

การวิเคราะห์และการทดสอบเพื่อคืนสภาพคุณสมบัติเชิงกลของปะเก็นโลหะ

นายเมธี โสภณ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2548

ISBN 974-533-485-5

**ANALYSIS AND TESTING OF RECOVERY OF
MECHANICAL PROPERTIES OF METAL GASKET**

Methee Sophon

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the

Degree of Master of Engineering in Mechanical Engineering

Suranaree University of Technology

Academic Year 2005

ISBN 974-533-485-5

การวิเคราะห์และการทดสอบเพื่อคืนสภาพคุณสมบัติเชิงกลของปะเก็นโลหะ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้หน้าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



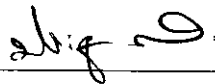
(รศ. น.อ. ดร.วรพจน์ จำพิศ)

ประธานกรรมการ



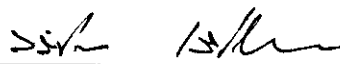
(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)




(ผศ. ดร.ประยูร ส่งศิริฤทธิกุล)

กรรมการ



(อ. ดร.วีระศักดิ์ เลิศศิริโยธิน)

กรรมการ



(รศ. ดร.เสาวณีย์ รัตนพานี)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ



(รศ. น.อ. ดร.วรพจน์ จำพิศ)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

เมธี โสภณ : การวิเคราะห์และการทดสอบเพื่อคืนสภาพคุณสมบัติเชิงกลของปะเก็นโลหะ (ANALYSIS AND TESTING OF RECOVERY OF MECHANICAL PROPERTIES OF METAL GASKET) อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ร.อ. ดร. กนต์ธร ชำนิประศาสน์, 111 หน้า. ISBN 974-533-485-5

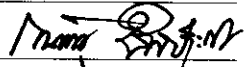
ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาวิเคราะห์และทดสอบเพื่อคืนสภาพคุณสมบัติเชิงกลของปะเก็นทองแดงชนิดปราศจากออกซิเจนความนำสูง (Oxygen Free High Conductivity) ที่อยู่ระหว่างข้อต่อแบบ Conflat Seals ในระบบสุญญากาศระดับสูงสุดซีค (Ultra-High Vacuum) ปะเก็นจะถูกจิกโดยสันของหน้าแปลน ทำให้เนื้อวัสดุบริเวณที่ถูกจิกเกิดการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร จนเกิดการยกคดขึ้นบนปะเก็น โครงสร้างและคุณสมบัติเชิงกลต่างๆ ที่เปลี่ยนไปหลังการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรสามารถทำให้กลับคืนสู่สภาพก่อนการเปลี่ยนรูปร่างได้ โดยให้ผ่านกระบวนการทางความร้อน ๓ อุณหภูมิและช่วงเวลาที่เหมาะสมหรือกระบวนการอบอ่อน (Annealing) โดยตัวแปรที่เกี่ยวข้องในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยอุณหภูมิ เวลา ความแข็ง และเปอร์เซ็นต์การขึ้นรูปเย็น นอกจากนั้นแล้วยังได้ใช้โปรแกรม SolidWorks และ COSMOS ช่วยในการจำลองลักษณะการเปลี่ยนแปลงและการกระจายตัวของความเค้นบนปะเก็นทองแดงขณะใช้งานในระบบสุญญากาศ

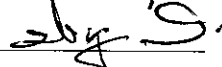
ผลการทดสอบกับระบบสุญญากาศ ภายใต้สภาวะความดันน้อยกว่าหรือเท่ากับ 10^{-7} Torr แรงบิดในการกดอัดหน้าแปลนกับปะเก็นเข้าด้วยกันไม่เกิน 110 kg-cm อัตราการรั่วซึมผ่านปะเก็นน้อยกว่า 10^{-5} lusec หรือ 10^{-8} Torr l/s-cm และค่า Ion Current ของแก๊สฮีเลียมจากเครื่องวิเคราะห์ก๊าซที่เหลืออยู่ในระบบไม่เกิน 10^{-10} แอมแปร์ พบว่าปะเก็นที่ใช้แล้วก่อนการอบอ่อนสามารถใช้งานได้ร้อยละ 20 แต่หลังจากผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 400 °C นาน 300 นาที สามารถใช้งานได้ร้อยละ 87.5 ซึ่งผลของความหนาและความหยาบผิวของปะเก็น ก่อนและหลังการอบอ่อนไม่ได้มีการเปลี่ยนแปลงมากนัก โดยความหนาเฉลี่ยมีค่าลดลงร้อยละ 1.328 ของความหนาเดิม ในขณะที่ความหยาบผิวนั้น หลังการอบอ่อนและทำความสะอาดผิวแล้วจะมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.290 μm เป็น 0.628 μm แต่ยังคงอยู่ในช่วงของค่าความหยาบผิวที่ต้องการสำหรับปะเก็นทองแดงใน Conflat Seals นอกจากนั้นผลจากการจำลองได้แสดงให้เห็นว่าการกระจายตัวของความเค้นบนปะเก็นจะเกิดขึ้นสูงสุดที่บริเวณรอยจิกจนทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรและการขยายตัวออกด้านข้างของปะเก็นขณะใช้งานในระบบสุญญากาศมีค่าน้อยมาก

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ปีการศึกษา 2548

ลายมือชื่อนักศึกษา 

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา 

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม 

METHEE SOPHON : ANALYSIS AND TESTING OF RECOVERY OF
MECHANICAL PROPERTIES OF METAL GASKET. THESIS ADVISOR
: ASSOC. PROF. CAPT.KONTORN CHAMNIPRASART, Ph.D. 111 PP.
ISBN 974-533-485-5

OFHC/COPPER GASKET/SEAL/COLD WORK/HARDNESS/ANNEAL/ULTRA
HIGH VACUUM/ CONFLATSEAL/

Analysis and testing of recovery of mechanical properties of metal gasket is the aim of this research. Oxygen Free High Conductivity (OFHC) copper gasket is the metallic alloy to be used in Conflat seals of ultra-high vacuum. The sealing ridges on the flange are designed to bite on each side of the gasket, the dept of bite in to the gasket is generally small plastic deformation or cold work. When cold work has occurred, the changing of microstructure and mechanical properties of the metal can recover by the process of heat treatment, which called “annealing”. The experimental variables which concerned consist of annealing temperature, annealing time, hardness and averaged of cold work index. Furthermore, computer simulations with finite elements method by SolidWorks and COSMOS have been carried out to study the profile of the dept and stress distribution in the gasket.


The results of this research showed that the most suitable condition for gasket annealing was operated with 400 °C for 300 min. The experimental parameters of gasket’s performance testing is performed with vacuum system in consideration of under pressure of 10^{-7} Torr, sealing force is not exceed 110 kg-cm, leak rate is not beyond 10^{-5} lusec or 10^{-8} Torr l/s-cm and the ion current of helium gas from the

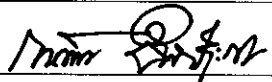
residual gasses analyzer is also not over 10^{-10} ampere. Under that conditions, 20% of the used copper gaskets before annealing is available but 87.5% of annealed copper gaskets can be reused properly.


In case of the changing in comparison of thickness and surface roughness both in before and after an annealing, the averaged gasket's thickness is approximately decrease to 1.328% from original thickness while surface roughness of annealed gasket which cleaned with appropriate pickling solution has been increased from 0.290 μm to 0.628 μm but still significantly below the surface finish required for conflat seals. Additional results from the simulations showed that the stress distribution in gasket had a highest concentrated on the area of impression while the lateral expansion of gasket is very small.

School of Mechanical Engineering

Academic year 2005

Student's Signature 

Advisor's Signature 

Co-advisor's Signature 

กิตติกรรมประกาศ

ในงานวิจัยนี้ จะไม่สามารถดำเนินให้สำเร็จลุล่วงไปได้ตามวัตถุประสงค์หากปราศจากบุคคลดังต่อไปนี้

รองศาสตราจารย์ ร.อ.ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประยูร ส่งศิริฤทธิกุล อาจารย์ที่ปรึกษาและอาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้ความรู้และคำแนะนำต่างๆ ที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการวิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ตรีตาภรณ์ ชูศรี อาจารย์ประจำสำนักวิทยาศาสตร์ สาขาวิชาเคมี ที่ได้ให้ความรู้และคำแนะนำเกี่ยวกับการเลือกใช้สารเคมีในการทำความสะอาดปะเก็นทองแดง

อาจารย์ ดร.ณรงค์ อัครพัฒนากุล อาจารย์ประจำสำนักวิศวกรรมศาสตร์ หัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ที่ได้ให้ความรู้และคำแนะนำเกี่ยวกับการอบอ่อนและคืนตัวของโครงสร้างและคุณสมบัติของโลหะตลอดจนการคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์การขึ้นรูปเย็น

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรศิริ จงกล อาจารย์ประจำสำนักวิศวกรรมศาสตร์ หัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม ที่ได้ให้ความรู้และคำแนะนำเกี่ยวกับการคิดคำนวณเรื่องต้นทุน

คุณวรรณชัย จิตรา และคุณกัมภีร์ ศิริคะเนรัตน์ วิศวกรและนายช่างเทคนิคประจำห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีทรัพยากร ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ 6 ที่ได้ช่วยอำนวยความสะดวกในการใช้เตาอบสำหรับงานอบอ่อนและการใช้เครื่องทดสอบความแข็ง

คุณ โอภาส ไทยดี วิศวกรประจำห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีทรัพยากร ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ 6 ที่ได้ช่วยอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องวัดความหยาบผิว

คุณอาทิตย์ คุณศรีสุข นักศึกษาปริญญาเอกสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและอดีตวิศวกรศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ ผู้ให้คำแนะนำในการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์จำลองผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงปะเก็นในระบบสุญญากาศ และการใช้โปรแกรม Matlab

คุณสุพัฒน์ กลิ่นเขียว คุณสกาจ พิมพา คุณพงศ์จักร ธรวารกาญจน์ และพนักงานทุกคนของห้องปฏิบัติการระบบลำเลียงแสงซินโครตรอน ศูนย์ปฏิบัติการวิจัยเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนแห่งชาติ ที่ได้ช่วยแนะนำการใช้เครื่องมือต่างๆ ในการทดสอบประสิทธิภาพของปะเก็นในระบบสุญญากาศ

ผู้ทำวิจัยขอขอบคุณทุกท่านที่กล่าวมา ณ โอกาสนี้

เมธี โสภณ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฐ

บทที่

1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	5
วัตถุประสงค์หลัก.....	5
วัตถุประสงค์รอง.....	5
1.3 สมมติฐานการวิจัย.....	5
ทฤษฎี.....	5
1. พฤติกรรมและการเปลี่ยนรูปของโลหะ.....	5
2. การขึ้นรูปร้อน โลหะ.....	6
3. การขึ้นรูปเย็น โลหะ.....	6
4. กระบวนการอบอ่อน.....	10
5. กระบวนการคืนตัว.....	11
6. กระบวนการเกิดผลึกใหม่.....	12
7. กระบวนการโตขึ้นของขนาดผลึกใหม่.....	14
สมมติฐาน.....	14
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	14
1.5 ข้อตกลงเบื้องต้น.....	16

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

1.6	ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	16
2	ปรีทึ่นัวรรณกรรมและงานที่เกี่ยวข้อง	17
2.1	ความเป็นมาของโลหะทองแดง	17
2.2	คุณสมบัติของทองแดง	18
2.3	การแบ่งชนิดทองแดง	18
2.3.1	ทองแดงท่ฟิทช์	18
2.3.2	ทองแดงความนำสูงปราศจากออกซิเจน	18
2.3.3	ทองแดงคือออกซิไดซ์	19
2.4	กลไกในการป้องกันการรั่วซึมของปะเก็น	20
2.5	รูปแบบการกันรั่วชนิดสันนูน (Ridge Seals)	22
	รูปแบบการกันรั่วชนิดสันนูนรูปร่างคล้ายสันมีด (Knife-edge Seals)	23
2.6	การอบอุ่นของทองแดง	25
2.7	การทำความสะอาดผิวโลหะ	32
3	วิธีดำเนินการวิจัย	33
3.1	การวิจัยเบื้องต้น	33
3.2	การวิจัยเชิงการทดลอง	35
3.2.1	การบำบัดด้วยความร้อน	35
3.2.2	การทำความสะอาดผิวปะเก็น	35
3.3	การทดสอบประสิทธิภาพของปะเก็น	36
3.4	สถานที่ทำงานวิจัย	37
4	ผลการการวิจัยและการอภิปรายผล	38
4.1.1	การเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรบนปะเก็น	38
4.1.2	ความลึกของรอยกดบนปะเก็น	41
4.1.3	ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การขึ้นรูปเย็นกับความแข็งของทองแดง	43
4.2	ผลการบำบัดด้วยความร้อนของปะเก็นทองแดงที่ใช้งานแล้ว	49
4.3	การทดสอบประสิทธิภาพปะเก็นที่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อน	56

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3.1 ผลจากการสู่มตัวอย่างปะเก็นที่ใช้แล้วมาทำการทดสอบประสิทธิภาพ.....	56
4.3.2 ปัจจัยของความหนาและความหยาบผิวของปะเก็น.....	59
5 บทสรุป	62
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	62
5.2 ข้อจำกัดของการวิจัย.....	63
5.3 ข้อเสนอแนะในการวิจัยต่อไป.....	63
รายการอ้างอิง	65
ภาคผนวก ก การทดสอบความแข็งของวัสดุ.....	69
ภาคผนวก ข การคำนวณแรงผื่นึกจากแรงบิดของสลักเกลียว.....	79
ภาคผนวก ค การคำนวณอัตราการรั่วซึม.....	89
ภาคผนวก ง การวัดความหยาบผิวของปะเก็น.....	92
ภาคผนวก จ ค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ.....	99
ภาคผนวก ฉ เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย.....	102
ประวัติผู้เขียน	111

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 คุณสมบัติเชิงกลของทองแดงความนำสูงปราศจากออกซิเจน	19
4.1 ค่าการเปลี่ยนรูปของปะเก็นพิจารณาพื้นผิววงใน	48
4.2 ค่าการเปลี่ยนรูปของปะเก็นพิจารณาพื้นผิววงนอก.....	48
4.3 ค่าการเปลี่ยนแปลงความหนาของปะเก็นทองแดง.....	60
ก.1 มาตรฐานของสเกลความแข็งแบบร็อคเวล แรกกดน้ำ 10 kg (ASTM E 18).....	73
ก.2 การแปลงหน่วยความแข็งของทองแดง (Hardness Conversion Table).....	75
ข.1 ค่าแรงฉีกที่คำนวณได้จากแรงบิดของสลักเกลียว สำหรับหน้าแปลน CF70	83
ข.2 ค่าแรงฉีกที่คำนวณได้จากแรงบิดของสลักเกลียว สำหรับหน้าแปลน CF114	84
ข.3 ค่าแรงฉีกที่คำนวณได้จากแรงบิดของสลักเกลียว สำหรับหน้าแปลน CF152	85
ข.4 ค่าแรงฉีกที่คำนวณได้จากแรงบิดของสลักเกลียว สำหรับหน้าแปลน CF203	86
ข.5 ค่าแรงฉีกที่คำนวณได้จากแรงบิดของสลักเกลียว สำหรับหน้าแปลน CF254	87
ข.6 ค่าแรงฉีกที่คำนวณได้จากแรงบิดของสลักเกลียว สำหรับหน้าแปลน CF304	88
ค.1 อัตราการรั่วซึมของแก๊สที่ความดันต่างๆ	91
ง.1 ความหยาบผิวของปะเก็นทองแดง.....	98

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	ลักษณะทั่วไปของการประยุกต์ใช้งานของปะเก็น..... 2
1.2	อิทธิพลของเปอร์เซ็นต์การขึ้นรูปเย็นต่อความแข็งแรงและกำลังครากของโลหะต่างๆ..... 8
1.3	อิทธิพลของเปอร์เซ็นต์การขึ้นรูปเย็นต่อความเหนียวในการยึดตัวของโลหะต่างๆ..... 9
1.4	อิทธิพลของเปอร์เซ็นต์การขึ้นรูปเย็นต่อความแข็ง..... 10
1.5	แผนภาพแสดงผลของการขึ้นรูปเย็นและการอบอ่อนต่อ โครงสร้างภายในและ แนวโน้มของคุณสมบัติเชิงกลในโลหะ..... 11
1.6	ผลของอุณหภูมิการอบอ่อนต่อวัสดุที่ผ่านการขึ้นรูปเย็น..... 12
1.7	ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิการเกิดผลึกใหม่และเปอร์เซ็นต์การขึ้นรูปเย็น..... 13
1.8	ภาคตัดขวางแสดงส่วนประกอบของ Conflat Seals..... 15
2.1	ภาคตัดขวางของชิ้นส่วนทางกลที่ประกบกัน..... 21
2.2	ภาคตัดขวางของรูปแบบการกันรั่วชนิดสันนูนรูปร่างคล้ายลิ้น..... 22
2.3	ภาคตัดขวางของรูปแบบการกันรั่วชนิดสันนูนรูปร่างสันนูนหลายชั้น..... 22
2.4	ภาคตัดขวางของรูปแบบการกันรั่วชนิดสันนูนรูปร่างคล้ายสันมีด..... 23
2.5	ภาคตัดขวางของรูปแบบการกันรั่วชนิด Conflat Seals..... 24
2.6	ภาคตัดขวางของการตัดแปลงขอบสันมีดมีรอยบิ่นให้สามารถใช้งานกับปะเก็นทองแดง ชนิด OFHC ใน Conflat Seals โดย H. Fend, 1996..... 25
2.7	แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์การขึ้นรูปเย็นกับความแข็งของทองแดงและ ทองแดงผสม โดย Svetlana Nestorovic, 2003..... 26
2.8	แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิการอบอ่อนกับความแข็งของโลหะ โดย Svetlana Nestorovic, 2003..... 26
2.9	แผนภูมิแสดงผลของเปอร์เซ็นต์การขึ้นรูปเย็นต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเชิงกลต่างๆ ของทองแดง OFHC โดย The Copper Development Association, UK..... 27
2.10	แผนภูมิแสดงผลของเปอร์เซ็นต์การขึ้นรูปเย็นต่อความแข็งของทองแดง..... 28
2.11	แผนภูมิแสดงผลของเปอร์เซ็นต์การขึ้นรูปเย็นต่อคุณสมบัติต่างๆ ของทองแดง OFHC..... 29
2.12	แผนภูมิแสดงการเปลี่ยนแปลงความแข็งที่เกิดขึ้นในสามกระบวนย่อยของการอบอ่อน..... 30

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.13 แผนภูมิแสดงผลของเวลาในการอบอุ่นต่อกระบวนการเกิดผลึกใหม่.....	30
2.14 แผนภูมิแสดงผลของเปอร์เซ็นต์การขึ้นรูปเย็นต่อกระบวนการเกิดผลึกใหม่	31
2.15 แผนภูมิแสดงผลของความบริสุทธิ์ของโลหะต่อกระบวนการเกิดผลึกใหม่	31
3.1 การรื้อยสลักเกลียวผ่านชุดหน้าแปลนเข้าเป็นเกลียว	34
3.2 ภาพถ่ายอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบสุญญากาศ	34
3.3 กระบวนการทางเคมีเพื่อกำจัดสนิมทองแดงและทำความสะอาดผิวของปะเก็น	36
4.1 แผนภาพแสดงลักษณะและความลึกที่เกิดขึ้นบนปะเก็นทองแดงขึ้นเดียวกัน และวัดความลึกด้านเดียวกัน (a) 50 μm (b) 65 μm	39
4.2 แผนภาพแสดงลักษณะและความลึกที่เกิดขึ้นบนปะเก็นทองแดง (c) 90 μm (d) 100 μm	39
4.3 แผนภาพแสดงลักษณะและความลึกที่เกิดขึ้นบนปะเก็นทองแดง (e) 140 μm (f) 170 μm	40
4.4 ภาพแสดงลำดับของการขันอัดชุดสลักเกลียวและแป้นเกลียว	41
4.5 แผนภูมิแสดงปริมาณของปะเก็นทองแดงที่ใช้แล้ว แยกตามความลึกที่เกิดขึ้น	42
4.6 แผนภูมิแสดงค่าความแข็งและความลึกที่เกิดขึ้นที่เกิดบนปะเก็นทองแดงที่ใช้แล้ว	42
4.7 ภาพจำลองการใช้งานปะเก็นทองแดงในระบบสุญญากาศโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ (a) การให้แรงกระทำต่อหน้าแปลน (b) การให้ความดันกระทำต่อผิวล่าง	43
4.8 ภาพการให้พื้นผิวด้านล่างของปะเก็นถูกตรึงให้อยู่กับที่	44
4.9 ภาพการแบ่งแบบจำลองออกเป็นส่วนย่อยๆ (Meshing).....	45
4.10 ภาพแสดงผลการคำนวณหาการเปลี่ยนแปลงการกระจายตัวของความเค้น.....	46
4.11 ภาพแสดงผลการคำนวณหาการเปลี่ยนแปลงการกระจายตัวของการเปลี่ยนรูป.....	46
4.12 ภาพหน้าตัดแสดงการกระจายตัวของความเค้นบนปะเก็นทองแดงขณะใช้งาน	47
4.13 ภาพหน้าตัดแสดงการกระจายตัวของรูปเปลี่ยนรูปบนปะเก็นทองแดงขณะใช้งาน	47
4.14 แผนภูมิแสดงเปอร์เซ็นต์การขึ้นรูปเย็นที่คำนวณได้เปรียบเทียบกับความแข็ง	49
4.15 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิการอบและค่าความแข็งในเวลา 30 นาที	50
4.16 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิการอบและค่าความแข็งในเวลา 60 นาที	51
4.17 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิการอบและค่าความแข็งในเวลา 300 นาที	52

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.18	53
4.19	54
4.20	54
4.21	56
4.22	56
4.23	61
ก.1	71
ข.1	80
ค.1	90
ง.1	94
ง.2	94
ง.3	96
ง.4	96
ง.5	96
ง.6	96
ง.7	97
ง.8	97
ง.9	97
ง.10	97
จ.1	100
จ.2	100
จ.3	101
จ.4	101
ฉ.1	103
ฉ.2	103
ฉ.3	104
ฉ.4	105

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ฉ.5 ภาพถ่าย Rotary Pump	106
ฉ.6 ภาพถ่าย Turbomolecular Pump	106
ฉ.7 ภาพถ่ายเครื่องวิเคราะห์แก๊สที่เหลื่ออยู่ในระบบ.....	107
ฉ.8 ภาพถ่ายถังบรรจุแก๊สฮีเลียม	107
ฉ.9 ภาพถ่ายประแจปรับขนาดแรงบิด.....	108
ฉ.10 ภาพถ่ายการใช้เวอร์เนียวัดขนาด	108
ฉ.11 ภาพถ่ายขาตั้งสำหรับวางปะเก็น	109
ฉ.12 อุปกรณ์ให้ความร้อนขณะทำความสะอาด	109
ฉ.13 ภาพถ่ายถูงมือกันความร้อน.....	110

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

ASTM	=	American Society for Testing and Materials
AVS	=	American Vacuum Society
UHV	=	Ultra-High Vacuum
OFHC	=	Oxygen Free High Conductivity
CF	=	Conflat
RGA	=	Residual Gasses Analyzer
FEM	=	Finite Element Method
CW	=	Cold Work, %
A_o	=	Original Cross Section Area, (mm ²)
A_f	=	Final Cross Section Area, (mm ²)
T_o	=	Original Thickness, (mm)
T_f	=	Final Thickness, (mm)
BHN	=	Brinell Hardness Number
HRF	=	Hardness Rowell Scale F
HV	=	Hardness Vickers
DPH	=	Diamond Pyramid Hardness Number
P	=	Compressive Load, (kg)
D	=	Diameter of the ball, (mm)
d	=	Diameter of the impression, (mm)
T	=	Torque (N-m)
W	=	Load (N)
d_m	=	Major diameter of thread, (mm)
d_p	=	Pitch diameter of thread, (mm)
d_r	=	Minor diameter of thread, (mm)
d_c	=	Mean diameter of thrust collar, (mm)
α	=	Lead angle, (Degree)
2Φ	=	Thread angle, (Degree)

p	=	Pitch of thread, (mm)
L	=	Lead of thread, (mm)
L_m	=	Length of measurement, (m)
R_a	=	Arithmetic mean value of roughness, (m)
y	=	Vertical deviation from nominal surface, (m)
μ	=	Coefficient of friction
μ_c	=	Coefficient of friction in thrust bearing
Q_{L_t}	=	True Leaks rate, (Torr l/s)
P_{us}	=	The Ultimate Pressure, (Torr)
S_n	=	The Net Pumping Speed, (l/s)

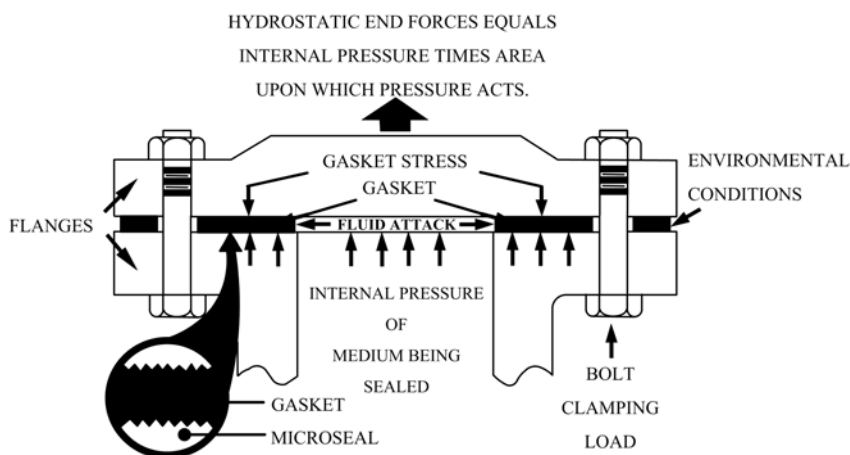
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปะเก็น (Gasket) เป็นอุปกรณ์เชิงกลที่จำเป็นอย่างยิ่งสำหรับระบบทางกล ปะเก็นได้ถูกให้ความหมายต่างๆ มากมาย มีทั้งส่วนที่เหมือนและแตกต่างกันตามการใช้งานเช่น ปะเก็นคือชิ้นส่วนที่ค่อนข้างที่จะคืนสู่สภาพเดิม ซึ่งอยู่ระหว่างผิวหน้าสัมผัสที่แข็งสองหน้า เพื่อป้องกันการรั่วซึม (Fabian, 1959) ปะเก็น โดยความหมายของ American Heritage Dictionary คือสิ่งที่ใช้ในการผนึกหรืออัดกันให้แน่นระหว่างชิ้นส่วนทางกลที่เหมาะสมหรือข้อต่อของท่อ เพื่อป้องกันการเล็ดลอดของแก๊สหรือของไหล นอกจากนี้แล้ว American Society for Testing and Materials (ASTM) ได้นิยามว่า ปะเก็นคือวัสดุที่ถูกบีบอัดอยู่ระหว่างผิวหน้าสัมผัสและทำหน้าที่ป้องกันการรั่วซึมแบบสถิตย์ ปะเก็นอาจจะถูกตัดหรือขึ้นรูปมาเพื่อให้เหมาะสมกับรูปร่างที่ต้องการใช้งานก็ได้ ในขณะที่สมาคมสุญญากาศอเมริกัน (American Vacuum Society) ได้ให้ความหมายปะเก็นในลักษณะที่คล้ายคลึงกัน กล่าวคือ ปะเก็นที่ใช้เป็นอุปกรณ์ป้องกันการรั่วซึมนั้นเกิดจากผลของการบีบอัดตัวปะเก็นที่อยู่ระหว่างชิ้นส่วนที่ต้องการ ไม่ให้เกิดการรั่วซึม ซึ่งจากความหมายทั้งหมดของปะเก็นที่กล่าวมานั้น สามารถกล่าวโดยสรุปได้ว่า ปะเก็นคือวัสดุเนื้อเดียวกันหรือเนื้อผสมที่ถูกบีบอัดอยู่ระหว่างจุดเชื่อมต่อทางกลสองชิ้น เพื่อผลในการป้องกันการเล็ดลอดหรือการรั่วซึมของแก๊สหรือของไหลผ่านจุดเชื่อมต่อนั้นในช่วงระยะเวลาหนึ่ง โดยสามารถรองรับกับสภาวะภายใต้อุณหภูมิและความดันของการใช้งานได้อย่างเหมาะสม ดังรูปที่ 1.1 ซึ่งแสดงให้เห็นลักษณะทั่วไปของการประยุกต์ใช้งานของปะเก็น

