคือท่อทองแดงที่ผิวภายในเป็นร่อง ส่วนเทอร์โมไซฟอนที่ได้รับการป้องกันด้วยวิธีที่ 3 และ 7 เมื่อทำจากท่อทองแดงจะมีค่าอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยต่ำสุดเท่ากับ 2.31 ± 0.79 mil/year แสดงว่าวัสดุที่เหมาะสมคือท่อทองแดง

จากงานวิจัยของ Kojima and Murakami (1990) เป็นการศึกษาท่อความร้อนที่ทำจากท่อทองแดง 2 ชนิด คือ Phosphorous deoxidized copper และ Oxygen-free copper ที่ผิวในของท่อเป็นร่องตามแนวยาวและมีน้ำเป็นสารทำงาน ที่อุณหภูมิ 160° เป็นเวลา 3600 ชั่วโมง พบว่าท่อทองแดงที่ทำจาก Oxygen-free copper จะเกิดการกัดกร่อนน้อยกว่า จะเห็นว่าการศึกษาเฉพาะท่อทองแดง 2 ชนิดเท่านั้น การทดลองนี้จึงเพิ่มเติมในส่วนวัสดุอื่นๆ ขึ้นมา

สรุปได้ว่าวัสดุที่เหมาะสมสำหรับใช้ทำเทอร์โมไซฟอนซึ่งไม่ได้รับการป้องกันการกัดกร่อนหรือได้รับการป้องกันการกัดกร่อนด้วยการเผาท่อเป็นเวลา 2 ชั่วโมงและเติม Na_2HPO_4 ลงในสารทำงาน 20 ppm คือ ท่อทองแดงที่ผิวภายในเป็นร่อง ส่วนวัสดุที่เหมาะสมสำหรับใช้ทำเทอร์โมไซฟอนซึ่งได้รับการป้องกันการกัดกร่อนด้วยการเผาท่อเป็นเวลา 2 ชั่วโมงหรือเติม Na_2HPO_4 ลงในสารทำงาน 20 ppm นั้นคือ ท่อทองแดง

4.1.2 อัตราการกัดกร่อนสูงสุด

เนื่องจากลักษณะการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นกับเทอร์โมไซฟอนที่ใช้ในการทดสอบจะเป็นแบบ Pitting คล้ายกันหมด ดังรูป 4.7 ซึ่งเป็นเทอร์โมไซฟอนที่เห็นรูปแบบการกัดกร่อนชัดเจนที่สุด โดยจะมีลักษณะเป็นร่องลึกเข้าไปในเนื้อโลหะและมีผลทำให้วัสดุเกิดการเสียหายได้ง่าย จึงจำเป็นต้องทราบค่าความลึกของร่องสูงสุดซึ่งวัดได้จากภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์ของภาคตัดขวางของเทอร์โมไซฟอน โดยที่รายละเอียดของวิธีการวัดจะแสดงไว้ในภาคผนวก ข จากค่าความลึกของร่องสูงสุดนำมาคำนวณค่าอัตราการกัดกร่อนสูงสุดซึ่งมีอยู่มากมายตามชนิดของโลหะและวิธีการ

ป้องกันการกัดกร่อน ในทำนองเดียวกับหัวข้อ 4.1.1 จึงเลือกชุดข้อมูลตัวอย่างของเทอร์โมไซฟอนที่เป็นท่อเหล็กที่เผาเป็นเวลา 2 ชั่วโมง และสารทำงานเป็นน้ำผสม Na_2HPO_4 ความเข้มข้น 20 ppm ซึ่งมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยที่สุด (21.6804 mil/year) โดยมีการใช้แบบจำลองอาร์เรนท์เนียสกับข้อมูลเหล่านี้เช่นเดียวกับข้อมูลอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยและได้ความสัมพันธ์ของอัตราการกัดกร่อนสูงสุดกับผลคูณระหว่างเวลากับตัวคูณเลื่อนค่าเป็นเส้นตรงตามสมการ

$$Cr_{\max} = 45573(t \cdot F(T))^{-0.9682} \dots\dots\dots(4.8)$$

โดยที่ $Cr_{\max}$ คือ อัตราการกัดกร่อนสูงสุด และตัวคูณเลื่อนค่าจะมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงกับเศษส่วนกลับของอุณหภูมิใช้งานดังสมการ

$$F(T) = 0.0611e^{(2055.2/T)} \dots\dots\dots(4.9)$$

แทนค่า (4.9) ใน (4.8) จะได้ความสัมพันธ์ของอัตราการกัดกร่อนสูงสุดกับเศษส่วนกลับของอุณหภูมิเป็น

$$Cr_{\max} = 45573 \cdot (t \cdot 0.0611e^{(2055.2/T)})^{-0.9682} \dots\dots\dots(4.10)$$

4.1.2.1 ผลของเวลาทำการทดสอบ

ความสัมพันธ์ผลของเวลาการทดสอบที่มีต่อค่าอัตราการกัดกร่อนสูงสุด ที่อุณหภูมิใช้งาน 250°C จะเป็นดังรูป 4.8 ซึ่งมีความสัมพันธ์เป็น Power function ตามสมการ

$$Cr_{\max} = 88474t^{(-0.9682)} \dots\dots\dots(4.11)$$

สัมประสิทธิ์ของสมการนี้ (คือค่า 88474) แสดงถึงอัตราการกัดกร่อนสูงสุดที่เวลาทดสอบ 1 ชั่วโมง ในหน่วย mil/year และส่วนยกกำลัง (คือค่า 0.9682) จะแสดงถึงอัตราการลดลงของอัตราการกัดกร่อนสูงสุด โดยจะมีค่าคงที่สำหรับเทอร์โมไซฟอนแต่ละประเภท ในหน่วย mil/year/hrs จากรูปจะเห็นว่าอัตราการกัดกร่อนสูงสุดลดลงอย่างต่อเนื่อง ด้วยเหตุผลเดียวกับอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ย และเมื่อคำนวณจากสมการจะพบว่า ที่เวลาผ่านไป 912558 ชั่วโมง จะยังคงมีความหนาที่เหลืออยู่

(0.85 mm) มากกว่าความหนาที่น้อยที่สุดที่จะทนความดันทำงานที่อุณหภูมินี้ได้ โอกาสเกิดความเสียหายจึงน้อยมาก หากพิจารณาสมการ (4.11) ในรูปทั่วไปคือ

$$Cr_{max} = At^B \dots\dots\dots(4.12)$$

แล้วจะสามารถแสดงค่าสัมประสิทธิ์ (A) และส่วนยกกำลัง (B) ของโลหะชนิดต่างๆ และวิธีการป้องกันแต่ละชนิด ได้ตามตาราง ก1 ซึ่งรวมผลการทดลองทั้งหมดไว้

เมื่อคำนวณจากสมการ (4.4) และ (4.11) พบว่าที่เวลาการทดสอบใดๆ อัตราการกัดกร่อนสูงสุดจะมีค่ามากกว่าอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยเสมอ เนื่องจากการกัดกร่อนแบบ Pitting ซึ่งมีลักษณะเป็นร่องลึกเข้าไปในเนื้อโลหะจะเกิดขึ้นเป็นจุดๆ เฉพาะตำแหน่งเท่านั้น ทำให้น้ำหนักหายไปน้อย

เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Kojima and Murakami (1990) ซึ่งพิจารณาต่อความร้อนของแสงกับน้ำที่อุณหภูมิ 160°C พบว่าที่ระยะเวลาการทดสอบยาวนานขึ้น จะมีการกัดกร่อนเพิ่มมากขึ้นเช่นเดียวกับการทดลองนี้ แต่เป็นเพียงการสังเกตลักษณะผิวภายในท่อจากกล้องจุลทรรศน์เท่านั้น ไม่ได้ทำการวิเคราะห์เชิงปริมาณออกมาดังเช่นที่ทำขึ้นในการทดลองนี้

สรุปได้ว่าเวลาที่ทำการทดสอบมีผลกับอัตราการกัดกร่อนสูงสุดนั่นคือ ที่เวลาการทดสอบมากขึ้น อัตราการกัดกร่อนสูงสุดจะมีค่าลดลงเรื่อยๆ ซึ่งจะเป็นจริงสำหรับเทอร์โมไซฟอนทั้งหมดที่ใช้ในการทดสอบ โดยสำหรับเทอร์โมไซฟอนที่ทำจากท่อเหล็ก ซึ่งได้รับการป้องกันการกัดกร่อนด้วยการเผาไหม้เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และเติม Na_2HPO_4 ลงในสารทำงานที่ความเข้มข้น 20 ppm ที่อุณหภูมิการใช้งาน 250°C จะมีความสัมพันธ์ของค่าอัตราการกัดกร่อนสูงสุดกับเวลาเป็น $Cr_{max} = 88474t^{(-0.9682)}$

4.1.2.2 ผลของอุณหภูมิการใช้งาน

จะเห็นว่ารูป 4.9 แสดงความสัมพันธ์ผลของอุณหภูมิการใช้งานที่มีต่อค่าอัตราการกัดกร่อนสูงสุดของเทอร์โมไซฟอนที่ทำจากท่อสเตนเลสที่ผิวภายในเป็นร่องและสารทำงานเป็นน้ำผสม Na_2HPO_4 ความเข้มข้น 20 ppm ที่ระยะเวลาการทดสอบ 1000 ชั่วโมง ซึ่งจะมีความสัมพันธ์เป็น Exponential function ตามสมการ

$$Cr_{max} = 500.33e^{(-3067.3/T)} \dots\dots\dots(4.13)$$

สัมประสิทธิ์ของสมการ (คือค่า 500.33) จะแสดงถึงค่ามากที่สุดของอัตราการกัดกร่อนสูงสุดในหน่วย mil/year และส่วนยกกำลัง (คือค่า 3067.3) จะแสดงถึงค่าการลดลงของอัตราการกัดกร่อนสูงสุด โดยจะมีค่าคงที่สำหรับเทอร์โมไซฟอนแต่ละประเภท มีหน่วยเป็น mil-R/year จากรูปจะเห็นว่าอัตราการกัดกร่อนสูงสุดจะมีค่าลดลง เนื่องจากสาเหตุเดียวกับอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ย ซึ่งเมื่อคำนวณจากสมการจะพบว่า ที่อุณหภูมิ -63°C ค่าอัตราการกัดกร่อนสูงสุดจึงจะมีค่าน้อยมาก (0.15 mil/year) แสดงว่าการใช้งานเทอร์โมไซฟอนทั่วๆ ไป ยังคงมีอัตราการกัดกร่อนสูงสุดมากเสมอ หากพิจารณาสมการ (4.13) ในรูปทั่วไปคือ

$$Cr_{\max} = Ce^{D/T} \dots\dots\dots (4.14)$$

แล้วจะสามารถแสดงค่าสัมประสิทธิ์ (C) และส่วนยกกำลัง (D) ของโลหะชนิดต่างๆ และวิธีการป้องกันแต่ละชนิด ได้ตามตาราง ก1 ซึ่งรวมผลการทดลองทั้งหมดไว้

เมื่อคำนวณจากสมการ (4.6) และ (4.13) พบว่าที่อุณหภูมิใช้งานใดๆ อัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยจะมีค่าต่ำกว่าอัตราการกัดกร่อนสูงสุดเสมอ แสดงว่าไม่ว่าจะใช้งานที่อุณหภูมิใดก็ตามการกัดกร่อนแบบ Pitting ก็ยังคงเกิดขึ้นเฉพาะตำแหน่งเท่านั้น ไม่ทั่วพื้นผิวของโลหะ

จากงานวิจัยของ Mou et al. (1990) และ Nishchik et al. (1995) พบว่าที่อุณหภูมิสูงขึ้นการกัดกร่อนจะรุนแรงมากขึ้นเช่นเดียวกับการทดลองนี้ ทำให้อัตราการกัดกร่อนสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้น

สรุปได้ว่าอุณหภูมิการใช้งานมีผลต่ออัตราการกัดกร่อนสูงสุด นั่นคือ เมื่ออุณหภูมิการใช้งานมีค่าต่ำลง อัตราการกัดกร่อนสูงสุดจะมีค่าลดลง ซึ่งจะเป็นจริงสำหรับเทอร์โมไซฟอนทั้งหมดที่ใช้ในการทดสอบ โดยที่ความสัมพันธ์ของค่าอัตราการกัดกร่อนสูงสุดกับส่วนกลับของอุณหภูมิการใช้งานสำหรับเทอร์โมไซฟอนที่ทำจากท่อสแตนเลสที่ผิวภายในเป็นร่อง ซึ่งได้รับการป้องกันการกัดกร่อนด้วยการเติม Na_2HPO_4 ลงในสารทำงาน 20 ppm ที่ระยะเวลาการทดสอบ 1000 ชั่วโมง คือ $Cr_{\max} = 500.33e^{(-3067.3/T)}$

