

การคืนสภาพคุณสมบัติเชิงกลของปะเก็นโลหะทองแดงที่ใช้งานแล้ว RECOVERY OF MECHANICAL PROPERTIES OF COPPER GASKET

เมธี โสภณ^{1,2*} ประยูร สงส์ริทธิกุล^{2,3} และ กนต์ธร ชำนิประศาสน์¹

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

โทร (66)-4422-4410 โทรสาร (66)-4422-4411 *อี-เมลล์: methee@nsrc.or.th

² ศูนย์ปฏิบัติการวิจัยเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนแห่งชาติ อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

โทร. (66)-4421-7040 โทรสาร. (66)-4421-7047

³ สาขาวิชาฟิสิกส์ สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

โทร. (66)-4422-4319 โทรสาร. (66)-4422-4932

Methee Sophon^{1,2*}, Prayoon Songsiriritthikul^{2,3} and Kontorn Chamniprasart¹

¹ School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology,

Nakhon Ratchasima, Thailand 30000, Tel. (66)-4422-4410 Fax.(66)-44-224411, *Email: methee@nsrc.or.th

² National Synchrotron Research Center, Nakhon Ratchasima, Thailand 30000,

Surapat 3 Suranaree University of Technology Tel. (66)-4421-7040, Fax. (66)-4421-7047

³ School of Physics, Institute of Science, Suranaree University of Technology

Nakhon Ratchasima, Thailand 30000, Tel. (66)-44-224319, Fax. (66)-4422-4932

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาวิเคราะห์และทดสอบการคืนสภาพคุณสมบัติเชิงกลของปะเก็นทองแดงชนิดปราศจากออกซิเจนความนำสูง (Oxygen Free High Conductivity) ที่ใช้งานแล้ว ปะเก็นดังกล่าวถูกใช้เพื่อป้องกันการรั่วซึมระหว่างข้อต่อแบบ Conflat Seals ในระบบสุญญากาศระดับสูงสุดขีด (Ultra-High Vacuum) ในการใช้งานปะเก็นจะถูกฉีกโดยสันของหน้าแปลน ทำให้เนื้อวัสดุบริเวณที่ถูกฉีกเกิดการเปลี่ยนรูปร่างถาวร จนเกิดรอยกีดขวางบนปะเก็น โครงสร้างและคุณสมบัติเชิงกลต่างๆ ที่เปลี่ยนไปหลังการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรสามารถทำให้กลับคืนสู่สภาพก่อนการเปลี่ยนรูปร่างได้ โดยให้ผ่านกระบวนการทางความร้อน ณ อุณหภูมิและช่วงเวลาที่เหมาะสมหรือกระบวนการอบอ่อน (Annealing) โดยตัวแปรที่เกี่ยวข้องในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยอุณหภูมิ เวลา และความแข็ง ผลการทดสอบกับระบบสุญญากาศ ภายใต้สภาวะความดันน้อยกว่าหรือเท่ากับ 10^{-7} Torr แรงบิดในการกดอัดหน้าแปลนกับปะเก็นเข้าด้วยกันไม่เกิน 110 kg·cm อัตราการรั่วซึมผ่านปะเก็นน้อยกว่า 10^{-8} Torr l/s·cm พบว่าปะเก็นที่ใช้แล้วที่ไม่ผ่านกระบวนการอบอ่อนสามารถใช้งานได้ร้อยละ 20 ส่วนปะเก็นที่ใช้แล้วที่ผ่านกระบวนการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 400 °C นาน 300 นาที สามารถใช้งานได้ร้อยละ 87.5

Abstract

The recovery of mechanical properties of used OFHC (Oxygen Free High Conductivity) gaskets have been investigated. The gaskets were used in Conflat seals of a UHV (Ultra-High Vacuum) system. The sealing ridges on the conflate flange are designed to bite on each side of the gaskets. The bite in to the gaskets is generally small plastic deformation or cold work. When cold work has occurred, the changes of microstructure and mechanical properties of the metal can be recovered by the process of heat treatment, known as "annealing". It was found that the most suitable condition for gasket annealing temperature and time were 400 °C and 300 min. respectively. The annealed gaskets were reused. Their leak-tight performance was tested in a vacuum system at vacuum pressure of 10^{-7} Torr. The maximum torque was used in the test 110 kg·cm. It was found that 87.5 % of used gaskets have the leak rate below 10^{-8} Torr l/s·cm, which is acceptable for use in UHV system. While, 20% of gaskets without annealing passed this criteria.