ปะเก็นเป็นอุปกรณ์ที่ได้รับความนิยมในการใช้งานเป็นอย่างมากในหลายวงการ เช่นอุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ และวงการอุตสาหกรรมทั่วไป เป็นต้น ในการพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับการสร้างและการประยุกต์ใช้ระบบสุญญากาศที่มีความดันต่ำมากๆ จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการป้องกันการรั่วซึมของของไหลหรือแก๊สจากภายนอกไหลซึมเข้าสู่ภายในระบบสุญญากาศในระดับที่สามารถยอมรับได้ ซึ่งต้องใช้ปะเก็นเป็นอุปกรณ์หลักและปะเก็นที่ใช้จะต้องมีลักษณะและคุณสมบัติเฉพาะที่เหมาะสมกับระบบสุญญากาศตามสภาวะการใช้งานและระดับของระบบสุญญากาศ ทั้งนี้ระบบสุญญากาศที่มีการใช้งานทั่วไปในด้านต่างๆ ทั้งในวงการอุตสาหกรรมและวิทยาศาสตร์เทคโนโลยี ตั้งแต่ระดับต่ำ (Low Vacuum) ที่มีความดันต่ำกว่าความดันบรรยากาศและมากกว่า 25 Torr ระดับปานกลาง (Medium Vacuum) ที่



รูปที่ 1.1 ลักษณะทั่วไปของการประยุกต์ใช้งานของปะเก็น

โดย Daniel E. Czernik, 1996

มีความดันอยู่ในช่วง 25 ถึง 10^{-3} Torr และระดับสูง (High Vacuum) ซึ่งมีความดันต่ำกว่า 10^{-3} Torr เป็นต้นไป นอกจากนี้ระบบสุญญากาศในระดับสูงยังสามารถแบ่งออกเป็น ระบบสุญญากาศระดับสูงมาก (Very High Vacuum) และระบบสุญญากาศระดับสูงสุดขีด (Ultra-High Vacuum) ซึ่งทั้งสองระบบนี้จะถูกจำกัดอยู่ที่การใช้วัสดุที่มีความดันไอต่ำ ณ อุณหภูมิห้อง โดยแต่ละระดับจะเหมาะสมกับลักษณะของการนำไปใช้งานที่แตกต่างกันไป

ปะเก็นที่ใช้ในระบบสุญญากาศนั้นทำมาจากวัสดุหลายประเภทขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งานของระบบสุญญากาศ เช่น ยาง พลาสติกและโลหะ โดยทั่วไปคุณสมบัติของวัสดุเหล่านี้จะถูกพิจารณาเลือกใช้อย่างเหมาะสมตามระดับความดันของระบบสุญญากาศ โดยเฉพาะอย่างยิ่งระบบสุญญากาศระดับสูงสุดขีดจำเป็นต้องใช้วัสดุที่มีความดันไอต่ำ ณ อุณหภูมิห้องซึ่งวัสดุดังกล่าวส่วนใหญ่ก็คือโลหะ ดังนั้นในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะลักษณะและคุณสมบัติของปะเก็นโลหะเท่านั้น

โลหะที่ใช้ทำเป็นปะเก็นมีหลายชนิดด้วยกัน แต่ส่วนใหญ่ที่ปรากฏว่าเคยใช้ทำเป็นปะเก็นก็คือ ทองคำ อะลูมิเนียม ทองแดง ตะกั่ว นิกเกิล เงิน เหล็ก เป็นต้น ซึ่งวัสดุแต่ละชนิดต่างก็มีทั้งข้อดีและข้อเสีย ตลอดจนคุณสมบัติเฉพาะที่สามารถนำไปใช้งานได้หลากหลาย ทำให้วัสดุนั้นๆ เป็นที่นิยมใช้ทำปะเก็นกันอย่างแพร่หลาย โดยทองคำ (Gold) จะเป็นวัสดุที่มีข้อได้เปรียบในด้านการไม่ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศขณะให้ความร้อน ทองคำมีจุดครากค่อนข้างต่ำ แต่ในทางตรงข้าม เมื่อทองคำเกิดการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร มันจะมีการแข็งตัวขึ้นเนื่องมาจากความเครียดที่เพิ่มขึ้น (Strain Hardening) สูงมาก จึงจำเป็นต้องใช้แรงมากขึ้น เพื่อใช้ในการกดอัดปะเก็นทองคำซึ่งไม่ค่อยเหมาะสมนัก โดยทั่วไปต้องกดอัดปะเก็นทองคำประมาณ 40-50% ของเส้นผ่านศูนย์กลางบนพื้นที่หน้าตัดเดิม (Lange W. J., 1957 and Mark J. T., 1960) และเหตุผลอีกประการหนึ่งก็คือ

คือปะเก็นที่ทำมาจากทองคำนั้นมีราคาแพงมาก ซึ่งไม่คุ้มค่าเมื่อเทียบกับมูลค่าของมันจึงไม่เป็นที่นิยม ในส่วนของปะเก็นอะลูมิเนียม (Aluminum) นั้นจะมีข้อได้เปรียบในเรื่องราคาถูกเป็นหลัก แต่ก็มีข้อจำกัดในเรื่องของอุณหภูมิการใช้งาน โดยมีรายงานว่าสามารถใช้ปะเก็นอะลูมิเนียมได้เพียง 400 °C เท่านั้น (Holland L., 1961) ส่วนปะเก็นที่ทำมาจากตะกั่วนั้นไม่สามารถใช้งานได้หลากหลายรูปแบบเนื่องจากมีผลเรื่องการยึดตัวตามเวลาหรือ “การคืบ” (Creep) เข้ามาเป็นอุปสรรคสำคัญทำให้ไม่เป็นที่นิยม เคยมีรายงานเกี่ยวกับการใช้ปะเก็นตะกั่วในลักษณะเส้นลวดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.6 mm. วางตัวอยู่ระหว่างหน้าแปลนที่ทำมาจากแก้ว (Green L.A. and Miles H.T., 1959) ในส่วนของปะเก็นเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) ก็ไม่ได้รับความนิยมใช้เนื่องจากมีความแข็งแรงสูงมาก แต่ส่วนใหญ่แล้วนิยมใช้เหล็กกล้าไร้สนิมเป็นวัสดุหลักในการทำชิ้นส่วนอื่นๆ ของระบบสุญญากาศเช่น หน้าแปลนแบบต่างๆ รวมไปถึงท่อสุญญากาศ (Vacuum Tube) และห้องสุญญากาศ (Vacuum Chamber) เป็นต้น ส่วนปะเก็นที่ทำมาจากเงิน (Silver) ก็ไม่ได้รับความนิยมมากนักเนื่องจากไม่สามารถใช้งานได้ดีกับระบบที่มีความดันต่ำมากๆ โดยส่วนใหญ่แล้วเงินมักจะถูกนำไปผสมกับโลหะอื่น เพื่อปรับปรุงให้ผลของคุณสมบัติบางประการดีขึ้น เช่นนำเงิน 0.1 % ผสมกับทองแดงบริสุทธิ์เกิดเป็นโลหะผสมทองแดงกับเงิน (CuAg) โดยมีคุณสมบัติเด่นในด้านการทนต่อความร้อนได้ดีกว่าทองแดงบริสุทธิ์ (Fend, 1996) แต่ในกรณีของทองแดง (Copper) นั้นจะมีข้อได้เปรียบมากกว่าวัสดุต่างๆ ที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ปะเก็นที่ทำมาจากทองแดงจึงเป็นที่นิยมใช้กันมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งปะเก็นทองแดงชนิด OFHC (Oxygen Free High Conductivity) โดยปะเก็นที่ทำมาจากทองแดงอาจจะถูกใช้งานได้ในสภาวะอุณหภูมิสูงถึง 800 °C (A. Roth, 1994) ในขณะที่มันก็มีข้อด้อยในเรื่องการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศขณะให้ความร้อนได้ง่ายมาก ซึ่งจะทำให้เกิดสนิมทองแดง (Copper Oxide) ขึ้นบนผิววัสดุ ขณะเดียวกันบริเวณที่ต้องสัมผัสกับปะเก็นทองแดงก็จำเป็นต้องสะอาดปราศจากสนิมทองแดงด้วย แต่สนิมทองแดงก็ไม่ใช่อุปสรรคสำคัญของการใช้ปะเก็นชนิดนี้ นอกจากนั้นแล้วข้อได้เปรียบอีกอย่างหนึ่งก็คือทองแดงสามารถขึ้นรูปได้ง่าย Van Heerden, 1955 ได้ทำ O-ring จากเส้นทองแดงชนิด OFHC และได้แนะนำว่าควรจะทำการอบอ่อน O-ring ภายในก๊าซไฮโดรเจนที่ 950 °C ในขั้นตอนสุดท้ายเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพที่ดี อย่างไรก็ตามการอบอ่อนยังสามารถกระทำในอากาศก็ได้ โดยหลังจากกระบวนการทางความร้อนเสร็จสิ้นลง ให้ทำความสะอาดเอาสนิมทองแดงตลอดจนสิ่งที่เป็นพิษทางกายภาพอื่นๆ ออกให้หมด (Hees G.W., 1956)

ปะเก็นทองแดงชนิด OFHC เป็นชิ้นส่วนที่จำเป็นยิ่งของระบบสุญญากาศ โดยจะใช้เป็นตัวประสานของส่วนต่างๆ ในระบบสุญญากาศเพื่อไม่ให้มีรอยร้าวเกิดขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบสุญญากาศระดับสูงสุดขีด ซึ่งถือเป็นระบบสุญญากาศที่มีความดันต่ำมากที่สุด โดยมีความดันอยู่ในช่วง $10^{-11} - 10^{-7}$ Torr นอกจากนั้นรูปแบบการกันรั่วในระบบสุญญากาศระดับสูงสุดขีด

ส่วนใหญ่จะเป็นรูปแบบที่เฉพาะและที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายเรียกว่า “รูปแบบการกันรั่วชนิด Conflat Seal” ใช้ตัวย่อว่า CF (รายละเอียดกล่าวไว้ในบทที่ 2) ปะเก็นทองแดงที่ใช้กับรูปแบบการกันรั่วชนิดนี้จะเป็นปะเก็นทองแดงแบนและมีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า วางตัวอยู่ในที่ว่างเฉพาะของหน้าแปลน (Flange) สองตัวประกบกัน ในขณะที่ใช้งานปะเก็นทองแดงจะถูกแรงกดโดยขอบสันบนหน้าแปลนทั้งสองที่ได้รับแรงบิด (Torque) จากการขันอัดสลักเกลียว (Bolt) และแป้นเกลียว (Nut) ซึ่งร้อยหน้าแปลนทั้งสองเข้าด้วยกัน จนเป็นผลทำให้เนื้อวัสดุของปะเก็น บริเวณที่ถูกกดเกิดการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร (Permanent Deformation) เกิดเป็นรอยกดขึ้นบนปะเก็น และเมื่อจำเป็นต้องถอดหน้าแปลนทั้งสองออกจากกันก็จะไม่นำปะเก็นตัวเดิมมาใช้งานอีก ทั้งนี้เนื่องมาจากรอยกดบนปะเก็น ทำให้เกิดความไม่มั่นใจในประสิทธิภาพของการป้องกันรอยรั่วซึมที่อาจจะเกิดขึ้นได้ จึงทำให้มีข้อจำกัดของจำนวนครั้งที่จะนำปะเก็นทองแดงนี้มาใช้งาน โดยที่ผ่านมาจะแนะนำให้ใช้งานปะเก็นทองแดงเพียงครั้งเดียวเท่านั้น

จากสภาพปัญหาของความไม่น่าเชื่อถือในประสิทธิภาพของปะเก็นที่ใช้งานแล้ว จึงได้ทำการทดลองนำปะเก็นทองแดงกลับมาใช้ซ้ำอีกครั้ง โดยเลือกปะเก็นที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 48 mm. ซึ่งขนาดค่อนข้างเล็กและง่ายต่อการถอดประกอบเข้ากับหน้าแปลน โดยปะเก็นดังกล่าวประกอบอยู่ระหว่างหน้าแปลน CF 70 mm. สองตัวประกบกัน (รายละเอียดอยู่ในรูปที่ 1.8 และ 2.5) ทดสอบหาประสิทธิภาพของปะเก็น (รายละเอียดและขั้นตอนอยู่ในบทที่ 3) กับระบบสุญญากาศภายใต้ความดันน้อยกว่าหรือเท่ากับ 10^{-7} Torr แรงบิดไม่เกิน 110 kg-cm. ในการขันอัดหน้าแปลนกับปะเก็นเข้าด้วยกันผ่านสลักเกลียวขนาด M6×1 จำนวน 6 ตัวและมีค่า Ion Current จากเครื่องทดสอบการรั่วซึมโดยใช้ก๊าซฮีเลียม (Helium leak Detector) ไม่เกิน 10^{-10} แอมแปร์ พบว่าสามารถใช้งานได้เพียงร้อยละ 20 เท่านั้น ซึ่งจะเห็นว่าจากการทดสอบดังกล่าว ปะเก็นทองแดงบางตัวสามารถที่จะนำกลับมาใช้งานได้ แต่ปะเก็นทองแดงส่วนใหญ่ไม่สามารถนำกลับมาใช้งานได้ จึงจำเป็นต้องทิ้งปะเก็นเหล่านั้นไปทั้งหมด ส่งผลทำให้เสียค่าใช้จ่ายมาก ประกอบกับปะเก็นดังกล่าวยังไม่สามารถผลิตได้เองภายในประเทศไทย จำเป็นต้องนำเข้าจากต่างประเทศในราคาสูงจากการประมาณราคาปะเก็นทองแดงสำหรับหน้าแปลน CF 70 mm. ราคา 1.9 ยูโรต่อชิ้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีความพยายามที่จะศึกษาและทดสอบการคืนสภาพคุณสมบัติเชิงกลของปะเก็น โลหะ โดยมุ่งเน้นที่ปะเก็นทองแดงที่ใช้ในระบบสุญญากาศระดับสูงสุดขีด เพื่อนำไปสู่ข้อสรุปเกี่ยวกับคุณสมบัติของปะเก็นและประสิทธิภาพในการใช้งานซ้ำของปะเก็นทองแดง โดยหวังว่าจะสามารถเพิ่มปัจจัยสนับสนุนในเรื่องคุณสมบัติเชิงกลที่เสียไปให้กลับคืนมาจนสามารถนำกลับมาใช้งานได้อีกครั้ง โดยมีวัตถุประสงค์ดังต่อไปนี้

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

วัตถุประสงค์หลัก

1. ศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของปะเก็นทองแดงที่ผ่านการใช้งาน ในการป้องกันการรั่วซึมของระบบสุญญากาศระดับสูงสุดขีด

2. ศึกษาและออกแบบวิธีการบำบัดที่เหมาะสม เพื่อคืนสภาพคุณสมบัติเชิงกลของปะเก็นทองแดงชนิด OFHC โดยในเบื้องต้นจะเป็นการบำบัดด้วยความร้อนก่อน

3. ศึกษาผลกระทบของการบำบัดด้วยความร้อนที่มีต่อปะเก็นทองแดงที่ใช้งานแล้ว

วัตถุประสงค์รอง

1. ทดสอบประสิทธิภาพของปะเก็นทองแดงชนิด OFHC ที่ใช้งานและผ่านการบำบัดด้วยความร้อนมาแล้ว โดยทำการพิจารณาจากตัวแปรต่างๆ ได้แก่

1.1 การวัดความดัน (Pressure Measurement) ในระบบสุญญากาศ

1.2. การวัดอัตราการรั่ว (Leak Rate) ของระบบสุญญากาศ

1.3. วิเคราะห์แก๊สที่เหลืออยู่ (Residual Gasses) ในระบบสุญญากาศ

1.4. แรงบิด (Torque) ที่ใช้ในการกดอัดหน้าแปลน

2. การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของปะเก็นทองแดง

2.1. ความแข็ง (Hardness)

2.2. การวัดความลึกและลักษณะของรอยกดถาวรบนปะเก็นที่ใช้งานแล้ว เพื่อใช้คำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์การขึ้นรูปเย็น (Cold Work Index)

3. ศึกษาวิธีการที่เหมาะสมสำหรับใช้ในการกำจัดสนิมทองแดง (Copper Oxide Elimination)

4. ลดค่าใช้จ่ายในการนำเข้าปะเก็นทองแดงจากต่างประเทศ

1.3 สมมติฐานการวิจัย

ทฤษฎี

1. พฤติกรรมและการเปลี่ยนรูปของโลหะ จากการศึกษาในเบื้องต้นพบว่า สำหรับโลหะทางวิศวกรรมประเภทโลหะเหนียวเช่น เหล็กเหนียว อลูมิเนียม ทองแดง เมื่อมีภาระกรรม (Load) มากระทำต่อโลหะทำให้เกิดความเค้นและความเครียดใน โครงสร้างของโลหะเป็นผลให้โลหะนั้นเกิดการเปลี่ยนรูปไป ในระยะแรกจะเป็นการเปลี่ยนรูปอย่างยืดหยุ่น นั่นคือเมื่อนำภาระกรรมที่มากกระทำออกการเปลี่ยนรูปอย่างยืดหยุ่นก็จะกลับคืนสู่รูปร่างเดิมของมัน แต่ถ้าภาระกรรมที่มากกระทำต่อโลหะนั้นมากพอที่จะทำให้เกิดความเค้นสูงจนกระทั่งเกิดการครากขึ้นใน โลหะจะเรียกความเค้นนั้นว่า “ความเค้นคราก (Yield Stress)” และเมื่อภาระกรรมยังคงกระทำต่อไปจน

ความเครียดที่เกิดขึ้นเลยจุดคราก (Yield Point) ของโลหะไป โลหะจะฟื้นคืนจำกัดของการเปลี่ยนรูปร่างอย่างยืดหยุ่นไปแล้ว และเข้าสู่ช่วงที่ทำให้โลหะเกิดการเปลี่ยนรูปร่างถาวร ในช่วงที่โลหะเกิดการบวมการเปลี่ยนรูปร่างถาวรนั้นสามารถจำแนกลักษณะการเปลี่ยนรูปร่างดังกล่าวได้เป็นสองแบบใหญ่ๆ ด้วยกันคือ การเปลี่ยนรูปร่างร้อนหรือการขึ้นรูปร้อน (Hot Working) และการเปลี่ยนรูปร่างเย็นหรือการขึ้นรูปเย็น (Cold Working) ซึ่งในแต่ละแบบก็จะมีลักษณะตลอดจนข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกันไป ทำให้เราสามารถเลือกประโยชน์ของการขึ้นรูปในแบบต่างๆ ไปใช้งานได้เหมาะสม

2. การขึ้นรูปร้อนของโลหะ หมายถึงกระบวนการที่ทำให้วัสดุหรือโลหะได้รับการกระทบทางกลเกิดการเปลี่ยนรูปร่างถาวรภายใต้ภาวะอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิการเกิดผลึกใหม่ (Recrystallization Temperature) แต่ยังต่ำกว่าอุณหภูมิการหลอมเหลวของวัสดุหรือโลหะนั้นๆ ทำให้การเปลี่ยนรูปร่างลักษณะนี้ไม่มีผลจากการแข็งตัวเนื่องจากความเครียดที่เพิ่มขึ้นเข้ามาเกี่ยวข้อง ทำให้มีข้อดีหลายอย่าง เช่น สิ่งปลอมปนที่ไม่พึงประสงค์หรือสารมลทิน (Impurity) ต่างๆ จะแตกตัวกระจายระจายออกไป สามารถกำจัดความพรุน (Porosity) ได้ดียิ่งขึ้น นอกจากนั้นแล้วลักษณะของเกรนโลหะที่เป็นเกรนยาว (Elongated Grain) และเกรนหยาบ (Coarse Grain) จะมีความละเอียดของเกรนมากขึ้น ส่วนข้อเสียของการขึ้นรูปร้อนคือ การทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศเกิดสารประกอบออกไซด์ขึ้นบริเวณผิวของชิ้นงาน รวมไปถึงโอกาสในการเกิดสะเก็ดขึ้นบนผิวของชิ้นงานทำให้ผิวของชิ้นงานออกมาไม่สวย นอกจากนั้นแล้วการควบคุมขนาดของชิ้นงานก็ทำได้ลำบาก ทั้งนี้เป็นผลเนื่องจากผลของการขยายตัวและการหดตัวของโลหะเมื่อได้รับความร้อน ตัวอย่างของการขึ้นรูปร้อน ประกอบไปด้วย การตีขึ้นรูป (Forging) การรีดร้อน (Hot Rolling) การดึงและกดขึ้นรูป (Drawing and Cupping) การเชื่อมต่อท่อ (Pipe Welding) การแทงขึ้นรูป (Piercing) การอัดรีดขึ้นรูป (Extruding) การหมุนขึ้นรูป (Spinning) เป็นต้น

3. การขึ้นรูปเย็นของโลหะ หมายถึงกระบวนการที่ทำให้วัสดุหรือโลหะได้รับการกระทบทางกลจนเกิดการเปลี่ยนรูปร่างถาวร โดยการเปลี่ยนรูปร่างดังกล่าวจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิการเกิดผลึกใหม่ของโลหะชนิดนั้นๆ ซึ่งนอกจากจะไม่มีโครงสร้างผลึกใหม่เกิดขึ้นแล้วยังจะส่งผลทำให้โครงสร้างและคุณสมบัติเชิงกลต่างๆ ของโลหะเปลี่ยนแปลงไป โดยรวมไปถึงการเกิดขึ้นของการแข็งตัวเนื่องจากความเครียดที่เพิ่มขึ้นด้วย ข้อดีของการขึ้นรูปเย็นก็คือ การใช้อุณหภูมิต่ำในการขึ้นรูป สภาพผิวของชิ้นงานยังคงเรียบและสวยงามไม่แตกต่างจากผิวเดิมมากนัก ขนาดของชิ้นงานที่ได้จะความเที่ยงตรงแน่นอน ความแข็งแรงและความแข็งจะมากขึ้นกว่า ส่วนข้อเสียคือ โครงสร้างผลึกจะเกิดความเค้นและความเครียดสูงมากส่งผลเกรนเกิดการแตกหักได้ง่าย ตัวอย่างของการขึ้นรูปเย็น ประกอบไปด้วย การดัดงอ (Bending) การรีดเย็น (Cold Rolling) การอัดรีดขึ้นรูป (Extruding) การบีบงอ (Squeezing) การหมุนเฉือนขึ้นรูป (Shear Spinning) การยืด

ออก (Stretching) การงอตรง (Strength Bending) การขึ้นรูปพิมพ์ลึก (Deep Drawing) เป็นต้น นอกจากนี้ยังพบกระบวนการใหม่ๆ ในการขึ้นรูปเย็นอีกด้วย

ผลกระทบของการขึ้นรูปเย็นต่อคุณสมบัติเชิงกลของโลหะนั้นมีมากมาย โดยที่ผ่านมาได้มีการศึกษากันอย่างแพร่หลาย ซึ่งส่วนใหญ่จะมีการวัดปริมาณการขึ้นรูปเย็นออกมาเป็นเปอร์เซ็นต์เรียกว่า “เปอร์เซ็นต์การขึ้นรูปเย็น” (Percent Cold Work or Cold Work Index) ใช้ตัวย่อว่า %CW โดยการคำนวณเปอร์เซ็นต์การขึ้นรูปเย็นสามารถหาได้จากสัดส่วนที่เปลี่ยนแปลงไปต่อด้วยสัดส่วนเดิมของวัสดุ ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับลักษณะของชิ้นงานด้วยเช่น ถ้าหากเป็นกระบวนการรีดเย็นวัสดุให้บางลงกว่าความหนาเดิมก็จะใช้ ความหนาที่เปลี่ยนแปลงไปต่อด้วยความหนาเดิม ดังสมการที่ (1.1) แต่ถ้าเป็นการดึงแท่งโลหะให้มีขนาดพื้นที่หน้าตัดเล็กกลง ก็จะใช้พื้นที่หน้าตัดที่เปลี่ยนแปลงไปต่อด้วยพื้นที่หน้าตัดเดิมดังสมการที่ (1.2) เป็นต้น

$$\%CW = \frac{[T_o - T_f]}{T_o} \times 100 \quad (1.1)$$

เมื่อ T_o = ความหนาเดิมของวัสดุ

T_f = ความหนาที่เปลี่ยนไปสู่สุดท้ายของวัสดุ

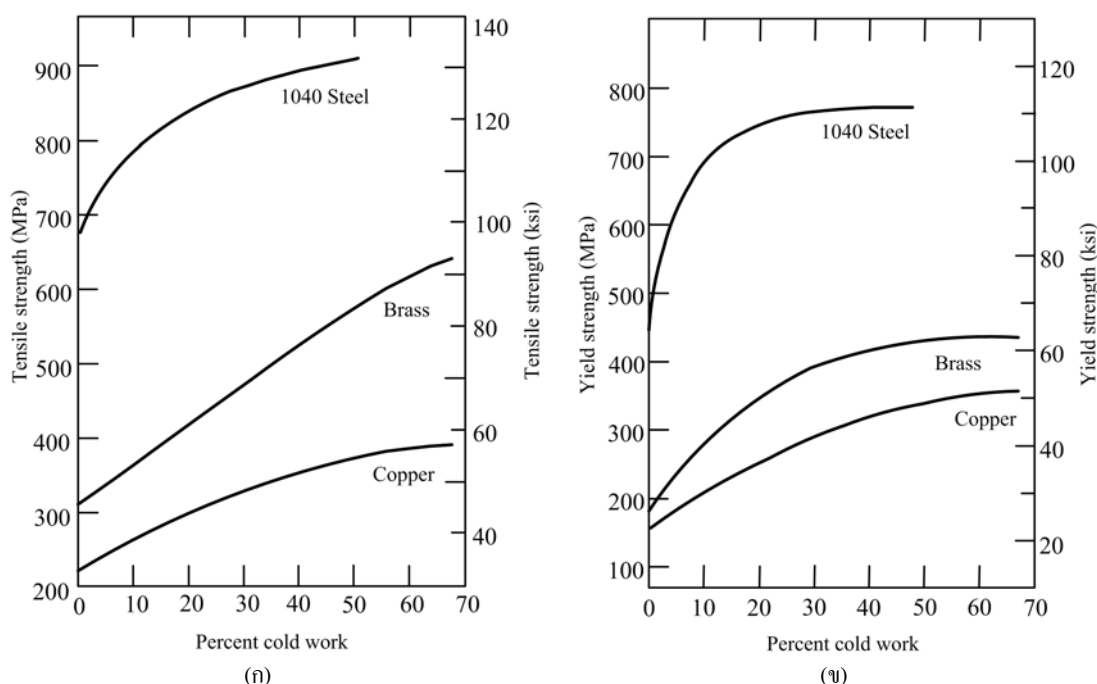
$$\%CW = \frac{[A_o - A_f]}{A_o} \times 100 \quad (1.2)$$