4.1.2.3 ผลของวิธีการป้องกันการกัดกร่อน

จากการวิเคราะห์ในแบบเดียวกับอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ย พบว่าเทอร์โมไซฟอนที่ทำจากท่อทองแดง ท่อเหล็ก ท่อทองแดงที่ผิวภายในเป็นร่อง และท่อสแตนเลสที่ผิวภายในเป็นร่อง เมื่อได้รับการป้องกันการกัดกร่อนด้วยวิธีที่ 6, 4, 7 และ 3 ตามลำดับ จะมีค่าอัตราการกัดกร่อนสูงสุดต่ำกว่าเทอร์โมไซฟอนที่ไม่ได้รับการป้องกันมากที่สุดเท่ากับ 6.01, 0.02, 18.1 และ

29.12 mil/year ตามลำดับ แสดงว่าวิธีการป้องกันการกัดกร่อนที่เหมาะสมสำหรับท่อทองแดงท่อเหล็ก ท่อทองแดงที่ผิวภายในเป็นร่อง และท่อสเตนเลสที่ผิวภายในเป็นร่อง คือ วิธีที่ 6, 4, 7 และ 3 ตามลำดับ สำหรับเทอร์โมไซฟอนที่ทำจากท่ออะลูมิเนียม นั้น เนื่องจากอัตราการกัดกร่อนสูงสุดของแต่ละวิธีมีค่าไม่แตกต่างกัน จึงไม่สามารถสรุปได้ว่าวิธีใดเหมาะสมที่สุด

จากงานวิจัยของ Barantsevich and Barkova (1995) ซึ่งพิจารณาท่ออะลูมิเนียมกับแอมโมเนีย พบว่าสารยับยั้งที่ดีที่สุดคือ Ammonia nitrate โดยจะมีค่าความลึกของร่องต่ำสุดเท่ากับ 0.032 มิลลิเมตร ซึ่งน้อยกว่าเทอร์โมไซฟอนอะลูมิเนียมกับน้ำในการทดลองนี้มาก เพราะน้ำทำปฏิกิริยาการกัดกร่อนกับอะลูมิเนียมได้ดีกว่าแอมโมเนีย ดังนั้นในการทดลองนี้จึงทำการค้นคว้าหาวิธีการป้องกันการกัดกร่อนของเทอร์โมไซฟอนที่ทำจากวัสดุชนิดต่างๆ กับน้ำขึ้นมา

จากที่กล่าวมาสรุปได้ว่า วิธีการป้องกันการกัดกร่อนที่เหมาะสมที่สุดสำหรับท่อทองแดงคือ การเผาท่อเป็นเวลา 1 ชั่วโมง และเติม Na_2HPO_4 ลงในสารทำงาน 20 ppm ท่อเหล็กและท่อทองแดงที่ผิวภายในเป็นร่องคือ การเผาท่อเป็นเวลา 1 และ 2 ชั่วโมง ตามลำดับ ส่วนท่อสเตนเลสที่ผิวภายในเป็นร่องคือ การเติม Na_2HPO_4 ลงในสารทำงาน 20 ppm สำหรับท่ออะลูมิเนียม นั้นไม่สามารถสรุปได้ว่าวิธีใดเหมาะสมที่สุด

4.1.1.4 ผลของวัสดุที่ใช้ทำเทอร์โมไซฟอน

จากแนวทางการวิเคราะห์เช่นเดียวกับข้อมูลอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ย พบว่าเทอร์โมไซฟอนที่ได้รับการป้องกันการกัดกร่อนด้วยวิธีที่ 1 และ 7 เมื่อทำจากท่อทองแดงที่ผิวภายในเป็นร่องจะมีค่าอัตราการกัดกร่อนสูงสุดต่ำที่สุดเท่ากับ 20.07 ± 10.15 mil/year แสดงว่าวัสดุที่เหมาะสมสำหรับใช้ทำเทอร์โมไซฟอนคือท่อทองแดงที่ผิวภายในเป็นร่อง ส่วนเทอร์โมไซฟอนที่ได้รับการป้องกันด้วยวิธีที่ 3 และ 9 เมื่อทำจากท่อสเตนเลสที่ผิวภายในเป็นร่องจะมีค่าอัตราการกัดกร่อนสูงสุดต่ำสุดเท่ากับ 8.59 ± 1.92 mil/year แสดงว่าวัสดุที่เหมาะสมคือท่อสเตนเลสที่ผิวภายในเป็นร่อง

จากงานวิจัยของ Kojima and Murakami (1990) เป็นการเปรียบเทียบการกัดกร่อนภายในท่อความร้อนที่ทำจากท่อทองแดง 2 ชนิดเท่านั้นซึ่งมีน้ำเป็นสารทำงาน ดังนั้นในการทดลองนี้จึงเป็นการศึกษาวัสดุชนิดอื่นๆ ที่เหมาะสมสำหรับใช้ทำเทอร์โมไซฟอน โดยทำการศึกษาจากค่าอัตราการกัดกร่อนสูงสุด

สรุปได้ว่าวัสดุที่เหมาะสมสำหรับใช้ทำเทอร์โมไซฟอนซึ่งไม่ได้รับการป้องกันการกัดกร่อนหรือได้รับการป้องกันการกัดกร่อนด้วยการเผาท่อเป็นเวลา 2 ชั่วโมง คือ ท่อทองแดงที่

ผิวภายในเป็นร่อง ส่วนวัสดุที่เหมาะสมสำหรับใช้ทำเทอร์โมไซฟอนซึ่งได้รับการป้องกันการกัดกร่อนด้วยการเผาไหม้เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และเติม Na_2HPO_4 ลงในสารทำงาน 20 ppm หรือเติม Na_2HPO_4 ลงในสารทำงาน 20 ppm เพียงอย่างเดียว นั่นคือ ท่อสเตนเลสที่ผิวภายในเป็นร่อง

จากที่กล่าวมาทั้งหมดจะเห็นว่าแนวทางการเลือกวิธีการป้องกันการกัดกร่อนที่เหมาะสมกับวัสดุแต่ละชนิดหรือการเลือกใช้วัสดุที่จะทำเป็นท่อเทอร์โมไซฟอน จะพิจารณาจากค่าอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยและค่าอัตราการกัดกร่อนสูงสุดเมื่อคำนึงถึงความเสี่ยงที่จะเกิดกับท่อเทอร์โมไซฟอน โดยในที่นี่แล้วแต่ความสะดวกของผู้ใช้งานว่าต้องการใช้ค่าไหนเป็นเกณฑ์การตัดสินใจ แต่จะสังเกตได้ว่าถ้าความหนาของท่อเล็ก ก็ควรจะใช้อัตราการกัดกร่อนสูงสุดเป็นเกณฑ์เนื่องจากท่อบางจะมีโอกาสเกิดการเสียหายจากการกัดกร่อนแบบเป็นร่องลึกเข้าไปในเนื้อโลหะได้ง่าย อย่างเช่นเทอร์โมไซฟอนที่เป็นท่อเหล็กที่ได้รับการเผาเป็นเวลา 1 ชั่วโมง และสารทำงานเป็นน้ำผสม Na_2HPO_4 ความเข้มข้น 10 ppm ที่อุณหภูมิการใช้งาน 250°C ถ้าสมมุติว่าเหล็กมีความหนาอย่างน้อย (0.6 mm) จะพบว่าที่เวลาการทดสอบ 4000 ชั่วโมง ความหนาที่เหลือน้อยจากการพิจารณาค่าอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยและอัตราการกัดกร่อนสูงสุดจะเป็น 0.59 และ 0.29 มิลลิเมตรตามลำดับ ดังนั้นถ้าพิจารณาจากค่าอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยจะพบว่าความหนาที่เหลือยังคงทนต่อความดันทำงานที่อุณหภูมินี้ได้ ทั้งที่จริงแล้วท่ออาจเกิดการเสียหายไปแล้ว เนื่องจากการกัดกร่อนแบบ Pitting ทำให้ความหนาท่อลดลงอย่างมาก

4.1.3 สารที่เคลือบบนผิวภายในท่อเทอร์โมไซฟอน

จากการตรวจวิเคราะห์สารด้วยเครื่อง XRD และ เครื่อง IR สามารถแยกพิจารณาได้เป็น 3 กลุ่มดังนี้

4.1.3.1 เทอร์โมไซฟอนที่ทำจากท่ออะลูมิเนียม

จากการวิเคราะห์สารด้วยเครื่อง XRD จะพบว่าสารที่เคลือบบนผิวภายในท่ออะลูมิเนียมทั้งที่เป็นท่อใหม่และท่อที่ผ่านการทดสอบที่ได้รับการป้องกันการกัดกร่อนด้วยวิธีต่างๆ จะเป็น $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ เสมอ เนื่องจากในการวิเคราะห์นั้นจะใช้วิธียิงรังสีเอกซ์ไปบนแผ่นโลหะโดยจะต้องยิงลึกเข้าไปในผิวโลหะอย่างต่ำ 1 ไมโครเมตร ถ้าสารที่เกิดจากปฏิกิริยาการกัดกร่อนบนผิวภายในท่อมีความหนาน้อยกว่า 1 ไมโครเมตร ก็จะทำให้สารที่ตรวจพบในท่อใหม่และท่อที่ผ่านการทดสอบออกมาเหมือนกันได้ ส่วนการวิเคราะห์สารด้วยเครื่อง IR พบว่าสารที่เคลือบบนผิวภายในท่อที่ผ่านการทดสอบที่ได้รับการป้องกันการกัดกร่อนด้วยวิธีใดๆ จะเป็น O-H, SiO, OSiO ในขณะที่เมื่อนำท่อใหม่ไปตรวจสอบจะไม่พบสารใดเลย แสดงว่าสาร O-H, SiO,

OSiO ที่ตรวจพบจะเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างก๊าซออกซิเจน น้ำกลั่น และผนังท่ออะลูมิเนียมซึ่งมี Si เป็นส่วนประกอบ ไม่ได้เกิดจากปฏิกิริยาของ Na_2HPO_4 เลย

จากที่กล่าวมาทั้งหมดจะสรุปได้ว่า สารที่มากลือบบนผิวภายในเทอร์โมไซฟอนที่ทำจากท่ออะลูมิเนียม นั่นคือ O-H, SiO, OSiO โดยมีความหนาแน่นน้อยกว่า 1 ไมโครเมตร สำหรับการทดสอบที่ได้นี้เป็นผลการทดสอบใหม่ที่ทำขึ้นจึงไม่สามารถจะเปรียบเทียบกับผลงานของผู้อื่นได้แต่จะเสริมความเข้าใจในแง่มุมใหม่ขึ้นมา

4.1.3.2 เทอร์โมไซฟอนที่ทำจากท่อทองแดงและท่อทองแดงที่ผิวภายในเป็นร่อง

จากการวิเคราะห์สารด้วยเครื่อง XRD จะพบว่าสารที่เคลือบบนผิวภายในท่อทองแดงและท่อทองแดงที่ผิวภายในเป็นร่อง ทั้งที่เป็นท่อใหม่และท่อที่ผ่านการทดสอบที่ได้รับการป้องกันการกัดกร่อนด้วยวิธีต่างๆ จะเป็น $\text{Cu}_4\text{SO}_4(\text{OH})_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$ เหมือนกันหมด เพราะสารที่เกิดจากปฏิกิริยาการกัดกร่อนบนผิวภายในท่อมีความหนาแน่นน้อยกว่า 1 ไมโครเมตร สำหรับการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง IR พบว่าสารที่เคลือบบนผิวภายในท่อทองแดงและท่อทองแดงที่ผิวภายในเป็นร่องที่ผ่านการทดสอบและได้รับการป้องกันการกัดกร่อนด้วยวิธีใดๆ จะเป็น SO, OSO เหมือนกันหมด ในขณะที่เมื่อนำท่อทองแดงใหม่ไปตรวจสอบจะไม่พบสารใดเลย ส่วนท่อทองแดงที่ผิวภายในเป็นร่องใหม่จะพบสาร SO, OSO เช่นเดียวกัน แสดงว่าสาร SO, OSO ที่ตรวจพบบนผิวภายในท่อที่ผ่านการทดสอบเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างก๊าซออกซิเจน น้ำกลั่น และผนังท่อซึ่งมี S เป็นส่วนประกอบ ไม่ได้เกิดจากปฏิกิริยาของ Na_2HPO_4 เลย โดยจะยืนยันได้จากสาร SO, OSO ที่ตรวจได้จากท่อทองแดงที่ผิวภายในเป็นร่องใหม่ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างก๊าซออกซิเจนกับผนังท่อที่มี S เป็นส่วนประกอบ

จากงานวิจัยของ Kojima and Murakami (1990) ที่พิจารณาท่อความร้อนทองแดงและน้ำ พบว่าสารที่เกิดขึ้นภายในท่อจะเป็นสารอินทรีย์พวกพันธะ O-H, C-O-C, กลุ่มฟีนิล และวงแหวนเบนซีน ซึ่งจะแตกต่างจากการทดลองนี้ โดยสารที่เคลือบบนผิวภายในท่อจะเป็น SO และ OSO ซึ่งเป็นสารอนินทรีย์แทน เนื่องจากท่อทองแดงและท่อทองแดงที่ผิวภายในเป็นร่องใหม่ที่ใช้ทำเทอร์โมไซฟอนไม่มี C เป็นส่วนประกอบ