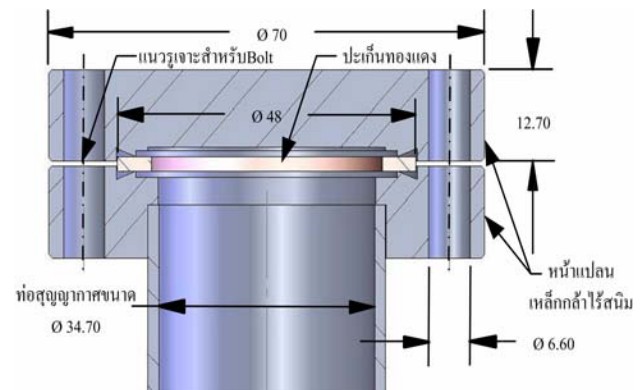
1. บทนำ

ปะเก็น (Gasket) เป็นชิ้นส่วนเชิงกลที่จำเป็นอย่างยิ่งสำหรับระบบทางกล โดยสรุปแล้วปะเก็นคือวัสดุเนื้อเดียวกันหรือเนื้อผสมที่ถูกบีบอัดอยู่ระหว่างจุดเชื่อมต่อทางกลสองชิ้น เพื่อผลในการป้องกันการรั่วซึมหรือการรั่วซึมของแก๊สหรือของไหลผ่านจุดเชื่อมต่อนั้นในช่วงระยะเวลาหนึ่ง โดยสามารถรองรับกับสภาวะภายใต้อุณหภูมิและความดันของการใช้งานได้อย่างเหมาะสม

ในการพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับการสร้างและการประยุกต์ใช้ระบบสุญญากาศที่มีความดันต่ำมาก ๆ จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการป้องกันการรั่วซึมของของไหลหรือแก๊สจากภายนอกไหลซึมเข้าสู่ภายในระบบสุญญากาศในระดับที่สามารถยอมรับได้ โดยการใช้ปะเก็นเป็นชิ้นส่วนหลัก และปะเก็นที่ใช้จำเป็นต้องมีลักษณะและคุณสมบัติเฉพาะที่เหมาะสมกับระบบสุญญากาศ ตามสภาวะการใช้งานและระดับของระบบสุญญากาศ ทั้งนี้ระบบสุญญากาศที่มีการใช้งานทั่วไปในด้านต่าง ๆ ทั้งในวงการอุตสาหกรรมและวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี ตั้งแต่ระดับต่ำ (Low Vacuum) ที่มีความดันต่ำกว่าความดันบรรยากาศแต่ต่ำกว่า 25 Torr ระดับปานกลาง (Medium Vacuum) ที่มีความดันอยู่ในช่วง 25 ถึง 10^{-3} Torr และระดับสูง (High Vacuum) ซึ่งมีความดันต่ำกว่า 10^{-3} Torr เป็นต้นไป [1, 2] นอกจากนี้ระบบสุญญากาศในระดับสูงยังสามารถแบ่งออกเป็น ระบบสุญญากาศระดับสูงมาก (Very High Vacuum) และระบบสุญญากาศระดับสูงสุดขีด (Ultra-High Vacuum) ซึ่งทั้งสองระบบนี้จะถูกจำกัดอยู่ที่การใช้วัสดุที่มีความดันไอต่ำ หนา อุณหภูมิห้อง โดยแต่ละระดับจะเหมาะสมกับลักษณะของการนำไปใช้งานที่แตกต่างกันไป

