

บทที่ 3

วิธีดำเนินการทดสอบ

เพื่อให้การทดสอบดำเนินไปอย่างถูกต้องและประสบผลสำเร็จ จำเป็นต้องทราบถึงวัตถุประสงค์ของการทดสอบ อุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดสอบ รวมทั้งต้องเข้าใจถึงวิธีการทดสอบและวิธีการวิเคราะห์ผลการทดสอบที่ได้ ซึ่งสามารถกล่าวแยกได้เป็นส่วนๆ ดังนี้

3.1 วัตถุประสงค์ในการทดสอบ

3.1.1 เพื่อศึกษาถึงลักษณะการกัดกร่อนบนผิวด้านในของเทอร์โมไซฟอน โดยใช้

3.1.1.1 เครื่องซึ่งมวลละเอียด เพื่อหาอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยจากน้ำหนักที่หายไป

3.1.1.2 กล้องจุลทรรศน์ เพื่อเห็นถึงรูปแบบการกัดกร่อนและหาค่าอัตราการกัดกร่อนสูงสุดจากค่าความลึกของรูสูงสุดที่ได้จากภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์

3.1.1.3 เครื่อง X-ray diffractometer (XRD) และเครื่อง Infra-red spectroscopy (IR) เพื่อตรวจวิเคราะห์สารที่เกิดขึ้นบนผิวภายในท่อของเทอร์โมไซฟอน

3.1.2 เพื่อศึกษาหาปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นภายในท่อเทอร์โมไซฟอน โดยใช้เครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี

3.1.3 เพื่อศึกษาหาการนำความร้อน ผลต่างของอุณหภูมิในส่วนควบแน่น และค่าความต้านทานการถ่ายเทความร้อนรวมของเทอร์โมไซฟอน โดยการวัดค่าอุณหภูมิที่ส่วนต่างๆ ของเทอร์โมไซฟอนและแหล่งให้ความร้อน

3.1.4 เพื่อศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ย อัตราการกัดกร่อนสูงสุด และปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นในเทอร์โมไซฟอนกับระยะเวลาที่ทำการทดสอบและส่วนกลับของอุณหภูมิการใช้งาน โดยการนำแผนภาพอาร์เรย์เนี่ยสมาประยุกต์ใช้กับข้อมูลที่ได้

3.1.5 เพื่อศึกษาถึงผลของเวลาทำการทดสอบ อุณหภูมิการใช้งาน วิธีการป้องกันการกัดกร่อนของเทอร์โมไซฟอนและวัสดุที่ใช้ทำเทอร์โมไซฟอน ที่มีต่อค่าอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ย อัตราการกัดกร่อนสูงสุดและปริมาณก๊าซไฮโดรเจน

3.1.6 เพื่อศึกษาถึงผลของปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นในเทอร์โมไซฟอนและสารที่เคลือบบนผิวภายในท่อที่มีต่อค่าความต้านทานการถ่ายเทความร้อนรวมของเทอร์โมไซฟอน

3.2 ตัวแปรสำหรับการทดสอบ

3.2.1 วัสดุที่ใช้ทำท่อเทอร์โมไซฟอนต้องเป็นวัสดุที่มีใช้กันแพร่หลายทั่วไป ประกอบไปด้วย

- 3.2.1.1 ท่อทองแดงที่มีผิวภายในเรียบ จำนวน 81 ท่อ
- 3.2.1.2 ท่อเหล็กที่มีผิวภายในเรียบ จำนวน 81 ท่อ
- 3.2.1.3 ท่ออะลูมิเนียมที่มีผิวภายในเรียบ จำนวน 81 ท่อ
- 3.2.1.4 ท่อทองแดงที่มีผิวภายในเป็นร่องแบบ Spiral ซึ่งมีจำนวนร่องเกลียวเป็น 30 ต่อเมตร และมีความยาวของร่องเกลียวเป็น 76 มิลลิเมตร จำนวน 24 ท่อ
- 3.2.1.5 ท่อสแตนเลสที่มีผิวภายในเป็นร่องแบบ Spiral ซึ่งมีจำนวนร่องเกลียวเป็น 30 ต่อเมตร และมีความยาวของร่องเกลียวเป็น 76 มิลลิเมตร จำนวน 24 ท่อ
- 3.2.2 วิธีการป้องกันการกัดกร่อน แบ่งเป็น 9 วิธี คือ
- 3.2.2.1 วิธีที่ 1 คือ ไม่ได้รับการป้องกันการกัดกร่อน
- 3.2.2.2 วิธีที่ 2 คือ เติมสารยับยั้งหรือโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (Na_2HPO_4) ลงในสารทำงานหรือน้ำกลั่นด้วยความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร
- 3.2.2.3 วิธีที่ 3 คือ เติมโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟตลงในสารทำงานด้วยความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร
- 3.2.2.4 วิธีที่ 4 คือ การเผาท่อที่อุณหภูมิ 550°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- 3.2.2.5 วิธีที่ 5 คือ การเผาท่อที่อุณหภูมิ 550°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และเติมโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟตลงในสารทำงานด้วยความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร
- 3.2.2.6 วิธีที่ 6 คือ การเผาท่อที่อุณหภูมิ 550°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และเติมโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟตลงในสารทำงานด้วยความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร
- 3.2.2.7 วิธีที่ 7 คือ การเผาท่อที่อุณหภูมิ 550°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
- 3.2.2.8 วิธีที่ 8 คือ การเผาท่อที่อุณหภูมิ 550°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และเติมโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟตลงในสารทำงานด้วยความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร
- 3.2.2.9 วิธีที่ 9 คือ การเผาท่อที่อุณหภูมิ 550°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และเติมโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟตลงในสารทำงานด้วยความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร
- โดยเทอร์โมไซฟอนที่ทำจากท่อชนิดที่มีผิวภายในเรียบนั้นจะได้รับการป้องกันการกัดกร่อนทั้ง 9 วิธีที่กล่าวมาข้างต้น ส่วนเทอร์โมไซฟอนที่ทำจากท่อชนิดที่มีผิวภายในเป็นร่องแบบ Spiral จะได้รับการป้องกันการกัดกร่อนด้วยวิธีที่ 1, 3, 7 และ 9 เท่านั้น
- 3.2.3 อุณหภูมิการใช้งานแบ่งเป็น 3 ระดับ เพราะต้องการนำไปประยุกต์ใช้งานในเครื่องอุ่นอากาศหรือน้ำเพื่อป้อนเข้าสู่หม้อไอน้ำ ซึ่งมีระดับอุณหภูมิอยู่ในช่วง $120 - 400^\circ\text{C}$ จึงทำการทดสอบที่อุณหภูมิดังต่อไปนี้

3.2.3.1 ที่อุณหภูมิการใช้งานประมาณ 150°C

3.2.3.2 ที่อุณหภูมิการใช้งานประมาณ 250°C

3.2.3.3 ที่อุณหภูมิการใช้งานประมาณ 350°C

3.2.4 ระยะเวลาที่นำเทอร์โมไชฟอนออกมาตรวจสอบ แบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ

3.2.4.1 สำหรับเทอร์โมไชฟอนที่ทำจากท่อชนิดที่มีผิวภายในเรียบ จะนำท่อออกมาตรวจสอบที่ระยะเวลา ดังต่อไปนี้