เมื่อ A_o = ความหนาเดิมของวัสดุ

A_f = ความหนาที่เปลี่ยนไปสู่สุดท้ายของวัสดุ

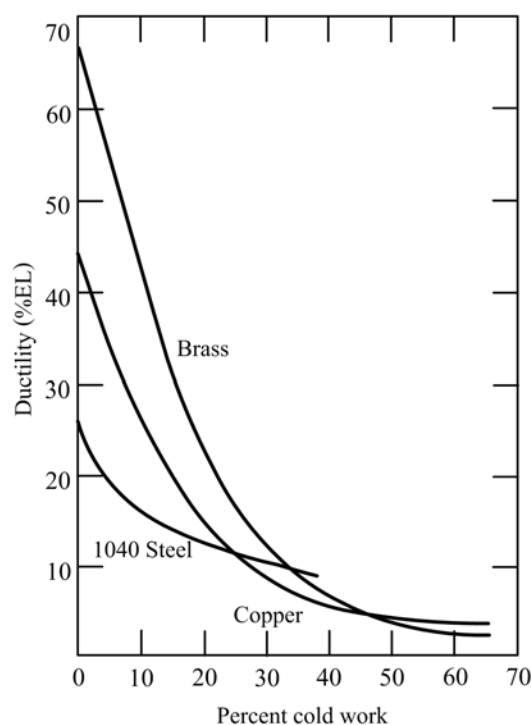
และเนื่องจากการคำนวณดังกล่าวสอดคล้องกับการคำนวณหาความเครียดของวัสดุ ดังนั้นในบางครั้งเราจะพบว่ารูปแบบของเปอร์เซ็นต์การขึ้นรูปเย็นเป็น $\epsilon\%$ ซึ่งมีความหมายเดียวกัน จากนั้นจึงนำผลของเปอร์เซ็นต์การขึ้นรูปเย็นไปพิจารณาเปรียบเทียบกับคุณสมบัติเชิงกลต่างๆ ที่เปลี่ยนแปลงไป ตัวอย่างแรกจะเป็นผลการศึกษาความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์การขึ้นรูปเย็นกับความแข็งแรง (Tensile Strength) และกำลังคราก (Yield Strength) ของวัสดุสามชนิดประกอบด้วย เหล็กชนิด 1040 ทองเหลือง และทองแดง ซึ่งจะพบว่าเมื่อเปอร์เซ็นต์การขึ้นรูปเย็นเพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้ความแข็งแรงและกำลังครากของวัสดุทั้งสามเพิ่มขึ้นด้วย แต่จะเพิ่มขึ้นในสัดส่วนที่ไม่เท่ากัน ซึ่งจะสังเกตว่าในช่วงเปอร์เซ็นต์การขึ้นรูปเย็นเกิดขึ้นต่ำๆ โลหะทั้งสามจะมีความแข็งแรงและ

กำลังครากเพิ่มขึ้นค่อนข้างรวดเร็วกว่าในช่วงเปอร์เซ็นต์การขึ้นรูปเย็นสูงๆ ตัวอย่างที่เห็นได้ชัดเจนคือ เหล็กชนิด1040 ดังในรูปที่ 1.2 (ก) และ (ข) ตามลำดับ



รูปที่ 1.2 อิทธิพลของเปอร์เซ็นต์การขึ้นรูปเย็นต่อความแข็งแรงและกำลังครากของโลหะต่างๆ
โดย William D. Calister Jr., 1985

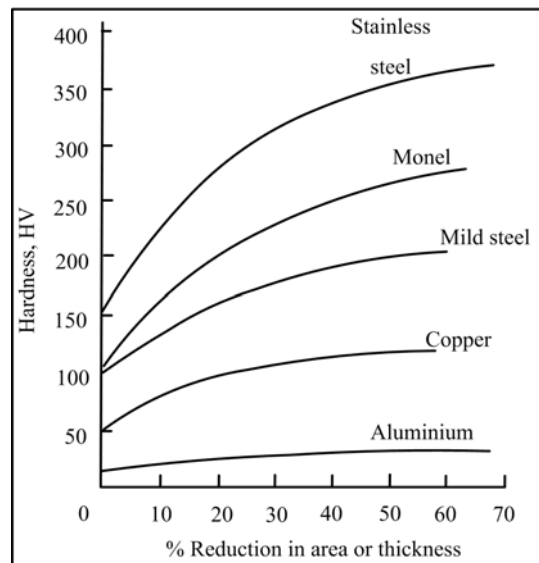
นอกจากจะพบว่าเปอร์เซ็นต์การขึ้นรูปเย็นมีผลต่อความแข็งแรงของวัสดุและกำลังครากแล้ว ตัวอย่างต่อมาก็คือการศึกษาค่าผลของเปอร์เซ็นต์การขึ้นรูปเย็นต่อความเหนียวในการยืดตัว (Ductility) ของวัสดุ โดยจากการศึกษาความเหนียวในการยืดตัวของวัสดุสามชนิดเดิมคือ เหล็กชนิด1040 ทองเหลือง และทองแดง ผลการศึกษาได้แสดงให้เห็นว่า เมื่อเปอร์เซ็นต์การขึ้นรูปเย็นเพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้ความเหนียวในการยืดตัวของวัสดุทั้งสามมีค่าลดลง ซึ่งแตกต่างจากความแข็งแรงและกำลังคราก โดยในช่วงที่มีค่าเปอร์เซ็นต์การขึ้นรูปเย็นต่ำๆ โลหะทั้งสามจะมีค่าความเหนียวในการยืดตัวลดลงอย่างรวดเร็วจากนั้นความเหนียวในการยืดตัวก็จะลดลงอย่างช้าๆ ซึ่งจะสังเกตว่าทองเหลืองจะลดลงมากที่สุดเมื่อเทียบกับค่าความเหนียวในการยืดตัวเดิมในขณะที่ความเหนียวในการยืดตัวของเหล็กชนิด1040 จะลดลงน้อยที่สุดดังในรูปที่ 1.3



รูปที่ 1.3 อิทธิพลของเปอร์เซ็นต์การขึ้นรูปเย็นต่อความเหนียวในการยืดตัวของโลหะต่างๆ

William D. Calister Jr., 1985

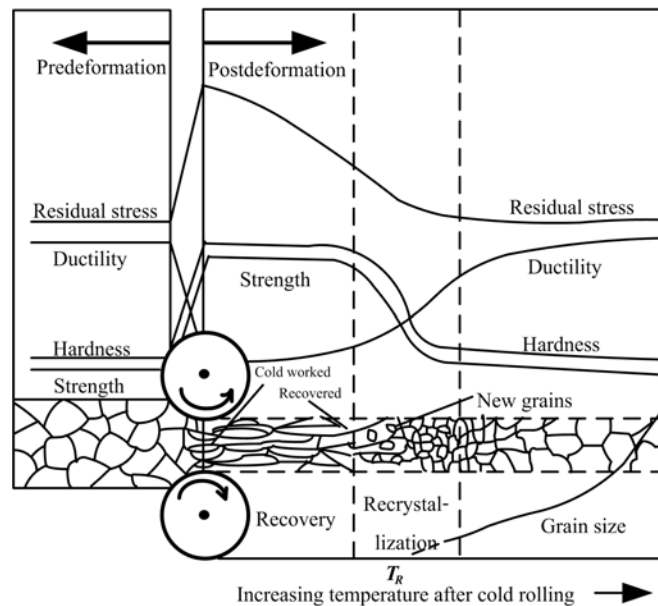
อิทธิพลของเปอร์เซ็นต์การขึ้นรูปเย็นต่อคุณสมบัติเชิงกลต่างๆ ของโลหะที่กล่าวนั้นสามารถสรุปได้ว่าเมื่อเปอร์เซ็นต์การขึ้นรูปเย็นเพิ่มขึ้นจะทำให้ ความแข็งแรง กำลังครากของวัสดุลดลงในขณะที่ความเหนียวในการยืดตัวจะลดลง แต่ต่อไปนี้จะกล่าวถึงอิทธิพลของเปอร์เซ็นต์การขึ้นรูปเย็นต่อค่าความแข็ง (Hardness) ของวัสดุซึ่งถือเป็นคุณสมบัติเชิงกลที่ตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงเปอร์เซ็นต์การขึ้นรูปเย็นที่ค่อนข้างจะให้ผลชัดเจนกว่าคุณสมบัติอื่นๆ ที่กล่าวมาแล้ว ทั้งนี้เป็นผลโดยตรงมาจากการแข็งตัวของเนื้อวัสดุเนื่องจากความเครียดที่เพิ่มขึ้น ทำให้สามารถคาดเดาได้ว่าความแข็งของวัสดุที่ผ่านการขึ้นรูปเย็นมานั้นจะต้องมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างแน่นอน โดยจากการศึกษาเปรียบเทียบกันระหว่างวัสดุหลายชนิดประกอบด้วย เหล็กกล้าไร้สนิม วัสดุทนกรด (Monel) เหล็กอ่อน ทองแดง และอะลูมิเนียม พบว่า เมื่อเปอร์เซ็นต์การขึ้นรูปเย็นเพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้ความแข็งของวัสดุทั้งหมดมีค่าเพิ่มขึ้น โดยในช่วงเปอร์เซ็นต์การขึ้นรูปเย็นต่ำๆ โลหะทั้งหมดจะมีความแข็งเพิ่มขึ้นค่อนข้างรวดเร็วกว่าในช่วงเปอร์เซ็นต์การขึ้นรูปเย็นสูงๆ ตัวอย่างที่เห็นได้ชัดเจนคือ เหล็กกล้าไร้สนิม วัสดุทนกรด เหล็กอ่อนและทองแดง ส่วนในกรณีของอะลูมิเนียมความแข็งมีการเปลี่ยนแปลงน้อยเมื่อเทียบกับค่าความแข็งเดิม ดังในรูปที่ 1.4



รูปที่ 1.4 อิทธิพลของเปอร์เซ็นต์การขึ้นรูปเย็นต่อความแข็ง
โดย W. Bolton, 2000

4. กระบวนการอบอ่อน จากที่กล่าวมาแล้วว่าโครงสร้างและคุณสมบัติเชิงกลต่างๆ ที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากการเปลี่ยนรูปร่างนั้น สามารถทำให้กลับคืนสู่สภาพก่อนการเปลี่ยนรูปได้ โดยให้โลหะที่มีเปลี่ยนรูปร่างผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการทางความร้อนที่อุณหภูมิและเวลาอย่างเหมาะสมหรือที่เรียกว่ากระบวนการอบอ่อน (Annealing) ซึ่งจะประกอบไปด้วยกระบวนการย่อยๆ สามกระบวนการตามสถานะอุณหภูมิของการบำบัด กล่าวคือกระบวนการคืนตัว (Recovery) กระบวนการเกิดผลึกใหม่ (Recrystallization) และกระบวนการโตขึ้นของขนาดผลึกใหม่ (Grain Growth) ซึ่งจะส่งผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางโครงสร้างและคุณสมบัติเชิงกลต่างๆ ของโลหะกลับคืนสู่สภาพก่อนการเปลี่ยนรูป เช่นความเค้นตกค้าง (Residual Stress) ในโลหะ ค่าความแข็งแรงและความแข็งจะลดลง ในขณะที่ค่าความเหนียวในการยืดตัวและขนาดของเกรน (Grain Size) จะเพิ่มขึ้น ทำให้สามารถนำไปขึ้นรูปเย็นได้อีกหลายครั้ง ดังจะเห็นได้จากรายละเอียดในรูปที่ 1.5

ดังที่ได้กล่าวเอาไว้ว่ากระบวนการอบอ่อนนั้นประกอบด้วยสามกระบวนการย่อยๆ โดยสามารถแยกตามภาวะอุณหภูมิของการบำบัดคือ กระบวนการคืนตัว กระบวนการเกิดผลึกใหม่ และตามด้วยกระบวนการโตขึ้นของขนาดผลึกใหม่ ซึ่งแต่ละกระบวนการก็จะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางโครงสร้างและคุณสมบัติเชิงกลต่างๆ ของโลหะที่แตกต่างกันคือ



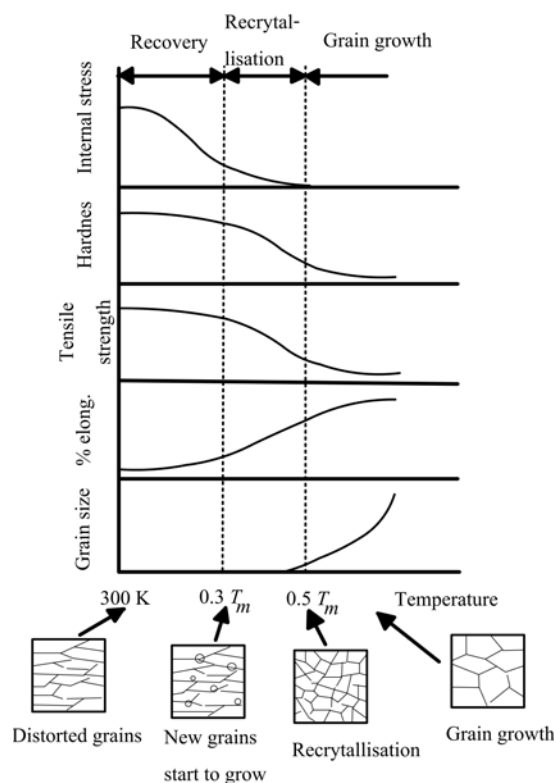
รูปที่ 1.5 แผนภาพแสดงผลของการขึ้นรูปเย็นและการอบอ่อนต่อโครงสร้างภายในและแนวโน้มของคุณสมบัติเชิงกลในโลหะ โดย Milton Ohring, 1936

5. กระบวนการคืนตัว เป็นช่วงต้นของการอบอ่อนโลหะที่ผ่านการขึ้นรูปเย็น ซึ่งกระบวนการนี้จะดำเนินไปในระดับอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิการเกิดผลึกใหม่ของโลหะชนิดนั้นๆ เพื่อปลดปล่อยความเค้นภายในที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากการขึ้นรูปเย็น ทำให้ความเค้นลดลงด้วย และมีผลให้คุณสมบัติทางกายภาพบางอย่างเช่น คุณสมบัติทางไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไป โดยจะถูกเปลี่ยนกลับไปเหมือนสภาพก่อนทำการขึ้นรูปเย็น (Precold Work States) ในช่วงการอบคืนตัวนี้ความแข็งและความแข็งแรงของโลหะจะลดลงเล็กน้อยแต่ความเหนียวจะเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ดังนั้นจึงนิยมใช้กับโลหะผสมที่ผ่านการขึ้นรูปเย็น เพื่อป้องกันการแตกร้าวและลดสภาพการบิดเบี้ยวจากความเค้นที่ค้างอยู่ในทางการค้าและวิศวกรรมทั่วไปนั้นเรียกการอบด้วยความร้อนในระดับต่ำเพื่อการคืนตัวนี้ว่า “การอบคลายความเค้นเครียด” (Stress Relief Annealing)

สำหรับวัสดุโดยทั่วไปจะประกอบไปด้วยผลึกเป็นจำนวนมากเรียงตัวกันเป็นโครงผลึก ซึ่งการเรียงตัวดังกล่าวจะทำให้เกิดแนวของช่องว่างที่เล็กมากๆ ระหว่างผลึกแนวดังกล่าวจะมีลักษณะเป็นแนวระนาบที่เรียกว่า “ระนาบเลื่อน” (Slip Planes or Slip Pages) ซึ่งระนาบเลื่อนนี้จะสามารถทนต่อความเค้นเฉือน (Shear Stress) ได้ต่ำ และเมื่อวัสดุได้รับภาระกรรมจากภายนอกมากระทำและทำให้เกิดความเค้นอยู่ในช่วงยืดหยุ่นขึ้น ผลึกเหล่านี้จะเปลี่ยนรูปไปเนื่องจากแรงระหว่างอะตอม ทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปเฉพาะในผลึกเท่านั้น ดังนั้นเมื่อนำภาระกรรมออกไป การเปลี่ยนรูปของผลึกก็จะกลับคืนสู่รูปเดิม แต่ถ้าภาระกรรมจากภายนอกมากระทำจนทำให้เกิดความ

เค้นสูงกว่าความเค้นครากของวัสดุนั้นๆ โคร่งผลึกก็จะเกิดการเปลี่ยนรูปไปแต่จะมีความเค้นอีกส่วนหนึ่งที่สามารถทำให้ผลึกเกิดการเคลื่อนตัวไปตามแนวระนาบเลื่อนหรือที่รู้จักกันโดยทั่วไปว่า “การผิดรูปของโคร่งผลึก” (Dislocation) โดยบริเวณที่เกิดการผิดรูปของโคร่งผลึกขึ้นก็จะเกิดการทำลายพันธะระหว่างอะตอมที่มีอยู่เดิมและจะสร้างพันธะใหม่ขึ้น ดังนั้นเมื่อนำภาระกรรมออกไป การเปลี่ยนรูปของผลึกก็จะกลับคืนสู่รูปเดิมแต่การเปลี่ยนรูปในโลหะจะยังคงมีอยู่ ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปอย่างถาวรขึ้น

6. กระบวนการเกิดผลึกใหม่ เป็นช่วงที่ต่อมาจากกระบวนการคืนตัว ซึ่งในกระบวนการนี้จะเป็นการอบให้ความร้อนจนโลหะที่ผ่านการขึ้นรูปเย็นมา มีอุณหภูมิสูงพอที่จะทำให้เกิดโคร่งผลึกใหม่ซึ่งปราศจากความเครียด โดยทั่วไปจะอยู่ที่ 0.3 ถึง 0.5 เท่า (W. Bolton, 2000) ของอุณหภูมิสัมบูรณ์การหลอมเหลว (Melting Point) ดังรูปที่ 1.6

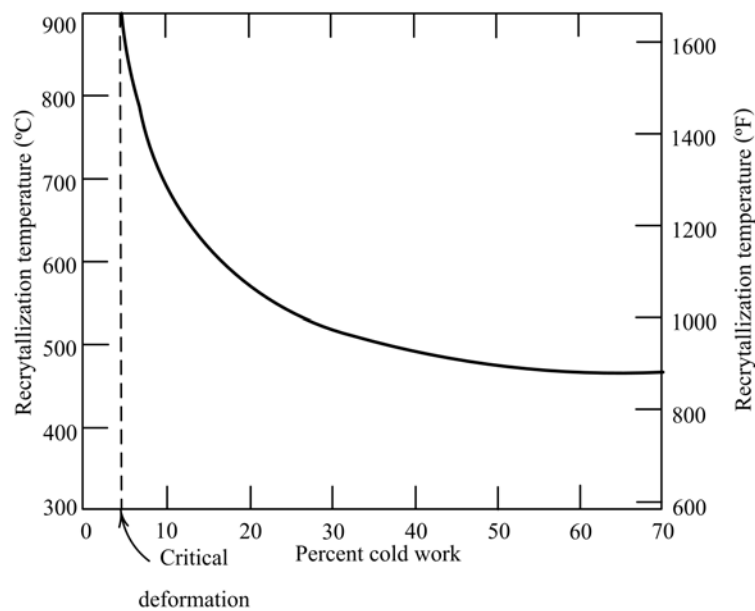


รูปที่ 1.6 ผลของอุณหภูมิการอบอ่อนต่อวัสดุที่ผ่านการขึ้นรูปเย็น

โดย W. Bolton, 2000

โคร่งผลึกใหม่ที่เกิดขึ้นนี้จะมีสัดส่วนทางเคมีและรูปผลึกลักษณะเดิมเหมือนผลึกที่เกิดจากการเย็นตัวของน้ำโลหะ (วีระพันธ์ สิทธิพงศ์, 2539) บริเวณที่เกิดผลึกใหม่ส่วนใหญ่จะเป็นบริเวณที่มีพลัง

งานสัคยสูงเช่น บริเวณเกรนมีการเปลี่ยนรูปร่างอย่างมากจากการขึ้นรูปเย็น แล้วจึงขยายตัวเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนแทนที่โครงสร้างเดิมทั้งหมด นั่นคือ โครงสร้างที่เกิดจากการขึ้นรูปเย็น (Cold Worked Structure) จะเปลี่ยนเป็น โครงสร้างที่เกิดจากโครงผลึกใหม่ ซึ่งมีความหนาแน่นของบริเวณที่เกิดการผิดรูปของโครงผลึกน้อยลง ความเค้นที่ยังคงค้างอยู่จะถูกกำจัดให้หมดไป ทำให้ความแข็งและความแข็งแรงของโลหะลดลงแต่ความอ่อนตัวสูงขึ้น



รูปที่ 1.7 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิการเกิดผลึกใหม่และเปอร์เซ็นต์การขึ้นรูปเย็น

โดย William D. Calister Jr., 1985

ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อกระบวนการนี้สำหรับโลหะประกอบด้วยสามตัวแปรหลักคือ ปริมาณหรือเปอร์เซ็นต์การขึ้นรูปเย็น อุณหภูมิและเวลา (R.B. Gupta, 2000) โดยกระบวนการเกิดผลึกใหม่ในโลหะที่ต่างชนิดกันย่อมจะใช้ช่วงอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ซึ่งอุณหภูมิที่ต่ำที่สุดที่สามารถทำให้เกิดกระบวนการนี้ได้เรียกว่า “อุณหภูมิการเกิดผลึกใหม่” อุณหภูมิการเกิดผลึกใหม่จะเกิดได้อย่างสมบูรณ์ในเวลาจำกัด ปกติแล้วใช้เวลาหนึ่งชั่วโมง (ทวิ อิมพิทักย์, ม.ป.ป.) โดยในส่วนของเปอร์เซ็นต์การขึ้นรูปเย็นที่มีต่อการเกิดกระบวนการเกิดผลึกใหม่คือต้องใช้อุณหภูมิการเกิดผลึกใหม่ที่ต่ำลง และในกรณีที่เปอร์เซ็นต์การขึ้นรูปเย็นมีน้อยเกินไป กระบวนการเกิดผลึกใหม่ก็ไม่สามารถที่จะเกิดขึ้นได้ โดยทั่วไปก่อนที่กระบวนการเกิดผลึกใหม่จะเริ่มขึ้นนั้น โลหะต้องมีปริมาณหรือเปอร์เซ็นต์การขึ้นรูปเย็นอยู่ปริมาณหนึ่ง ซึ่งมากพอที่จะทำให้กระบวนการเกิดผลึกใหม่เกิดขึ้นได้ ปริมาณดังกล่าวเรียกว่า “ปริมาณวิกฤติ” วีระพันธ์ สิทธิพงษ์ (2539) ได้กล่าวถึง

ปริมาณวิกฤติเอาไว้ในหนังสือโลหะวิทยาภาพสำหรับวิศวกร ภาค 1 โดยประมาณค่าเอาไว้ในช่วง 2-8 % และโลหะที่มีปริมาณหรือเปอร์เซ็นต์การขึ้นรูปเย็นมาถึงจุดนี้ก็จะทำให้เกิด “การเสียรูปร่างวิกฤติ” (Critical Deformation) ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 1.7 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์การขึ้นรูปเย็นและอุณหภูมิการเกิดผลึกใหม่

7. กระบวนการโตขึ้นของขนาดผลึกใหม่ เป็นสถานะที่เกิดขึ้นหลังจากที่กระบวนการเกิดผลึกใหม่เสร็จสิ้นลง แต่วัสดุยังคงได้รับความร้อนต่อไปจนมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิการเกิดผลึกใหม่ ทำให้ผลึกใหม่ซึ่งเกิดขึ้นจากสภาพที่ปราศจากความเครียดของกระบวนการเกิดผลึกใหม่ มีความหนาแน่นของขอบผลึกสูงมาก ซึ่งจะทำให้เกิดภาวะโครงสร้างผลึกที่ไม่เสถียร บริเวณขอบผลึกดังกล่าวเหล่านี้ก็จะรวมตัวเข้าด้วยกันเพื่อลดขนาดพื้นผิวสัมผัสในแต่ละผลึกลง ซึ่งจะส่งผลทำให้ผลึกรวมกันเป็นก้อนผลึกใหม่หรือเกรนใหม่ที่มีการขยายตัวให้โตขึ้นอย่างต่อเนื่อง ขึ้นกับอุณหภูมิและเวลาเป็นปัจจัยสำคัญ คุณสมบัติเชิงกลต่างๆ เช่นความแข็ง ความแข็งแรง และการยึดตัวจะเปลี่ยนแปลงน้อยมากในช่วงนี้