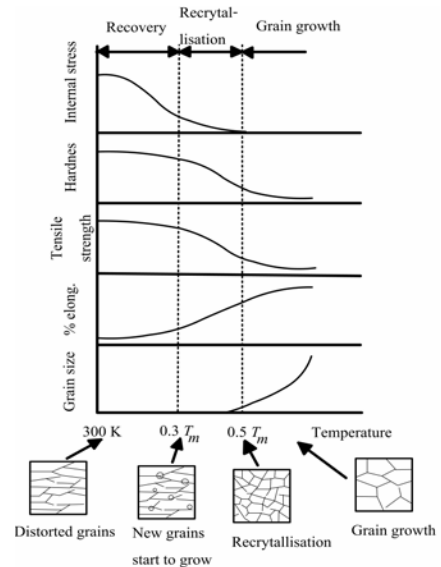
ปะเก็นทองแดงชนิด OFHC เป็นชิ้นส่วนที่จำเป็นยิ่งของระบบสุญญากาศ โดยจะใช้เป็นตัวประสานของส่วนต่างๆ ในระบบสุญญากาศเพื่อไม่ให้มีรอยรั่วเกิดขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบสุญญากาศระดับสูงสุดขีด ซึ่งถือเป็นระบบสุญญากาศที่มีความดันต่ำมากที่สุดที่มีการใช้งาน โดยมีความดันอยู่ในช่วง 10^{-11} – 10^{-7} Torr [2] นอกจากนี้รูปแบบการกันรั่วในระบบสุญญากาศระดับสูงสุดขีด ส่วนใหญ่จะเป็นรูปแบบที่เฉพาะและที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายเรียกว่า “รูปแบบการกันรั่วชนิด Conflat Seal” ใช้ตัวย่อว่า CF ปะเก็นทองแดงชนิด OFHC ที่ใช้กับรูปแบบการกันรั่วชนิดนี้จะเป็นปะเก็นทองแดงแบนและมีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยปะเก็นจะวางตัวอยู่ในที่ว่างเฉพาะของหน้าแปลน (Flange) สองตัวประกบกัน หน้าแปลนดังกล่าวทำมาจากเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) การเลือกใช้ทองแดงเป็นวัสดุของปะเก็นเนื่องจากทองแดงมีความแข็งแรงน้อยกว่าเหล็กกล้าไร้สนิม ดังรูปที่ 1 ในขณะใช้งานปะเก็นทองแดงจะถูกแรงกดโดยขอบสันบนหน้าแปลนทั้งสอง ที่ได้รับแรงบิด จากการขันอัดสลักเกลียวและแป้นเกลียวซึ่งร้อยหน้าแปลนทั้งสองเข้าด้วยกัน จนเป็นผลทำให้เนื้อวัสดุของปะเก็นบริเวณที่ถูกกดเกิดการเปลี่ยนรูปร่างถาวร (Permanent Deformation) เกิดเป็นรอยกดขึ้นบนปะเก็น และเมื่อจำเป็นต้องถอดหน้าแปลนทั้งสองนี้ออกจากกันก็จะไม่นำปะเก็นตัวเดิมมาใช้งานอีก ทั้งนี้เนื่องมาจากรอยกดบนปะเก็น ทำให้เกิดความไม่มั่นใจในประสิทธิภาพของปะเก็น จึงทำให้มีข้อจำกัดของจำนวนครั้งที่จะนำ

ปะเก็นทองแดงนี้มาใช้งานซ้ำ โดยที่ผ่านมาจะแนะนำให้ใช้งานปะเก็นทองแดงเพียงครั้งเดียวเท่านั้น



รูปที่ 1 ส่วนประกอบของ Conflat seal (mm.)

การนำกลับมาใช้อีกครั้งของปะเก็นทองแดงสามารถทำได้ จากการทดสอบของ Wheeler, 1963. [3] แสดงให้เห็นว่าปะเก็นทองแดงชนิด OFHC สามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้ถึง 22 ครั้ง อย่างไรก็ตามได้มีงานวิจัยและบทความทางวิชาการต่างๆ ที่เกี่ยวข้องและแสดงให้เห็นว่าทองแดงซึ่งเป็นโลหะเหนียวนั้น หลังจากที่มีการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรเกิดขึ้นแล้ว สามารถที่จะทำการอบอ่อนเพื่อคืนสภาพคุณสมบัติเชิงกลและโครงสร้างของโลหะกลับสู่สภาพเดิมได้ [4, 5]



รูปที่ 2 ผลของอุณหภูมิการอบอ่อนต่อวัสดุที่ขึ้นรูปเย็น [6]

การอบอ่อนจะประกอบด้วยกระบวนการย่อยๆ สามกระบวนการตามภาวะอุณหภูมิของการบำบัด ดังจะเห็นได้จากรายละเอียดในรูปที่ 2 กล่าวคือกระบวนการอบคืนตัว (Recovery) กระบวนการเกิดผลึกใหม่ (Recrystallization) และกระบวนการโตขึ้นของขนาดผลึกใหม่ (Grain Growth) ซึ่งในแต่ละกระบวนการจะใช้อุณหภูมิและเวลาไม่เท่ากัน ขึ้นกับชนิดของวัสดุและขนาดของการเปลี่ยนรูปร่างถาวร โดยผลจากการอบอ่อนทำให้เกิดผลึกใหม่ที่สมบูรณ์ซึ่งส่งผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง

ทางโครงสร้างและคุณสมบัติเชิงกลต่างๆ ของโลหะให้กลับคืนสู่สภาพก่อนการเปลี่ยนรูป เช่นความเครียด ค่า Tensile strength และ Hardness จะลดลง ในขณะที่ค่าความเหนียวจะเพิ่มขึ้น ทำให้สามารถนำไปขึ้นรูปเย็นได้อีกหลายครั้ง [5, 6]

2. วิธีดำเนินการวิจัย

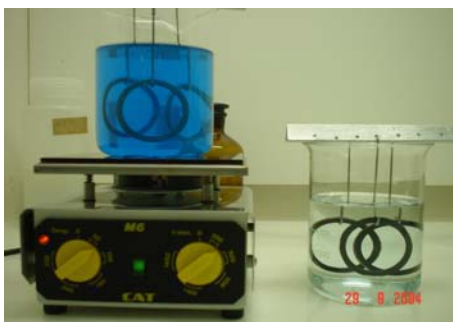
2.1 การบำบัดด้วยความร้อน

ปะเก็นที่ใช้งานมาแล้วก็นำมาศึกษาถูกจำแนกตามความลึกของรอยกัด การวัดความลึกของรอยกัดบนปะเก็นดังกล่าวใช้เครื่องวัดความหนาผิวของวัสดุยี่ห้อ Mitutoyo รุ่น SURFTTEST SV-400 โดยเลือกช่วงความลึกของการวัดเท่ากับ 8 ซึ่งเป็นช่วงที่ให้ค่าความละเอียดสูงสุดเท่ากับ $0.001\ \mu\text{m}$ ส่วนความหนาของปะเก็นใช้เวอร์เนียเยื่อ Mitutoyo ที่ให้ความละเอียดสูงสุดเท่ากับ $0.01\ \text{mm}$ จากนั้นนำปะเก็นเหล่านั้นไปบำบัดด้วยความร้อนโดยใช้เตาอบ ยี่ห้อ Carbolite รุ่น CWF ที่อุณหภูมิ $400\ ^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 300 นาที ดังรูปที่ 3 แล้วนำกลับมาวัดความแข็งโดยใช้เครื่องวัดความแข็งวัสดุยี่ห้อ Wilson/Rockwell รุ่น B503-R เพื่อวิเคราะห์ผลของความแข็งกับอุณหภูมิการบำบัด



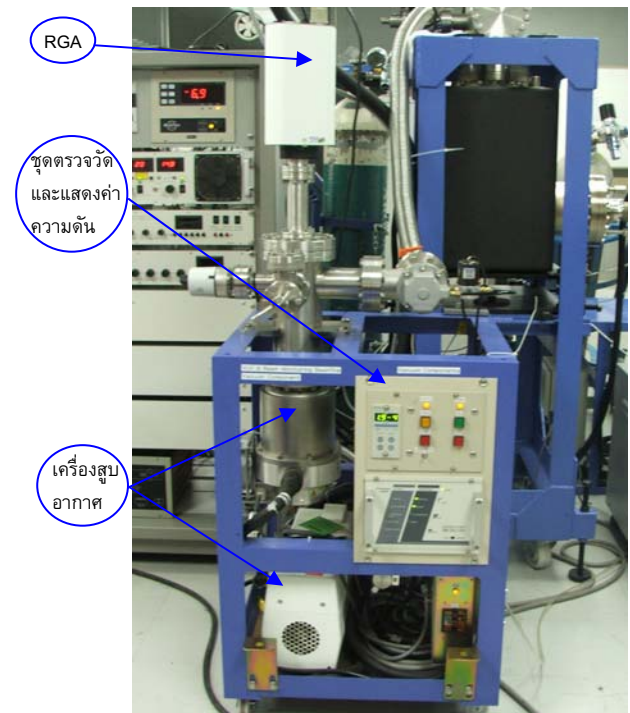
รูปที่ 3 ภาชนะการทางเคมีเพื่อทำความสะอาดผิวของปะเก็น