จากที่กล่าวมาทั้งหมดจะสรุปได้ว่าสารที่มากลือบบนผิวภายในเทอร์โมไซฟอนที่ทำจากท่อทองแดงและท่อทองแดงที่ผิวภายในเป็นร่องนั้นคือ SO, OSO โดยมีความหนาแน่นน้อยกว่า 1 ไมโครเมตร

4.1.3.3 เทอร์โมไซฟอนที่ทำจากท่อเหล็กและท่อสแตนเลสที่ผิวภายในเป็นร่อง

จากการวิเคราะห์สารด้วยเครื่อง XRD จะพบว่าสารที่เคลือบบนผิวภายในท่อเหล็กและท่อสแตนเลสที่ผิวภายในเป็นร่อง ทั้งที่เป็นท่อใหม่และท่อที่ผ่านการทดสอบที่ได้รับการป้องกันการกัดกร่อนด้วยวิธีต่างๆ จะเป็น Fe_2O_3 เหมือนกันหมด เพราะสารที่เกิดจากปฏิกิริยาการกัดกร่อนบนผิวภายในท่อมีความหนาน้อยกว่า 1 ไมโครเมตร สำหรับการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง IR พบว่าสารที่เคลือบบนผิวภายในท่อเหล็กและท่อสแตนเลสที่ผิวภายในเป็นร่องที่ผ่านการทดสอบและได้รับการป้องกันการกัดกร่อนด้วยวิธีใดๆ จะเป็น SO, OSO เหมือนกันหมด ในขณะที่เมื่อนำท่อเหล็กใหม่ไปตรวจสอบจะไม่พบสารใดเลย ส่วนท่อสแตนเลสที่ผิวภายในเป็นร่องใหม่จะพบสาร SO, OSO เช่นเดียวกัน แสดงว่าสาร SO, OSO ที่ตรวจพบบนผิวภายในท่อที่ผ่านการทดสอบเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างก๊าซออกซิเจน น้ำกลั่น และผนังท่อซึ่งมี S เป็นส่วนประกอบ ไม่ได้เกิดจากปฏิกิริยาของ Na_2HPO_4 เลย โดยจะยืนยันได้จากสาร SO, OSO ที่ตรวจได้จากท่อสแตนเลสที่ผิวภายในเป็นร่องใหม่ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างก๊าซออกซิเจนกับผนังท่อที่มี S เป็นส่วนประกอบ

จากงานวิจัยของ Novotna et al. (1994) ซึ่งทำการศึกษาท่อความร้อนเหล็กและน้ำ พบว่าในการวิเคราะห์ด้วยรังสีเอกซ์จะได้สารที่เคลือบบนผิวภายในท่อเป็น Fe และ Fe_3O_4 ซึ่งจะแตกต่างจากการทดลองนี้ โดยสารที่ได้จะเป็น SO และ OSO แทน เนื่องจากเป็นสารที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง IR ไม่ใช่เครื่อง XRD

จากที่กล่าวมาทั้งหมดจะสรุปได้ว่าสารที่มาเคลือบบนผิวภายในเทอร์โมไซฟอนที่ทำจากท่อเหล็กและท่อสแตนเลสที่ผิวภายในเป็นร่องนั้นคือ SO, OSO โดยมีความหนาน้อยกว่า 1 ไมโครเมตร

4.2 ปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นภายในเทอร์โมไซฟอน

สาเหตุหนึ่งที่ทำให้ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของเทอร์โมไซฟอนลดลงคือมีก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดจากปฏิกิริยาการกัดกร่อนระหว่างผนังท่อและสารทำงานในส่วนควบแน่นของเทอร์โมไซฟอน ซึ่งในการทดลองนี้จะได้ข้อมูลปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนออกมามากมายตามชนิดของโลหะและวิธีการป้องกันการกัดกร่อน แต่เนื่องจากข้อมูลส่วนใหญ่มีความคล้ายคลึงกัน ดังนั้นจึงเลือกข้อมูลตัวอย่างของเทอร์โมไซฟอนที่เป็นท่อเหล็กที่เผาเป็นเวลา 1 ชั่วโมง และสารทำงานเป็นน้ำ เพราะมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยที่สุด โดยมีการใช้แบบจำลองอาร์เรนท์เนี่ยสกับข้อมูล

เหล่านี้และได้ความสัมพันธ์ของปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนกับผลคูณระหว่างเวลากับตัวคูณเลื่อนค่าเป็นเส้นตรงตามสมการ

$$V = 40.921 \ln(t \cdot F(T)) - 278.55 \dots\dots\dots(4.15)$$

โดยที่ V คือ ปริมาตรก๊าซไฮโดรเจน

และตัวคูณเลื่อนค่าจะมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงกับเศษส่วนกลับของอุณหภูมิใช้งานดังสมการ

$$F(T) = 1.2761e^{(-139.68/T)} \dots\dots\dots(4.16)$$

แทนค่า (4.16) ใน (4.15) จะได้ความสัมพันธ์ของปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนกับเศษส่วนกลับของอุณหภูมิเป็น

$$V = 40.921 \ln(t \cdot 1.2761e^{(-139.68/T)}) - 278.55 \dots\dots\dots(4.17)$$

4.2.1. ผลของเวลาที่ทำการทดสอบ

จากรูป 4.10 จะเห็นว่าความสัมพันธ์ของเวลาการทดสอบที่มีต่อปริมาตรก๊าซไฮโดรเจน ที่อุณหภูมิการใช้งาน 150°C จะเป็นฟังก์ชันลอการิทึม (Logarithmic function) ตามสมการ

$$V = 40.921 \ln(t) - 276.17 \dots\dots\dots(4.18)$$

สัมประสิทธิ์ของ $\ln(t)$ (คือค่า 40.921) แสดงถึงอัตราการเกิดก๊าซไฮโดรเจนซึ่งจะมีค่าคงที่สำหรับเทอร์โมไซฟอนแต่ละประเภท มีหน่วยเป็น ml/hrs และจากการคำนวณพบว่าเริ่มมีก๊าซไฮโดรเจนเกิดขึ้นหลังจากทำการทดสอบไป 853 ชั่วโมง เพราะปฏิกิริยาการกัดกร่อนที่ผลิตก๊าซไฮโดรเจนจะเกิดขึ้นหลังจากก๊าซออกซิเจนที่เข้าทำปฏิกิริยาการกัดกร่อนหมดลง จากรูปจะเห็นว่า ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เพราะเทอร์โมไซฟอนเป็นระบบปิดทำให้ก๊าซไฮโดรเจนไม่สามารถหลุดออกไปได้ และเมื่อคำนวณจากสมการพบว่า ที่เวลาผ่านไป 19004 ชั่วโมง จะมีก๊าซไฮโดรเจนอยู่เต็มส่วนควบแน่นของเทอร์โมไซฟอน (127 ml) ทำให้ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของ

เทอร์โมไชนฟอนลดลง จึงควรปรับปรุงคุณภาพ เช่น การนำก๊าซไฮโดรเจนออกจากท่อ หากพิจารณาสมการ (4.18) ในรูปทั่วไปคือ

$$V = A \ln(t) + B \dots\dots\dots(4.19)$$

แล้วจะสามารถแสดงค่าสัมประสิทธิ์ (A) และค่าคงตัว (B) ของโลหะชนิดต่างๆ และวิธีการป้องกันแต่ละชนิด ได้ตามตาราง ก1 ซึ่งรวมผลการทดลองทั้งหมดไว้

เมื่อเทียบกับงานวิจัยของ Baker (1973) และ Mou et al. (1990) ซึ่งเป็นการศึกษาท่อความร้อนสเตนเลสกับน้ำ ที่อุณหภูมิ 100°F, 200°F และ 300°F เป็นเวลา 2 ปี และท่อความร้อนเหล็กกับน้ำ ตามลำดับ พบว่าปริมาณก๊าซไฮโดรเจนก็เพิ่มขึ้นในทำนองเดียวกับการทดลองนี้ แต่ท่อความร้อนเหล็กกับน้ำจะมีปริมาณก๊าซไฮโดรเจนคงตัวหลังจากใช้งานไป 60 - 70 วัน ซึ่งจะแตกต่างจากที่ทดลองได้ เนื่องจากทำการวัดปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่ 3 เวลาการทดสอบ (1000, 2500 และ 4000 ชั่วโมง) เท่านั้น จึงไม่สามารถบอกรูปแบบการสะสมก๊าซไฮโดรเจนได้

สรุปได้ว่าเวลาที่ทำการทดสอบมีผลกับปริมาณก๊าซไฮโดรเจนนั้นคือ ที่เวลาการทดสอบมากขึ้น ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนจะมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งจะเป็นจริงสำหรับเทอร์โมไชนฟอนทั้งหมดที่ใช้ในการทดสอบ โดยสำหรับเทอร์โมไชนฟอนที่ทำจากท่อเหล็ก ซึ่งได้รับการป้องกันการกัดกร่อนด้วยการเผาท่อเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิการใช้งาน 150°C จะมีความสัมพันธ์ของปริมาณก๊าซไฮโดรเจนกับเวลาเป็น $V = 40.921 \ln(t) - 276.17$

4.2.2 ผลของอุณหภูมิการใช้งาน

ผลของอุณหภูมิการใช้งานที่มีต่อปริมาณก๊าซไฮโดรเจน จะเป็นไปตามรูป 4.11 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณก๊าซไฮโดรเจนกับเศษส่วนกลับของอุณหภูมิใช้งานของเทอร์โมไชนฟอนที่ทำจากท่อสเตนเลสที่ผิวภายในเป็นร่องและสารทำงานเป็นน้ำผสม Na_2HPO_4 ความเข้มข้น 20 ppm ที่ระยะเวลาการทดสอบ 4000 ชั่วโมง โดยมีความสัมพันธ์เป็นฟังก์ชันเส้นตรง (Linear function) ตามสมการ

$$V = -208868/T + 307.03 \dots\dots\dots(4.20)$$

สัมประสิทธิ์ของเศษส่วนกลับของอุณหภูมิ (คือค่า 208868) แสดงถึงค่าการลดลงของปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซึ่งจะมีค่าคงที่สำหรับเทอร์โมไชนฟอนแต่ละประเภท มีหน่วยเป็น ml-R ส่วนค่าคงตัว

(คือค่า 307.03) จะแสดงถึงปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนสูงสุด ในหน่วย ml จากรูปพบว่าปริมาณก๊าซไฮโดรเจนลดลง เพราะก๊าซไฮโดรเจนเกิดจากปฏิกิริยาการกัดกร่อนซึ่งจะเกิดขึ้นน้อยลงตามอุณหภูมิที่ลดลง และเมื่อคำนวณจากสมการจะพบว่า ที่อุณหภูมิการใช้งาน 105°C จะไม่มีก๊าซไฮโดรเจนเกิดขึ้นในเทอร์โมไซฟอน หากพิจารณาสมการ (4.20) ในรูปทั่วไปคือ

$$V = C/T + D \dots\dots\dots(4.21)$$

แล้วจะสามารถแสดงค่าสัมประสิทธิ์ (C) และค่าคงตัว (D) ของโลหะชนิดต่างๆ และวิธีการป้องกันแต่ละชนิด ได้ตามตาราง ก1 ซึ่งรวมผลการทดลองทั้งหมดไว้

จากงานวิจัยของ Baker (1973) และ Mou et al. (1990) พบว่า มวลของก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นในท่อความร้อนลดลง เมื่ออุณหภูมิต่ำลงเช่นเดียวกับการทดลองนี้ ส่วนค่าคงตัวของมวลก๊าซไฮโดรเจนจะเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิใช้งาน ซึ่งไม่เหมือนกับการทดลองนี้ ที่ทราบเพียงว่า ปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิใช้งาน

สรุปได้ว่าอุณหภูมิการใช้งานมีผลต่อปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นในส่วนควบแน่น นั่นคือ เมื่ออุณหภูมิการใช้งานมีค่าต่ำลง ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงด้วย ซึ่งจะจริงสำหรับเทอร์โมไซฟอนทั้งหมดที่ใช้ในการทดสอบ โดยที่ความสัมพันธ์ปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนกับส่วนกลับของอุณหภูมิการใช้งานสำหรับเทอร์โมไซฟอนที่ทำจากท่อสเตนเลสที่ผิวภายในเป็นร่อง ซึ่งได้รับการป้องกันการกัดกร่อนด้วยการเติม Na_2HPO_4 ลงในสารทำงาน 20 ppm ที่ระยะเวลาการทดสอบ 4000 ชั่วโมง คือ $V = -208868/T + 307.03$