ก. ที่ระยะเวลา 1000 ชั่วโมง

ข. ที่ระยะเวลา 2500 ชั่วโมง

ค. ที่ระยะเวลา 4000 ชั่วโมง

3.2.4.2 สำหรับเทอร์โมไชฟอนที่ทำจากท่อชนิดที่มีผิวภายในเป็นร่องแบบ Spiral จะนำท่อออกมาตรวจสอบที่ระยะเวลา ดังต่อไปนี้

ก. ที่ระยะเวลา 2000 ชั่วโมง

ข. ที่ระยะเวลา 4000 ชั่วโมง

3.3 อุปกรณ์การทดสอบ

3.3.1 ชุดทดสอบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

ชุดทดสอบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนได้ถูกออกแบบและสร้างขึ้นในการทดลองนี้ เพื่อใช้เป็นแหล่งความร้อนแก่ส่วนทำระเหยของเทอร์โมไชฟอนซึ่งจะมีทั้งหมด 3 เครื่อง เพื่อใช้งานที่อุณหภูมิประมาณ 150°C , 250°C และ 350°C โดยการให้ส่วนทำระเหยของเทอร์โมไชฟอนจมอยู่ในทรายที่บรรจุอยู่ในถังที่มีฮีตเตอร์ (Heater) แบบแผ่นติดอยู่โดยรอบ ขนาดและปริมาณของฮีตเตอร์ที่ใช้ขึ้นอยู่กับขนาดของถังที่บรรจุทรายไว้จนเต็ม อุณหภูมิการใช้งาน รวมถึงจำนวนของเทอร์โมไชฟอนที่บรรจุอยู่ในถัง ซึ่งจะแยกพิจารณาที่ละเครื่องดังนี้

ก. ชุดทดสอบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่อุณหภูมิการใช้งาน 150°C

ออกแบบให้ถังที่บรรจุทรายมีขนาดกว้าง 12 เซนติเมตร ยาว 102 เซนติเมตร และลึก 52 เซนติเมตร และใช้บรรจุเทอร์โมไชฟอนทั้งหมด 97 ท่อ โดยมีการติดฮีตเตอร์แบบแผ่นขนาด 280 วัตต์ จำนวน 12 ตัว รอบๆ ถัง รวมทั้งจะมีฉนวนกันความร้อนอยู่รอบๆ ถังอีกทีหนึ่ง ดังรูป 3.1

ข. ชุดทดสอบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่อุณหภูมิการใช้งาน 250°C

ออกแบบให้ถังที่บรรจุทรายมีขนาดกว้าง 14 เซนติเมตร ยาว 120 เซนติเมตร และลึก 52 เซนติเมตร และใช้บรรจุเทอร์โมไชฟอนทั้งหมด 97 ท่อ โดยมีการติดฮีตเตอร์แบบแผ่นขนาด

480 วัดต์ จำนวน 8 ตัว และขนาด 280 วัดต์ จำนวน 16 ตัว รอบๆ ถึง รวมทั้งจะมีฉนวนกันความร้อนอยู่รอบๆ ถึงอีกทีหนึ่ง ดังรูป 3.2

ค. ชุดทดสอบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่อุณหภูมิการใช้งาน 350°C

ออกแบบให้ถังที่บรรจุทรายมีขนาดกว้าง 54 เซนติเมตร ยาว 59 เซนติเมตร และลึก 52 เซนติเมตร และใช้บรรจุเทอร์โมไซโฟนทั้งหมด 97 ท่อ โดยมีการติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่อุณหภูมิการใช้งานประมาณ 150°C , 250°C และ 350°C ตามลำดับ และเทอร์โมไซโฟนในถังแต่ละกลุ่มจะมีรายละเอียดดังตาราง 3.1 เนื่องจากท่อเหล็กชนิดที่ผิวภายในเป็นร่องแบบ Spiral ไม่มีการผลิตในประเทศไทย จึงใช้ท่อสแตนเลสชนิดที่ผิวภายในเป็นร่องแบบ Spiral แทนซึ่งมีราคาแพง ทำให้นำมาทดสอบได้ในจำนวนจำกัด

3.3.2 เทอร์โมไซโฟน

เทอร์โมไซโฟนที่สร้างขึ้นในการทดสอบจะมีความยาวเท่ากับ 1 เมตร และมีจำนวนทั้งหมด 291 ท่อ ซึ่งจะถูกแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มๆ ละ 97 ท่อ เพื่อติดตั้งลงในชุดทดสอบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่อุณหภูมิการใช้งานประมาณ 150°C , 250°C และ 350°C ตามลำดับ และเทอร์โมไซโฟนในแต่ละกลุ่มจะมีรายละเอียดดังตาราง 3.1 เนื่องจากท่อเหล็กชนิดที่ผิวภายในเป็นร่องแบบ Spiral ไม่มีการผลิตในประเทศไทย จึงใช้ท่อสแตนเลสชนิดที่ผิวภายในเป็นร่องแบบ Spiral แทนซึ่งมีราคาแพง ทำให้นำมาทดสอบได้ในจำนวนจำกัด

โดยที่ขั้นตอนการสร้างเทอร์โมไซโฟนมีดังต่อไปนี้

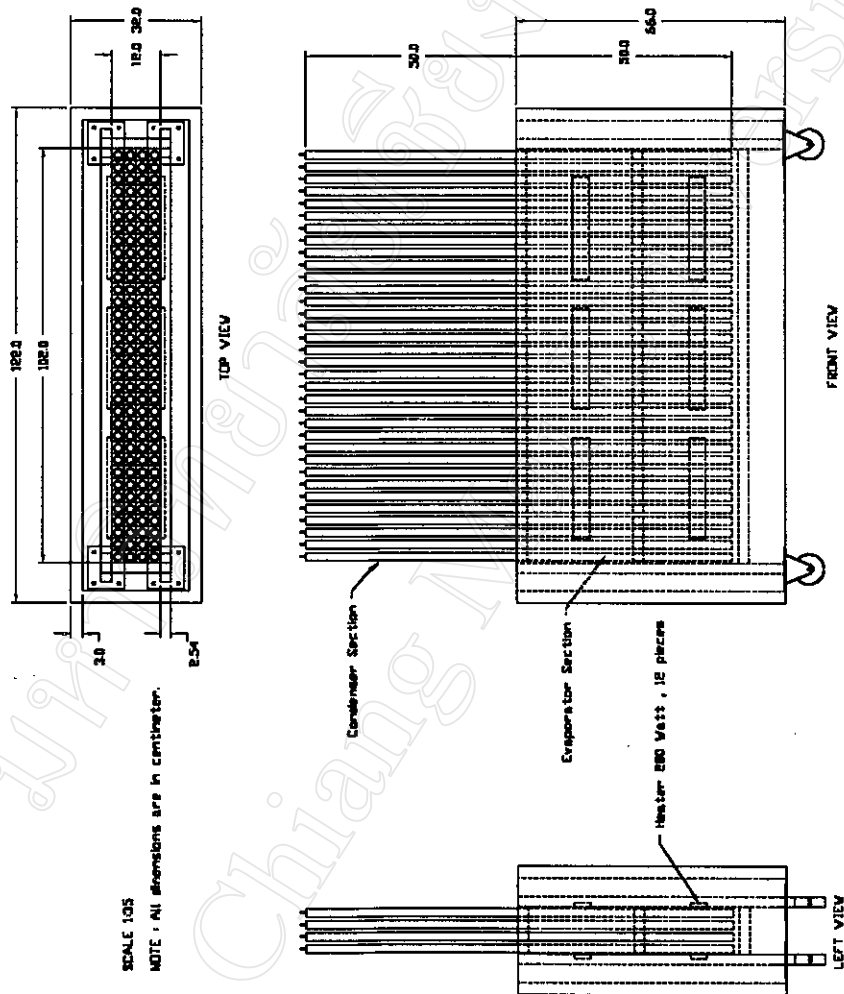
3.3.2.1 ทำความสะอาดผิวภายในของท่อทั้งหมดที่จะทำเป็นเทอร์โมไซโฟน