หลังจากทำการอบอ่อนปะเก็นแล้ว ก่อนการทดสอบประสิทธิภาพของปะเก็น จำเป็นต้องทำความสะอาดด้วยกระบวนการทางเคมีที่เหมาะสม โดยการวิจัยนี้ใช้สารละลายกรดไนตริก (HNO_3) เข้มข้น 250 ml กรดซัลฟูริก (H_2SO_4) เข้มข้น 600 ml และกรดไฮโดรคลอริก (HCl) 20 ml ผสมกับน้ำบริสุทธิ์ 130 ml แล้วนำปะเก็นแช่ไว้พร้อมกับให้ความร้อนประมาณ $40\ ^\circ\text{C}$ [2, 7] ดังรูปที่ 4 เมื่อทำความสะอาดแล้วจึงนำมาวัดความหนาของปะเก็นอีกครั้งเพื่อเปรียบเทียบผล



รูปที่ 4 ภาชนะการทางเคมีเพื่อทำความสะอาดผิวของปะเก็น

2.2 การทดสอบประสิทธิภาพของปะเก็น



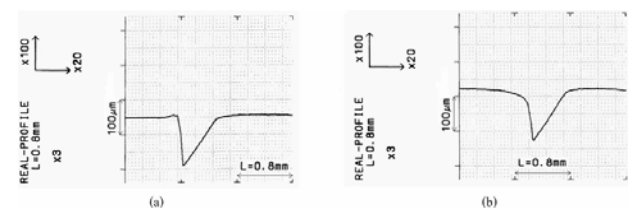
รูปที่ 5 ภาพถ่ายอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบสุญญากาศ

การใช้งานของปะเก็นถูกทดสอบโดยใช้ระบบสุญญากาศจริงแสดงในรูปที่ 5 ซึ่งเป็นระบบที่สามารถผลิตสุญญากาศที่มีระดับความดันน้อยกว่าหรือเท่ากับ 10^{-7} Torr โดยใช้เครื่องสูบลมแบบ Turbomolecular Pump ที่อัตราการสูบลมเท่ากับ 320 L/s. โดยมีการสูบลมช่วยโดยเครื่องสูบลมแบบ Two-stage Rotary pump แรงบิด (Torque) ในการกดอัดหน้าแปลนกับปะเก็นเข้าด้วยกันไม่เกิน $110\ \text{kg}\cdot\text{cm}$ [7] อัตราการรั่วซึมผ่านปะเก็นน้อยกว่า 10^{-8} Torr l/s $\cdot\text{cm}$ [7, 8] และค่า Ion Current ของก๊าซฮีเลียมจากเครื่องวิเคราะห์ก๊าซที่เหลืออยู่ในระบบ (Residual Gases Analyzer, RGA) ไม่เกิน 10^{-10} แอมแปร์ โดยในงานวิจัยนี้ใช้ RGA รุ่น QMA 200 ยี่ห้อ PFEIFFER

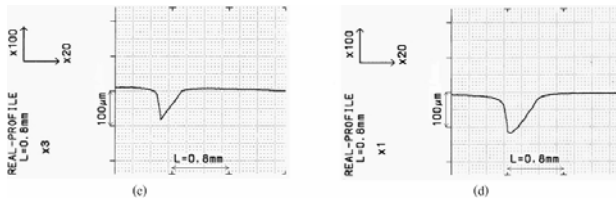
3. ผลการทดลอง

3.1 ผลการบำบัดด้วยความร้อน

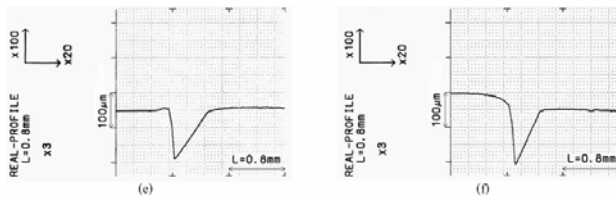
จากการจำแนกปะเก็นทองแดงที่ใช้งานมาแล้วตามขนาดความลึกของรอยกัด พบว่ามีความลึกตั้งแต่ $50\ \mu\text{m}$ ไปจนถึง $170\ \mu\text{m}$ ซึ่งเป็นค่าความลึกที่สูงที่สุดดังรูปที่ 6 7 และ 8 ตามลำดับ