4.2.3 ผลของวิธีการป้องกันการกัดกร่อน

จากการวิเคราะห์ในทำนองเดียวกับที่ผ่านมา จะพบว่า เทอร์โมไซฟอนที่ทำจากท่อทองแดงและท่อทองแดงที่ผิวภายในเป็นร่อง เมื่อได้รับการป้องกันการกัดกร่อนด้วยวิธีที่ 6 และวิธีที่ 7 กับ 9 ตามลำดับ จะไม่มีก๊าซไฮโดรเจนเกิดขึ้นในเทอร์โมไซฟอน แสดงว่าวิธีการป้องกันที่เหมาะสมสำหรับท่อทองแดงและท่อทองแดงที่ผิวภายในเป็นร่องคือ วิธีที่ 6 และ วิธีที่ 7 กับ 9 ตามลำดับ ส่วนเทอร์โมไซฟอนที่ทำจากท่อเหล็กและท่อสเตนเลสที่ผิวภายในเป็นร่อง เมื่อได้รับการป้องกันการกัดกร่อนด้วยวิธีที่ 7 เหมือนกัน จะมีปริมาณก๊าซไฮโดรเจนน้อยกว่าในเทอร์โมไซฟอนที่ไม่ได้รับการป้องกันการกัดกร่อนมากที่สุดเท่ากับ 45.08 และ 1.02 ml ตามลำดับ แสดงว่าวิธีที่เหมาะสมกับท่อเหล็กและท่อสเตนเลสที่ผิวภายในเป็นร่องคือ วิธีที่ 7 สำหรับท่อ

อะลูมิเนียม เมื่อได้รับการป้องกันด้วยวิธีที่ 6 จะมีปริมาณก๊าซไฮโดรเจนน้อยกว่าวิธีที่ 5 เท่ากับ 10.89 ml แสดงว่าวิธีที่ 6 เหมาะสมกับท่ออะลูมิเนียมมากกว่าวิธีที่ 5

จากงานวิจัยของ Nishchik et al. (1995) และ Novotna et al. (1994) ซึ่งพิจารณาเทอร์โมไซฟอนเหล็กและน้ำ ที่อุณหภูมิ 100°C และ 200°C ตามลำดับ พบว่าการเติมสารยับยั้งลงในสารทำงานหรือการเคลือบผิวภายในท่อ จะช่วยลดปริมาณก๊าซไฮโดรเจนในท่อลงได้เช่นเดียวกับการทดลองนี้ โดยที่การป้องกันการกัดกร่อนที่ดีที่สุดคือ การเติมสาร K_2CrO_4 ลงในสารทำงาน ร่วมกับการเคลือบผิวภายในท่อด้วย Fe_3O_4 เพราะไม่มีก๊าซไฮโดรเจนเกิดขึ้นในท่อ ซึ่งจะแตกต่างจากการทดลองนี้ที่วิธีที่ดีที่สุดจะเป็นการเคลือบผิวภายในท่อเพียงอย่างเดียว เนื่องจากสารยับยั้งและสารที่เคลือบบนผิวท่อไม่เหมือนกัน

จากที่กล่าวมาทั้งหมดสรุปได้ว่า วิธีการป้องกันการกัดกร่อนที่เหมาะสมที่สุดสำหรับท่อทองแดงคือ การเผาท่อเป็นเวลา 1 ชั่วโมง และเติม Na_2HPO_4 ลงในสารทำงาน 20 ppm และท่อทองแดงที่ผิวภายในเป็นร่องคือ การเผาท่อเป็นเวลา 2 ชั่วโมง หรือการเผาท่อเป็นเวลา 2 ชั่วโมง และเติม Na_2HPO_4 ลงในสารทำงาน 20 ppm ส่วนท่อเหล็กและท่อสเตนเลสที่ผิวภายในเป็นร่องคือ การเผาท่อเป็นเวลา 2 ชั่วโมง สำหรับท่ออะลูมิเนียมคือ การเผาท่อเป็นเวลา 1 ชั่วโมง และเติม Na_2HPO_4 ลงในสารทำงาน 20 ppm

4.2.4 ผลของวัสดุที่ใช้ทำเทอร์โมไซฟอน

จากการวิเคราะห์ในแบบเดียวกับข้อมูลอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยและอัตราการกัดกร่อนสูงสุด จะพบว่า เทอร์โมไซฟอนที่ได้รับการป้องกันการกัดกร่อนด้วยวิธีที่ 1 และ 3 เมื่อทำจากท่อทองแดงจะมีปริมาณก๊าซไฮโดรเจนเกิดขึ้นต่ำสุดเท่ากับ 12.62 ± 12.24 ml แสดงว่าวัสดุที่เหมาะสมสำหรับใช้ทำเทอร์โมไซฟอนคือท่อทองแดง ส่วนเทอร์โมไซฟอนที่ได้รับการป้องกันด้วยวิธีที่ 7 และ 9 เมื่อทำจากท่อทองแดงที่ผิวภายในเป็นร่องจะไม่มีก๊าซไฮโดรเจนเกิดขึ้นภายในท่อ แสดงว่าวัสดุที่เหมาะสมคือท่อทองแดงที่ผิวภายในเป็นร่อง

จากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่ามีเพียงงานวิจัยของ Kojima and Murakami (1990) เท่านั้นที่ทำการเปรียบเทียบการกัดกร่อนในท่อทองแดง 2 ชนิด ดังนั้นในการทดลองนี้จึงทำการเปรียบเทียบการกัดกร่อนในเทอร์โมไซฟอนที่ทำจากโลหะชนิดต่างๆ โดยทำการศึกษาจากปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นในเทอร์โมไซฟอน เพื่อเป็นแนวทางในการหาวัสดุที่เหมาะสมสำหรับใช้ทำเทอร์โมไซฟอนต่อไป

สรุปได้ว่าวัสดุที่เหมาะสมสำหรับใช้ทำเทอร์โมไซฟอนซึ่งไม่ได้รับการป้องกันการกัดกร่อนหรือได้รับการป้องกันการกัดกร่อนด้วยการเติม Na_2HPO_4 ลงในสารทำงาน 20 ppm คือ

ท่อทองแดง ส่วนวัสดุที่เหมาะสมสำหรับใช้ทำเทอร์โมไซฟอนซึ่งได้รับการป้องกันการกัดกร่อนด้วยการเผาห่อเป็นเวลา 2 ชั่วโมง หรือการเผาห่อเป็นเวลา 2 ชั่วโมงและเติม Na_2HPO_4 ลงในสารทำงาน 20 ppm นั่นคือ ท่อทองแดงที่ผิวภายในเป็นร่อง

จากผลการทดลองที่ผ่านมาทั้งหมด พบว่า ท่อทองแดงที่ผิวภายในเป็นร่องเป็นวัสดุที่ทนทานต่อการกัดกร่อนเมื่อพิจารณาจากค่าอัตราการกัดกร่อน และยังพบว่าไม่มีก๊าซไฮโดรเจนเกิดขึ้นในท่อด้วย จึงสรุปได้ว่าวัสดุที่เหมาะสมสำหรับใช้ทำเทอร์โมไซฟอนคือท่อทองแดงที่ผิวภายในเป็นร่อง

4.3 ค่าความต้านทานการถ่ายเทความร้อนรวมของเทอร์โมไซฟอน

เนื่องจากเทอร์โมไซฟอนเมื่อใช้งานไปจะมีก๊าซไฮโดรเจนเกิดขึ้นในส่วนควบแน่นและมีสารที่เกิดจากปฏิกิริยาการกัดกร่อนมาเคลือบบนผิวภายในท่อทำให้ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนเสื่อมลง แสดงว่าค่าความต้านทานการถ่ายเทความร้อนรวมของเทอร์โมไซฟอน (Z_{total}) จะเปลี่ยนแปลงไปดังรูป 4.12(ก) ซึ่งมีค่าความต้านทานความร้อนเพิ่มขึ้น 2 ส่วน คือ

Z_H คือ ค่าความต้านทานความร้อนที่เกิดจากก๊าซไฮโดรเจนในส่วนควบแน่น

Z_{fouling} คือ ค่าความต้านทานความร้อนของ fouling หรือสารที่เคลือบบนผิวภายในท่อ

แต่เนื่องจากค่าการนำความร้อนของก๊าซไฮโดรเจนมีค่าน้อยมาก ดังนั้นค่า Z_H จึงมีค่ามากจนความร้อนส่วนใหญ่จะผ่าน Z_f มากกว่า จึงสามารถตัดค่า Z_H ออกได้ และสำหรับค่า Z_{fouling} ตามรูป 4.12(ข) นั้น จะเห็นว่ามีลักษณะเป็นฟังก์ชันของเวลากว่าคืออาจจะเพิ่มขึ้นตามเวลาที่ผ่านมาหรือลดลงหากมีการทำความสะอาดภายในท่อ ข้อมูลค่าความต้านทานความร้อนรวมของเทอร์โมไซฟอนในการทดลองมีมากมายเช่นเดียวกัน ซึ่งข้อมูลส่วนใหญ่ไม่สามารถนำมาหาความสัมพันธ์ได้ อาจเป็นผลมาจากช่วงระยะเวลาการทดสอบสั้นไปจึงมีก๊าซไฮโดรเจนและสารที่เคลือบบนผิวภายในท่อเกิดขึ้นน้อย แต่มีบางข้อมูลสามารถหาความสัมพันธ์ได้ และมีลักษณะคล้ายคลึงกัน ในที่นี้จึงเลือกข้อมูลตัวอย่างของเทอร์โมไซฟอนที่เป็นท่อเหล็กซึ่งถูกเผาเป็นเวลา 1 ชั่วโมง และสารทำงานเป็นน้ำผสม Na_2HPO_4 ความเข้มข้น 10 ppm ที่อุณหภูมิใช้งาน 350°C เพราะเป็นชุดข้อมูลที่เห็นความแตกต่างชัดเจนที่สุด ได้มีการนำแบบจำลอง fouling ของ Kern and Seaton มาประยุกต์ใช้กับข้อมูลเหล่านี้ โดยหาความสัมพันธ์ของ $\ln(dZ_{\text{total}}/dt)$ กับเวลา เพื่อหาค่าอัตราการก่อตัวของ fouling (ϕ_f) และค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการหลุดร่วงของ fouling (β) ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ดังรูป 4.13 ที่เป็นฟังก์ชันเส้นตรงตามสมการ

$$\ln(dZ_{\text{total}}/dt) = -0.0001t - 4.0298 \dots\dots\dots(4.22)$$

โดยที่ $(-\beta)$ คือ -0.0001 และ $\ln(\phi_0)$ คือ -4.0298 ดังนั้น β จึงมีค่าเท่ากับ 0.0001 hrs^{-1} ส่วน ϕ_0 จะมีค่าเท่ากับ 0.017778 K/W-hrs แทนค่า β และ ϕ_0 ลงในสมการ fouling ของ Kern and Seaton จะได้ความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานความร้อนของ fouling กับเวลาเป็น

$$Z_{\text{fouling}} = 177.78(1 - e^{-0.0001t}) \dots\dots\dots(4.23)$$

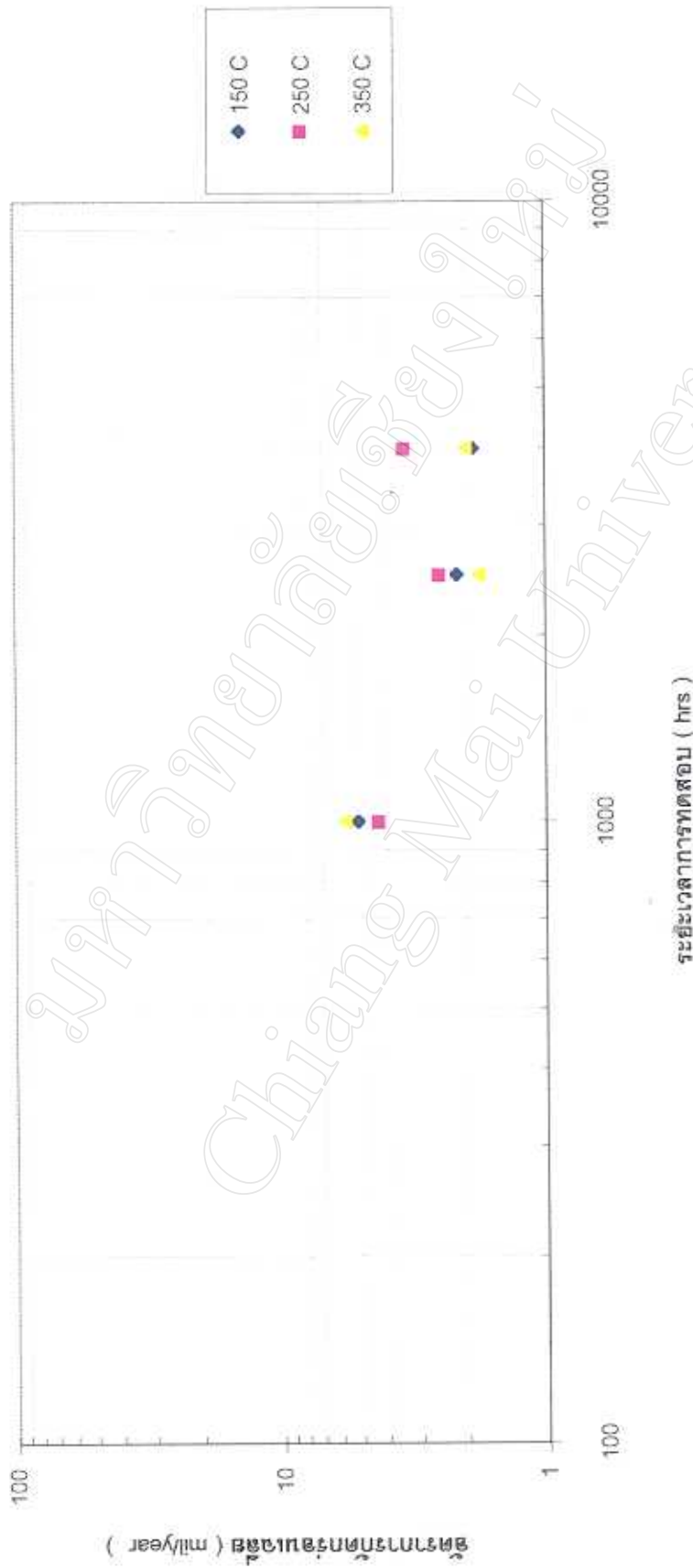
ซึ่งเมื่อนำมาเขียนลงบนกราฟดังรูป 4.14 จะเห็นว่าความต้านทานความร้อนของ fouling มีค่าเป็นศูนย์เมื่อเริ่มทดสอบ แล้วจึงมีค่าเพิ่มขึ้นตามเวลาการทดสอบ เนื่องจากการสะสมของสารที่เกิดจากปฏิกิริยาการกัดกร่อนบนผิวท่อ และจากสมการ (4.23) พบว่า ที่เวลาผ่านไป 60000 ชั่วโมง ค่าความต้านทานความร้อนของ fouling จะเริ่มคงที่เท่ากับ 177.78 K/W เพราะเกิดการกัดกร่อนน้อยมาก จนแทบไม่มีการสะสมของสารที่เกิดจากการกัดกร่อนบนผิวท่อ หากพิจารณาสมการ (4.23) ในรูปทั่วไปคือ