สมมติฐาน

จากทฤษฎีและความเป็นไปได้ต่างๆ ที่กล่าวมาข้างต้นทั้งหมดจึงนำไปสู่แนวความคิดที่จะประยุกต์ใช้กับปะเก็นทองแดงที่ใช้งานในระบบสุญญากาศ โดยงานวิจัยนี้มีความพยายามที่จะศึกษาและทดสอบการคืนสภาพคุณสมบัติเชิงกลของปะเก็นโลหะ โดยมีสมมติฐานว่าเมื่อปะเก็นทองแดงที่ถูกแรงกดจากสันบนหน้าแปลนจนปะเก็นเกิดการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร ทำให้บริเวณดังกล่าวมีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเชิงกลต่างๆ และเนื่องจากเป็นบริเวณที่มีพื้นที่เล็ก คุณสมบัติเชิงกลที่เหมาะสมและง่ายต่อการทดสอบมากที่สุดก็คือความแข็ง โดยคาดว่าความแข็งบริเวณนั้นจะมีค่าสูงกว่าบริเวณที่ไม่ถูกกดอัด ทั้งนี้เป็นผลอันเนื่องมาจากการแข็งตัวเนื่องจากความเครียดที่เพิ่มขึ้น จากนั้นหากนำปะเก็นไปทำการบำบัดด้วยกระบวนการทางความร้อนที่อุณหภูมิและเวลาอย่างเหมาะสมหรือการอบอ่อน จะสามารถทำให้คุณสมบัติเชิงกลที่เปลี่ยนแปลงไปฟื้นคืนสภาพสู่ภาวะเดิมและพร้อมที่จะสามารถใช้งานอีกครั้ง โดยตัวแปรที่เกี่ยวข้องประกอบด้วย ขนาดของปะเก็นและหน้าแปลน แรงบิดในการขันอัดสลักเกลียว ความดัน อัตราการรั่วซึมผ่านปะเก็น อุณหภูมิ เวลา ความแข็ง และเปอร์เซ็นต์การขึ้นรูปเย็น จากนั้นจึงทำการหาประสิทธิภาพของปะเก็นที่ผ่านการบำบัดแล้ว โดยนำกลับมาทดลองใช้ซ้ำในระบบสุญญากาศอีกครั้ง แล้วเปรียบเทียบผลที่ได้ต่อไป

1.4 ขอบเขตงานวิจัย

เนื่องจากตัวแปรต่างๆ งานวิจัยนี้มีจำนวนมาก ดังนั้นงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาและทดลองบนพื้นฐานและขอบเขตต่างๆ ของ

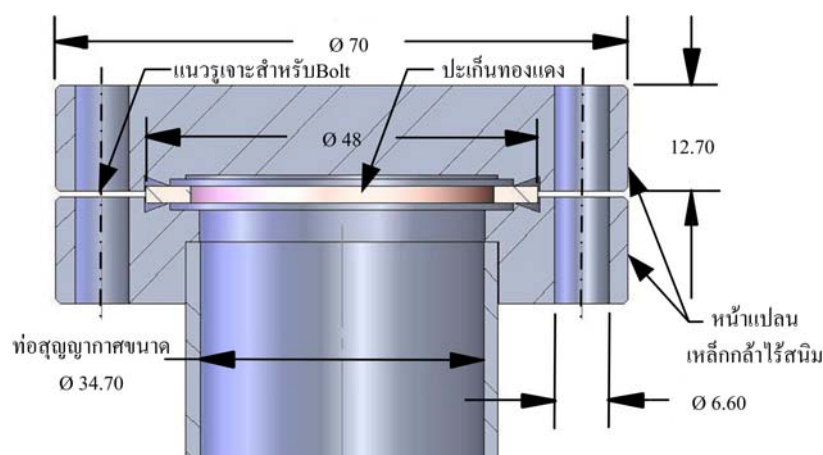
1. การศึกษาผลกระทบของคุณสมบัติเชิงกลต่อประสิทธิภาพการป้องกันการรั่วซึมของปะเก็นในระบบสุญญากาศ อันได้แก่

1.1 ความแข็งของปะเก็น

1.2 เพอร์เซ็นต์การขึ้นรูปเย็น

1.3 ความหยาบผิวของปะเก็น

2. การศึกษาปะเก็นที่ใช้งานอยู่ในระบบสุญญากาศซึ่งใช้รูปแบบการกันรั่วชนิด Conflat Seal ซึ่งประกอบไปด้วยหน้าแปลนสองชิ้นที่มีผิวสัมผัสของการกันรั่วชนิดทรงโคน (Conical Sealing Surface) และปะเก็นทองแดงแบนชนิด OFHC ซึ่งวางอยู่ระหว่างหน้าแปลนทั้งสอง โดยในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้ปะเก็นทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอก 48 mm. โดยประมาณ ซึ่งเป็นขนาดเฉพาะสำหรับหน้าแปลน CF 70 mm. ดังที่ได้แสดงในรูปที่ 1.8



รูปที่ 1.8 ภาคตัดขวางแสดงส่วนประกอบของ Conflat Seals (mm.)

3. การพิจารณาประสิทธิภาพของปะเก็น จะพิจารณาจากตัวแปรต่างๆ ดังต่อไปนี้

3.1 ใช้แรงหนี๊กต่อความยาวปะเก็น (Sealing Force) ไม่เกิน 358 kg/cm. (A. Roth, 1994) หรือคิดเป็นขนาดแรงบิดในการขันอัดหน้าแปลนทั้งสองกับปะเก็นเข้าด้วยกันไม่เกิน 110 kg-cm. ผ่านสลักเกลียวและเป็นเกลียวสแตนเลส ขนาด M6×1 จำนวน 6 ตัว

3.2 รักษาระดับความดันภายในระบบสุญญากาศที่ 10^{-7} Torr หรือน้อยกว่าได้

3.3 มีอัตราการรั่วซึมที่ยอมรับได้ (Admissible leak rate) ไม่เกิน 3×10^{-5} lusec/cm. หรือ 3×10^{-8} Torr-l/s (A. Roth, 1994) ซึ่งมีรายละเอียดในภาคผนวก ค

3.4 ค่า Ion Current ของแก๊สที่เหลือจากเครื่องวิเคราะห์ก๊าซที่เหลือ (Residual gasses analyzer, RGA) อยู่ในระบบไม่เกิน 10^{-10} A (ค่าแนะนำมาจากผู้ผลิตเครื่องมือ)

4. การบำบัดด้วยความร้อนของปะเก็นโดยใช้เตาอบที่แวดล้อมด้วยอากาศ
5. การใช้กระบวนการทางเคมีในการกำจัดสนิมทองแดงและสิ่งสกปรกต่างๆ โดยจะเลือกใช้สารละลายที่ประกอบด้วยกรดไนตริกเข้มข้น (HNO_3) 250 ml. กรดซัลฟูริกเข้มข้น (H_2SO_4) 600 ml. และกรดไฮโดรคลอริก (HCl) 20 ml. ผสมกับน้ำบริสุทธิ์ 130 ml. (A. Roth, 1994)

1.5 ข้อตกลงเบื้องต้น

เนื่องจากตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างภายในและคุณสมบัติเชิงกลต่างๆ ของปะเก็นที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีจำนวนมาก ฉะนั้นในการศึกษาผลกระทบของคุณสมบัติเชิงกลและปัจจัยอื่นๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการป้องกันการรั่วซึมของปะเก็นทองแดงเช่น Modulus of elasticity, Tensile strength, Ductility, Residual stresses distribution, Grain size ตลอดจนคุณสมบัติทางไฟฟ้า และคุณสมบัติทางเคมีจะไม่ได้รวมอยู่ในการศึกษาครั้งนี้

จำนวนกลุ่มตัวอย่างในงานวิจัยนี้เป็นปะเก็นที่ไม่ได้ใช้งาน ซึ่งมีปริมาณที่ไม่แน่นอน ไม่สามารถกำหนดขอบเขตของจำนวนประชากรได้แน่นอน จึงจำเป็นต้องใช้วิธีการสุ่มตัวอย่างแบบไม่ใช้ความน่าจะเป็นชนิดเจาะจง (Purposive sampling) ซึ่งสะดวกและใช้เวลาในการสุ่มน้อย เนื่องจากการเลือกตัวอย่างตามคุณสมบัติที่ตรงกับวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้คือ เป็นปะเก็นชนิดและขนาดเดียวกันทั้งหมด

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

เมื่องานวิจัยนี้สัมฤทธิ์ผล จะทำให้เกิดความรู้ความเข้าใจในการออกแบบวิธีการบำบัดด้วยความร้อนที่เหมาะสม เพื่อคืนสภาพคุณสมบัติเชิงกลของปะเก็นทองแดงชนิด OFHC จนสามารถนำไปสู่ข้อสรุปเกี่ยวกับผลคุณสมบัติเชิงกลต่อประสิทธิภาพในการใช้งานซ้ำของปะเก็น โดยประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับมีดังต่อไปนี้

1. สามารถประเมินการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเชิงกลของปะเก็นทองแดง ที่ผ่านการใช้งานในระบบสุญญากาศได้
2. สามารถออกแบบวิธีการบำบัดด้วยความร้อนที่เหมาะสม เพื่อคืนสภาพคุณสมบัติเชิงกลของปะเก็นทองแดง
3. สามารถประเมินประสิทธิภาพของปะเก็นทองแดง ที่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อน
4. ทำให้ได้ปะเก็นทองแดงที่สามารถใช้งานได้หลายครั้ง
5. สามารถลดค่าใช้จ่ายของประเทศโดยไม่ต้องนำเข้าปะเก็นทองแดงจากต่างประเทศ
6. เป็นพื้นฐานสำหรับการพัฒนาคุณภาพของปะเก็นโลหะต่อไป

บทที่ 2

ปรัทัศนัวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในงานวิจัยนี้ได้มีการกล่าวถึงปะเก็นที่ใช้ในระบบสุญญากาศเป็นหลัก ซึ่งทั้งหมดจะเป็นปะเก็นชนิดที่มีการป้องกันการรั่วซึมแบบสติด นอกจากนั้นวัสดุที่นำมาผลิตปะเก็นยังเป็นสิ่งสำคัญด้วยเช่นกัน ดังนั้นในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงวรรณกรรมโดยสรุปเนื้อหาที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติเชิงกลต่างๆ ของวัสดุที่นำมาทำปะเก็น โดยเน้นที่โลหะทองแดง กลไกในการป้องกันการรั่วซึมของปะเก็น รูปแบบการกันรั่วของปะเก็นในจุดเชื่อมต่อทางกล การเปลี่ยนรูปร่างของวัสดุและกระบวนการอบอ่อนเพื่อฟื้นคืนสภาพของโครงสร้างและคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ

2.1 ความเป็นมาของโลหะทองแดง

ทองแดงเป็นหนึ่งในโลหะที่เก่าแก่ที่สุดที่มนุษย์เคยใช้งาน มันถูกค้นพบครั้งแรกในราว 6000 ปีก่อนคริสตกาล ซึ่งมนุษย์โบราณในสมัยนั้นรู้จักใช้ประโยชน์ของทองแดงโดยนำมาทำเครื่องมือไม้สอยและอาวุธต่าง ๆ มีกระบวนการทำที่ไม่ซับซ้อนเช่นการตีขึ้นรูปให้มีความแหลมคม ลักษณะสีที่ค่อนข้างแดงทำให้มันดูมีค่าและน่าดึงดูดใจแก่คนจำนวนมาก ต่อมาในราว 4000 ปีก่อนคริสตกาล มันก็ถูกค้นพบว่าสามารถที่จะนำไปหลอมแล้วหล่อขึ้นรูปในรูปร่างต่างๆ ตามลักษณะการใช้งาน ไม่เพียงเท่านั้นมนุษย์ในยุคต่อมาก็ค้นพบว่าสามารถที่เอามันไปหลอมรวมกับโลหะอื่นเกิดเป็นโลหะผสมต่างๆ ที่สามารถใช้งานได้กว้างขวางกว่าทองแดงบริสุทธิ์ และโลหะผสมที่ได้รับความนิยมใช้มากในขณะนั้นก็คือทองสัมฤทธิ์ (Bronze) ซึ่งต่อมาได้ถูกเรียกว่ายุคสัมฤทธิ์ (Bronze Age) นั่นเอง โดยมีช่วงอายุประมาณ 2000 ปีก่อนคริสตกาลมาจนถึงปีคริสตกาล

มนุษย์ในยุคโรมันพบว่าเฉพาะที่เกาะไซปรัสเท่านั้นที่เป็นแหล่งของทองแดงทั้งหมด พวกเขาขนานนามโลหะสีแดงนี้ว่า “สินแร่แห่งไซปรัส” aes cyprum (ore of Cyprus) และถูกเขียนในแบบสั้นว่า Cyprium ซึ่งต่อมาได้ถูกเปลี่ยนชื่อเป็น Cuprium และนี่ก็คือที่มาของสัญลักษณ์ทางเคมีของทองแดงในตารางธาตุว่า “Cu” ทองแดงถือเป็นโลหะที่สำคัญที่สุดในกลุ่มโลหะนอกกลุ่มเหล็ก (Non-ferrous Metals) และยังเป็นโลหะที่ได้รับความนิยมใช้งานอย่างแพร่หลายมากตลอดมาตราบปัจจุบัน (Mikell P., 2002)

2.2 คุณสมบัติของทองแดง

ทองแดงและทองแดงผสมมีสมบัติเด่นหลายประการ เช่นคุณสมบัติความต้านทานแรงดึงได้ดี และมีช่วงพิคคองกำลังครากค่อนข้างกว้าง (ขึ้นกับชนิดของทองแดงและกรรมวิธีผลิต) ความเหนียวของทองแดงสูงมาก สามารถขึ้นรูปโดยไม่เสี่ยงต่อการแตกหัก เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีมาก เป็นตัวนำความร้อนที่ดีมากเช่นกัน เมื่อผสมธาตุบางตัวเข้าไปจะสามารถกลึงไสเข้ารูปได้ง่าย ต้านทานความล้าได้ดี ไม่เป็นสารแม่เหล็ก ทนทานต่อการกัดกร่อน โดยเฉพาะเมื่อต้องใช้งานกับกรดหรือน้ำทะเล ทนทานต่อการสึกกร่อน (Wear Resistance) มีสีสวยงามใช้

โดยทั่วไป เราถือว่าโลหะทองแดงบริสุทธิ์ (Pure Copper) นั่นก็คือโลหะที่เนื้อของธาตุโลหะที่เป็นทองแดงเกือบทั้งหมด มีสิ่งเจือปนอื่น ๆ ผสมปนอยู่ไม่เกิน 0.5 % โดยน้ำหนัก และเรียกว่า ทองแดงผสมหรือโลหะผสมของทองแดง (Copper alloys) เมื่อโลหะผสมนั้นมีส่วนผสมของธาตุทองแดงอยู่มากที่สุด แต่ไม่น้อยกว่า 40 % และไม่เกินกว่า 99 % โดยน้ำหนัก (ชาญวุฒิ, 2541) ความหนาแน่นของทองแดงมาตรฐานมีค่าเท่ากับ 8.89 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

2.3 การแบ่งชนิดของทองแดง

ทองแดงมีมากมายหลายชนิดด้วยกัน ส่วนใหญ่จำแนกตามความบริสุทธิ์ของเนื้อโลหะ แต่ตามมาตรฐาน ASTM B224 สามารถแบ่งทองแดงออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่ๆ คือ

2.3.1 ทองแดงทัฟพิทซ์ (Tough-Pitch Copper) ได้แก่ทองแดงที่มีความบริสุทธิ์ 99.95 % มีสิ่งเจือปนที่สำคัญคือออกซิเจน โดยมีออกซิเจนผสมอยู่ประมาณ 0.02-0.05 % โดยน้ำหนัก ออกซิเจนนี้เป็นออกซิเจนที่ตกค้างจากกระบวนการหลอมทองแดงและอยู่ในลักษณะของสารประกอบออกไซด์ (Cu_2O) เป็นส่วนมาก ทองแดงนี้มีค่าการนำไฟฟ้าประมาณ 101 % IACS (International Annealed Copper Standard) ซึ่งเป็นมาตรฐานที่ใช้ในการเปรียบเทียบคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของโลหะต่าง ๆ ตั้งขึ้นโดย International Electrotechnical Commission เมื่อปี 1913 ตามมาตรฐานนี้กำหนดว่า ทองแดงมาตรฐานที่ผ่านการอบอ่อน ขนาดพื้นที่หน้าตัด 1 mm^2 , ยาว 1 เมตร ซึ่งมีความต้านทานไฟฟ้า $1.7241 \Omega\text{-cm}$. จะมีค่าการนำไฟฟ้าคิดเป็น 100 % IACS) ทองแดงทัฟพิทซ์ แบ่งออกเป็นสองชนิดตามวัตถุดิบที่ใช้ คือ Electrolytic Tough-Pitch Copper ที่ผ่านการทำให้บริสุทธิ์ด้วยวิธีทางไฟฟ้า และชนิด Fired Refined Tough-Pitch Copper ที่ผ่านการทำให้บริสุทธิ์ด้วยวิธีทางความร้อน (Fired Refined)

2.3.2 ทองแดงความนำสูงปราศจากออกซิเจน (OFHC) หมายถึงทองแดงที่ผ่านการกำจัดออกซิเจนในระหว่างการหลอมทองแดง แม้แต่ในรูปของสารประกอบออกไซด์ และไม่มีสารที่ใช้ในการกำจัดออกซิเจนตกค้างอยู่ในเนื้อทองแดงด้วย ทำให้ทองแดงชนิดนี้มีความบริสุทธิ์มากกว่า

99.95 % มีค่าการนำไฟฟ้าประมาณ 95 % IACS ซึ่งไม่แตกต่างจากทองแดงที่ฟิตซ์มากนัก จึงสามารถใช้แทนกันได้เมื่อต้องใช้งานที่มีอุณหภูมิสูง โดยคุณสมบัติเชิงกลต่างๆ ของทองแดงชนิดนี้ได้รวบรวมไว้ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติเชิงกลของทองแดงความนำสูงปราศจากออกซิเจน

Properties	Unit	OFHC-Cu
Melting point	°C	1083
Mass Density	kg/m ³	8960
Modulus of Elasticity	GPa	125
Shear Modulus	GPa	46
Electrical conductivity @20 °C	MS/m	59
	%IACS	101.7
Electrical resistivity @20 °C	μΩm	0.017
Thermal conductivity @20 °C	W/m-K	393-460
Linear expansion coefficient @20-200 °C	1/K	2.40E-05
Specific Heat @20 °C	J/kg-K	385
Yield Strength @p0.2%	MPa	40-430
Tensile Strength	MPa	150-450
Elongation	%	5-40
Hardness (Vickers)	N/mm ²	400-1000
Fatigue strength for 10 ⁸ cycles	N/mm ³	<180

ที่มา : Cahn, R. W., Haasen, P., and Kramer E. J.(1996).

2.3.3 ทองแดงดีออกไซด์ (Deoxidized Copper) หมายถึงทองแดงที่ผ่านการเติมธาตุบางชนิด เพื่อกำจัดออกซิเจนที่เจือปนอยู่ในเนื้อทองแดงในระหว่างการหลอมเช่น ฟอสฟอรัส ทำให้ทองแดงชนิดนี้ไม่มีออกซิเจนเจือปนอยู่ แต่ธาตุที่ผสมลงไปนี้มีปริมาณมาก จนทำให้หลงเหลืออยู่ในเนื้อทองแดงบางส่วน ความบริสุทธิ์ของทองแดงกลุ่มนี้จึงขึ้นอยู่กับปริมาณของธาตุที่หลงเหลืออยู่นั่นเอง โดยกลุ่มของทองแดงเหล่านี้ยังสามารถแบ่งออกเป็นชนิดย่อย ๆ ได้ดังนี้

2.3.3.1 ทองแดงที่มีค่าความนำไฟฟ้าสูง (High Conductivity Copper) หมายถึงทองแดงที่มีค่าการนำไฟฟ้าไม่น้อยกว่า 100 % IACS ที่ 20 °C เมื่อทดสอบตามมาตรฐาน ASTM B193 หรือตามมาตรฐาน JIS C3002

2.3.3.2 ทองแดงฟอสฟอรัส (Phosphorus Copper) หมายถึงทองแดงในกลุ่มทองแดงดีออกไซด์ ซึ่งใช้ธาตุฟอสฟอรัสในการกำจัดออกซิเจนออก แล้วมีฟอสฟอรัสเหลือตกค้างอยู่ แบ่งออกเป็นสองพวกคือ พวกที่มีฟอสฟอรัสตกค้างต่ำ (Low Residual Phosphorus) ปริมาณฟอสฟอรัสตกค้างอยู่ไม่เกิน 0.011 % โดยน้ำหนัก และพวกที่มีฟอสฟอรัสตกค้างสูง (High Residual Phosphorus) ปริมาณฟอสฟอรัสตกค้างอยู่สูงกว่าในพวกแรกแต่ไม่เกิน 0.040 % โดยน้ำหนัก คุณสมบัติการนำไฟฟ้าของทองแดงชนิดนี้จะถูกทำลายลงอันเนื่องจากการละลายของฟอสฟอรัสลงมาเป็นจำนวนมากจึงไม่เหมาะที่จะใช้งานทองแดงชนิดนี้เป็นตัวนำไฟฟ้า

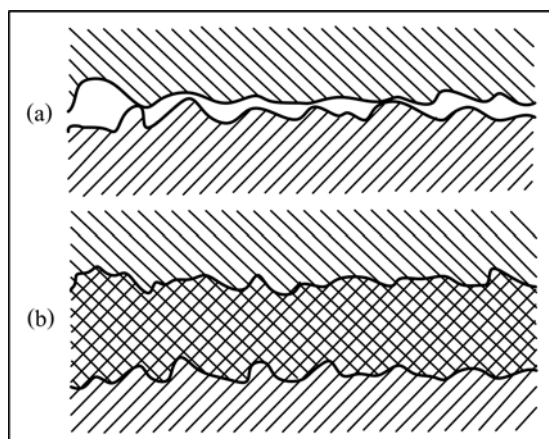
2.3.3.3 ทองแดงที่มีเงิน (Silver-bearing Copper) หมายถึงทองแดงที่ผสมธาตุเงินลงไปประมาณ 10-12 ออนซ์ต่อตันของทองแดง โดยมีจุดประสงค์สำคัญในการช่วยเพิ่มอุณหภูมิการเกิดผลึกใหม่ (Recrystallization Temperature) ของทองแดง นอกจากนั้นยังเป็นการเพิ่มความต้านทานต่อการเกิดคราบ โดยไม่ทำให้คุณสมบัติการนำไฟฟ้าของทองแดงลดลง เนื่องจากเงินไม่ได้ทำลายสมบัติการนำไฟฟ้าของทองแดง ดังนั้นในงานที่เกี่ยวข้องกับระบบไฟฟ้าจึงนิยมคิดปริมาณของเงินรวมกับปริมาณของทองแดง เช่นทองแดงเงิน 99.92 % เป็นต้น

2.3.3.4 ทองแดงอาร์เซนิก (Arsenical Copper) หมายถึงทองแดงที่ผ่านกระบวนการผสมธาตุอาร์เซนิก (As) ลงไปประมาณ 0.25-0.50 % เพื่อช่วยเพิ่มคุณสมบัติการต้านทานแรงดึง ความทนทานต่อการล้าและเพิ่มอุณหภูมิการเกิดผลึกใหม่ ตลอดจนช่วยให้ง่ายต่อการขึ้นรูปเพิ่มความสามารถในการต้านทานต่อการกัดกร่อน แต่ทองแดงชนิดนี้ไม่เหมาะสมสำหรับใช้กับงานที่เกี่ยวข้องกับระบบไฟฟ้าเพราะค่าการนำไฟฟ้าของทองแดงชนิดนี้จะลดลงอย่างมากประมาณ 40 % IACS เมื่อมีธาตุอาร์เซนิกผสมอยู่ 0.5 %

2.3.3.5 ทองแดงเทลลูเรียม (Tellurium Copper) และทองแดงซีเลเนียม (Selenium Copper) หมายถึงทองแดงที่ผสมธาตุเทลลูเรียม (Te) หรือซีเลเนียม (Se) ลงไปตามลำดับประมาณ 0.5% เพื่อปรับปรุงสมบัติการกลึงไสของทองแดงให้ดีขึ้น โดยไม่ทำให้ค่าการนำไฟฟ้าของทองแดงลดลงมาก

2.4 กลไกในการป้องกันการรั่วซึมของปะเก็น

เมื่อนำหน้าแปลนหรือชิ้นส่วนทางกลสองชิ้นที่มีความเรียบของผิวสัมผัสที่ดีมาประกบกันย่อมทำให้เกิดจุดเชื่อมต่อทางกลที่ดีไม่มีการรั่วซึมของแก๊สหรือของไหลต่างๆ แต่ถึงแม้จะมีความเรียบของผิวสัมผัสที่ดีเพียงใดก็ตาม เมื่อพิจารณาลงไปในความเป็นจริงจะพบว่าจะยังคงมีช่องว่างที่เล็กมากอยู่ระหว่างชิ้นส่วนทั้งสองทั้งสอง ดังที่แสดงในรูปที่ 2.1



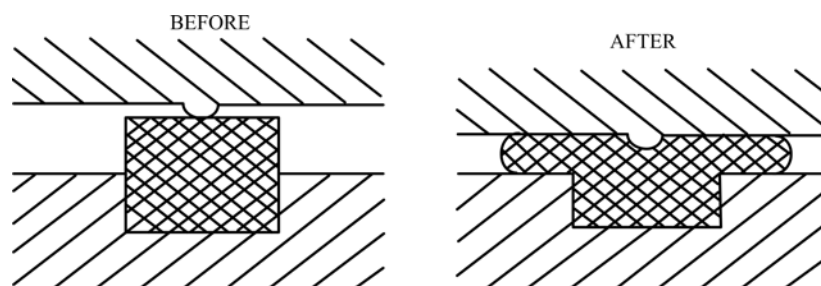
รูปที่ 2.1 ภาควัดขวางของชิ้นส่วนทางกลที่ประกบกัน (a) ไม่มีปะเก็น (b) มีปะเก็น

จากภาพที่แสดงจะเห็นว่ากลไกในการป้องกันการรั่วซึมของปะเก็นคือการเติมเต็มลงไปในส่วนที่ว่างทั้งหมดของหน้าผิวสัมผัส ซึ่งจำเป็นต้องมีแรงกดอัดที่เหมาะสมกระทำต่อหน้าแปลนหรือชิ้นส่วนทางกลสองชิ้นที่มาประกบกัน เป็นผลให้การป้องกันการรั่วซึมมีประสิทธิภาพดี แรงดังกล่าวทำให้เกิดความดันกระทำต่อปะเก็นซึ่งจะน้อยแตกต่างกันขึ้นอยู่กับวัสดุของปะเก็น ความหยาบของผิวสัมผัส และแรงเสียดทานระหว่างปะเก็นกับหน้าแปลน ดังนั้นองค์ประกอบของปะเก็นที่ดีควรมีทั้งส่วนที่มีการให้ตัวแบบพลาสติก (Plasticity) เพื่อช่วยในการเติมเต็มลงไปในส่วนที่ว่างเล็กๆ ได้ดีและส่วนที่มีการให้ตัวแบบยืดหยุ่น (Elasticity) เพื่อช่วยในการคงสภาพของความดันที่กระทำต่อปะเก็นในขณะใช้งาน (A. Roth, 1994) แต่อย่างไรก็ตามที่ผ่านมาคุณสมบัติต่างๆ ของวัสดุหลายชนิด ไม่เปิดโอกาสให้ใช้งานในการให้ตัวแบบพลาสติกและแบบยืดหยุ่นได้ในเวลาเดียวกัน วัสดุพวกยางต่างๆ จะถูกใช้เพราะมันมีคุณสมบัติที่ดีเยี่ยมในด้านการให้ตัวแบบยืดหยุ่น ในขณะที่พวกพลาสติกและโลหะจะถูกใช้ใช้งานเพราะมีคุณสมบัติในด้านการให้ตัวแบบพลาสติก