รูปที่ 6 ความลึกที่เกิดขึ้นบนปะเก็นทองแดง (a) $50\ \mu\text{m}$ (b) $65\ \mu\text{m}$

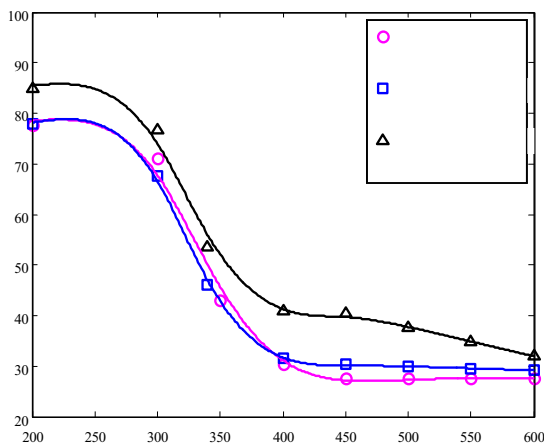


รูปที่ 7 ความลึกที่เกิดขึ้นบนปะเก็นทองแดง (a) 90 μm (b) 100 μm



รูปที่ 8 ความลึกที่เกิดขึ้นบนปะเก็นทองแดง (a) 140 μm (b) 170 μm

เมื่อนำปะเก็นเหล่านั้นไปอบอ่อนที่อุณหภูมิต่างๆ เป็นเวลา 300 นาทีในเตาอบ แล้ววัดค่าความแข็งดังรูปที่ 9 ซึ่งเป็นแผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิการอบอ่อนและค่าความแข็งของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงไป จะเห็นได้ว่าเส้นกราฟมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่คล้ายคลึงกันในลักษณะฟังก์ชันขั้นบันได (Step Function) โดยในแต่ละช่วงการเปลี่ยนแปลงสามารถอธิบายได้ว่า



รูปที่ 9 อุณหภูมิการอบและค่าความแข็งในเวลา 300 นาที

ในช่วงแรกของแผนภูมิเมื่ออุณหภูมิการอบเพิ่มขึ้นค่าความแข็งของวัสดุจะมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างน้อย ดังจะเห็นจากเส้นกราฟที่มีลักษณะคล้ายเส้นตรงในแนวราบ แต่เส้นกราฟช่วงนี้จะมีความยาวไม่เท่ากันขึ้นกับความลึกของรอยกัดที่เกิดขึ้น ซึ่งการเปลี่ยนแปลงในช่วงนี้คือกระบวนการอบคืนตัว ในช่วงที่สองของการอบอ่อนจะสังเกตเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิการอบเพิ่มขึ้นอีกเพียงเล็กน้อย ค่าความแข็งวัสดุก็จะลดต่ำลงมาอย่างค่อนข้างฉับพลัน ซึ่งในช่วงที่สองนี้จะสัมพันธ์กันกับความยาวของเส้นกราฟในช่วงแรกโดยตรง โดยจะพบว่าปะเก็นที่มีความยาวของเส้นกราฟในช่วงแรกสั้น การลดลงของความแข็งอย่างค่อนข้าง

ฉับพลันก็จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่าปะเก็นมีความยาวของเส้นกราฟในช่วงแรกยาว โดยการเปลี่ยนแปลงนี้เรียกว่ากระบวนการเกิดผลึกใหม่ และในช่วงสุดท้ายของการอบอ่อนจะเป็นช่วงที่เกิดขึ้น เมื่อกระบวนการเกิดผลึกใหม่เกิดขึ้นโดยสมบูรณ์แล้ว ซึ่งจะเกิดขึ้นหลังจากการลดลงของความแข็งอย่างค่อนข้างฉับพลันสิ้นสุดลง โดยจะพบว่าเมื่ออุณหภูมิการอบเพิ่มขึ้นค่าความแข็งของวัสดุก็จะเริ่มไม่มีการเปลี่ยนแปลงหรือมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะค่อยๆ ลดลงเรื่อยๆ ถึงแม้ว่าจะเพิ่มอุณหภูมิการอบขึ้นไปเรื่อยๆ ก็ตาม