$$Z_{\text{fouling}} = E(1 - e^{-Ft}) \dots\dots\dots(4.24)$$

แล้วจะสามารถแสดงค่าสัมประสิทธิ์ (E) และส่วนยกกำลัง (F) ของโลหะชนิดต่างๆ และวิธีการป้องกันแต่ละชนิด ได้ตามตาราง ก2 ซึ่งรวมผลการทดลองส่วนนี้ไว้ทั้งหมด

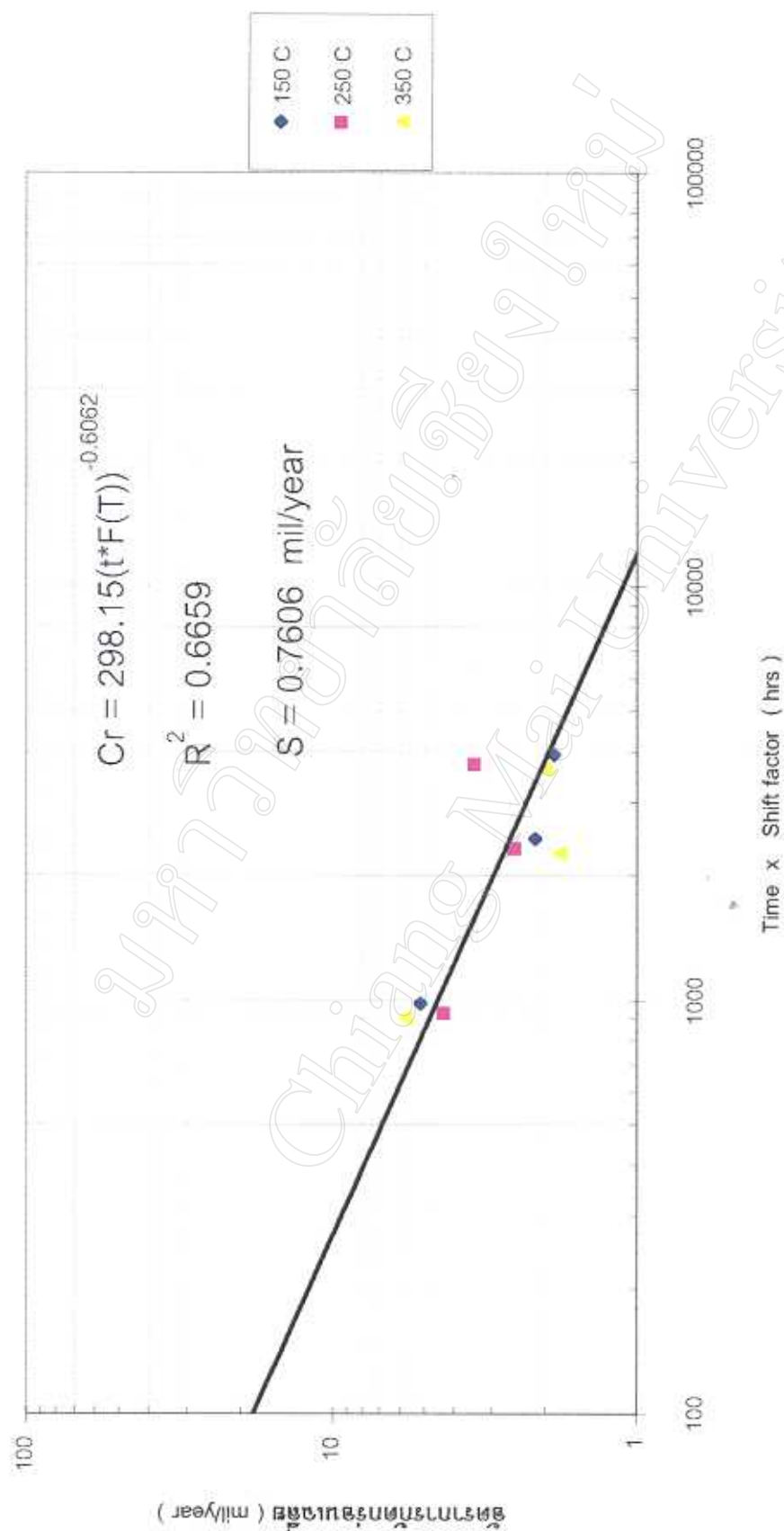
จากงานวิจัยของ Nishchik et al. (1995) พบว่าการเกิดการกัดกร่อนจะสร้างสารมาเคลือบผิวภายในท่อความร้อนแบบค่อยเป็นค่อยไป จึงมีผลกระทบทางลบต่อความสามารถในการถ่ายเทความร้อน ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลการทดลองนี้คือ ค่าความต้านทานความร้อนของ fouling จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามเวลาการทดสอบ ทำให้ค่าความต้านทานความร้อนรวมของเทอร์โมไซฟอนมีค่าสูงขึ้นด้วย

สรุปได้ว่าการสะสมของสารที่เกิดจากปฏิกิริยาการกัดกร่อนบนผิวภายในท่อจะมีผลทำให้เกิดความต้านทานความร้อนของ fouling ขึ้น ซึ่งจะมีค่าสูงขึ้นตามเวลาการทดสอบ โดยสำหรับเทอร์โมไซฟอนที่ทำจากท่อเหล็กซึ่งได้รับการป้องกันการกัดกร่อนด้วยการเผาท่อเป็นเวลา 1 ชั่วโมง และเติม Na_2HPO_4 ลงในสารทำงาน 10 ppm ที่อุณหภูมิการใช้งานประมาณ 350°C จะหาค่าความต้านทานความร้อนของสารที่เคลือบบนผิวภายในท่อได้จาก $Z_{\text{fouling}} = 177.78(1 - e^{-0.0001t})$



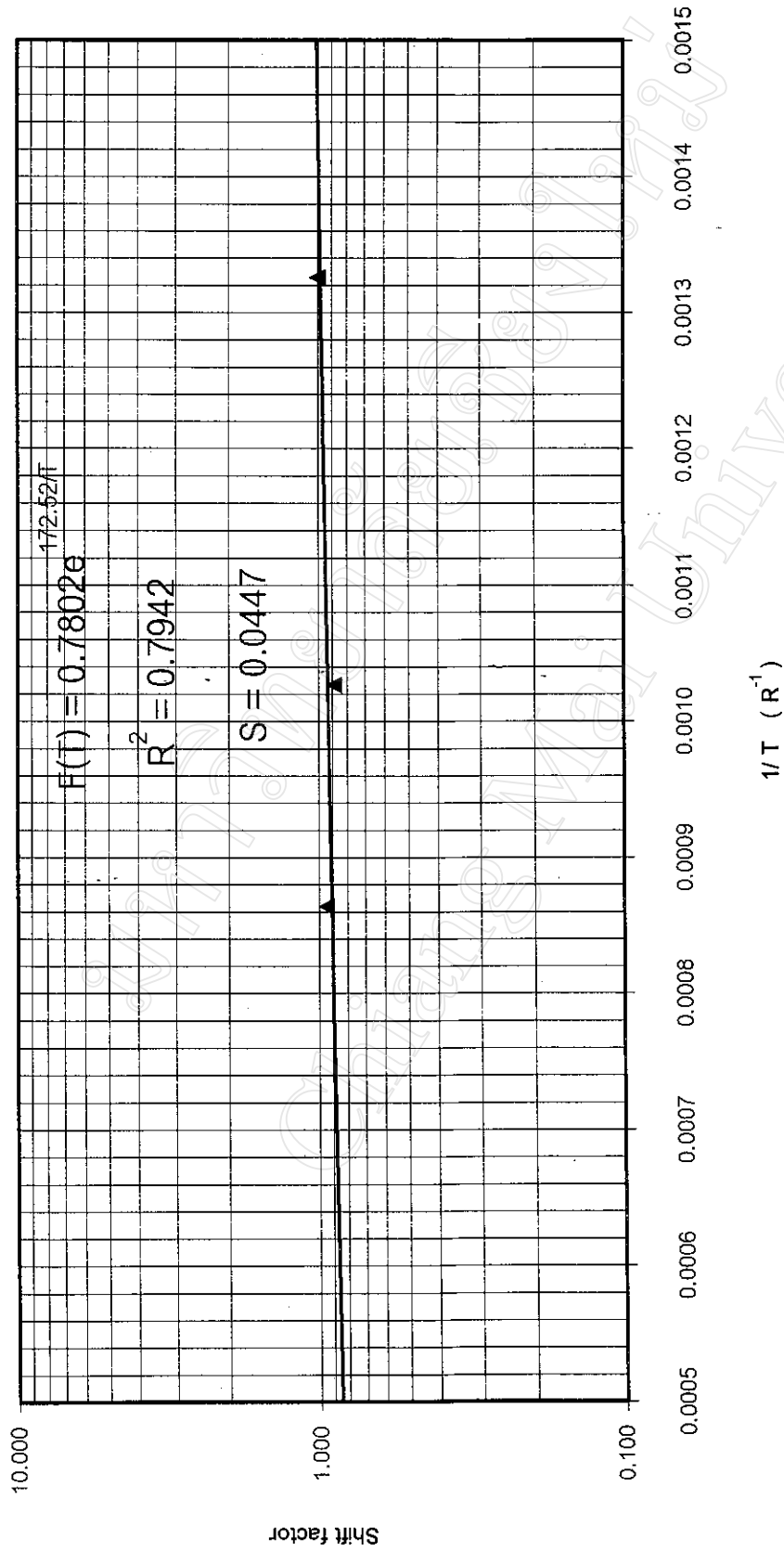
รูป 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยกับระยะเวลาการทดสอบสำหรับ
เทอร์โมไซฟอนที่ทำจากท่อเหล็กซึ่งได้รับการป้องกันจากการกัดกร่อนด้วยการเผาเพื่อเป็นเวลา