3.3.2.2 เชื่อมปิดหัวและท้ายของท่อทั้งหมดด้วยจุกที่กลึงจากเพลลาของโลหะชนิดเดียวกัน ซึ่งจุกที่ใช้ปิดด้านบนของท่อนั้นจะได้รับการเจาะรูและเชื่อมติดกับท่อขนาด 6.35 มิลลิเมตร ($\frac{1}{4}$ นิ้ว) มาแล้ว เพื่อใช้สำหรับทำสุญญากาศและเติมสารทำงานลงในท่อ โดยที่ลักษณะของท่อที่ได้รับการเชื่อมปิดหัวท้ายแล้วจะเป็นดังรูป 3.4

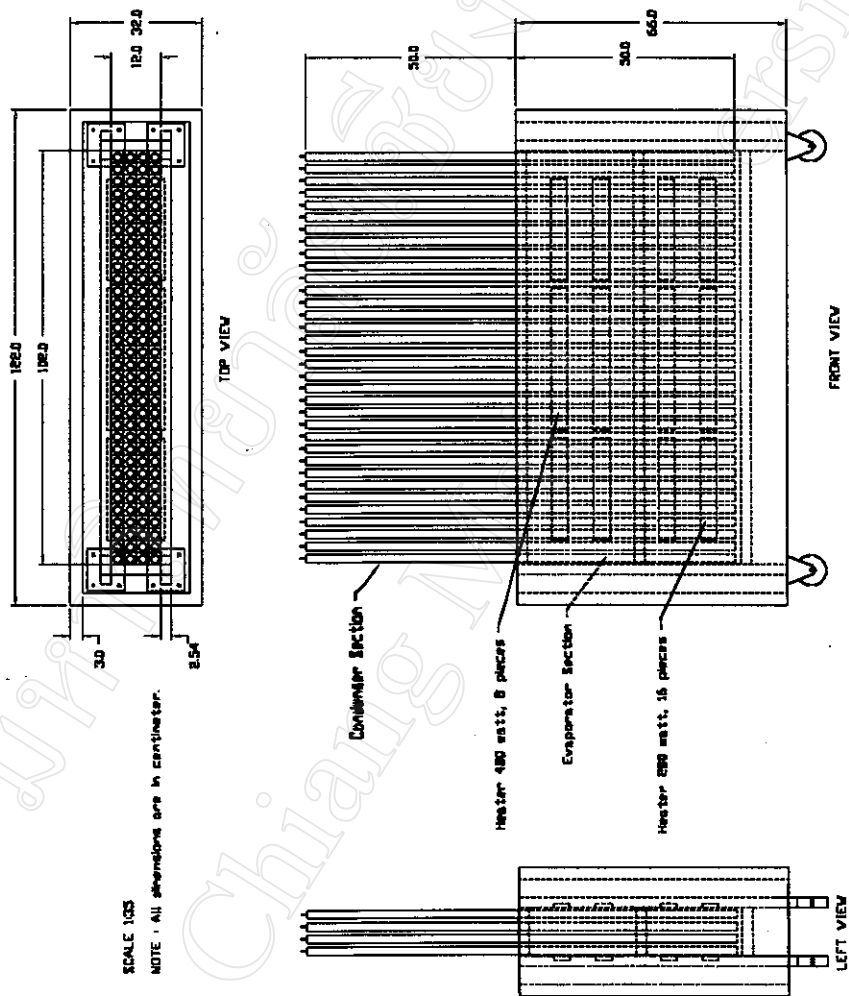
3.3.2.3 เติมสารอะซีโตนเข้าไปในท่อทั้งหมดให้เต็มแล้วทิ้งไว้ 1 คืน เพื่อทำความสะอาดคราบมันและคราบเขม่าจากการเชื่อม แล้วระบายสารอะซีโตนออกและทิ้งไว้ให้ภายในท่อแห้ง

3.3.2.4 แบ่งท่อที่ต้องการเคลือบผิวท่อด้วยออกไซด์ไปเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 550°C ตามเวลาที่กำหนด เนื่องจากไม่สามารถหาไดนาไมท์ร้อนยวดยิ่งมาใช้ได้จึงใช้การเผาท่อในเตาเผาที่มีก๊าซหุงต้มเป็นเชื้อเพลิงแทน ซึ่งทำได้ง่ายกว่า ดังรูป 3.5

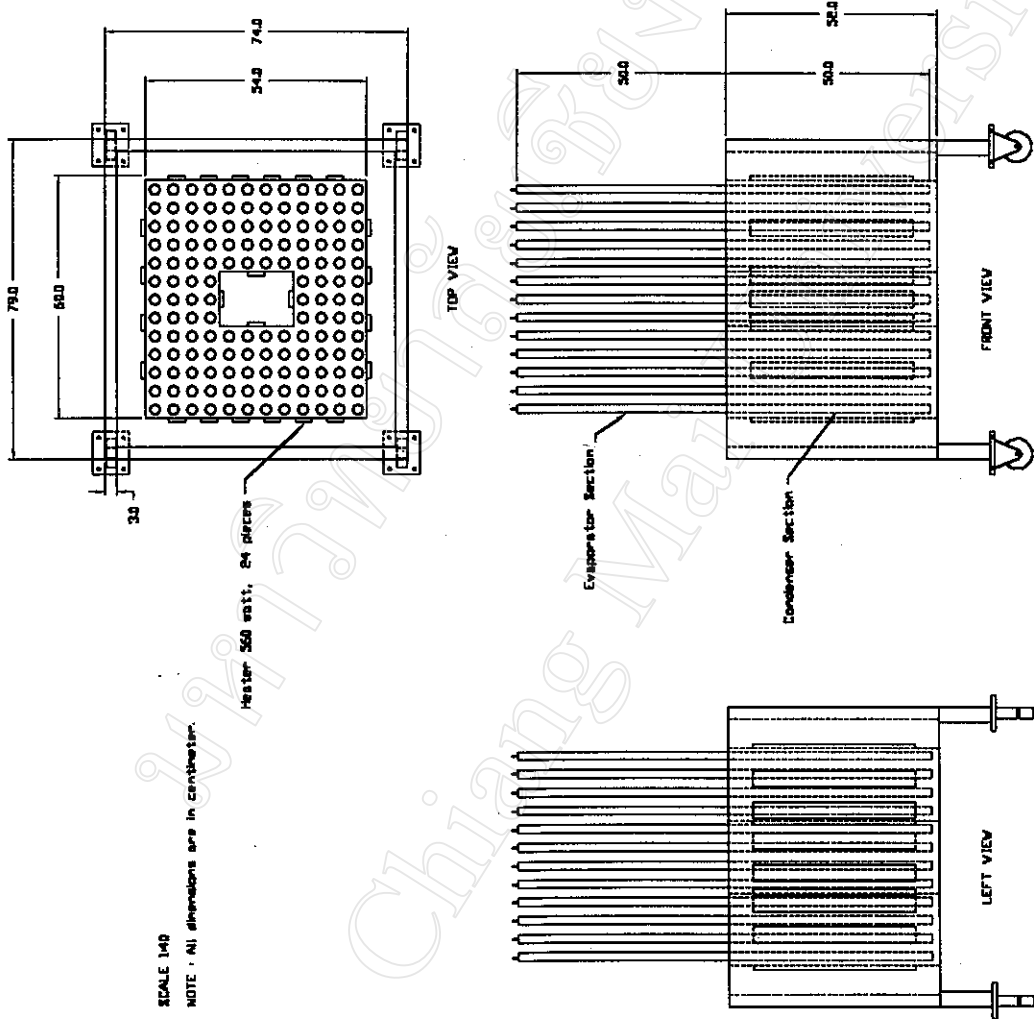
3.3.2.5 ดูดอากาศออกจากท่อหรือทำสุญญากาศภายในท่อแต่ละท่อ และเติมของเหลวทำงานลงไป 50 เปอร์เซ็นต์ของปริมาตรส่วนทอระเหยซึ่งเป็นครึ่งหนึ่งของปริมาตรท่อทั้งหมด แล้วจึงเชื่อมปิดปลายท่อให้สนิททันที ก็จะได้เทอร์โมไซโฟนที่สามารถนำไปใช้งานได้