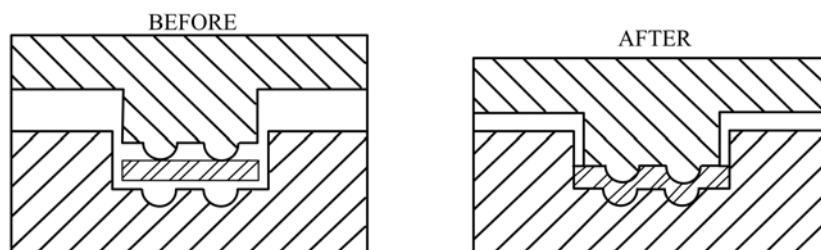
เมื่อพิจารณาถึงผลของความดันที่กระทำต่อปะเก็นในขณะใช้งาน แล้วส่งผลทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปร่างของปะเก็น การเปลี่ยนรูปร่างในขั้นแรกจะเป็นแบบยืดหยุ่น แต่จะเปลี่ยนเป็นการเปลี่ยนรูปร่างแบบถาวรเมื่อแรงกระทำเพิ่มมากขึ้น โดยในช่วงแรกของการเปลี่ยนรูปร่างจะเกิดขึ้นบริเวณที่สัมผัสกับสันของหน้าแปลน แล้วค่อยๆ ขยายวงกว้างออกไปยังส่วนที่เหลือของปะเก็น และหากช่วงใดของการเปลี่ยนรูปร่างเกินขีดจำกัดของการเปลี่ยนรูปร่างแบบยืดหยุ่นก็จะทำให้ความแข็งของวัสดุเพิ่มขึ้นเนื่องจากความเครียดที่เพิ่มขึ้น ซึ่งหากปะเก็นที่มีการเปลี่ยนรูปร่างลักษณะนี้เกิดขึ้นแล้วจะไม่สามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้อีก (A. Roth, 1994)

2.5 รูปแบบการป้องกันการรั่วชนิดสันนูน (Ridge Seals)

การกันรั่วของปะเก็นในจุดเชื่อมต่อทางกลมีหลายรูปแบบด้วยกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบสุญญากาศซึ่งมีความหลายหลายของขนาดอุปกรณ์ต่างๆ รวมถึงลักษณะของปะเก็นที่ใช้ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะได้กล่าวถึงกรณีของรูปแบบการป้องกันการรั่วชนิดสันนูนซึ่งเป็นแบบที่นิยมใช้ในระบบสุญญากาศระดับสูงสุดขีด เนื่องจากระบบสุญญากาศระดับสูงสุดขีดนั้นมีความดันต่ำมากที่สุด ดังนั้นความดันจากภายนอกจึงกระทำต่อระบบสูงมากเช่นกัน ปะเก็นที่ใช้จึงจำเป็นต้องมีกลไกที่ดีในการป้องกันการรั่ว โดยลักษณะเด่นของรูปแบบการป้องกันการรั่วชนิดสันนูนก็คือการทำขอบสันนูนไว้ที่ผิวหน้าสัมผัสของหน้าแปลนทั้งสอง ซึ่งรูปร่างของขอบสันนูนก็จะเปลี่ยนแปลงไปเพื่อให้เหมาะสมกับชนิดของปะเก็นที่ใช้เช่น รูปร่างคล้ายลิ้น (Tongues Seals) ก็จะถูกใช้กับปะเก็นจำพวกยาง รูปร่างสันนูนหลายชั้น (Multiple Ridges Seals) จะถูกใช้กับปะเก็นจำพวกTeflon และรูปร่างคล้ายสันมีด (Knife-edge Seals) จะถูกใช้กับปะเก็นโลหะต่างๆ เป็นต้น โดยในรูปที่ 2.2 และรูปที่ 2.3 ได้แสดงรายละเอียดการใช้งานของรูปแบบสันนูนรูปร่างคล้ายลิ้นและรูปร่างสันนูนหลายชั้น ตามลำดับ และจะไม่กล่าวถึงรายละเอียดมากกว่านี้แต่จะกล่าวถึงเฉพาะรูปแบบสันนูนรูปร่างคล้ายสันมีดต่อไป



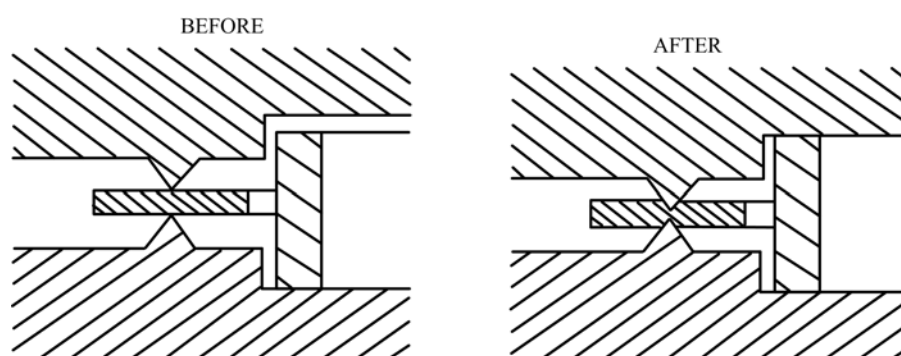
รูปที่ 2.2 ภาคตัดขวางของรูปแบบการกันรั่วชนิดสันนูนรูปร่างคล้ายลิ้น



รูปที่ 2.3 ภาคตัดของรูปแบบการกันรั่วชนิดสันนูนรูปร่างสันนูนหลายชั้น

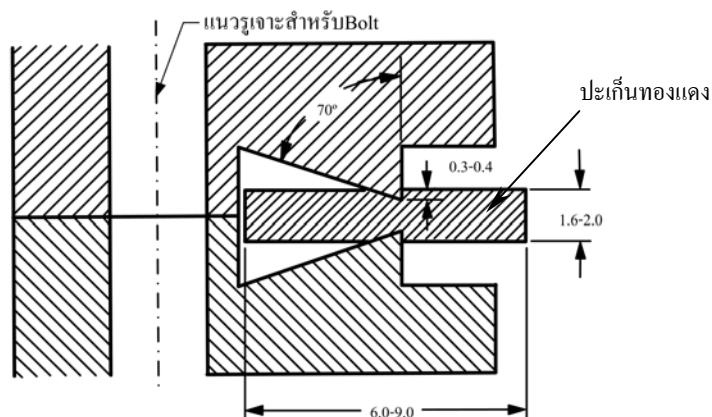
รูปแบบการกันรั่วชนิดสันนูนรูปร่างคล้ายสันมีด (Knife-edge Seals)

รูปแบบการกันรั่วชนิดสันนูนรูปร่างคล้ายสันมีดมีกลไกในการป้องกันการรั่วซึมที่สำคัญ คือ การให้แรงกระทำต่อหน้าแปลนทั้งสองด้าน (เช่นเดียวกับรูปแบบการกันรั่วชนิดสันนูนรูปร่างคล้ายลิ้นและรูปร่างสันนูนหลายชั้น) โดยหน้าแปลนทั้งสองด้านได้ทำขอบสันมีดเอาไว้ เพื่อให้มันสามารถจิกตัวลงไปในเรื่องของปะเก็นโลหะที่อยู่ระหว่างหน้าแปลนทั้งสองได้เท่าๆ กัน ดังรูปที่ 2.4 การบีบอัดตัวลงไปในเรื่องลักษณะนี้ จะส่งผลทำให้ปะเก็นโลหะที่อ่อนตัวนั้นสามารถเติมลงไปในส่วนที่ว่างเล็กๆ ซึ่งส่วนใหญ่เกิดขึ้นจากกระบวนการทำขอบสันมีดบนหน้าผิวสัมผัสของสันมีด จากคำกล่าวของ Van Heerden ในหนังสือ Vacuum Sealing Techniques ของ A. Roth, 1994 ระบุว่า “กลไกในการกันรั่วจะเกิดขึ้นบนหน้าผิวสัมผัสของสันมีดซึ่งจะมีปริมาณแรงเฉือนที่มากพอในการป้องกันการรั่ว กระทำต่อกันกับเนื้อวัสดุของปะเก็น”



รูปที่ 2.4 ภาพตัดขวางของรูปแบบการกันรั่วชนิดสันนูนรูปร่างคล้ายสันมีด โดย A. Roth, 1994

ปะเก็นที่ถูกใช้ในรูปแบบการกันรั่วชนิดสันนูนรูปร่างคล้ายสันมีด จำเป็นอย่างยิ่งต้องเป็นโลหะที่อ่อนตัวได้ดี โดยปกติแล้วจะนิยมใช้ทองแดงชนิดทองแดงความนำสูงปราศจากออกซิเจน แต่ก็มีรายงานการใช้ปะเก็นโลหะชนิดอื่นๆ ด้วยเช่น มีการใช้ปะเก็นที่ทำมาจากเหล็กเหนียวอ่อน (Carpenter R., 1962) การใช้ปะเก็นที่ทำมาจากนิกเกิล (Hees G. W., 1955) การใช้ปะเก็นที่ทำมาจากเงิน (Drawin J. W., 1960) เป็นต้น ปะเก็นทองแดงที่ใช้ชนิดนี้ควรมีลักษณะแบน ถูกตัดเข้ารูปกับหน้าแปลน มีความหนาปกติจะอยู่ในช่วง 1-2 mm. แต่ในบางกรณีที่เป็นกรณีพิเศษปะเก็นที่บางมาก ๆ หรือหนามาก ๆ ก็สามารถใช้ได้เช่นกัน



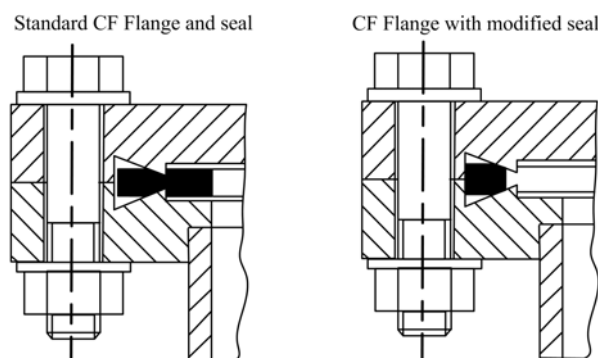
รูปที่ 2.5 ภาคตัดขวางของรูปแบบการกันรั่วชนิด Conflat Seals (mm.)

โดย A. Roth, 1994

รูปแบบการกันรั่วชนิดสันนูนรูปร่างคล้ายสันมีดยังสามารถแบ่งออกได้หลายชนิด หนึ่งในจำนวนนั้นคือ Conflat Seal ซึ่งถูกผลิตขึ้นโดย Varian R.H. ในเดือนเมษายนปี 1952 โดยรูปแบบจะประกอบไปด้วยปะเก็นทองแดงแบนชนิด OFHC อยู่ระหว่างหน้าแปลนทั้งสองซึ่งที่มีผิวสัมผัสของสันมีดสำหรับใช้ในการกันรั่วแบบทรงโคน ขอบด้านในจะตั้งตรงเป็นมุมฉากกับปะเก็น ส่วนอีกด้านหนึ่งมีลักษณะลาดเอียงทำมุม 70 องศา กับแนวราบ อย่างไรก็ตามมุมดังกล่าวสามารถปรับเปลี่ยนได้เพื่อผลทดสอบที่ติดต่อการทดสอบในระบบสุญญากาศ ขอบสันมีดดังกล่าวนี้ถูกออกแบบมาให้สามารถจิกตัวลงไปได้ประมาณ 0.3-0.4 mm. บนแต่ละด้านของปะเก็นที่มีความหนาประมาณ 1.6-2.0 mm. ดังในรูปที่ 2.5

ความแข็งแรงของขอบสันมีดต้องมีมากกว่าปะเก็นโลหะที่ใช้เพื่อประสิทธิภาพที่ดีในการป้องกันการรั่วซึม ดังนั้นวัสดุส่วนใหญ่ที่ถูกเลือกมาทำหน้าแปลนและขอบสันมีดจึงเป็นเหล็กกล้าไร้สนิม เพื่อผลของความแข็งแรงเป็นหลักเพราะถ้าหากขอบสันมีดมีรอยบิ่นเกิดขึ้นย่อมส่งผลทำให้ประสิทธิภาพในการป้องกันการรั่วซึมลดลง จนอาจจะไม่สามารถใช้งานหน้าแปลนนั้นได้อีกเลย แต่อย่างไรก็ตามในปี 1996 H Fend ได้ทำการศึกษาเพื่อหาทางแก้ไขปัญหาที่เกิดจากขอบสันมีดที่มีรอยบิ่นเกิดขึ้น โดยเขาได้ดัดแปลงขอบสันมีดที่มีรอยบิ่นเกิดขึ้นให้สามารถประยุกต์ใช้กับปะเก็นทองแดงได้ ซึ่งจุดเด่นของการดัดแปลงคือลักษณะของปะเก็นที่ใช้ กล่าวคือในขณะที่ใช้งานปะเก็นจะไม่ถูกขอบสันมีดจิกลงไปเนื้อวัสดุ แต่จะอาศัยผิวสัมผัสด้านที่เอียงทำมุม 70 องศา กับแนวราบเป็นกลไกในการป้องกันการรั่วซึม ดังในรูปที่ 2.6 โดยรูปทางซ้ายมือเป็นลักษณะการใช้ปะเก็นโดยทั่วไป ส่วนรูปทางขวามือคือผลที่ได้จากการดัดแปลง และผลจากการดัดแปลงของเขายังสามารถลดขนาดของแรงฉีกต่อความยาวปะเก็นมาตรฐานลงไปได้ถึง 50% โดยค่าของแรง

ผนึกต่อความยาวปะเก็นมาตรฐานซึ่งรวบรวมไว้ในหนังสือ Vacuum Sealing Techniques ของ A. Roth, 1994 ระบุค่าสำหรับ Conflat Seal เอาไว้เท่ากับ 358 kg/cm.

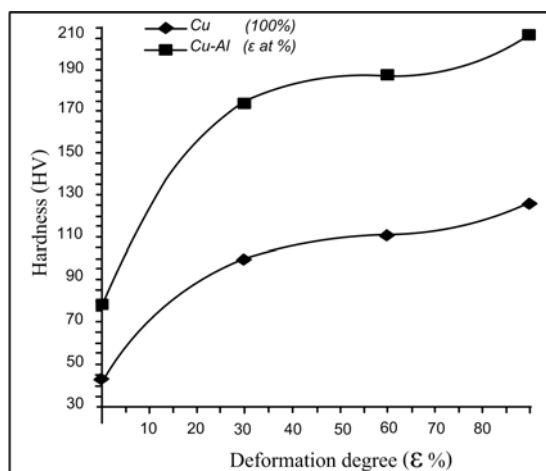


รูปที่ 2.6 ภาคตัดขวางของการตัดแปลงขอบสันมีดมีรอยบิ่นให้สามารถใช้งานกับปะเก็นทองแดง ชนิด OFHC ใน Conflat Seals โดย H Fend, 1996

2.6 การอบอ่อนของทองแดง

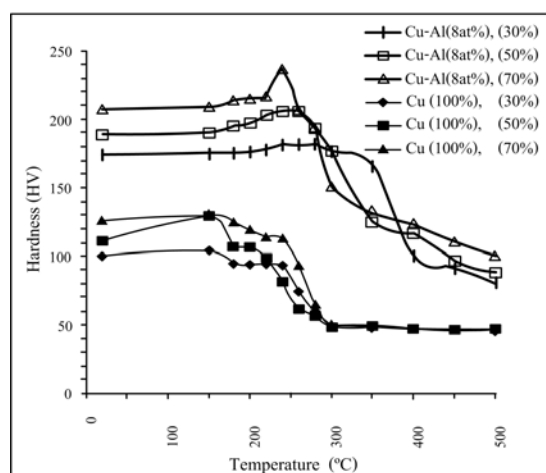
การนำปะเก็นทองแดงกลับมาใช้ใหม่หลังจากนำไปใช้ในรูปแบบการกันรั่วชนิด Conflat Seal สามารถกระทำได้ โดยจากการทดสอบของ Wheeler ในปี 1963 แสดงให้เห็นว่าปะเก็นทองแดงสามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้ถึง 22 ครั้ง โดยเพิ่มแรงผนึกในการขันอัดหน้าแปลนกับปะเก็นขึ้นทีละน้อยของทุกครั้งที่ใช้ซ้ำ อย่างไรก็ตามเขาได้แนะนำว่า หากต้องการประสิทธิภาพที่ดีในการป้องกันไม่ให้เกิดรอยร้าวควรใช้งานซ้ำในอัตรา 3 ครั้ง ทำให้มีข้อจำกัดของจำนวนครั้งในการใช้ซ้ำของปะเก็นทองแดง โดยที่ผ่านมาปะเก็นทองแดงจะถูกแนะนำให้ใช้งานเพียงครั้งเดียวเท่านั้น อย่างไรก็ตามได้มีงานวิจัย และบทความทางวิชาการต่างๆ ที่เกี่ยวข้องและแสดงให้เห็นว่าทองแดงซึ่งเป็นโลหะเหนียวนั้น หลังจากที่มีการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรเกิดขึ้นแล้ว สามารถที่จะทำการอบอ่อนเพื่อคืนสภาพคุณสมบัติเชิงกลและโครงสร้างของโลหะกลับสู่สภาพเดิม

Svetlana Nestorovic (2003) ได้นำเสนอให้เห็นว่าทองแดงผสมและทองแดงบริสุทธิ์ ที่ผ่านการขึ้นรูปเย็นในปริมาณที่ต่างกัน (Deformation degree) ย่อมทำให้ค่าความแข็งจากการแข็งตัวเนื่องจากความเครียดที่เพิ่มขึ้นแตกต่างกันด้วย โดยค่าความแข็งสูงสุดของทองแดงบริสุทธิ์คือ 126 HV ในขณะที่ทองแดงผสมเป็น 207 HV ดังรูปที่ 2.7



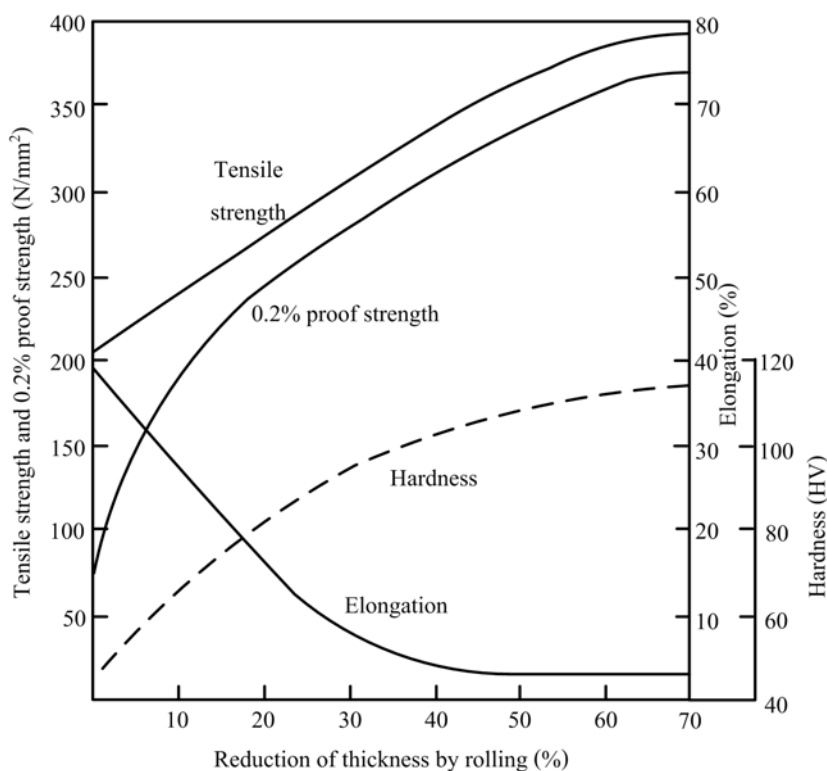
รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์การขึ้นรูปเย็นกับความแข็งของทองแดงและทองแดงผสม
โดย Svetlana Nestorovic, 2003

เมื่อนำขึ้นทองแดงและทองแดงผสมไปอบอ่อนที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่าอุณหภูมิการเกิดผลึกใหม่ ของทองแดงบริสุทธิ์ในทุกเปอร์เซ็นต์การขึ้นรูปเย็นจะมีค่ามากกว่า 200 °C แต่สำหรับทองแดงผสมในทุกเปอร์เซ็นต์การขึ้นรูปเย็นมีค่ามากกว่า 350 °C ดังรูปที่ 2.8 นอกเหนือจากนั้น จากผลการทดลองยังพบว่าในช่วงอุณหภูมิ 180 – 300 °C ค่าความแข็งของทองแดงผสมจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ทั้งนี้เป็นผลมาจากการแข็งขึ้นเนื่องมาจากการอบอ่อน (Anneal hardening effect) โดยผลดังกล่าวจะแปรผันตามเปอร์เซ็นต์การขึ้นรูปเย็นในโลหะ



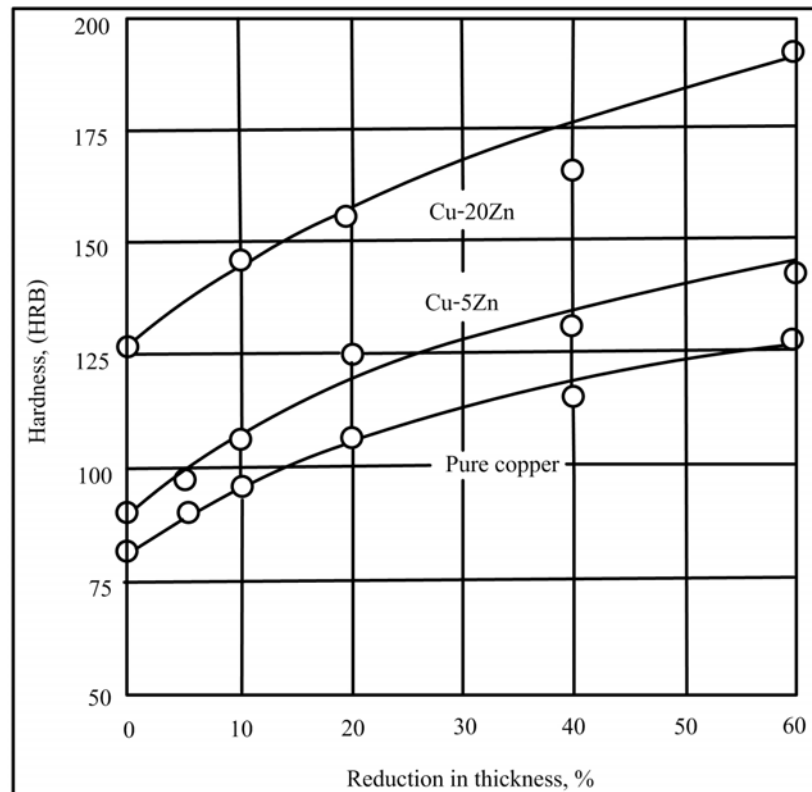
รูปที่ 2.8 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิการอบอ่อนกับความแข็งของโลหะ
โดย Svetlana Nestorovic, 2003

A. F. Grant, B. D. Fell, n.d. ได้ศึกษาและใช้ผลการทดสอบของเปอร์เซ็นต์การขึ้นรูปเย็นที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเชิงกลต่างๆ ของทองแดง OFHC (ดังรูปที่ 2.9) ก่อนที่จะเลือกเอาทองแดง OFHC ที่มีการขึ้นรูปเย็น 50 % ไปทำท่อสำหรับเป็นฉนวนกันความร้อนของกระจกที่ใช้สะท้อนแสงซินโครตรอน



รูปที่ 2.9 ผลของเปอร์เซ็นต์การขึ้นรูปเย็นต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเชิงกลของทองแดง OFHC โดย The Copper Development Association, UK.