2 ชั่วโมง และเติม Na_2HPO_4 ลงในสารทำงาน 20 ppm

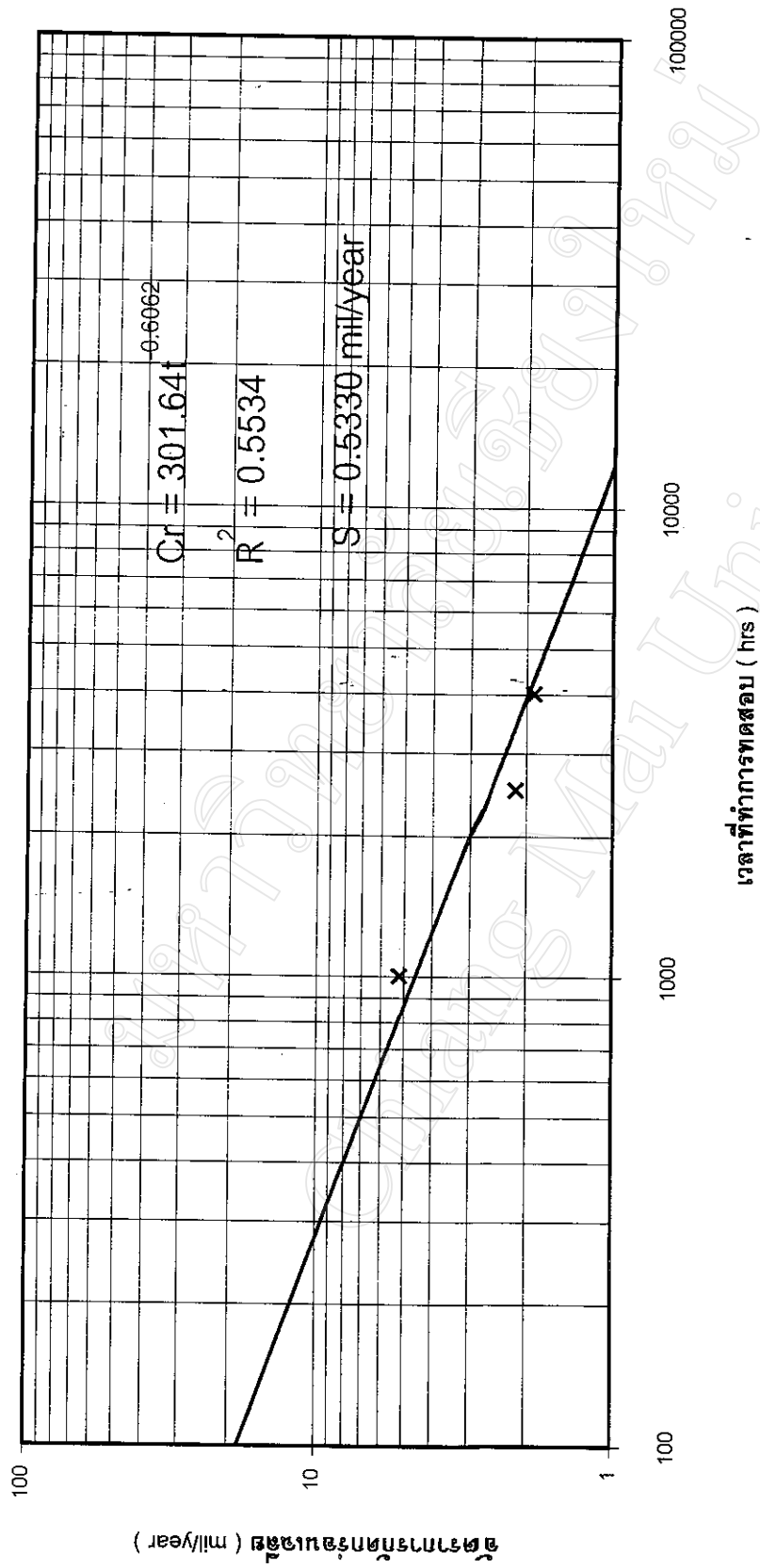


รูป 4.2 Universal curve ของข้อมูลอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยจากเทอร์โมไซฟอนที่ทำด้วย

ท่อเหล็กซึ่งถูกเผาเป็นเวลา 2 ชม. และเติม Na_2HPO_4 ลงในสารทำงาน 20 ppm

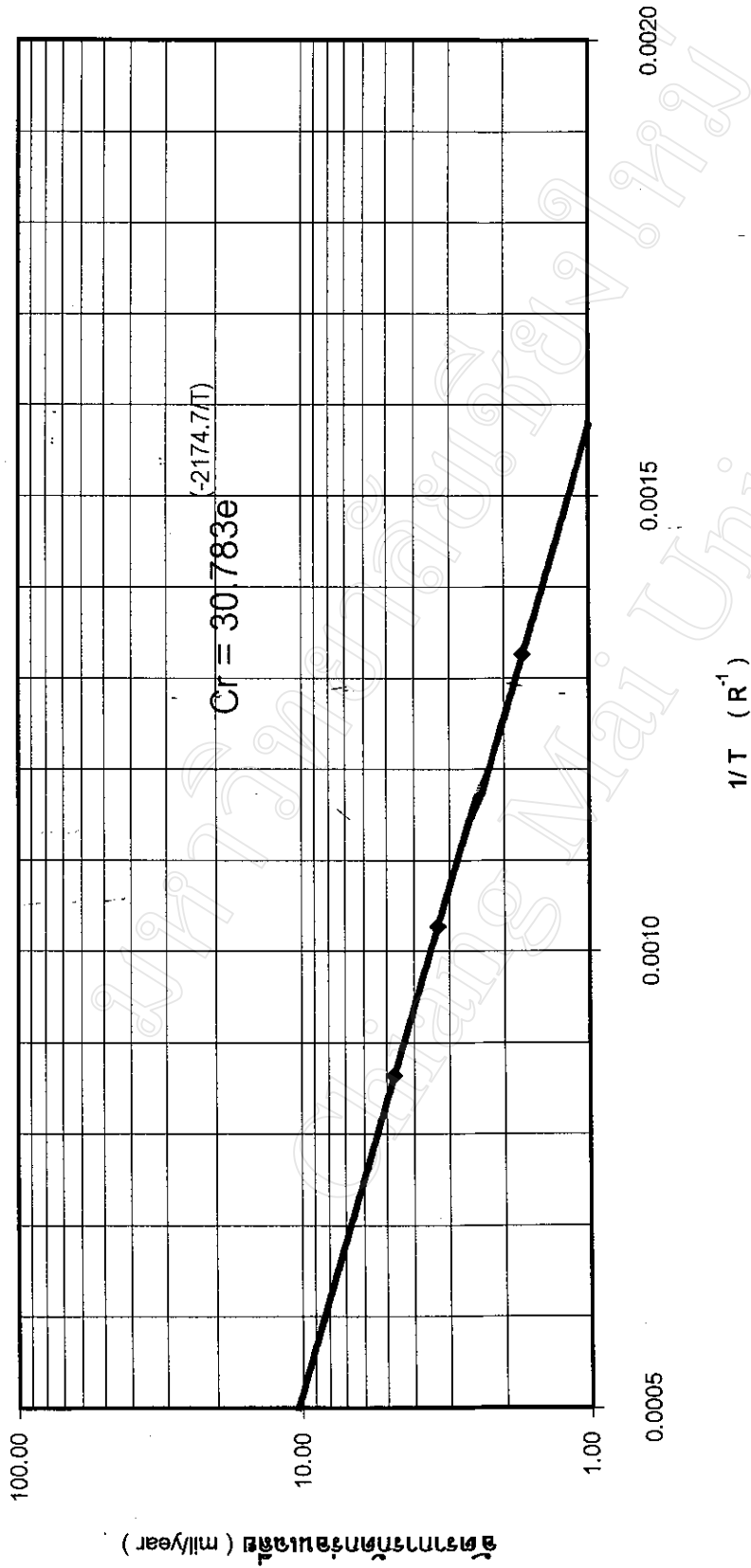


รูป 4.3 แสดงการเขียนตัวคูณเลื่อนค่าอัตราการเกิดกร่อนเฉลี่ยบนแผนภาพอาร์เร็นท์เนียสของ เทอร์โมสเฟฟอนที่ทำด้วยท่อเหล็กซึ่งถูกเผาเป็นเวลา 2 ชม. และเติม Na_2HPO_4 ลงในสารทำงาน 20 ppm



รูป 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยกับระยะเวลาที่ทำการทดสอบของเทอร์โมไซฟอนที่ทำจากท่อเหล็กซึ่งได้รับการป้องกันจากการกัดกร่อนด้วยการเผาเพื่อเป็นเวลา 2 ชั่วโมง

และเติม Na_2HPO_4 ลงในสารทำงาน 20 ppm สำหรับอุณหภูมิการใช้งาน 150°C

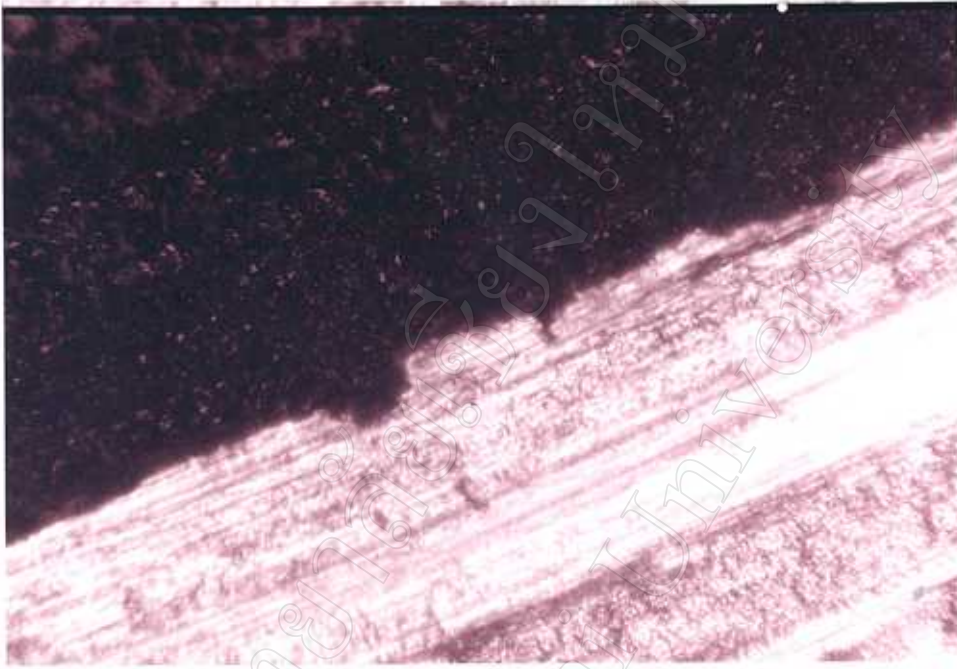


รูป 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราปฏิกิริยาที่อุณหภูมิของอุณหภูมิใช้งานของเทอร์มิสเตอร์ที่ทำการทดสอบแต่ละตัวภายในเป็นร่องซึ่งได้รับการป้องกันการกัดกร่อนด้วยการเติม Na_2HPO_4 ลงในสารทำงาน 20 ppm สำหรับระยะเวลาการทดสอบ 1000 ชั่วโมง

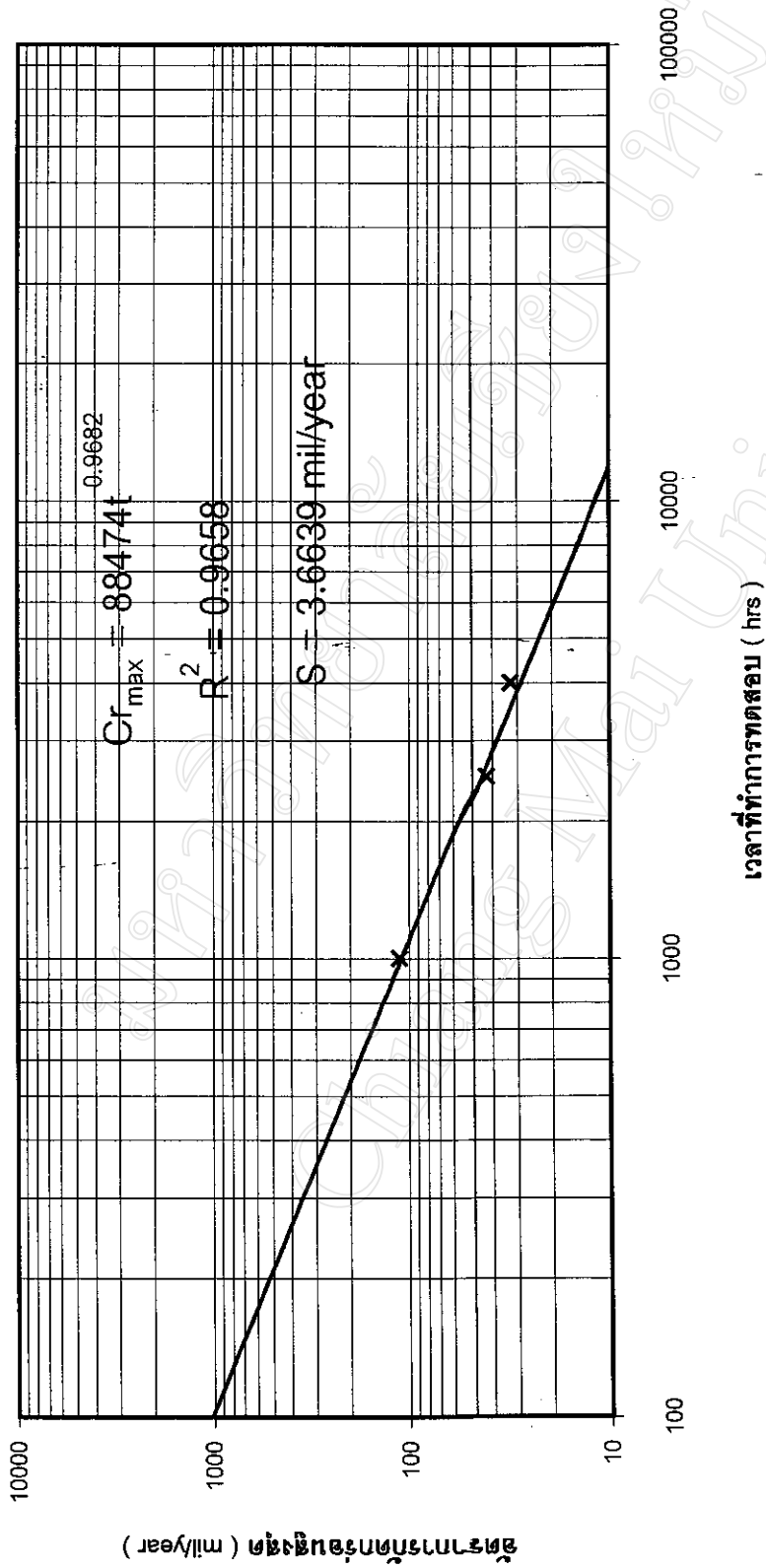


วิธีการป้องกันโรค

รูป 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดโรคเฉลี่ยกับวิธีการป้องกันโรคของเทอร์โมไฟฟอนที่ทำจากท่อทองแดง สำหรับอุณหภูมิการใช้งานและระยะเวลาทดสอบต่างๆ กัน