รูป 3.1 ชุดทดสอบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่อุณหภูมิ 150°C



รูป 3.2 ชุดทดสอบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่อุณหภูมิ 250°C



รูป 3.3 ชุดทดสอบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่อุณหภูมิ 350°C

ตาราง 3.1 แสดงรายละเอียดของเทอร์โมไซฟอนในแต่ละอุณหภูมิการใช้งาน (มีทั้งหมด 3 อุณหภูมิ คือ 150°C, 250°C และ 350°C)

หมายเลข	วัสดุที่ใช้ทำ เทอร์โมไซฟอน	D _o (mm)	D _i (mm)	เวลาการเผาต่อ (hrs)	สารทำงาน	จำนวน ท่อ
1	Cu	19.1	17.0	0	น้ำกลั่น	3
2	Cu	19.1	17.0	0	น้ำกลั่น+Na ₂ HPO ₄ 10 ppm	3
3	Cu	19.1	17.0	0	น้ำกลั่น+Na ₂ HPO ₄ 20 ppm	3
4	Cu	19.1	17.0	1	น้ำกลั่น	3
5	Cu	19.1	17.0	1	น้ำกลั่น+Na ₂ HPO ₄ 10 ppm	3
6	Cu	19.1	17.0	1	น้ำกลั่น+Na ₂ HPO ₄ 20 ppm	3
7	Cu	19.1	17.0	2	น้ำกลั่น	3
8	Cu	19.1	17.0	2	น้ำกลั่น+Na ₂ HPO ₄ 10 ppm	3
9	Cu	19.1	17.0	2	น้ำกลั่น+Na ₂ HPO ₄ 20 ppm	3
10	Fe	20.5	18.0	0	น้ำกลั่น	3
11	Fe	20.5	18.0	0	น้ำกลั่น+Na ₂ HPO ₄ 10 ppm	3
12	Fe	20.5	18.0	0	น้ำกลั่น+Na ₂ HPO ₄ 20 ppm	3
13	Fe	20.5	18.0	1	น้ำกลั่น	3
14	Fe	20.5	18.0	1	น้ำกลั่น+Na ₂ HPO ₄ 10 ppm	3
15	Fe	20.5	18.0	1	น้ำกลั่น+Na ₂ HPO ₄ 20 ppm	3
16	Fe	20.5	18.0	2	น้ำกลั่น	3
17	Fe	20.5	18.0	2	น้ำกลั่น+Na ₂ HPO ₄ 10 ppm	3
18	Fe	20.5	18.0	2	น้ำกลั่น+Na ₂ HPO ₄ 20 ppm	3
19	Al	19.1	16.5	0	น้ำกลั่น	3
20	Al	19.1	16.5	0	น้ำกลั่น+Na ₂ HPO ₄ 10 ppm	3
21	Al	19.1	16.5	0	น้ำกลั่น+Na ₂ HPO ₄ 20 ppm	3
22	Al	19.1	16.5	1	น้ำกลั่น	3
23	Al	19.1	16.5	1	น้ำกลั่น+Na ₂ HPO ₄ 10 ppm	3
24	Al	19.1	16.5	1	น้ำกลั่น+Na ₂ HPO ₄ 20 ppm	3
25	Al	19.1	16.5	2	น้ำกลั่น	3
26	Al	19.1	16.5	2	น้ำกลั่น+Na ₂ HPO ₄ 10 ppm	3
27	Al	19.1	16.5	2	น้ำกลั่น+Na ₂ HPO ₄ 20 ppm	3

ตาราง 3.1 แสดงรายละเอียดของเทอร์โมไซฟอนในแต่ละอุณหภูมิการใช้งาน (ต่อ)

หมายเลข	วัสดุที่ใช้ทำ เทอร์โมไซฟอน	D _o (mm)	D _i (mm)	เวลาการเผาท่อ (hrs)	สารทำงาน	จำนวน ท่อ
28	CuG	19.9	17.6	0	น้ำกลั่น	2
29	CuG	19.9	17.6	0	น้ำกลั่น+Na ₂ HPO ₄ 20 ppm	2
30	CuG	19.9	17.6	2	น้ำกลั่น	2
31	CuG	19.9	17.6	2	น้ำกลั่น+Na ₂ HPO ₄ 20 ppm	2
32	SSi	19.8	17.2	0	น้ำกลั่น	2
33	SSi	19.8	17.2	0	น้ำกลั่น+Na ₂ HPO ₄ 20 ppm	2
34	SSi	19.8	17.2	2	น้ำกลั่น	2
35	SSi	19.8	17.2	2	น้ำกลั่น+Na ₂ HPO ₄ 20 ppm	2



รูป 3.4 แสดงท่อที่ได้รับการเชื่อมปิดหัวและท้ายของท่อแล้ว



รูป 3.5 แสดงการเผาไหม้ในเตาเผาที่มีก๊าซหุงต้มเป็นเชื้อเพลิง

3.4 อุปกรณ์ประกอบและเครื่องมือวัด

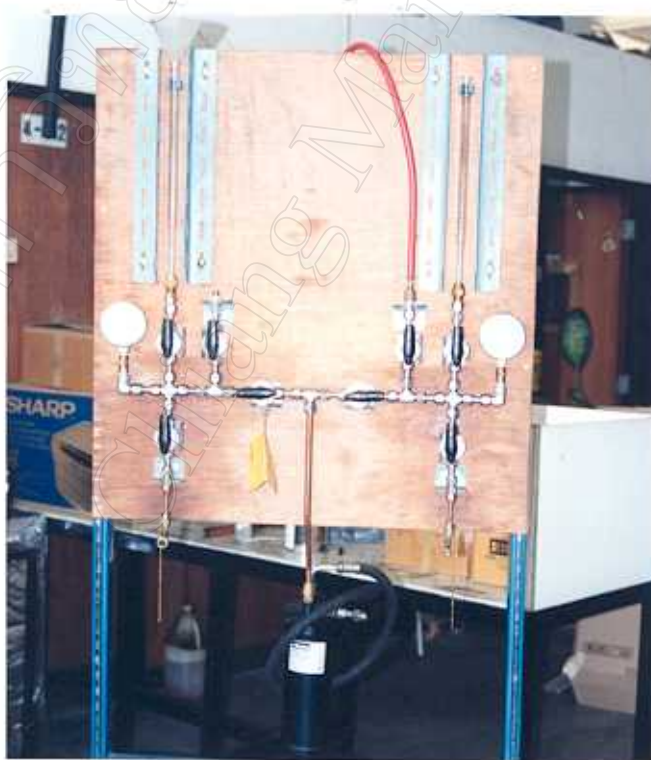
3.4.1 ฮีตเตอร์ (Heater) แบบแผ่น ใช้สำหรับให้ความร้อนแก่ทรายละเอียดที่บรรจุอยู่ในถัง แล้วทรายจะเป็นตัวนำความร้อนไปให้แก่ส่วนทำระเหยของเทอร์โมไซฟอนอีกทีหนึ่ง โดยที่ฮีตเตอร์แผ่นที่นำมาใช้นี้จะมีขนาดเท่ากับ 280, 480 และ 560 วัตต์ ดังแสดงในรูป 3.6