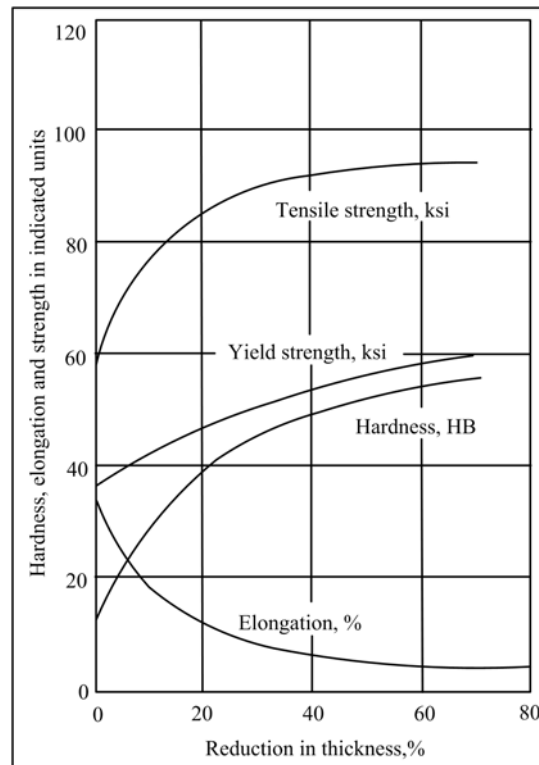
ผลการทดลองของ Svetlana Nestorovic นั้นสอดคล้องกับหลักการบำบัดด้วยความร้อนของโลหะผสมนอกกลุ่มเหล็ก (Principles of Heat Treating of Nonferrous Alloys) ซึ่งรวบรวมโดย Charlie R. Brooks (1997) ได้แสดงให้เห็นว่าเมื่อเปอร์เซ็นต์การขึ้นรูปเย็นเพิ่มขึ้นค่าการแข็งตัวเนื่องจากความเครียดที่เพิ่มขึ้นก็จะสูงขึ้นตามไปด้วย ส่งผลทำให้ค่าความแข็งของทั้งทองแดงผสมและทองแดงบริสุทธิ์มีค่าสูงขึ้น



รูปที่ 2.10 แผนภูมิแสดงผลของเปอร์เซ็นต์การขึ้นรูปเย็นต่อความแข็งของทองแดง

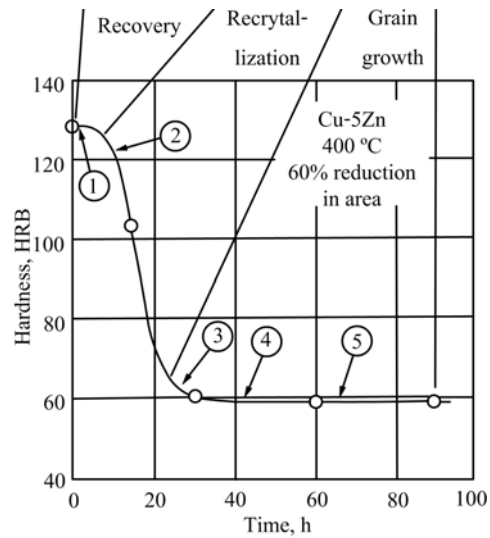
โดย Charlie R. Brooks, 1997

รูปที่ 2.10 ได้แสดงให้เห็นว่าเมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์การขึ้นรูปเย็นที่เท่ากันทองแดงผสมจะมีค่าความแข็งมากกว่าทองแดงบริสุทธิ์ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าความแข็งของโลหะผสมจะมากกว่าความแข็งของโลหะบริสุทธิ์ นอกจากนี้แล้วสิ่งที่น่าสนใจยิ่งก็คือ ผลของเปอร์เซ็นต์การขึ้นรูปเย็นต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเชิงกลต่างๆ ในทองแดง OFHC ดังปรากฏในรูปที่ 2.11 โดยเมื่อเปอร์เซ็นต์การขึ้นรูปเย็นเพิ่มขึ้น ความแข็ง กำลังคราก และความแข็งแรงจะมีค่าสูงขึ้น ในขณะที่ค่าความเหนียวจะลดลง ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่าคุณสมบัติเชิงกลต่างๆ ของทองแดง OFHC เป็นฟังก์ชันกับเปอร์เซ็นต์การขึ้นรูปเย็น



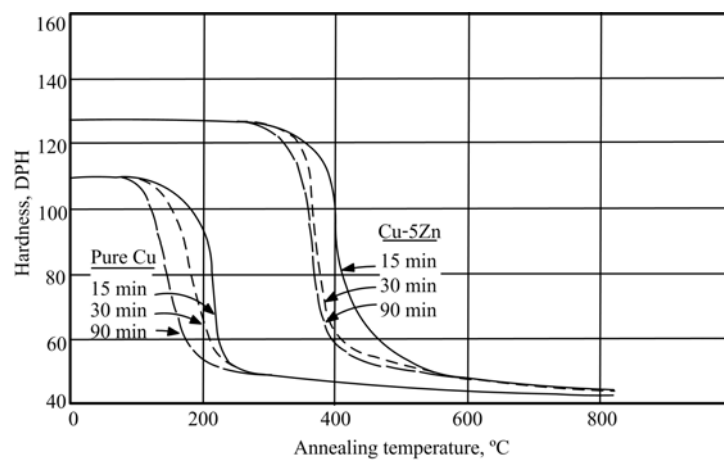
รูปที่ 2.11 แผนภูมิแสดงผลของเปอร์เซ็นต์การขึ้นรูปเย็นต่อคุณสมบัติต่างๆ ของทองแดง OFHC โดย Charlie R. Brooks, 1997

เมื่อนำโลหะที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปเย็นไปทำการอบอ่อน กระบวนการย่อยๆ ทั้งสามจะสามารถสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนจากค่าความแข็งที่เปลี่ยนไป ดังรูปที่ 2.12 ซึ่งได้แสดงให้เห็นว่าความแข็งของโลหะจะค่อยๆ ลดลงในช่วงแรกของการอบอ่อน ซึ่งในช่วงนี้เรียกว่า กระบวนการคืนตัว โดย ณ ตำแหน่งที่ 1 มีค่าความแข็ง 128 HRB จะยังคงอยู่ในช่วงการอบคืนตัวและยังไม่เข้าสู่กระบวนการเกิดผลึกใหม่แต่อย่างใด ต่อจากนั้นเมื่อกระบวนการคืนตัวสิ้นสุดลงก็จะเริ่มเข้าสู่กระบวนการเกิดผลึกใหม่ ณ ตำแหน่งที่ 2 ซึ่งมีค่าความแข็ง 127 HRB โดยจะสังเกตเห็นว่าจากตำแหน่งที่ 2 เป็นต้นไป ค่าความแข็งของโลหะจะลดลงอย่างรวดเร็ว จนกระทั่งถึงตำแหน่งที่ 3 ซึ่งเรียกช่วงนี้ว่ากระบวนการเกิดผลึกใหม่ และ ณ ตำแหน่งที่ 3 นี้จะมีค่าความแข็ง 63 HRB และเป็นตำแหน่งสิ้นสุดของกระบวนการเกิดผลึกใหม่อย่างสมบูรณ์ ขณะเดียวกันกระบวนการโตขึ้นของขนาดผลึกใหม่ก็จะเริ่มต้นขึ้น ณ ตำแหน่งนี้เช่นกัน ซึ่งจะพบว่าจากตำแหน่งที่ 3 เป็นต้นไป ค่าความแข็งของโลหะจะลดลงอย่างช้าๆ จนกระทั่งผ่านตำแหน่งที่ 4 และ 5 ซึ่งจะมีค่าความแข็ง 60 และ 58 HRB ตามลำดับ



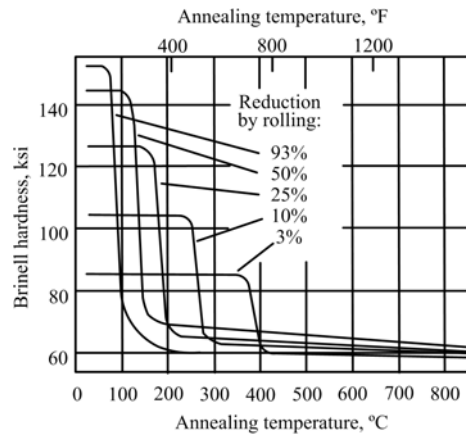
รูปที่ 2.12 แผนภูมิแสดงการเปลี่ยนแปลงความแข็งที่เกิดขึ้นในสามกระบวนการย่อยของการอบอ่อน โดย Charlie R. Brooks, 1997

ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการเกิดผลึกใหม่นั้นมีอยู่หลายปัจจัยด้วยกัน ซึ่งต่อไปนี้จะกล่าวถึงปัจจัยดังกล่าวโดย Charlie R. Brooks (1997) ได้นำเสนอผลของปัจจัยต่างๆ ที่มีต่อกระบวนการเกิดผลึกใหม่ของโลหะทองแดงและโลหะผสมของทองแดงกับสังกะสี โดยปัจจัยแรกคือเวลา ดังในรูปที่ 2.13 ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า หากพิจารณาเปอร์เซ็นต์การขึ้นรูปเย็นที่เท่ากัน การใช้เวลาในการอบอ่อนมากขึ้นจะทำให้กระบวนการเกิดผลึกใหม่ของทั้งทองแดงผสมและทองแดงบริสุทธิ์เกิดขึ้นที่อุณหภูมิที่ต่ำลง



รูปที่ 2.13 แผนภูมิแสดงผลของเวลาในการอบอ่อนต่อกระบวนการเกิดผลึกใหม่ โดย Charlie R. Brooks, 1997

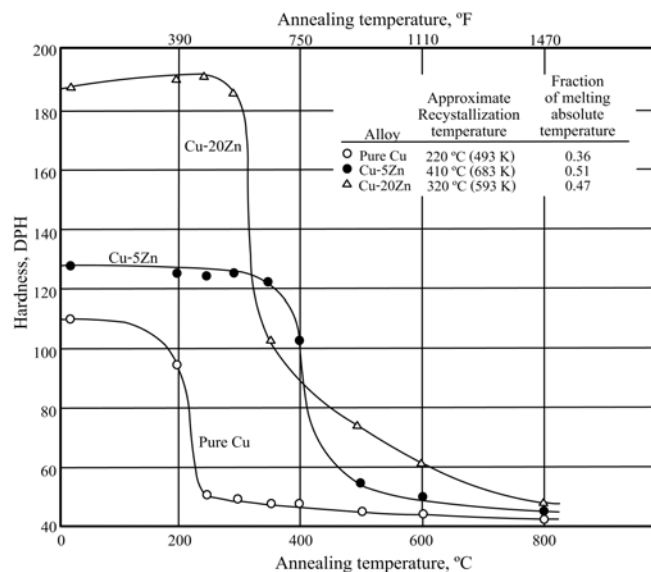
ส่วนปัจจัยที่สองที่มีผลต่อกระบวนการเกิดผลึกใหม่คือเปอร์เซ็นต์การขึ้นรูปเย็น ดังในรูปที่ 2.14 ซึ่งจะพบว่า เมื่อเปอร์เซ็นต์การขึ้นรูปเย็นเพิ่มขึ้นจะทำให้กระบวนการเกิดผลึกใหม่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิที่ต่ำลง



รูปที่ 2.14 แผนภูมิแสดงผลของเปอร์เซ็นต์การขึ้นรูปเย็นต่อกระบวนการเกิดผลึกใหม่

โดย Charlie R. Brooks, 1997

และปัจจัยสุดท้ายก็คือความบริสุทธิ์ของโลหะ ดังในรูปที่ 2.15 ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่า อุณหภูมิการเกิดผลึกใหม่ของโลหะบริสุทธิ์จะต่ำกว่าอุณหภูมิการเกิดผลึกใหม่ของโลหะผสม



รูปที่ 2.15 แผนภูมิแสดงผลของความบริสุทธิ์ของโลหะต่อกระบวนการเกิดผลึกใหม่

โดย Charlie R. Brooks, 1997

2.7 การทำความสะอาดผิวโลหะ

กลไกการป้องกันการรั่วซึมในระบบสุญญากาศจะเกิดขึ้นไม่ได้ถ้าหากผิวสัมผัสของจุดเชื่อมต่อทางกลนั้นไม่สะอาด ความสะอาดนั้นจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับพื้นผิวที่สัมผัสกับภาวะสุญญากาศ ซึ่งวิธีการทำความสะอาดผิวสัมผัสของระบบสุญญากาศมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี โดยแต่ละวิธีก็จะเหมาะสมกับเฉพาะรูปแบบของการกันรั่วที่แตกต่างกัน ดังที่กล่าวไว้แล้วว่าโดยทั่วไปนั้น การทำความสะอาดผิวโลหะหมายถึงการกำจัดเศษวัสดุที่ไม่ต้องการบนพื้นผิวสัมผัส แต่ในทางเทคนิคสำหรับระบบสุญญากาศแล้ว ไม่เพียงแต่การกำจัดเศษวัสดุที่ไม่ต้องการเท่านั้น แต่ยังรวมไปถึงสิ่งเจือปนทางกายภาพอื่นๆ ที่ติดอยู่บนผิวสัมผัสเช่น น้ำมัน คราบไขมัน จาระบี หรือผลจากปฏิกิริยาทางเคมีต่างๆ จำพวกสารประกอบออกไซด์ เป็นต้น

ลำดับของการทำความสะอาดผิวโลหะนั้น โดยทั่วไปจะเริ่มต้นจากกระบวนการทำความสะอาดทางกล (Mechanical Cleaning) แล้วจะตามด้วยกระบวนการทำความสะอาดทางเคมี (Chemical Cleaning) สุดท้ายจึงทำความสะอาดด้วยผงซักฟอก การทำความสะอาดทางกลที่นิยมกระทำคือ การขัดด้วยกระดาษทรายหรือแปรงลวด ส่วนการทำความสะอาดทางเคมีนั้นจะกระทำเพื่อกำจัดสารประกอบออกไซด์ต่างๆ โดยจะมีทั้งการแช่ในสารเคมี (Pickling Solutions) เพื่อกัดผิวให้สะอาด หรือการขัดผิวด้วยการแยกประจุทางไฟฟ้า (Electrolytic Polishing) โดย A. Roth, 1994 ระบุว่า Pickling Solutions สำหรับทองแดงนั้นมีหลายชนิดด้วยกัน โดยหนึ่งในนั้นคือ การใช้สารละลายระหว่างกรดไนตริก (HNO_3) 65% 500 ml ผสมกับกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) เข้มข้น 500 ml และกรดไฮโดรคลอริก (HCl) 35% 10 ml แล้วเติม carbon black อีก 5 กรัม โดยให้จุ่มชิ้นงานลงไปประมาณ 2-3 วินาทีแล้วล้างด้วยน้ำทันที อย่างไรก็ตามยังมีสารละลายอื่นอีกที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ให้เหมาะสมกับโลหะต่างๆ ซึ่งปรากฏในหนังสือ Vacuum Sealing Techniques (A. Roth, 1994, pp 83-88)

จากบทความเชิงวิชาการและงานวิจัยต่างๆ ดังที่ได้กล่าวไปแล้วนั้น พอที่จะสรุปได้ว่าหากนำปะเก็นทองแดงชนิด OFHC ที่ใช้ในระบบสุญญากาศ ซึ่งเมื่อปะเก็นทองแดงถูกกดอัดโดยขอบสันมิดแบบ Conflat Seal บนหน้าแปลนจนเกิดการเปลี่ยนรูปอย่างถาวรซึ่งมีลักษณะเหมือนการขึ้นรูปเย็น ทำให้บริเวณดังกล่าวมีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเชิงกลต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งคุณสมบัติของความแข็งซึ่งสะดวกต่อการทดสอบ โดยความแข็งบริเวณรอยกดจะมีค่าสูงกว่าบริเวณที่ไม่มีถูกกดอัด ทั้งนี้เป็นผลอันเนื่องมาจากการแข็งตัวเนื่องจากความเครียดที่เพิ่มขึ้นนั่นเอง จากนั้นเมื่อนำปะเก็นมาทำการบำบัดด้วยความร้อนหรือที่เรียกว่าการอบอ่อนในภาวะที่เหมาะสมทั้งอุณหภูมิและเวลา แล้วซึ่งจะทำให้โครงสร้างและคุณสมบัติเชิงกลที่เปลี่ยนแปลงไปฟื้นคืนสภาพสู่ภาวะเดิม จากนั้นจึงทำการทดสอบหาประสิทธิภาพของปะเก็นที่ผ่านการบำบัดแล้ว โดยนำกลับมาทดลองใช้ซ้ำในระบบสุญญากาศอีกครั้ง แล้วเปรียบเทียบผลที่ได้ต่อไป

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

สำหรับในการวิจัยครั้งนี้ได้ทำการแบ่งงานวิจัยออกเป็นสามส่วนหลักๆ ด้วยกัน ประกอบไปด้วย งานวิจัยในส่วนแรกซึ่งเป็นการวิจัยเบื้องต้นเกี่ยวกับการศึกษาคุณสมบัติเชิงกลต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนรูปร่างของปะเก็น การศึกษาในทางทฤษฎีเกี่ยวกับการบำบัดด้วยความร้อนเพื่อนำไปสู่การออกแบบการอบอ่อนปะเก็น ตลอดจนการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการวิจัย ต่อจากนั้นเป็นการวิจัยในส่วนที่สอง โดยจะทำการวิจัยในเชิงการทดลองเรื่องการบำบัดด้วยความร้อนต่อการคืนตัวของคุณสมบัติเชิงกลต่างๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของปะเก็น ทั้งความแข็งแรง อุณหภูมิ เวลา เฟอร์เซนต์การขึ้นรูปเย็น รวมถึงการใช้กระบวนการทางเคมีอย่างเหมาะสมในการกำจัดสนิมทองแดงตลอดจนกราบสกปรกต่างๆ สำหรับในส่วนที่สามซึ่งเป็นส่วนสุดท้ายของการวิจัยจะเป็นการทดสอบประสิทธิภาพของปะเก็นที่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อน โดยจะทำการทดสอบกับระบบสุญญากาศ ภายใต้ขอบเขตที่กล่าวไว้ในบทที่ 1 เพื่อจะได้ทำการสรุปและวิจารณ์ผลการวิจัยต่อไป

3.1 การวิจัยเบื้องต้น

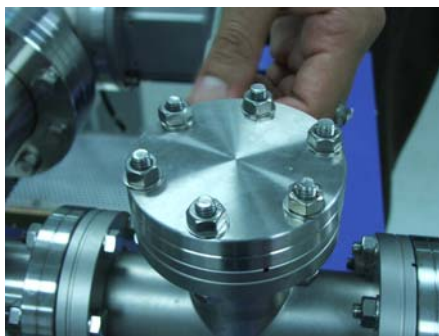
1. ทำการสุ่มตัวอย่างปะเก็นที่ผ่านการใช้งานแล้ว มาทดสอบหาประสิทธิภาพในการป้องกันการเกิดรอยร้าวในระบบสุญญากาศเพื่อสรุปความชัดเจนของปัญหาและหาปริมาณของปะเก็นที่สามารถใช้งานได้ โดยใช้หลักการพิจารณาประสิทธิภาพของปะเก็นภายใต้ขอบเขตที่กล่าวไว้ในบทที่ 1 ซึ่งสามารถนำไปเปรียบเทียบกับปริมาณของปะเก็นที่ผ่านการอบอ่อนแล้ว ซึ่งมีขั้นตอนการทดสอบดังต่อไปนี้

1.1 นำปะเก็นทองแดงที่ต้องการทดสอบไปทำความสะอาดด้วยอะซิโตนและแอลกอฮอล์ โดยต้องสวมถุงมือเพื่อป้องกันไฟฟ้าสถิตย์

1.2 ทำการประกอบปะเก็นทองแดงที่ต้องการทดสอบเข้ากับชุดหน้าแปลน โดยชุดหน้าแปลนดังกล่าวจะต่ออยู่กับห้องสุญญากาศและปั๊มสุญญากาศ

1.3 ทำการร้อยสลักเกลียวผ่านชุดหน้าแปลนเข้าเป็นเกลียว โดยใช้มือหมุนเป็นเกลียวให้แน่นจนครบทั้งหกตัว ดังรูปที่ 3.1

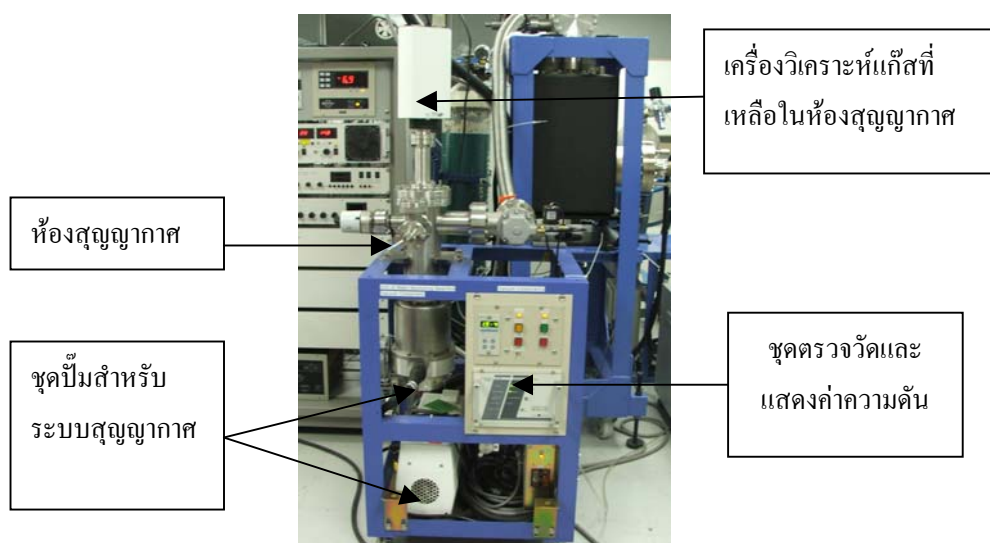
1.4 ใช้ประแจที่สามารถปรับค่าแรงบิดได้มาทำการขันอัดเป็นเกลียวให้แน่น โดยจะปรับค่าแรงบิดไว้ไม่เกิน 110 kg-cm. ดังรูปในภาคผนวก ก



รูปที่ 3.1 การรื้อสลักเกลียวผ่านชุดหน้าแปลนเข้าเป็นเกลียว

1.5 เดินเครื่องให้ปั๊มสุญญากาศทำงาน โดย Rotary Pump (RP) ซึ่งเป็นปั๊มแบบใบพัดจะเป็นปั๊มแรกๆที่เริ่มทำงานเพื่อให้ห้องสุญญากาศมีค่าความดันอยู่ที่ 10^{-3} Torr และหลังจากนั้น Turbomolecular Pump (TMP) จะเริ่มทำงานควบคู่กับ RP เพื่อให้ได้ระดับความดันในช่วง 10^{-3} Torr จนถึงระดับความดัน 10^{-9} Torr ดังรูปในภาคผนวก ฉ

1.6 รอจนกระทั่งห้องสุญญากาศมีค่าความดันน้อยกว่าเท่ากับ 10^{-7} Torr จึงทำการทดสอบหาการรั่วของปะเก็น โดยใช้เครื่องวิเคราะห์แก๊สที่เหลือนอยู่ในห้องสุญญากาศ ซึ่งจะใช้แก๊สฮีเลียมเป็นตัวทดสอบ หากเครื่องวิเคราะห์แก๊สที่เหลือนตรวจจับปริมาณแก๊สฮีเลียมในห้องสุญญากาศได้ ก็จะสามารถพิจารณาได้จากค่า Ion Current ที่แสดงออกมาทางคอมพิวเตอร์โดยค่า Ion Current ต้องไม่เกิน 10^{-10} A จึงจะยอมรับได้ว่าปะเก็นตัวดังกล่าวสามารถใช้งานได้



รูปที่ 3.2 ภาพถ่ายอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบสุญญากาศ

2. ทำการศึกษาคุณสมบัติเชิงกลต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนรูปร่างของปะเก็น โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

2.1 ทำการสำรวจปะเก็นทองแดงที่ใช้งานแล้วโดยนำมาทำการวัดความลึกของรอยกดบนปะเก็น โดยอาศัยเครื่องมือในการวัดความหยาบผิววัสดุ จากนั้นนำปะเก็นเหล่านั้นไปทำการวัดค่าความแข็งที่เกิดขึ้น โดยใช้เครื่องวัดความแข็ง

2.2 จำแนกปะเก็นออกเป็นกลุ่มๆ ตามขนาดความลึกและความแข็งที่วัดได้

2.3 ทำการคำนวณการเกิดเปอร์เซ็นต์การขึ้นรูปเย็นบริเวณรอยกด จากสมการที่ (1.1) โดยมีการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ (SolidWorks และ COSMOS) ช่วยในการจำลองหาการเปลี่ยนแปลงการกระจายตัวของความเค้นและการกระจายตัวของการเปลี่ยนรูปบนปะเก็นขณะใช้งานในระบบสุญญากาศ

2.4 หาความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การขึ้นรูปเย็นกับความแข็ง โดยนำค่าเปอร์เซ็นต์การขึ้นรูปเย็นที่คำนวณได้กับค่าความแข็งที่เกิดขึ้นมาเปรียบเทียบกับความสัมพันธ์ที่ได้มีการศึกษามาแล้ว

3.2 การวิจัยเชิงการทดลอง

3.2.1 การบำบัดด้วยความร้อน

1. นำปะเก็นที่ใช้งานแล้ว มาวัดความหนาโดยเฉลี่ยโดยใช้ดิจิตอลเวอร์เนียร์ แล้วนำไปวัดวัดความหยาบผิวและขนาดความลึกของรอยกด โดยใช้เครื่องวัดความหยาบผิววัสดุ

2. นำปะเก็นเหล่านั้นไปบำบัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ เริ่มตั้งแต่ 200-600 °C เป็นเวลา 30 นาทีภายในเตาอบซึ่งแวดล้อมด้วยอากาศ แล้วปล่อยให้เย็นตัวลงอย่างช้าๆ ภายในเตาอบ โดยตลอดกระบวนการมีการบันทึกค่าความชื้นและอุณหภูมิโดยรอบของเตาอบ เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการอ้างอิงในการนำเสนอผลการทดลอง

3. นำปะเก็นที่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ มาวัดความแข็งที่เกิดขึ้น เพื่อวิเคราะห์ผลของความแข็งกับอุณหภูมิในการบำบัด

4. ทำการทดลองซ้ำอีกครั้งแต่ได้เปลี่ยนเวลาในการบำบัดเป็น 60 นาทีและ 300 นาที

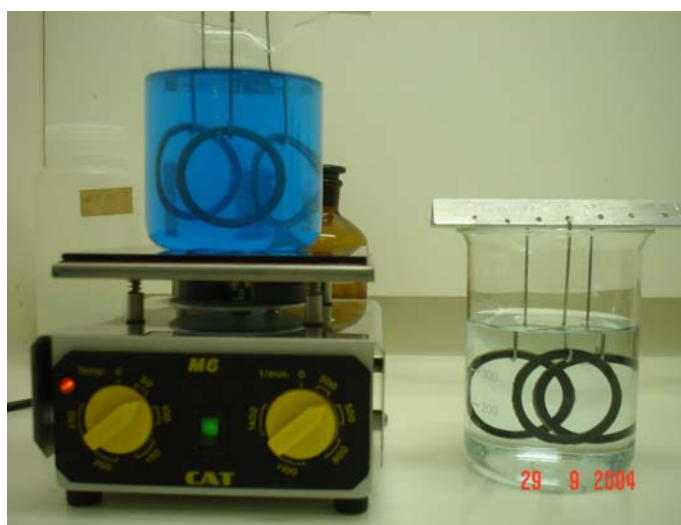
5. นำผลที่ได้มาเขียนแผนภูมิเพื่อนำเสนอและวิเคราะห์ผลการทดลอง

3.2.2 การทำความสะอาดผิวปะเก็น

1. นำปะเก็นซึ่งผ่านการบำบัดด้วยความร้อนมาผ่านกระบวนการทางเคมี เพื่อกำจัดสนิมทองแดงและสิ่งสกปรกต่างๆ ออกไป กระบวนการทางเคมีที่ใช้ประกอบด้วยกรด

ไนตริก (HNO_3) เข้มข้น 250 ml กรดซัลฟูริก (H_2SO_4) เข้มข้น 600 ml และกรดไฮโดรคลอริก (HCl) 20 ml ผสมกับน้ำบริสุทธิ์ 130 ml

2. นำปะเก็นแขวนอยู่ในสารละลายที่ได้จากข้อ 1 แล้วนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 30°C เพื่อเป็นการเร่งการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีให้เร็วขึ้น โดยสามารถสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนว่าสารละลายจะเปลี่ยนเป็นสีฟ้า ดังรูปที่ 3.3 แล้วจะเข้มข้นเรื่อยๆ เป็นสีน้ำเงินหากไม่นำปะเก็นออกมาจากสารละลาย