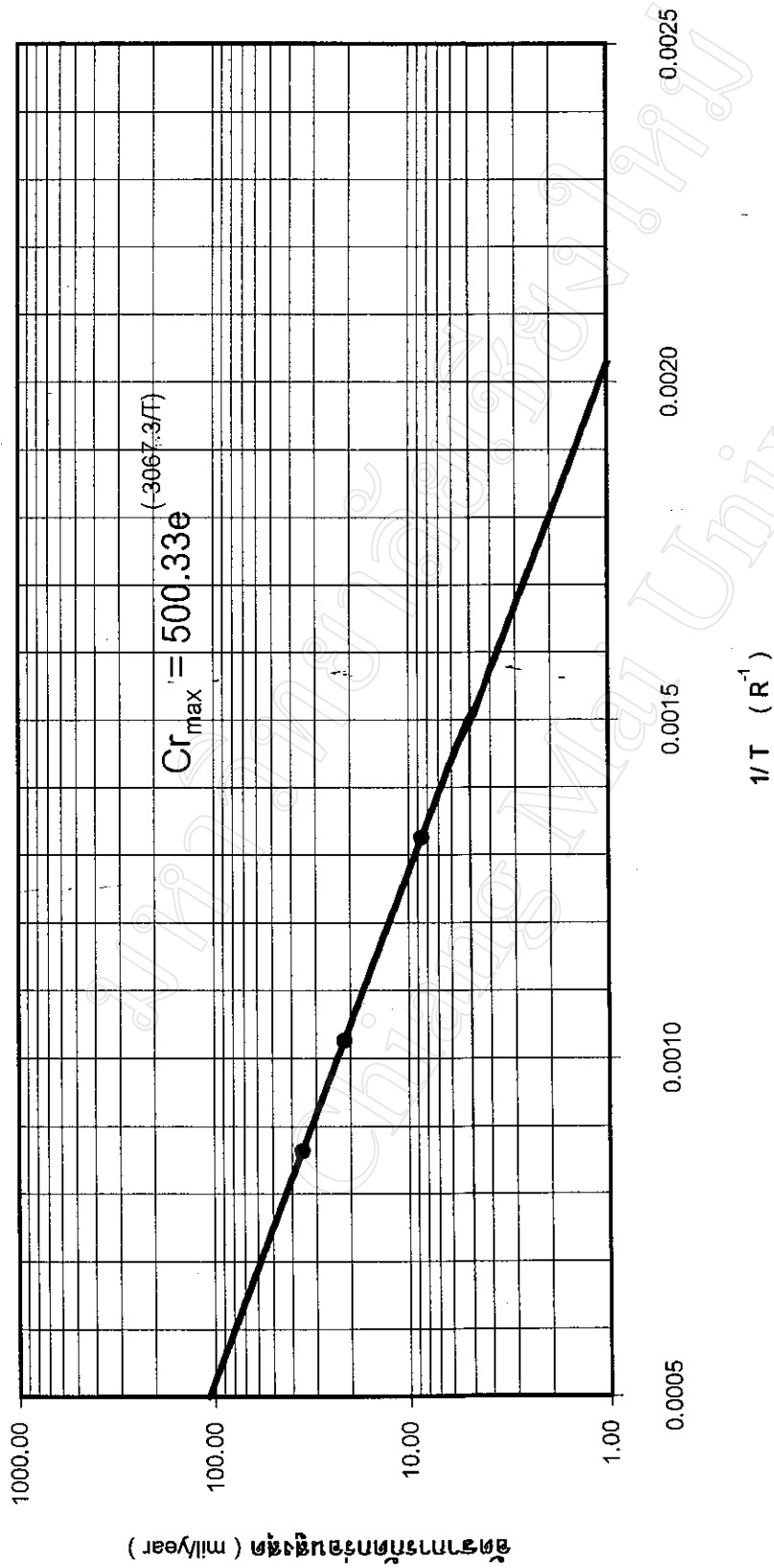


รูป 4.7 ภาพถ่ายภาพกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 25 เท่า ของภาคตัดขวางของเทอร์โมไซฟอนที่เป็นท่อเหล็กซึ่งถูกเผาเป็นเวลา 2 ชั่วโมง และมีสารทำงานเป็นน้ำผสม Na_2HPO_4 ความเข้มข้น 10 ppm โดยผ่านการทดสอบเป็นเวลา 1000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิใช้งาน 350°C



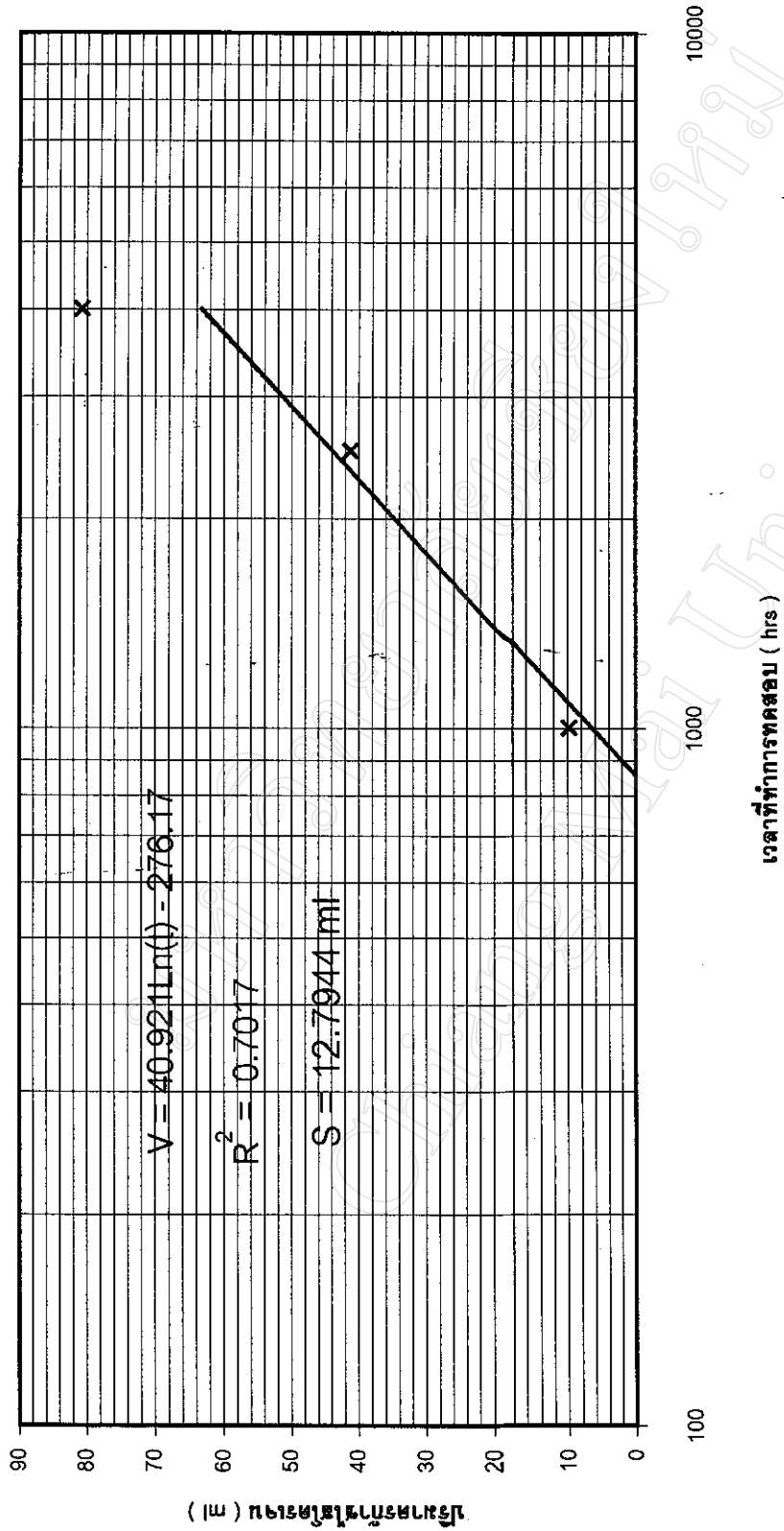
รูป 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกัดกร่อนสูงสุดกับระยะเวลาที่ทำการทดสอบของเพอร์ไมโซฟอนที่ทำจากท่อเหล็กซึ่งได้รับการป้องกันการกัดกร่อนด้วยการเผาทิ้งเป็นเวลา 2 ชั่วโมง

และเติม Na_2HPO_4 ลงในสารทำงาน 20 ppm สำหรับอุณหภูมิการใช้งาน 250°C

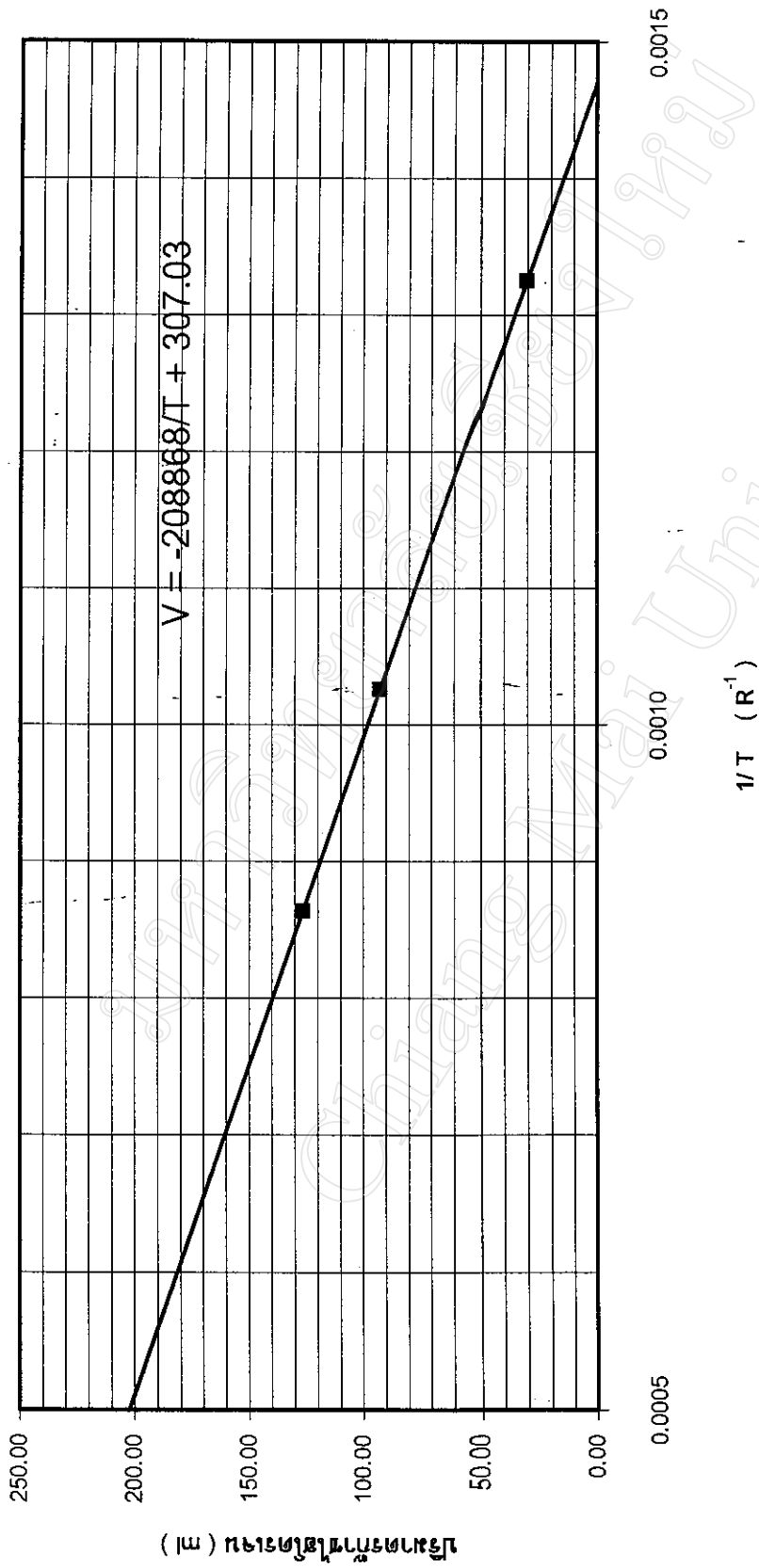


รูป 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงสุดกับส่วนกลับของอุณหภูมิการใช้งานของเทอร์มิสโตนที่ทำการทดสอบและอุณหภูมิภายในเป็นรองซึ่งได้รับการป้องกันก่อนด้วยการเติม