3.4.2 เครื่องบรรจustrทำงาน เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการบรรจustrทำงานเข้าสู่เทอร์โมไซฟอน โดยจะประกอบด้วย Vacuum pump, Valve A, B, C, D, E, F, G, H, Working fluid container และมีท่อสแตนเลสทำหน้าที่เชื่อมต่อกัน ดังแสดงในรูป 3.7 โดยจะนำเทอร์โมไซฟอนมาต่อเข้าเมื่อจะทำการบรรจustrทำงาน

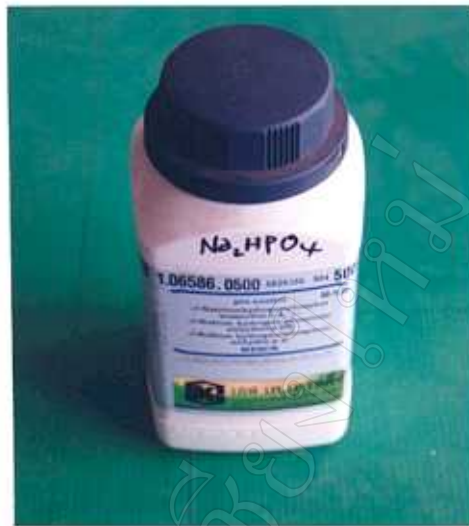
3.4.3 สารโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (Na_2HPO_4) ใช้เป็นสารยับยั้งของปฏิกิริยาการเกิดการกัดกร่อนภายในท่อเทอร์โมไซฟอน ดังแสดงในรูป 3.8



รูป 3.6 ซีตเตอร์แบบแผ่นขนาด 280, 480 และ 560 วัตต์ จากซ้ายไปขวา



รูป 3.7 เครื่องบรรจุมอเตอร์ทำงาน



รูป 3.8 สารโพแตสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต

3.4.4 เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) ยี่ห้อ OMEGA Type K ใช้ร่วมกับเครื่องอ่านอุณหภูมิ เพื่อวัดค่าอุณหภูมิในถังทราย อุณหภูมิของอากาศบริเวณที่ทำการทดสอบ และอุณหภูมิที่ส่วนควบแน่นของเทอร์โมไซฟอน สำหรับการวัดอุณหภูมิที่ส่วนควบแน่นของเทอร์โมไซฟอนนั้น เพื่อความสะดวกจึงได้มีการติดสายเทอร์โมคัปเปิลไว้บนผิวด้านในของท่อทองแดงที่ถูกผ่าครึ่งตามแนวยาวของท่อ โดยการเจาะท่อให้เป็นรูขนาด 1 มิลลิเมตร แล้วสอดสายเทอร์โมคัปเปิลมาปิดด้านในของท่อไว้ตามจุดต่างๆ ดังรูป 3.9 ในการติดสายเทอร์โมคัปเปิลนี้จะมีการเว้นระยะจากปลายท่อเพื่อเลี่ยงความยาวของจุดปิดด้านบนของท่อเทอร์โมไซฟอน และในช่วงแรกจะติดสายเทอร์โมคัปเปิลห่างกัน 15 มิลลิเมตร จำนวน 11 จุด ในช่วงที่สองจะติดสายเทอร์โมคัปเปิลห่างกัน 30 มิลลิเมตร จำนวน 4 จุด ส่วนในช่วงสุดท้ายจะติดสายเทอร์โมคัปเปิลห่างกัน 45 มิลลิเมตร จำนวน 3 จุด

3.4.5 เครื่องอ่านอุณหภูมิ 10 ช่องสัญญาณ ยี่ห้อ COMARK รุ่น C8510 มีช่วงในการวัดอุณหภูมิ -100 ถึง 3000°C มีความแม่นยำ $\pm 0.2\%$ ดังแสดงในรูป 3.10

3.4.6 เครื่องอ่านอุณหภูมิ 20 ช่องสัญญาณ ยี่ห้อ YOKOGAWA รุ่น HR1300 มีความแม่นยำ $\pm 0.05\%$ ดังแสดงในรูป 3.11

3.4.7 เครื่องชั่ง ยี่ห้อ DIGICON รุ่น GL-1002R แสดงผลแบบตัวเลขละเอียดถึงทศนิยมตำแหน่งที่ 3 ในหน่วยกิโลกรัม และสามารถชั่งมวลได้สูงสุด 10 กิโลกรัม มีความแม่นยำ $\pm 0.4\%$ ดังแสดงในรูป 3.12 ใช้สำหรับชั่งท่อเทอร์โมไซฟอนที่ผ่านการทดสอบมาแล้วก่อนจะนำไปตรวจวิเคราะห์ด้วยกรรมวิธีต่างๆ



รูป 3.9 เครื่องมือสำหรับวัดอุณหภูมิที่ส่วนควบแน่น



รูป 3.10 เครื่องอ่านอุณหภูมิ 10 ช่องสัญญาณ



รูป 3.11 เครื่องอ่านอุณหภูมิ 20 ช่องสัญญาณ



รูป 3.12 เครื่องชั่ง

3.4.8 เครื่องชั่งมวลละเอียด ยี่ห้อ METTLER รุ่น AJ150L แสดงผลเป็นตัวเลขละเอียดถึงทศนิยมตำแหน่งที่ 4 ในหน่วยกรัม และสามารถชั่งมวลได้สูงสุด 150 กรัม ดังแสดงในรูป 3.13 ใช้สำหรับหามวลของท่อที่หายไปหลังการทดสอบ



รูป 3.13 เครื่องชั่งมวลละเอียด

3.4.9 เครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี (Gas chromatography, GC) และเครื่องบันทึกผลการตรวจวิเคราะห์ ดังรูป 3.14 และ 3.15 ใช้สำหรับหาปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นในเทอร์โมโซฟอน โดยจะแสดงผลออกมาเป็นเส้นกราฟและเป็นเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนใน 1 มิลลิลิตรของก๊าซที่ฉีดเข้าไปตรวจสอบในเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี



รูป 3.14 เครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี



รูป 3.15 เครื่องบันทึกผลการวิเคราะห์จากเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี

3.4.10 เข็มฉีดยา ขนาด 1 ml ดังรูป 3.16 ใช้สำหรับดูดก๊าซที่เกิดขึ้นในส่วนควบแน่นของเทอร์โมไซฟอนออกมาตรวจวิเคราะห์ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี



รูป 3.16 เข็มฉีดยา ขนาด 1 ml

3.4.11 เครื่อง X-ray diffractometer (XRD) และเครื่องบันทึกผลการตรวจวิเคราะห์ ดังรูป 3.17 และ 3.18 ใช้สำหรับตรวจวิเคราะห์สารที่เกิดขึ้นบนผิวภายในท่อ โดยอาศัยรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะตัวของสาร



รูป 3.17 เครื่อง X-ray diffractometer



รูป 3.18 เครื่องบันทึกผลการตรวจวิเคราะห์จากเครื่อง X-ray diffractometer

3.4.12 เครื่องอัดความดันไฮดรอลิก (Hydraulic workshop press) ยี่ห้อ SANKYO รุ่น SCP-60 สามารถอัดความดันได้สูงสุด 250 kg/mm^2 ใช้สำหรับเตรียมตัวอย่างที่จะนำไปตรวจวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD ดังแสดงในรูป 3.19



รูป 3.19 เครื่องอัดความดันไฮดรอลิก

3.4.13 เครื่อง Infra-red spectroscopy (IR) และเครื่องบันทึกผลการตรวจวิเคราะห์ ดังรูป 3.20 และ 3.21 ใช้สำหรับตรวจวิเคราะห์สารที่เกิดขึ้นบนผิวภายในท่อ โดยการตรวจจับพลังงานความร้อนที่เกิดจากการสั่นของอะตอมในตัวอย่างซึ่งมีค่าแตกต่างกันไปตามชนิดของพันธะระหว่างอะตอมของตัวอย่าง



รูป 3.20 เครื่อง Infra-red spectroscopy



รูป 3.21 เครื่องบันทึกผลการตรวจวิเคราะห์จากเครื่อง Infra-red spectroscopy

3.4.14 สาร Potassium bromine (KBr) ดังรูป 3.22 ใช้ผสมกับสารที่ต้องการตรวจวิเคราะห์ด้วยเครื่อง IR เพื่อทำเป็น KBr disc



รูป 3.22 สาร Potassium bromine

3.4.15 เครื่องอัดและแม่พิมพ์ ดังรูป 3.23 ใช้ทำ KBr disc ซึ่งมีลักษณะเป็นแผ่นบางที่โปร่งใส แล้วนำ KBr disc ที่ได้ไปตรวจวิเคราะห์สารด้วยเครื่อง IR



รูป 3.23 เครื่องอัดและแม่พิมพ์

3.4.16 กล้องจุลทรรศน์ (Optical microscope) ยี่ห้อ OLYMPUS เป็นกล้องผลิตขึ้นมาเพื่อใช้งานพิเศษ สามารถจำแนกรายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างของวัตถุได้ชัดเจนดี ดังแสดงในรูป 3.24



รูป 3.24 กล้องจุลทรรศน์

3.4.17 เวอร์เนีย ใช้สำหรับวัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อ และวัดค่าความลึกของรูสูงสุดที่ได้จากภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์ โดยสามารถวัดได้ละเอียดถึง 0.02 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูป 3.25



รูป 3.25 เวอร์เนีย

3.4.18 โพลีเอสเตอร์เรซิน (Polyester resin) ดังรูป 3.26 ใช้เทลงในท่อก่อนที่จะนำไปกลึงปาดหน้าและนำไปตรวจสอบภาพการกัดกร่อนที่ผิวในด้วยกล้องจุลทรรศน์



รูป 3.26 โพลีเอสเตอร์เรซิน

3.4.19 ฟิล์มถ่ายรูป ยี่ห้อ Fuji ประเภท NEOPAN 1600 ขาว-ดำ ดังรูป 3.27 ใช้ในการถ่ายภาพสำหรับกล้องจุลทรรศน์



รูป 3.27 ฟิล์มถ่ายรูป

3.5 วิธีการทดสอบ

3.5.1 ตัดท่อทองแดง ท่อเหล็ก ท่ออะลูมิเนียม ชนิดที่ผิวภายในเรียบ และท่อทองแดง ท่อสเตนเลส ชนิดที่ผิวภายในเป็นร่อง ซึ่งเป็นท่อใหม่ออกมาอย่างละท่อนมีความยาวเท่ากับ 2.54 เซนติเมตร แล้วนำมาซึงหามวลด้วยเครื่องชั่งมวลละเอียดเก็บไว้

3.5.2 นำเทอร์โมไซโฟนทั้งหมดมาติดตั้งลงในชุดทดสอบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทั้ง 3 เครื่อง โดยให้ส่วนทำระเหยซึ่งมีความยาวเท่ากับ 50 เซนติเมตร จมอยู่ในถังทรายและให้ส่วนควบแน่นมีการระบายความร้อนด้วยอากาศ รวมทั้งมีการติดตั้งสายเทอร์โมคัปเปิลในถังทรายและในอากาศบริเวณที่ทำการทดสอบ

3.5.3 เริ่มเดินเครื่องชุดทดสอบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทั้ง 3 เครื่อง ให้ทำงานต่อเนื่องตลอดเป็นเวลา 4000 ชั่วโมง และในระหว่างนั้นก็ทำการบันทึกอุณหภูมิในถังทรายทั้ง 3 ถังและในอากาศทุกๆ 2 ชั่วโมง

3.5.4 ทำการวัดอุณหภูมิที่ส่วนควบแน่นของเทอร์โมไซโฟนทั้งหมดทุกๆ 240 ชั่วโมง โดยมีความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิประมาณ ± 0.05 %

3.5.5 เมื่อทำการทดสอบครบ 1000 ชั่วโมง ก็นำเทอร์โมไซฟอนออกจากชุดทดสอบทั้ง 3 เครื่อง โดยแบ่งเทอร์โมไซฟอนจากหมายเลข 1 ถึง 27 ในตาราง 3.1 ออกมาหมายเลขละ 1 ท่อ สำหรับแต่ละชุดทดสอบ

3.5.6 นำเทอร์โมไซฟอนทั้งหมดที่เอาออกจากชุดทดสอบทั้ง 3 เครื่อง มาชั่งหามวลด้วยเครื่องชั่ง

3.5.7 นำเทอร์โมไซฟอนที่ชั่งมวลเรียบร้อยแล้วมาตรวจหาปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นในส่วนควบแน่นของเทอร์โมไซฟอนโดยใช้เครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี ซึ่งมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

3.5.7.1 จับท่อให้ส่วนควบแน่นอยู่ด้านล่างเพื่อให้สารทำงานไหลมาที่ส่วนควบแน่นแทนที่ก๊าซ หลังจากนั้นเจาะท่อตรงส่วนปลายท่อด้านล่างที่เป็นส่วนควบแน่นโดยเว้นระยะจากจุดขึ้นมาประมาณ 3 เซนติเมตร จะได้รูที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 1 มิลลิเมตร และปิดรูนั้นด้วยกระดาษกาวให้สนิท

3.5.7.2 จับท่อให้ส่วนควบแน่นอยู่ด้านบนเหมือนเดิม แล้วใช้เข็มฉีดยาขนาด 1 มิลลิลิตร แทะเข้าไปในรูที่เตรียมไว้เพื่อดูก๊าซออกมาวิเคราะห์ โดยดูก๊าซออกมาเท่ากับ 1 มิลลิลิตร และหลังจากดูเสร็จก็ปิดกระดาษกาวทึบเข้าไปอีกให้สนิท

3.5.7.3 ฉีดก๊าซที่ได้จากข้อ 3.5.7.2 เข้าไปในเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟีที่ได้รับการอุ่นเครื่องมาก่อนหน้านี้เป็นเวลาประมาณครึ่งชั่วโมง โดยที่จะใช้ระบบ TCD ซึ่งมีก๊าซฮีเลียมเป็นก๊าซพาสำหรับการตรวจวิเคราะห์ก๊าซไฮโดรเจน แล้วผลที่ได้จะแสดงออกมาบนเครื่องบันทึกผลการตรวจวิเคราะห์จากเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี

3.5.7.4 ทำการทดสอบซ้ำข้อ 3.5.7.2 และ 3.5.7.3 อีก 2 เข็ม

3.5.8 ใช้เข็มฉีดยาดูดสารทำงานออกจากท่อที่ผ่านการตรวจหาปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนแล้วให้หมดและชั่งมวลของท่อด้วยเครื่องชั่งเก็บไว้ หลังจากนั้นทำการตัดส่วนทำระเหยของท่อโดยเว้นระยะจากปลายท่อเพื่อเลี้ยวจุดและรอยเชื่อมขึ้นมาประมาณ 10 เซนติเมตร ให้เป็นท่อนมีความยาวเท่ากับ 2.54 เซนติเมตร จำนวน 3 อัน และความยาวเท่ากับ 3.81 เซนติเมตร จำนวน 1 อัน

3.5.9 นำท่อตรงส่วนทำระเหยที่ตัดไว้ยาว 2.54 เซนติเมตร จากข้อ 3.5.8 มาผ่าครึ่งตามแนวแกนท่อแล้วปิดผิวด้านในของท่อด้วยเทปใสขนาด 2.54 เซนติเมตร ให้เรียบ หลังจากนั้นนำไปอัดด้วยเครื่องอัดความดันไฮดรอลิกที่ความดันเท่ากับ 120 kg/mm^2 ให้เป็นแผ่นแบน เพื่อนำไปตรวจวิเคราะห์สารที่เกิดขึ้นบนผิวภายในของท่อด้วยเครื่อง XRD ซึ่งผลการตรวจวิเคราะห์ที่ได้จะแสดงออกมาบนเครื่องบันทึกผลการตรวจสอบจากเครื่อง XRD

3.5.10 นำท่อตรงส่วนทำระเหยที่ตัดไว้ยาว 2.54 เซนติเมตร จากข้อ 3.5.8 มาตรวจวิเคราะห์สารที่เกิดขึ้นบนผิวภายในท่อด้วยเครื่อง IR ซึ่งมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

3.5.10.1 ขูดสารที่เกิดขึ้นบนผิวด้านในของท่อออกมาผสมกับ Potassium bromine แล้วบดให้ละเอียดและทำให้แห้งในตู้อบ

3.5.10.2 บรรจุสารที่ได้ลงในแม่พิมพ์ของเครื่องอัดและอัดด้วยความดันประมาณ 1000 kg/cm² ทิ้งไว้ 1 นาที จะได้สารที่มีลักษณะเป็นแผ่นบางโปร่งใสเรียกว่า KBr disc ซึ่งมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร

3.5.10.3 นำสารที่เป็นแผ่นบางไปตรวจวิเคราะห์ด้วยเครื่อง IR โดยผลการตรวจวิเคราะห์จะแสดงออกมาบนเครื่องบันทึกผลการตรวจสอบจากเครื่อง IR

3.5.11 นำท่อตรงส่วนทำระเหยที่ตัดไว้ยาว 2.54 เซนติเมตร จากข้อ 3.5.8 มาซึ่งหามวลด้วยเครื่องซึ่งมวลละเอียดเก็บไว้

3.5.12 นำเรซินมาเทลงในท่อที่ตัดไว้ยาว 3.81 เซนติเมตร จากข้อ 3.5.8 ให้เต็มท่อและทิ้งไว้ให้แห้งแล้วนำไปกลิ้งปาดหน้าให้เรียบเสมอกันทั้งภาคตัด หลังจากนั้นถ่ายภาพภาคตัดขวางของท่อด้วยกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 25 และ 50 เท่า ให้เห็นรูปแบบการกัดกร่อนที่ผิวด้านในของท่อและนำภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 50 เท่า มาวัดค่าความลึกของร่องสูงสุดที่เกิดจากการกัดกร่อนโดยใช้เวอร์เนียในการวัด

3.5.13 เมื่อทำการทดสอบครบ 2000 ชั่วโมง ก็นำเทอร์โมไิพอนออกจากชุดทดสอบทั้ง 3 เครื่อง โดยแบ่งเทอร์โมไิพอนจากหมายเลข 28 ถึง 35 ในตาราง 3.1 ออกมาหมายเลขละ 1 ท่อสำหรับแต่ละชุดทดสอบ แล้วทำการทดสอบซ้ำจากข้อ 3.5.6 ถึง 3.5.12

3.5.14 เมื่อทำการทดสอบครบ 2500 ชั่วโมง ก็นำเทอร์โมไิพอนออกจากชุดทดสอบทั้ง 3 เครื่อง โดยแบ่งเทอร์โมไิพอนจากหมายเลข 1 ถึง 27 ในตาราง 3.1 ออกมาหมายเลขละ 1 ท่อสำหรับแต่ละชุดทดสอบ แล้วทำการทดสอบซ้ำจากข้อ 3.5.6 ถึง 3.5.12

3.5.15 เมื่อทำการทดสอบครบ 4000 ชั่วโมง ก็ปิดเครื่องชุดทดสอบทั้ง 3 เครื่อง และนำเทอร์โมไิพอนที่เหลือทั้งหมดมาทำการทดสอบจากข้อ 3.5.6 ถึง 3.5.12

3.6 วิธีการวิเคราะห์

3.6.1 นำข้อมูลของแต่ละเทอร์โมไิพอนที่เก็บไว้ในช่วงทำการทดลองมาคำนวณหาค่าต่างๆ ดังนี้

3.6.1.1 ค่าอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ย (Cr) จากนิยามของอัตราการกัดกร่อนแบบ mpy ตามสมการ

$$Cr = \frac{534W}{\rho At} \dots \dots \dots (3.1)$$

3.6.1.2 ค่าอัตราการกัดกร่อนสูงสุด (Cr_{max}) จาก

$$Cr_{max} = \frac{8760p}{t} \dots \dots \dots (3.2)$$

โดยที่ p คือค่าความลึกของร่องสูงสุดของภาคตัดขวางของเทอร์โมไซฟอนที่ได้จากภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์

3.6.1.3 ปริมาตรก๊าซไฮโดรเจน (V) จาก

$$V = \left(\frac{\pi}{4} D_i^2 L - V_i \right) C_{ave} \dots \dots \dots (3.3)$$

โดยที่ D_i คือเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ

V_i คือปริมาตรสารทำงาน

C_{ave} คือความเข้มข้นเฉลี่ยของก๊าซไฮโดรเจน คิดเป็น % ใน 1 ml ที่ได้จากเครื่อง GC

L คือความยาวของเทอร์โมไซฟอน

และมีความคลาดเคลื่อนประมาณ ±5 %

3.6.1.4 เนื่องจากค่าการนำความร้อนของโลหะที่เป็นผนังท่อเทอร์โมไซฟอนที่ผ่านการทดสอบไม่สามารถคำนวณออกมาได้เดี่ยวๆ เพราะมีสารที่เกิดจากการกัดกร่อนมาเคลือบบนผิวภายในท่อไว้และมีก๊าซไฮโดรเจนเกิดขึ้นภายในท่อด้วย จึงใช้ค่าความต้านทานการถ่ายเทความร้อนรวมแทน ซึ่งมีความหมายไปในทางเดียวกันกับผลต่างของอุณหภูมิในส่วนควบแน่น คือ ถ้าค่าความต้านทานความร้อนรวมมาก ค่าผลต่างของอุณหภูมิในส่วนควบแน่นก็จะมากด้วย และถ้าค่าความต้านทานความร้อนรวมน้อย ค่าผลต่างของอุณหภูมิในส่วนควบแน่นก็จะน้อยด้วย ดังนั้นจึงคำนวณหาเฉพาะค่าความต้านทานการถ่ายเทความร้อนรวมจากสมการ (3.4) ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนประมาณ ±0.006%

$$Z_{\text{total}} = \frac{T_{\text{so}} - T_{\text{co}}}{\text{Nu} k D_o \pi (T_{\text{co}} - T_a)} \dots\dots\dots (3.4)$$