จากกราฟในรูปที่ 9 จะพบว่ากระบวนการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 400 $^{\circ}\text{C}$ เป็นสภาวะที่ทำให้กระบวนการเกิดผลึกใหม่เกิดขึ้นโดยสมบูรณ์ กับปะเก็นทุกระดับความลึกที่เกิดขึ้น จึงสามารถใช้สภาวะดังกล่าวในการอบอ่อนปะเก็นทั้งหมดได้

3.2. ผลการทดสอบประสิทธิภาพของปะเก็น

การทดสอบประสิทธิภาพของปะเก็น โดยพบว่าปะเก็นที่ใช้งานแล้วโดยไม่ได้ผ่านการบำบัดแต่อย่างใดนั้นสามารถนำกลับมาใช้งานได้เพียงร้อยละ 20 แต่เมื่อทดสอบกับปะเก็นที่ใช้แล้วโดยไม่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 400 $^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 300 นาที พบว่าสามารถนำปะเก็นที่ใช้แล้วกลับมาใช้งานได้มากถึงร้อยละ 87.5

หลังจากทำการอบอ่อนปะเก็นและผ่านการทำความสะอาดผิวด้วยกระบวนการทางเคมีที่เหมาะสมแล้ววัดความหนา พบว่าความหนาโดยเฉลี่ยของปะเก็นลดลงไป 0.027 mm. จากความหนาเดิม 2.033 mm. คิดเป็นร้อยละ 1.328 โดยความหนาที่ลดลงไปนั้นเกิดจากการที่ทองแดงทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศเกิดเป็นสารประกอบสีดำดังในรูปที่ 4 เรียกว่าสนิมทองแดง (Copper oxide) ซึ่งเกิดขึ้นขณะอบอ่อนในเตา การล้างด้วยกระบวนการทางเคมีทำให้สนิมทองแดงถูกกัดออกไปเป็นผลให้ความหนาของปะเก็นลดลงด้วย แต่อย่างไรก็ตามการลดลงของความหนาดังกล่าวไม่ได้มีผลต่อการใช้งานของปะเก็น

4. สรุป

เมื่อนำปะเก็นทองแดงชนิด OFHC ที่ใช้งานใน Conflat seals ไปทำการบำบัดด้วยกระบวนการทางความร้อนที่อุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสม จนกระทั่งบริเวณรอยกัดเกิดกระบวนการเกิดผลึกใหม่โดยสมบูรณ์ ทำให้โครงสร้างและคุณสมบัติเชิงกลที่เปลี่ยนแปลงไป พื้นผิวสภาพสุภาพเดิมที่จะสามารถใช้งานได้อีกครั้ง โดยสภาวะที่เหมาะสมทั้งอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการอบอ่อนปะเก็นที่ใช้แล้วคือ 400 $^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 300 นาที ซึ่งสามารถใช้ได้กับปะเก็นทุกระดับความลึกของรอยกัดที่เกิดขึ้นตั้งแต่ 50 μm ไปจนถึง 170 μm โดยพบว่าปะเก็นที่ใช้แล้วที่ไม่ผ่านการอบอ่อนสามารถนำกลับมาใช้งานได้ร้อยละ 20 การอบอ่อนที่อุณหภูมิ 400 $^{\circ}\text{C}$ นาน 300 นาที สามารถเพิ่มการนำปะเก็นที่ใช้แล้วกลับมาใช้งานได้ถึงร้อยละ 87.5 ในขณะที่ความหนาของปะเก็นหลังการอบอ่อนและทำความสะอาดผิวแล้วจะมีค่าลดลงไป 0.027 mm. คิดเป็นร้อยละ 1.328 ซึ่งไม่มีผลต่อการใช้งานของปะเก็นแต่อย่างใด

จากผลการวิจัยดังกล่าวให้ผลเป็นที่น่าพอใจเพราะสามารถเพิ่มความเชื่อถือให้กับปะเก็นทองแดงที่ใช้แล้ว และเมื่อพิจารณาต่อไปในเรื่องของต้นทุนในการบำบัดด้วยความร้อน การทำความสะอาดผิว