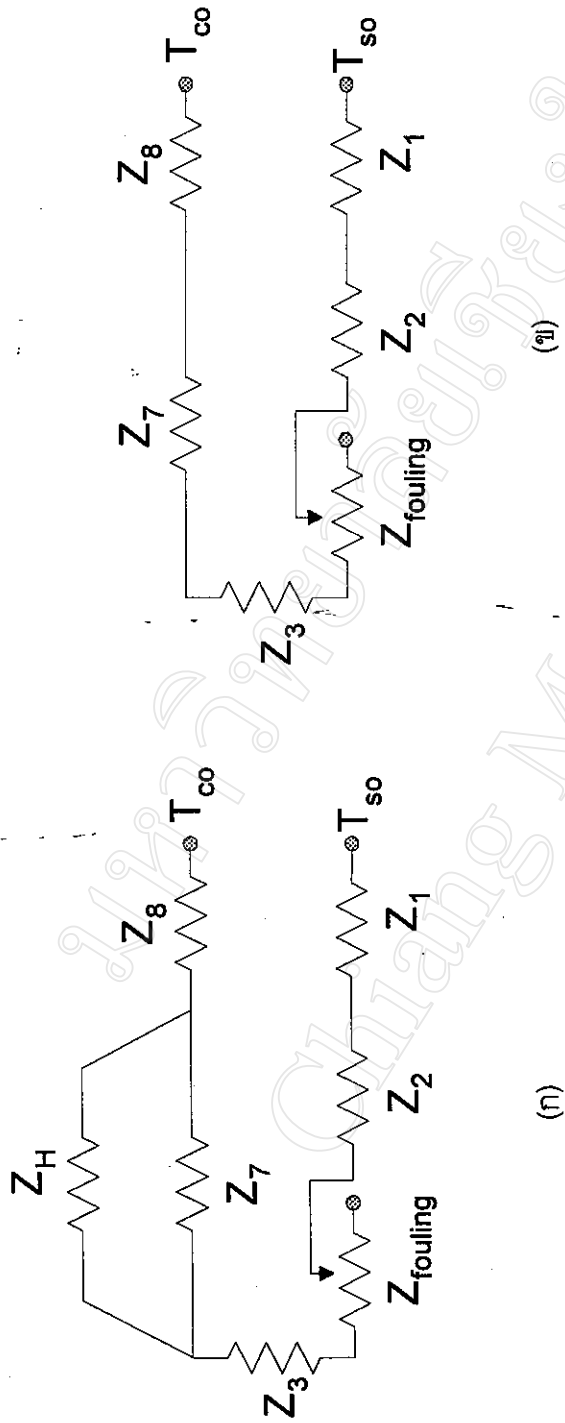
Na_2HPO_4 ลงในสารทำงาน 20 ppm สำหรับระยะเวลาการทดสอบ 1000 ชั่วโมง



รูป 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนกับระยะเวลาที่ทำการทดสอบ
 ของเทอร์มิไซฟอนที่ทำจากท่อเหล็กซึ่งได้รับการป้องกันการกัดกร่อน
 ด้วยการเผาเพื่อเป็นเวลา 1 ชั่วโมง สำหรับอุณหภูมิการใช้งาน 150°C

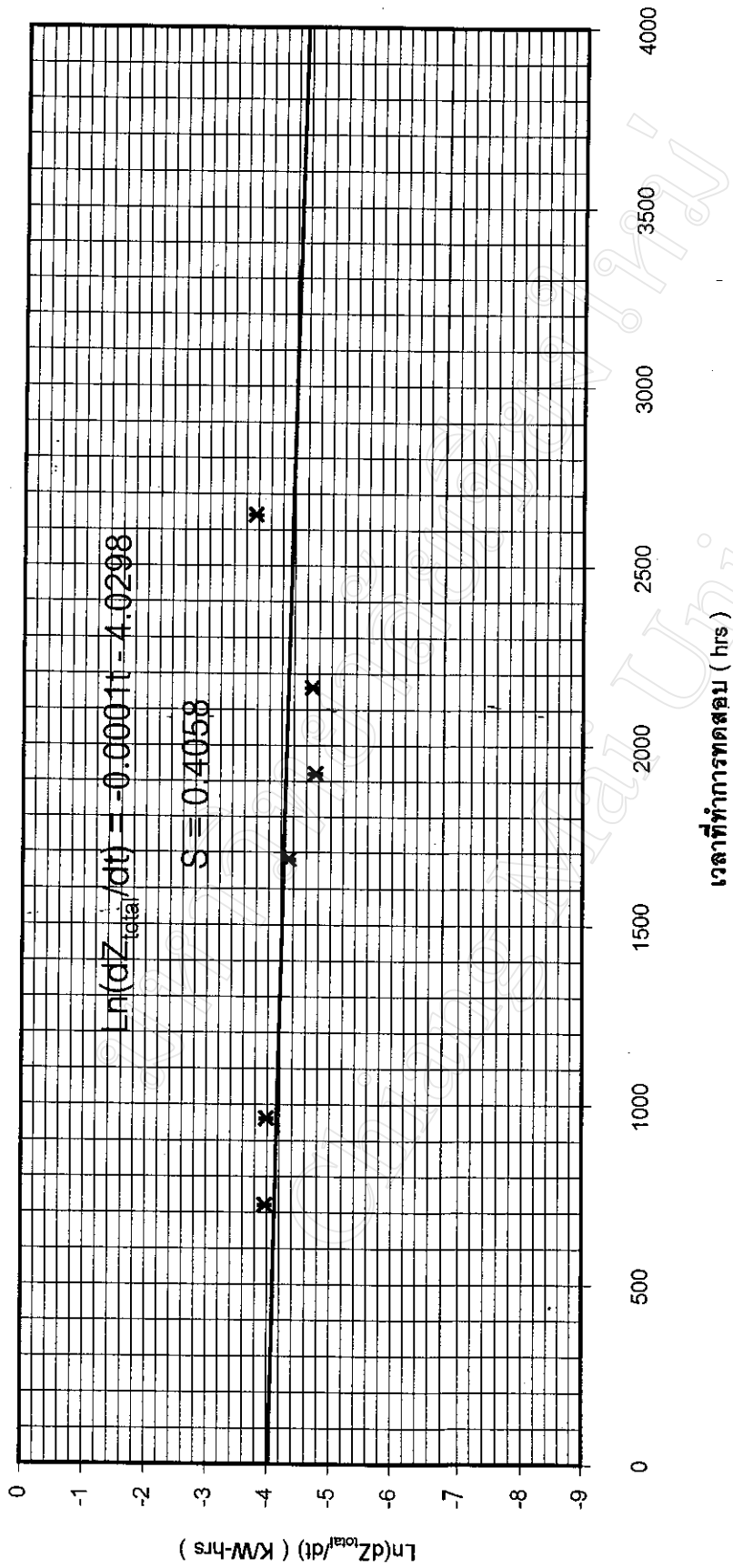


รูป 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนกับส่วนกลับของอุณหภูมิการใช้งานของเทอร์โมไสฟอนที่ทำจากท่อสเตนเลสตีผิวภายในเป็นร่องซึ่งได้รับการป้องกันการกัดกร่อนด้วยการเติม Na_2HPO_4 ลงในสารทำงาน 20 ppm สำหรับระยะเวลาการทดสอบ 4000 ชั่วโมง

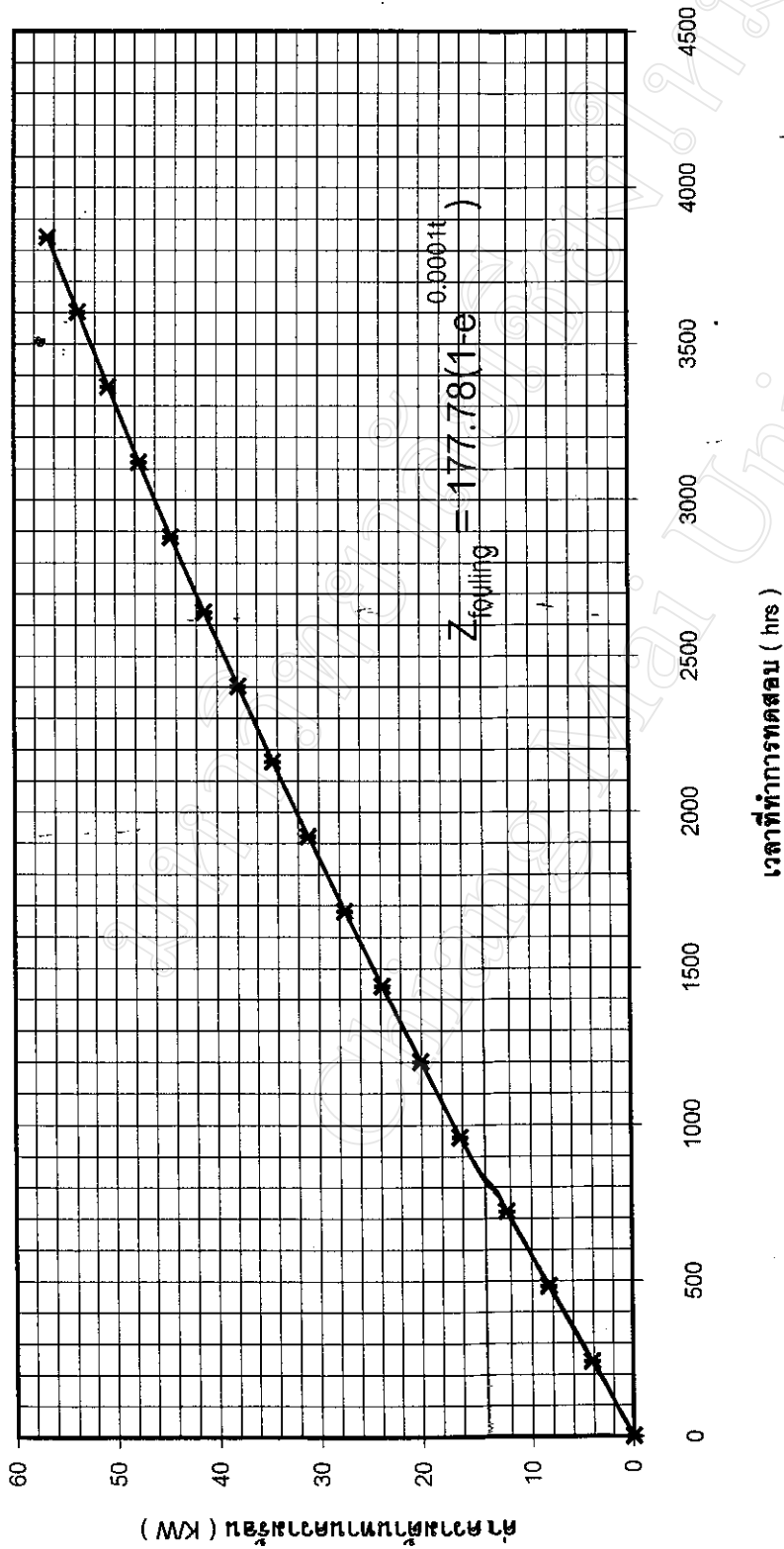


รูป 4.12 (ก) แสดงวงจรความต้านทานความร้อนที่ประกอบด้วย Z_H , $Z_{fouling}$

(ข) แสดงวงจรความต้านทานความร้อนที่ประกอบด้วย $Z_{fouling}$



รูป 4.13 กราฟแสดงการหาค่า ϕ_d และ β ของสมการ fouling ของ Kern และ Seaton สำหรับเทอร์โมไฮฟอน
 ที่ทำจากท่อเหล็กซึ่งได้รับการป้องกันการกัดกร่อนด้วยการเผาเพื่อเป็นเวลา 1 ชั่วโมง
 และเติม Na_2HPO_4 ลงในสารทำงาน 10 ppm ที่อุณหภูมิใช้งาน 350°C



รูป 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานความร้อนของ fouling กับเวลาการทดสอบ สำหรับเพอร์มิเซฟอนที่ทำจากพอลิเอทิลีนซึ่งได้รับการป้องกันจากการกัดกร่อนด้วยการเผาเพื่อเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

และเติม Na_2HPO_4 ลงในสารทำงาน 10 ppm ที่อุณหภูมิการใช้งาน 350°C