โดยที่

$$T_f = \frac{T_{\text{co}} + T_a}{2} \dots\dots\dots (3.5)$$

$$\overline{\text{Nu}}^{1/2} = 0.825 + \frac{0.387(\text{GrPr})^{1/6}}{[1 + (0.492/\text{Pr})^{9/16}]^{8/27}} \dots\dots\dots (10^{-1} < \text{GrPr} < 10^{12}) \dots\dots\dots (3.6)$$

$$\text{Gr} = \frac{g(T_{\text{co}} - T_a)L_c^3}{T_f \nu^2} \dots\dots\dots (3.7)$$

3.6.2 นำกราฟที่ได้จากการตรวจวิเคราะห์สารด้วยเครื่อง XRD ของแต่ละเทอร์โมโซฟอนซึ่งเป็นกราฟระหว่างค่ามุมที่เกิดการเลี้ยวเบน (2θ) กับความเข้มของรังสีเอ็กซ์ (I) มาคำนวณหาค่าความเข้มสัมพัทธ์ (I/I_0) และค่าระยะห่างระหว่างอะตอมจาก

$$d = \frac{\lambda}{2\sin\theta} \dots\dots\dots (3.8)$$

แล้วนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานของแต่ละสารที่เก็บรวบรวมไว้โดย JCPDS (Joint committee on Power Diffraction Standard) เพื่อที่จะหาว่าสารที่นำมาตรวจสอบเป็นสารใด

3.6.3 นำกราฟที่ได้จากการตรวจวิเคราะห์สารด้วยเครื่อง IR ของแต่ละเทอร์โมโซฟอนมาพิจารณาค่าพีค (Peak) ที่เกิดขึ้นว่าอยู่ในช่วงความถี่ (Wavenumber) ไດ ซึ่งเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าความถี่มาตรฐานจะทำให้ทราบว่าพีคดังกล่าวเป็นพีคของพันธะทางเคมีระหว่างอะตอมของธาตุชนิดใด

3.6.4 หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยที่คำนวณจากข้อ 3.6.1.1 กับระยะเวลาที่ทำการทดสอบและส่วนกลับของอุณหภูมิการใช้งานของเทอร์โมโซฟอน โดยมีการนำแผนภาพอาร์เรนห์เนี่ยสมาประยุกต์ใช้กับข้อมูลดังต่อไปนี้

3.6.4.1 เขียนกราฟระหว่างค่าอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยกับระยะเวลาที่ทำการทดสอบของเทอร์โมไซโฟนซึ่งทำจากวัสดุชนิดเดียวกันและได้รับการป้องกันการกัดกร่อนเหมือนกัน ที่ทุกอุณหภูมิการใช้งานและทุกระยะเวลาการทดสอบ

3.6.4.2 หาค่าเฉลี่ยของข้อมูลในแต่ละอุณหภูมิเพื่อใช้เป็นตัวแทนของข้อมูลในกลุ่มอุณหภูมิเดียวกัน หลังจากนั้นปรับค่าเฉลี่ยของแต่ละอุณหภูมิให้อยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกัน โดยตัวแปรที่ใช้ปรับค่าเฉลี่ยของแต่ละอุณหภูมิเรียกว่า ตัวคูณเลื่อนค่า ดังนั้นจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยกับผลคูณของเวลาและตัวคูณเลื่อนค่า

3.6.4.3 เขียนกราฟระหว่างตัวคูณเลื่อนค่ากับส่วนกลับของอุณหภูมิการใช้งาน ดังนั้นจะได้ความสัมพันธ์ของตัวคูณเลื่อนค่ากับส่วนกลับของอุณหภูมิการใช้งาน ซึ่งจะทำให้ทราบความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยกับเวลาที่อุณหภูมิใดๆ และความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยกับส่วนกลับของอุณหภูมิที่เวลาใดๆ

3.6.5 เขียนกราฟของความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยกับเวลาที่ได้จากข้อ 3.6.4 เพื่อศึกษาผลของเวลาที่มีต่อค่าอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ย

3.6.6 เขียนกราฟของความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยกับส่วนกลับของอุณหภูมิที่ได้จากข้อ 3.6.4 เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ย

3.6.7 เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยซึ่งคำนวณจากสมการระหว่างค่าอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยและเวลาในข้อ 3.6.4 กับวิธีการป้องกันการกัดกร่อน เพื่อศึกษาผลของวิธีการป้องกันการกัดกร่อนที่มีต่อค่าอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยโดยพิจารณาที่ละวัสดุที่ใช้ทำเทอร์โมไซโฟน

3.6.8 เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยซึ่งคำนวณจากสมการระหว่างค่าอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยและเวลาในข้อ 3.6.4 กับวัสดุที่ใช้ทำเทอร์โมไซโฟน เพื่อศึกษาผลของวัสดุที่ใช้ทำเทอร์โมไซโฟนที่มีต่อค่าอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ย

3.6.9 ทำการวิเคราะห์ข้อ 3.6.4 ถึง 3.6.8 แต่เปลี่ยนข้อมูลอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยเป็นอัตราการกัดกร่อนสูงสุดที่คำนวณจากข้อ 3.6.1.2 แทน

3.6.10 ทำการวิเคราะห์ข้อ 3.6.4 ถึง 3.6.8 แต่เปลี่ยนข้อมูลอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยเป็นปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนที่คำนวณจากข้อ 3.6.1.3 แทน

3.6.11 หาค่าความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานความร้อนรวมที่คำนวณจากข้อ 3.6.1.4 กับเวลาทำการทดสอบ โดยการนำแบบจำลอง fouling ของ Kern and Seaton มาประยุกต์ใช้กับข้อมูลดังต่อไปนี้

3.6.11.1 เขียนกราฟระหว่าง $\ln(dZ_{\text{total}}/dt)$ กับเวลาที่ทำการทดสอบ เพื่อหาค่า ϕ_d และ β เมื่อ $-\beta$ คือความชันของกราฟ ส่วน $\ln(\phi_d)$ คือจุดตัดแกน y

3.6.11.2 หาความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานความร้อนของ fouling กับเวลาจาก

$$Z_{\text{fouling}} = \frac{\phi_d}{\beta} (1 - e^{-\beta t}) \dots \dots \dots (3.9)$$

3.6.12 เขียนกราฟของความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานความร้อนของ fouling กับเวลาที่ทำการทดสอบซึ่งได้จากข้อ 3.6.11 เพื่อศึกษาผลของปริมาณก๊าซไฮโดรเจนในส่วนควบแน่นและสารที่เคลือบผิวภายในท่อที่มีต่อค่าความต้านทานความร้อนรวม และเนื่องจากได้ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิ วิธีการป้องกันการกัดกร่อนและวัสดุที่ใช้ทำเทอร์โมไซฟอนที่มีต่อปริมาณก๊าซไฮโดรเจนมาแล้ว เพื่อไม่ให้เกิดการซ้ำซ้อนจึงไม่มีการศึกษาในส่วน of ค่าความต้านทานความร้อนรวม