ปะเก็นด้วยสารเคมี ตลอดจนการทดสอบประสิทธิภาพของปะเก็นที่ผ่านการบำบัดแล้ว พบว่าราคาต้นทุนต่อชิ้นเท่ากับ 52.75 บาท และเมื่อเปรียบเทียบกับราคาต้นทุนที่จำเป็นต้องใช้ในการนำเข้าปะเก็นทองแดง OFHC จากต่างประเทศ โดยสำรวจจาก www.mdcvacuum.com ซึ่งเป็นบริษัทผลิตอุปกรณ์เกี่ยวกับระบบสุญญากาศในประเทศอังกฤษและเคยถูกส่งเข้ามาใช้งาน โดยคิดอัตราแลกเปลี่ยนเงินตราระหว่างประเทศของกรมศุลกากรเมื่อวันที่ 4 มกราคม 2549 พบว่าราคาต้นทุนต่อชิ้นในการนำเข้าปะเก็นทองแดง OFHC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 48 mm. มีค่าเท่ากับ 123.01 บาท ดังนั้นในการวิจัยนี้ นอกจากจะได้แสดงให้เห็นว่าร้อยละ 87.5 ของปะเก็นทองแดงที่ใช้งานแล้ว สามารถนำกลับมาใช้งานซ้ำได้อีกครั้ง โดยมีราคาต้นทุนในการนำกลับมาใช้ซ้ำต่อชิ้น 52.75 บาท สามารถประหยัดค่าใช้จ่ายลงได้ 70.26 บาทต่อชิ้น ซึ่งเป็นการลดการนำเข้าปะเก็นทองแดงจากต่างประเทศได้ แต่อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าราคาต้นทุนในการนำกลับมาใช้ซ้ำต่อชิ้นจะต่ำกว่าราคาต้นทุนของปะเก็นใหม่ สิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการวิจัยครั้งต่อไป คือกระบวนการบำบัดด้วยความร้อนโดยปราศจากการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศ ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้เตาอบแบบธรรมดาที่สัมผัสกับอากาศโดยตรง จึงทำให้ทองแดงเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศ ณ อุณหภูมิสูง ส่งผลทำให้เกิดสนิมทองแดงและสิ่งสกปรกอื่นๆ บนปะเก็น จำเป็นต้องใช้กระบวนการทางเคมีช่วยในการกำจัดคราบสนิมทองแดงและสิ่งสกปรกอื่นๆ ออกไป แต่ถ้าหากใช้เตาอบแบบไม่สัมผัสกับอากาศ เช่น การอบอ่อนในระบบสุญญากาศ (Vacuum Oven) หรือทำการอบอ่อนโดยมีแก๊สไฮโดรเจนปกคลุมไว้ (Hydrogen-fire) [9] ก็จะทำให้ความหนาของปะเก็นก่อนและหลังการอบไม่มีการเปลี่ยนแปลงหรือมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ทั้งนี้เนื่องจากทองแดงไม่เกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศส่งผลให้ไม่ต้องใช้กระบวนการทางเคมีเข้ามาเกี่ยวข้อง ซึ่งจำเป็นต้องทำการศึกษาต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดีจากการสนับสนุนด้านเทคนิคจากบุคลากรศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และบุคลากรทางเทคนิคของศูนย์ปฏิบัติการวิจัยเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนแห่งชาติ

เอกสารอ้างอิง

- [1]. P. A. Redhead, J. P. Hobson and E. V. Kornelsen. (1968). The physical basis of ultrahigh vacuum, London, Chapman and Hall.
- [2]. Roth, A. (1994). American Vacuum Society Classics: Vacuum Sealing Techniques, New York : AIP Press.
- [3]. Wheeler W. R. (1963). Theory and application of metal gasket seals. In 1963 Trans. American Vacuum Soc. (pp 159). New York, Macmillan.
- [4]. ASM International. Handbook Committee. (1987). (Volume 4, Heat Treating of Copper Alloys). Materials Park, OH: ASM International.

- [5]. Chemical Engineering: University of New Brunswick. (2003). Part II: Deformation, Hardness, and Recrystallization of Metals. <http://www.unb.ca/che/Undergrad/lab/deformation.pdf>
- [6]. Bolton, W. (William). (1993). Materials for Engineering. Oxford ; Boston : Butterworth-Heinemann, 1994.
- [7]. Roth, A. (1990). Vacuum Technology, (Third, Updated and Enlarged Edition). Amsterdam : Elsevier Science Publishers B.V.
- [8]. Berman, A. (1992). Vacuum Engineering Calculations, Formulas, and Solved Exercises. California : Academic Press.
- [9]. Heerden P. J. van. (1955). Metal gaskets for demountable vacuum system. In Rev. Sci. Instr., 26, 1131.