รูปที่ 3.3 กระบวนการทางเคมีเพื่อกำจัดสนิมทองแดงและทำความสะอาดผิวของปะเก็น

3. นำปะเก็นที่ผ่านกระบวนการทางเคมีมาทำความสะอาดด้วยน้ำกลั่น แล้วเช็ดให้แห้งและจกเก็บไว้ให้สัมผัสกับอากาศน้อยที่สุด

4. ทำการวัดความหนาผิวด้วยเครื่องวัดความหนาผิวและวัดความหนาของปะเก็นที่บำบัดแล้วด้วยดิจิตอลเวอร์เนียร์อีกครั้ง เพื่อนำผลไปวิเคราะห์และเปรียบเทียบกับความหนาผิวและความหนาของปะเก็นทั่วไปที่ไม่ได้ผ่านการบำบัดด้วยความร้อนต่อไป

3.3 การทดสอบประสิทธิภาพของปะเก็น

นำปะเก็นที่ได้บำบัดด้วยความร้อน มาทำการทดสอบประสิทธิภาพในการป้องกันการรั่วของปะเก็นอีกครั้งภายใต้ขอบเขตที่กำหนด เพื่อสรุปผลที่ได้กับปริมาณของปะเก็นที่ไม่ได้ผ่านการบำบัดด้วยความร้อน โดยมีขั้นตอนในการทดสอบประสิทธิภาพของปะเก็นเช่นเดียวกับการสุ่มตัวอย่างในเบื้องต้น

3.4 สถานที่ทำงานวิจัย

อาคารเครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ศูนย์ปฏิบัติการวิจัยเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนแห่งชาติ

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

ในบทนี้จะได้รับรายงานผลการทดลองต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยทั้งสามส่วนหลัก โดยใน ส่วนที่หนึ่งจะเป็นการรายงานผลการศึกษา ผลการสำรวจและทดสอบเกี่ยวกับคุณสมบัติเชิงกลที่ เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรของปะเก็น เพื่อนำไปสู่ข้อสรุปว่า ผลของเปอร์เซ็นต์การ ขึ้นรูปเย็นที่เกิดขึ้น จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเชิงกลต่างๆ ของปะเก็นทองแดงอย่างไร ต่อมาส่วนที่สองจะเป็นรายงานผลการศึกษาและการทดลองเกี่ยวกับการบำบัดด้วยความร้อนของ ปะเก็นที่ใช้แล้ว เพื่อนำไปสู่ข้อสรุปของการเลือกใช้อุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในการบำบัดด้วยความร้อน ส่วนสุดท้ายถือเป็นส่วนที่สำคัญที่สุดซึ่งจะเป็นผลการวิจัยที่สามารถพิสูจน์ว่า สมมติฐานที่ตั้งไว้ก่อนหน้านี้ นั้น มีความเป็นไปได้มากน้อยเพียงใด นั่นคือการรายงานผลการทดสอบ ประสิทธิภาพของปะเก็นทองแดงที่บำบัดด้วยความร้อนแล้วอีกครั้ง นอกจากนั้นแล้วยังจะนำเสนอ ผลการทดลองอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องเพื่อให้เกิดความสมบูรณ์ของเนื้อหาในงานวิจัยในครั้งนี้

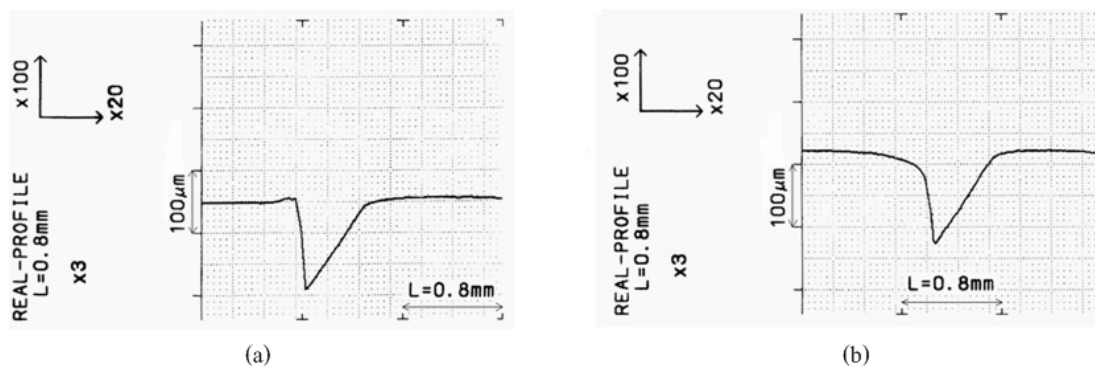
4.1 ผลการสำรวจปะเก็นทองแดงที่ใช้งานแล้ว

ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วว่า ปะเก็นที่ใช้งานอยู่ในระบบสุญญากาศแบบ Conflat Seal ซึ่ง ประกอบไปด้วยปะเก็นทองแดงที่วางตัวอยู่ระหว่างหน้าแปลนสองชิ้น โดยหน้าแปลนทั้งสองมีผิว สัมผัสแบบสันมิดสำหรับการกันรั่วชนิดทรง โคน ขอบด้านในจะตั้งตรงเป็นมุมฉากกับปะเก็น ส่วนอีกด้านหนึ่งมีลักษณะลาดเอียงทำมุม 70 องศากับแนวราบ เมื่อปะเก็นทองแดงที่ถูกใช้ใน ระบบสุญญากาศถูกแรงฉีกกระทำจากภายนอก ขอบสันมิดดังกล่าวจะจิกตัวลงไปบนเนื้อแต่ละ ด้านของปะเก็น ทำให้ปะเก็นเกิดการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร ดังในรูปที่ 2.5 โดยในการสำรวจนี้ ได้เลือกเฉพาะปะเก็นทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางวงนอก 48 mm. ซึ่งเป็นขนาดเฉพาะสำหรับ หน้าแปลน CF 70 mm. มาทำการศึกษาเกี่ยวกับลักษณะการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร ความลึกที่เกิด ขึ้นจากการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร ตลอดจนความแข็งที่เปลี่ยนแปลงไป ดังรายละเอียดที่จะกล่าว ต่อไปนี้

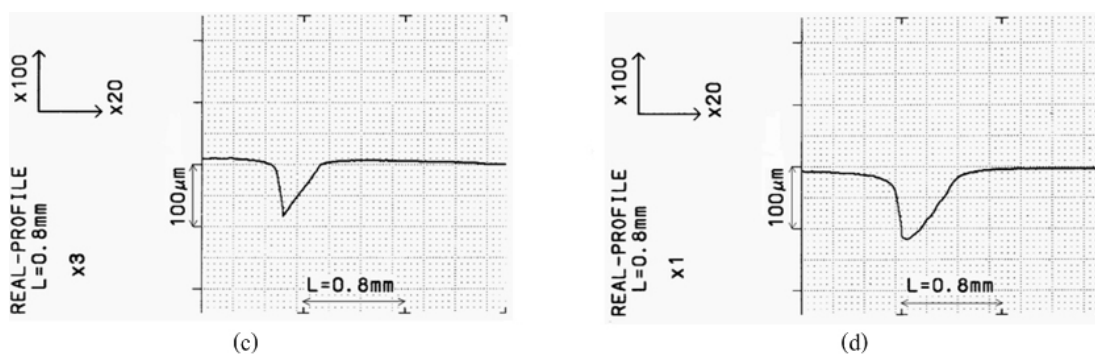
4.1.1 การเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรบนปะเก็น

จากการศึกษาลักษณะและความลึกที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรบนปะ เก็นที่ใช้แล้ว พบว่ามีลักษณะการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรเป็นรูปสามเหลี่ยม

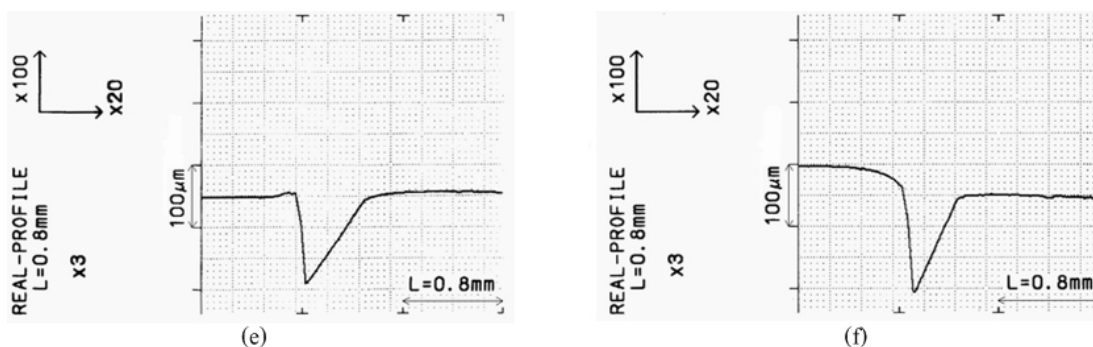
ด้านไม่เท่า การเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรดังกล่าวมีลักษณะที่คล้ายคลึงทั้งหมดแต่มีความลึกที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรไม่เท่ากัน โดยมีความลึกที่เกิดขึ้นตั้งแต่ $50\ \mu\text{m}$ ไปจนถึง $170\ \mu\text{m}$ โดยประมาณ ดังรูปที่ 4.1 ถึง 4.3 นอกจากนั้นยังพบว่าปะเก็นที่ใช้แล้วมีความลึกแต่ละด้านที่ไม่เท่ากัน และบางตัวก็มีความลึกไม่เท่ากันแม้จะวัดที่ด้านเดียวกันก็ตาม



รูปที่ 4.1 แผนภาพแสดงลักษณะและความลึกที่เกิดขึ้นบนปะเก็นทองแดงชิ้นเดียวกัน และวัดความลึกด้านเดียวกัน (a) $50\ \mu\text{m}$ (b) $65\ \mu\text{m}$

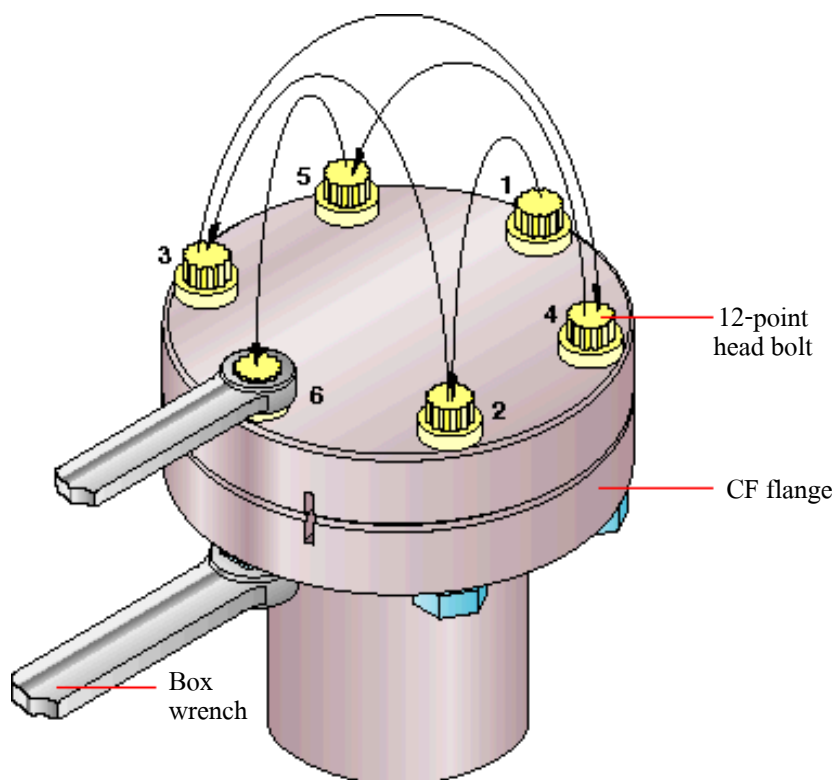


รูปที่ 4.2 แผนภาพแสดงลักษณะและความลึกที่เกิดขึ้นบนปะเก็นทองแดงชิ้นเดียวกัน และวัดความลึกด้านเดียวกัน (c) $90\ \mu\text{m}$ (d) $100\ \mu\text{m}$



รูปที่ 4.3 แผนภาพแสดงลักษณะและความลึกที่เกิดขึ้นบนปะเก็นทองแดงชิ้นเดียวกัน และวัดความลึกด้านเดียวกัน (e) 140 μm (f) 170 μm

จากสิ่งที่พบในผลการสำรวจดังที่รายงานไว้ข้างต้นสามารถอธิบายได้ว่า ปะเก็นทองแดงที่ใช้งานแล้วนั้น มีลักษณะของการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรแบบรูปสามเหลี่ยมด้านไม่เท่า และมีความลึกที่ไม่เท่ากัน ทั้งนี้เนื่องจากในขณะใช้งานจริงในระบบสุญญากาศ ปะเก็นทองแดงจะถูกสันมีดจิกตัวลงไปบนเนื้อแต่ละด้านของปะเก็น ทำให้ปะเก็นเกิดการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร และด้วยเหตุที่หน้าแปลนทั้งสองมีผิวสัมผัสแบบสันมีดสำหรับการกันรั่วชนิดทรงโคน เมื่อพิจารณาพื้นที่หน้าตัดของผิวสัมผัสนี้จะมีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านไม่เท่า เป็นผลให้การเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรบนปะเก็นมีลักษณะเป็นรอยกดรูปสามเหลี่ยมด้านไม่เท่านั่นเอง และในกรณีที่มีความลึกของปะเก็นแต่ละตัวแตกต่างกัน ก็เนื่องมาจากขนาดของแรงที่ใช้ในการกดอัดหน้าแปลนทั้งสองเข้าด้วยกันแตกต่างกัน ส่วนเหตุผลที่ทำให้ความลึกของปะเก็นขึ้นเดียวกัน วัดความลึกด้านเดียวกัน แต่มีความลึกไม่เท่ากันนั้น เป็นผลเนื่องจากความไม่ได้ระนาบของแรงที่มากระทำต่อหน้าแปลนทั้งสอง โดยสามารถอธิบายได้ว่าแรงที่ใช้ในการกดอัดหน้าแปลนเข้าด้วยกัน มาจากการขันอัดชุดสลักเกลียวและเป็นเกลียวจำนวน 6 ชุด ที่ใช้ร้อยประกอบหน้าแปลนทั้งสองที่มีปะเก็นอยู่ระหว่างกลางเข้าด้วยกัน โดยในขณะที่ขันอัดชุดสลักเกลียวเข้ากับเป็นเกลียวจำเป็นต้องกระทำในลักษณะตัวเว้นตัวดังรูปที่ 4.4 เพื่อให้หน้าแปลนได้รับแรงกระทำที่เป็นระนาบเดียวกันให้มากที่สุด แต่ในความเป็นจริงแล้ว ลำดับและขนาดของแรงที่ไม่สัมพันธ์กันจะทำให้หน้าแปลนลาดเอียงไปด้านใดด้านหนึ่ง ซึ่งทำให้ความลึกของรอยกดบนปะเก็นด้านเดียวกันแต่มีความลึกไม่เท่ากัน

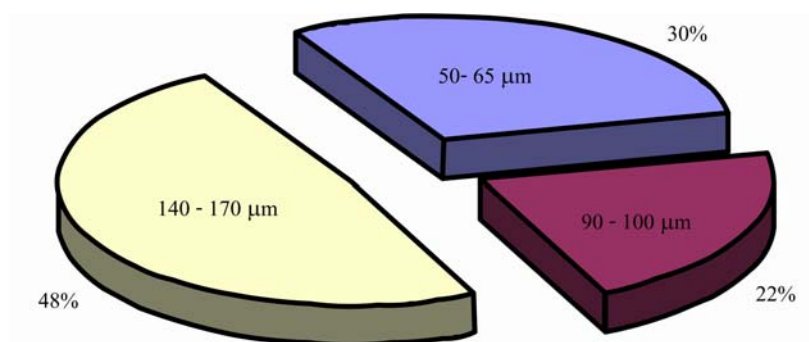


รูปที่ 4.4 ภาพแสดงลำดับของการขันอัดชุดสลักเกลียวและเป็นเกลียว

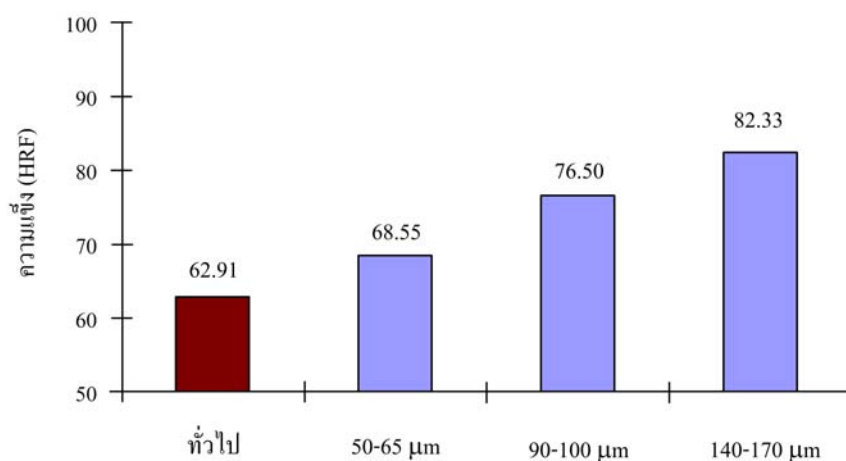
โดย <http://www.mdcvacuum.com>

4.1.2 ความลึกของรอยกดบนปะเก็น

ผลจากการศึกษาลักษณะและความลึกของรอยกดบนปะเก็นที่ได้สำรวจผ่านมานั้น สามารถแบ่งกลุ่มปะเก็นที่ใช้แล้วออกได้เป็น 3 กลุ่มหลักๆ โดยกลุ่มแรกมีความลึกอยู่ในช่วง 50 ถึง 65 μm กลุ่มที่สองมีความลึกอยู่ในช่วง 90 ถึง 100 μm และกลุ่มสุดท้ายคือกลุ่มที่มีความลึก 140 ถึง 170 μm เป็นต้น โดยผลของการสำรวจในครั้งนี้พบว่ากลุ่มที่มีความลึก 140 ถึง 170 μm มีจำนวนมากที่สุดถึงร้อยละ 48 รองลงมาคือกลุ่มที่มีความลึกอยู่ในช่วง 90 ถึง 100 μm คิดเป็นร้อยละ 30 และสุดท้ายร้อยละ 22 คือกลุ่มที่มีความลึกอยู่ในช่วง 50 ถึง 75 μm ดังรูปที่ 4.5 และเมื่อทำการวัดความแข็งโดยเฉลี่ยที่เกิดขึ้นบริเวณทั่วไปบนปะเก็นและบริเวณที่มีการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรหรือบริเวณรอยกด พบว่าบริเวณรอยกดมีค่าความแข็งมากกว่าบริเวณทั่วไปบนปะเก็น และจะมีค่าความแข็งสูงขึ้นตามความลึกของรอยกดดังภาพที่ 4.6



รูปที่ 4.5 แผนภูมิแสดงปริมาณของปะเก็นทองแดงที่ใช้แล้ว แยกตามความลึกที่เกิดขึ้น



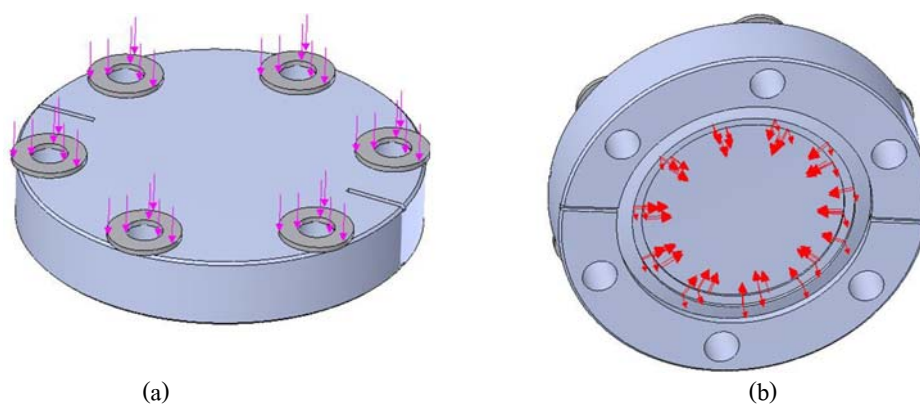
รูปที่ 4.6 แผนภูมิแสดงค่าความแข็งและความลึกที่เกิดขึ้นที่เกิดบนปะเก็นทองแดงที่ใช้แล้ว

จากผลของการทดสอบความแข็งไม่เพียงทำให้ทราบว่าบริเวณรอยกดมีค่าความแข็งมากกว่าบริเวณทั่วไปบนปะเก็นเท่านั้น แต่ยังพบว่าความแข็งจะมีแนวโน้มสูงขึ้นตามความลึกของรอยกดด้วย ทั้งนี้สามารถอธิบายได้ว่า เมื่อปะเก็นทองแดงที่ถูกกดอัดโดยขอบสันมีคบนหน้าแปลนจนเกิดการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร ทำให้บริเวณดังกล่าวมีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเชิงกลต่างๆ ความแข็งเป็นคุณสมบัติเชิงกลที่เหมาะสมและง่ายต่อการทดสอบ เนื่องจากเป็นบริเวณที่เล็ก โดยความแข็งบริเวณรอยกดมีค่าสูงกว่าบริเวณทั่วไปบนปะเก็นนั้นเป็นผลอันเนื่องมาจากปริมาณการแข็งตัวเนื่องจากความเครียดที่เพิ่มขึ้นเกิดขึ้นมากที่สุด ณ บริเวณดังกล่าวนั่นเอง และเมื่อมีการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรมากขึ้นปริมาณการแข็งตัวเนื่องจากความเครียดที่เพิ่มขึ้นก็จะมากตามไปด้วย จึงทำให้ความแข็งจะมีแนวโน้มสูงขึ้นตามความลึกของรอยกดด้วย

4.1.3 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การขึ้นรูปเย็นกับความแข็งของทองแดง

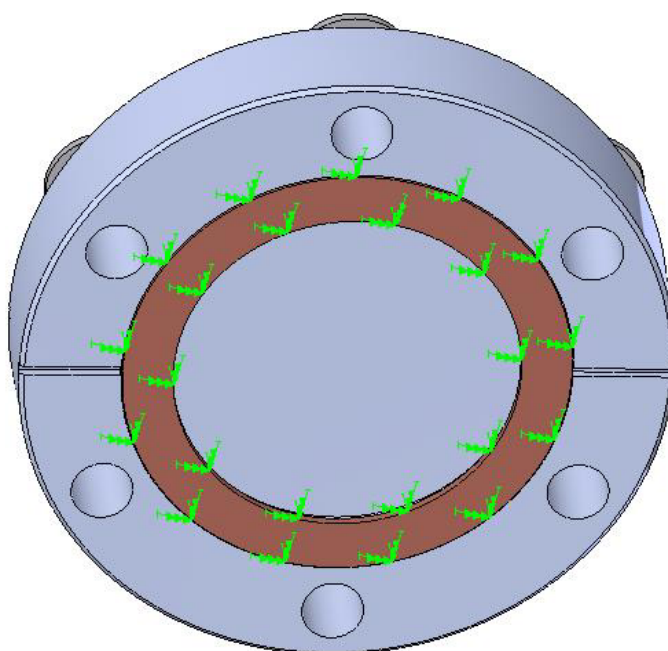
นอกเหนือจากค่าความแข็งบริเวณรอยกดจะขึ้นอยู่กับความลึกของรอยกดแล้วยังมีผลการศึกษาที่แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของความแข็งที่เกิดขึ้นเปลี่ยนแปลงไปอย่างไร เมื่อเทียบกับปริมาณการแข็งตัวเนื่องจากความเครียดที่เพิ่มขึ้น นั่นคือการคำนวณหาปริมาณการแข็งตัวเนื่องจากความเครียดที่เพิ่มขึ้นในรูปแบบของเปอร์เซ็นต์การขึ้นรูปเย็น ซึ่งได้พิจารณาจากการคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์การขึ้นรูปเย็นของปะเก็นหลังการใช้งานและค่าความแข็งที่เกิดขึ้น โดยพิจารณาเปรียบเทียบกับผลการของ The Copper Development Association, UK ที่ได้นำเสนอผลของเปอร์เซ็นต์การขึ้นรูปเย็น ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเชิงกลต่างๆ ของทองแดงความนำสูงดังรูปที่ 2.9 ซึ่ง A. F. Grant and B. D. Fell, n.d. ได้ใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงในการศึกษาทองแดงที่จะใช้ทำท่อเป็นฉนวนกันความร้อนให้กับกระจกที่ใช้สำหรับสะท้อนแสงซินโครตรอน ใน Daresbury Laboratory ประเทศอังกฤษ แต่เนื่องจากในงานวิจัยนี้พิจารณาวัสดุที่มีการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรบางส่วน ปริมาณการแข็งตัวเนื่องจากความเครียดที่เพิ่มขึ้นจะเกิดขึ้นสูงที่สุดบริเวณรอยกดที่มีความลึกที่สุดนั่นเอง ดังนั้นการคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์การขึ้นรูปเย็นของปะเก็นที่เกิดขึ้นจึงจำเป็นต้องใช้สมการที่ (1.1)

สมมติฐานเพิ่มเติมอีกประการหนึ่งคือการขยายตัวออกด้านข้างของปะเก็นขณะใช้งานในระบบสุญญากาศมีค่าน้อยมาก ซึ่งสมมติฐานเพิ่มเติมนี้จำเป็นต้องพิสูจน์ให้แน่ชัดเสียก่อน ซึ่งนอกจากจะใช้วิธีการวัดขนาดความหนาของปะเก็นทั้งบริเวณวงนอกและวงในแล้ว ในงานวิจัยนี้ได้ทำการจำลองพฤติกรรมการรับแรงที่มากระทำต่อปะเก็นขณะใช้งานในระบบสุญญากาศ โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ (SolidWorks และ COSMOS) ช่วยในการจำลองหาการเปลี่ยนรูปและการกระจายตัวของความเค้นบนปะเก็นขณะใช้งานในระบบสุญญากาศด้วย



รูปที่ 4.7 ภาพจำลองการใช้งานปะเก็นทองแดงในระบบสุญญากาศโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์
(a) การให้แรงกระทำต่อหน้าแปลน (b) การให้ความดันกระทำต่อผิวล่าง

แบบจำลองของปะเก็นทองแดงสำหรับใช้งานในระบบสุญญากาศ โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูปที่มีชื่อทางการค้าว่า SolidWorks ทำการสร้างแบบจำลองซึ่งประกอบด้วย หน้าแปลนขนาด CF70 mm. โดยด้านบนจะมีรูสำหรับร้อยสลักเกลียวขนาด M6 จำนวน 6 รู พร้อมวงแหวนสวมเกลียว (Washer) ซึ่งจะเป็นพื้นที่ที่รับแรงกดจากขนาดแรงบิดของการขันอัดแป้นเกลียว ดังรูปที่ 4.7 (a) ส่วนด้านล่างของแบบจำลองถูกออกแบบให้มีรูปแบบการกันรั่วชนิดสันนูนรูปร่างคล้ายสันมิด ดังรูปที่ 4.7 (b) โดยที่ผิวด้านล่างของหน้าแปลนจะถูกกำหนดให้เป็นพื้นที่ที่ต้องรับผลของความดันสุญญากาศที่มากกระทำในขณะที่ถูกใช้งาน

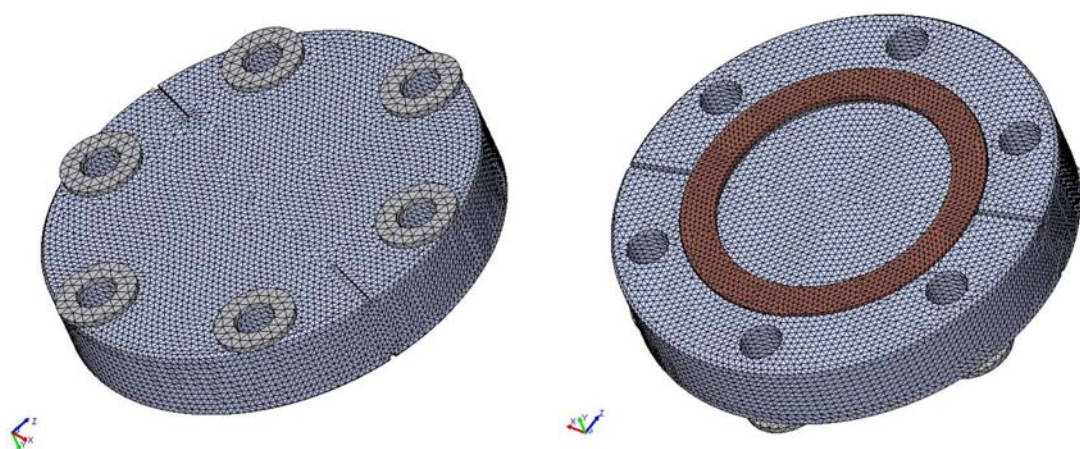


รูปที่ 4.8 ภาพการให้พื้นผิวด้านล่างของปะเก็นถูกตรึงให้อยู่กับที่

นอกจากหน้าแปลนขนาด CF70 mm. แล้ว แบบจำลองนี้ยังต้องประกอบด้วย ปะเก็นทองแดงซึ่งจะประกบอยู่กับด้านล่างของหน้าแปลน โดยกำหนดให้ความหนาของปะเก็นเท่ากับ 1 mm. ซึ่งเป็นครึ่งหนึ่งของความหนาจริง และกำหนดเงื่อนไขให้พื้นผิวด้านล่างของปะเก็นถูกตรึงให้อยู่กับที่ เนื่องจากพิจารณาให้เป็นระนาบสมมาตร (Symmetrical Plane) ในขณะใช้งานจริง ดังภาพที่ 4.8

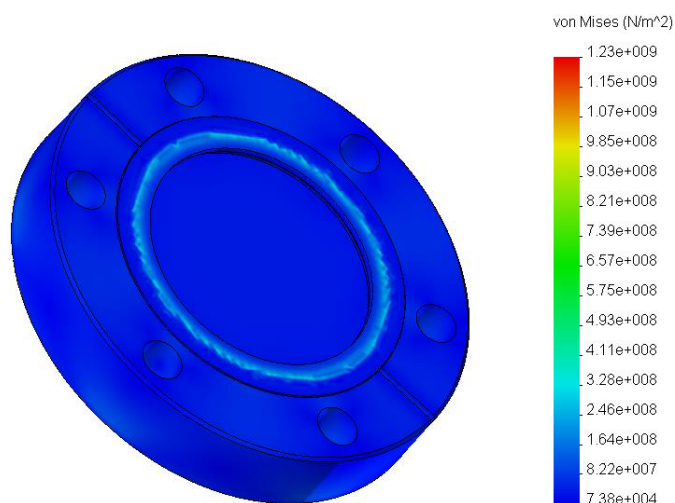
หลังจากกำหนดพื้นที่ในการรับแรงกดและพื้นที่ในการรับผลของความดันสุญญากาศที่มากกระทำแล้ว ขนาดของแรงกดและความดันที่มากกระทำก็ถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 8,000 N และ 101,300 Pa ตามลำดับ ซึ่งขนาดของแรงกดดังกล่าวได้คำนวณมาจากขนาดของแรง

บิตที่ใช้ในการขันอัดเป็นเกลียวขนาด 110 kg-cm. ที่สอดคล้องกับแรงผืนึก 358 kg/cm. นั้นเอง (รายการคำนวณอยู่ในภาคผนวก ข.) แล้วกำหนดชนิดของวัสดุของแบบจำลอง โดยกำหนดคุณสมบัติเชิงกลต่างๆ ของปะเก็นมีเป็นวัสดุทองแดงชนิดความนำสูงปราศจากออกซิเจน ส่วนที่เหลือจะถูกกำหนดคุณสมบัติเชิงกลต่างๆเป็นวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม ชนิด 316LN จากนั้นจึงทำการแบ่งแบบจำลองทั้งหมดออกเป็นส่วนย่อยๆ (Meshing) ตามหลักการของ Finite Element Method โดยกำหนดให้ส่วนของปะเก็นเป็นส่วนที่มีขนาดเล็กมากที่สุด ดังภาพที่ 4.9

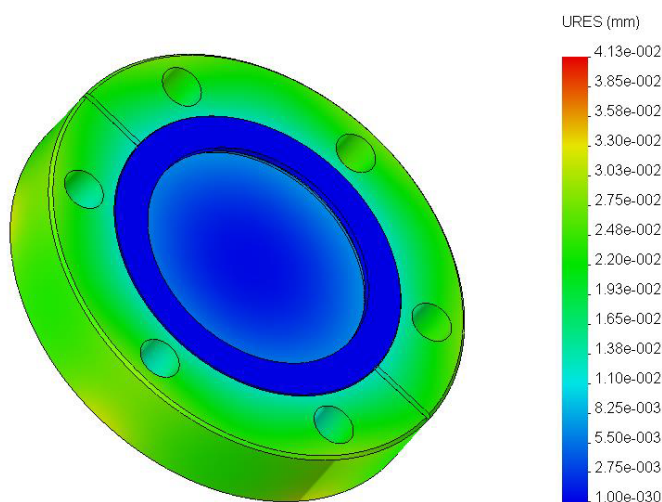


รูปที่ 4.9 ภาพการแบ่งแบบจำลองออกเป็นส่วนย่อยๆ (Meshing)

เมื่อทำการแบ่งแบบจำลองทั้งหมดออกเป็นส่วนย่อยๆ ตลอดจนกำหนดเงื่อนไขต่างๆ ที่จำเป็นเสร็จเรียบร้อยแล้วจึงทำการคำนวณโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ COSMOS เพื่อคำนวณหาการเปลี่ยนแปลงของแบบจำลอง ตลอดจนลักษณะการกระจายตัวของความเค้นและการกระจายตัวของการเปลี่ยนรูปบนปะเก็นขณะใช้งานในระบบสุญญากาศ ดังภาพที่ 4.10 และ 4.11 ตามลำดับ

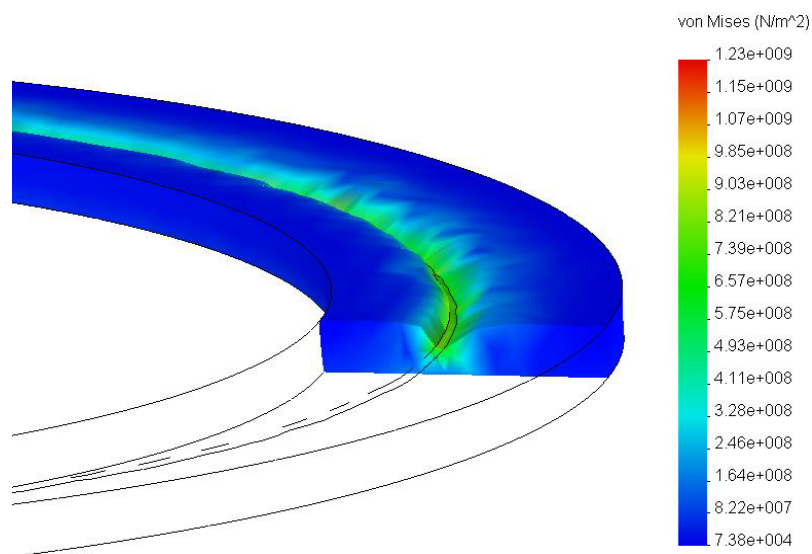


รูปที่ 4.10 ภาพแสดงผลการคำนวณหาการเปลี่ยนแปลงการกระจายตัวของความเค้น

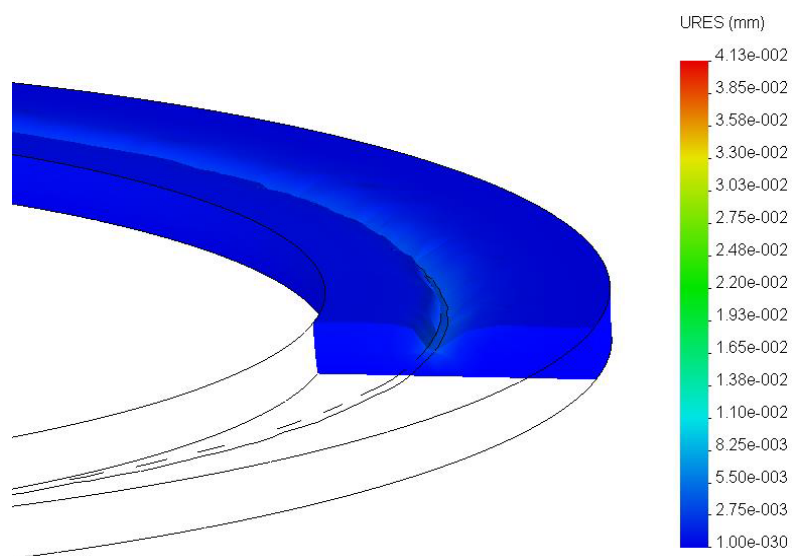


รูปที่ 4.11 ภาพแสดงผลการคำนวณหาการเปลี่ยนแปลงการกระจายตัวของการเปลี่ยนรูป

เพื่อความสะดวกและง่ายต่อการพิจารณาผลจากการคำนวณ จึงแสดงผลเฉพาะส่วนของปะเก็นทองแดง ดังภาพที่ 4.12 ที่แสดงให้เห็นการกระจายตัวของความเค้นบนปะเก็น ซึ่งจะพบว่าความเค้นที่เกิดขึ้นบริเวณส่วนที่สัมผัสกับขอบสันมีดของหน้าแปลน(บริเวณร่องรอยกดสีเขียว) มีค่าสูงกว่าส่วนอื่นของปะเก็น ทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปที่ไม่เท่ากัน โดยการเปลี่ยนรูปที่ไม่เท่ากันจะสังเกตเห็นได้จากลักษณะรอยกดถาวรนั่นเอง ความเค้นที่แสดงนั้นจะเป็นค่าความเค้นของมิต (von Mises Stress) ซึ่งให้ผลที่เหมาะสมกับวัสดุที่เป็นโลหะเหนียวเช่น ทองแดงมากที่สุด โดยมีค่าความเค้นของมิตมากและน้อยที่สุดคือ 1.23 GPa และ 1.44 MPa ตามลำดับ



รูปที่ 4.12 ภาพหน้าตัดแสดงการกระจายตัวของความเค้นบนปะเก็นทองแดงขณะใช้งาน



รูปที่ 4.13 ภาพหน้าตัดแสดงการกระจายตัวของการเปลี่ยนรูปบนปะเก็นทองแดงขณะใช้งาน

ภาพที่ 4.13 เป็นภาพที่แสดงให้เห็นการเปลี่ยนรูปที่เกิดขึ้นกับแบบจำลอง โดยจะมีลักษณะของการเปลี่ยนรูปบริเวณที่สัมผัสกับขอบสันมีดบนหน้าแปลนอย่างชัดเจน โดยเมื่อนำค่าการเปลี่ยนรูปที่เกิดขึ้นมาพิจารณา โดยพิจารณาพื้นผิววงในและวงนอกของปะเก็น ดังรายละเอียดในตารางที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ โดยพบว่าค่าการเปลี่ยนรูปในทิศทาง Y ซึ่งเป็นทิศทางเดียวกันกับความหนาของปะเก็นจะมีค่าการเปลี่ยนรูปโดยเฉลี่ยทั้งพื้นผิววงในและวงนอกของปะเก็น

เท่ากับ 0.0826 μm และ 0.0318 μm ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาการเปลี่ยนรูปโดยรวมก็มีค่าน้อยมากเช่นกัน ซึ่งน้อยมากพอที่จะไม่คิดผลของการเปลี่ยนรูปนี้ และผลดังกล่าวนี้ได้สอดคล้องกับความหนาของปะเก็นที่เปลี่ยนแปลงไปก่อนและหลังการใช้งาน

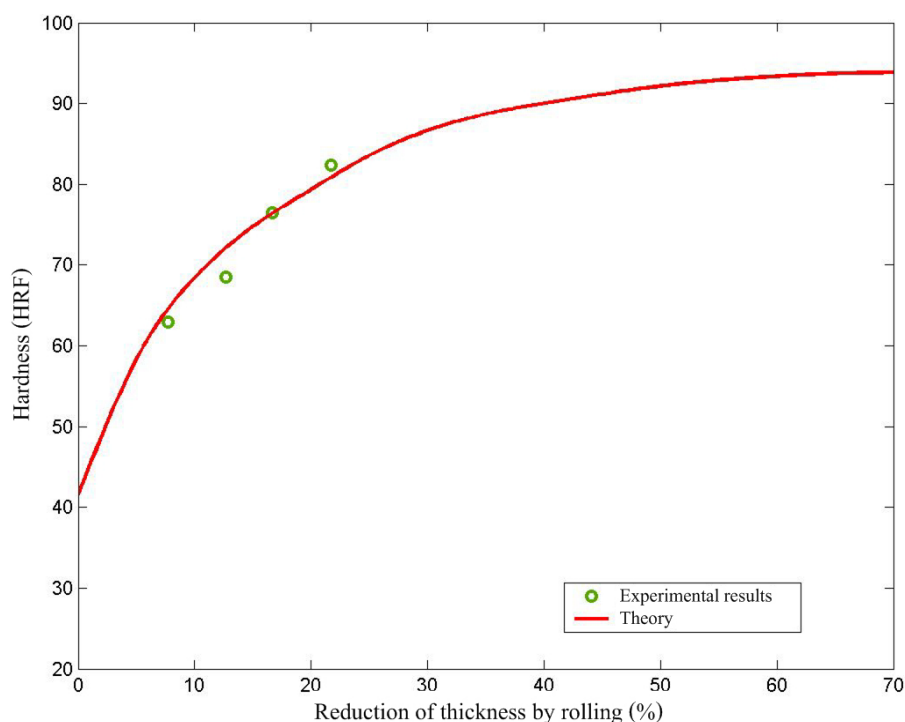
ตารางที่ 4.1 ค่าการเปลี่ยนรูปของปะเก็นพิจารณาพื้นผิววงใน

การพิจารณา	การเปลี่ยนรูป (mm.) (Displacement)	การเปลี่ยนรูป (mm.) ใน X direction	การเปลี่ยนรูป (mm.) ใน Y direction	การเปลี่ยนรูป (mm.) ใน Z direction
ค่าสูงสุด	5.44×10^{-4}	5.00×10^{-7}	1.47×10^{-7}	5.26×10^{-7}
ค่าต่ำสุด	0	-5.00×10^{-7}	0	-5.22×10^{-7}
ค่ารวม	6.64×10^{-5}	9.04×10^{-8}	6.64×10^{-5}	5.31×10^{-8}
ค่าเฉลี่ย	8.26×10^{-8}	1.12×10^{-10}	8.26×10^{-8}	6.60×10^{-11}

ตารางที่ 4.2 ค่าการเปลี่ยนรูปของปะเก็นพิจารณาพื้นผิววงนอก

การพิจารณา	การเปลี่ยนรูป (mm.) (Displacement)	การเปลี่ยนรูป (mm.) ใน X direction	การเปลี่ยนรูป (mm.) ใน Y direction	การเปลี่ยนรูป (mm.) ใน Z direction
ค่าสูงสุด	1.84×10^{-4}	1.63×10^{-7}	0	1.59×10^{-7}
ค่าต่ำสุด	0	-1.62×10^{-7}	-6.08×10^{-8}	-1.58×10^{-7}
ค่ารวม	3.29×10^{-5}	3.04×10^{-7}	-3.29×10^{-5}	1.65×10^{-8}
ค่าเฉลี่ย	3.18×10^{-8}	2.95×10^{-10}	-3.18×10^{-8}	1.60×10^{-11}

ผลที่ได้จากการคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์การขึ้นรูปเย็นของปะเก็นที่เกิดขึ้น ภายใต้สมมติฐานเพิ่มเติมว่าด้วยการขยายตัวออกด้านข้างของปะเก็นขณะใช้งานในระบบสุญญากาศมีค่าน้อยมาก จนทำให้สามารถคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์การขึ้นรูปเย็นของปะเก็นจากสมการที่ (1.1) ได้ แล้วนำผลที่คำนวณได้มาเปรียบเทียบกับค่าความแข็งที่เกิดขึ้นจริงจากข้อมูลที่ได้สำรวจมาแล้วทั้งหมด โดยเมื่อนำค่าเปอร์เซ็นต์การขึ้นรูปเย็นกับความแข็งมาเขียนแผนภูมิร่วมกัน แล้วนำไปเปรียบเทียบกับแผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับเปอร์เซ็นต์การขึ้นรูปเย็นของทองแดง OFHC ซึ่งทดสอบโดย The Copper Development Association, UK โดยถือเป็นความสัมพันธ์ในทางทฤษฎี และเพื่อให้เปรียบเทียบผลกันได้ จึงต้องทำการเปลี่ยนหน่วยของความแข็งจาก HV มาเป็น HRF โดยใช้ข้อมูลจาก ASTM E-140 Table IV (รายละเอียดในภาคผนวก ก) ซึ่งเมื่อนำผลมาเปรียบเทียบกับแผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับเปอร์เซ็นต์การขึ้นรูปเย็นที่คำนวณได้ ให้ผลที่ค่อนข้างสอดคล้องและเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับผลการทดสอบของ The Copper Development Association, UK ดังรูปที่ 4.14



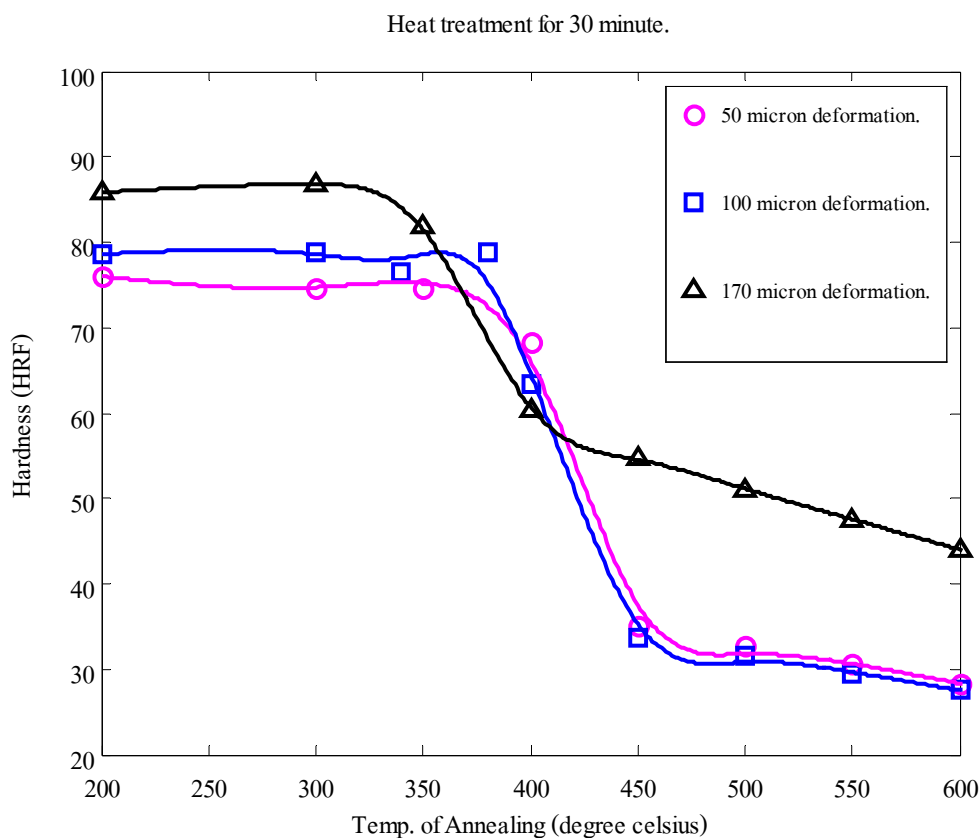
รูปที่ 4.14 แผนภูมิแสดงเปอร์เซ็นต์การขึ้นรูปเย็นที่คำนวณได้เปรียบเทียบกับความแข็ง

ผลของเปอร์เซ็นต์การขึ้นรูปเย็นที่เกิดขึ้นกับปะเก็นนั้นจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเชิงกลต่างๆ ของปะเก็นทองแดง โดยเฉพาะความแข็งซึ่งจะมีลักษณะที่เพิ่มขึ้นแบบสมการโพลิโนเมียลตามปริมาณของการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรหรือการแข็งตัวเนื่องจากความเครียดที่เพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามคุณสมบัติเชิงกลต่างๆ ของปะเก็นทองแดงจะสามารถทำให้กลับคืนสู่สภาพก่อนการเปลี่ยนรูปได้ โดยอาศัยกระบวนการทางความร้อนเข้ามาเกี่ยวข้องภายใต้สภาวะของอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมเรียกว่าการอบอ่อน ซึ่งประกอบด้วยสามกระบวนการย่อยๆ คือการอบคืนตัว การเกิดผลึกใหม่ และการโตขึ้นของขนาดผลึกใหม่ ซึ่งจากนี้ไปจะเป็นผลการทดลองเพื่อหาสภาวะการอบอ่อนที่เหมาะสม ทั้งอุณหภูมิและเวลา เพื่อให้ได้ปะเก็นที่สามารถนำกลับมาใช้ได้อีกครั้ง

4.2 ผลการบำบัดด้วยความร้อนของปะเก็นทองแดงที่ใช้งานแล้ว

ผลจากการสุ่มสำรวจตัวอย่างปะเก็นทองแดงที่ใช้แล้วมาทำการวัดหาความลึกของรอยกัดที่เกิดจากการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร ซึ่งมีความลึกที่เกิดขึ้นตั้งแต่ 50 μm ไปจนถึง 170 μm ดังกล่าวไว้ในหัวข้อที่แล้ว ดังนั้นในการทดลองนี้จึงทำการตัดปะเก็นเหล่านั้นออกเป็นชิ้นเล็กๆ แล้วแยกอบในเตาด้วยความร้อน โดยทำการอบที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ กัน ผลที่ได้จากการ

ทดลองในรูปที่ 4.15 ถึง 4.17 เป็นผลจากการอบด้วยความร้อน ณ อุณหภูมิต่างๆ ในเวลาที่เท่ากัน ประกอบด้วย 30 นาที 60 นาทีและ 300 นาทีตามลำดับ ส่วนรูปที่ 4.18 ถึง 4.20 นั้นจะแสดงผลของการอบด้วยความร้อน ณ อุณหภูมิและเวลาต่างๆ ของปะเก็นที่มีความลึกของรอยกดเท่ากัน ประกอบด้วย 50 μm 100 μm และ 170 μm ตามลำดับ

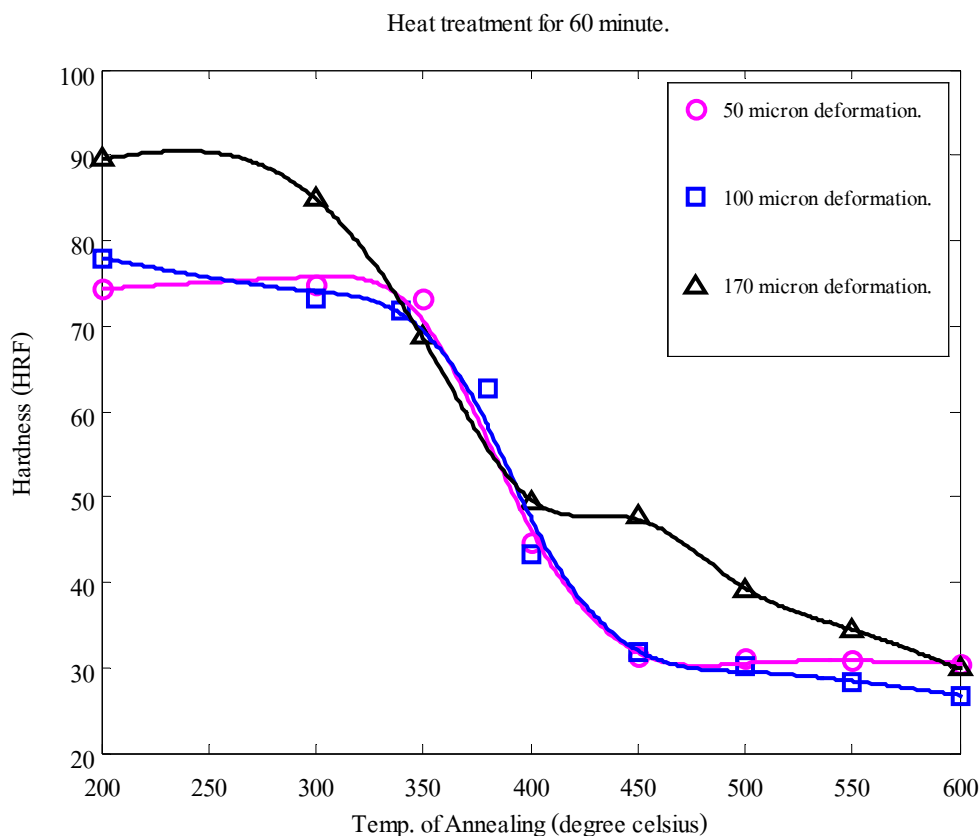


รูปที่ 4.15 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิการอบและค่าความแข็งในเวลา 30 นาที

จากแผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิการอบอ่อนและค่าความแข็งของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงไปทั้งหกภาพนั้น จะเห็นว่าแผนภูมิทั้งหมดมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของเส้นกราฟที่คล้ายคลึงกันในลักษณะคล้ายฟังก์ชันขั้นบันได (Step Function) โดยในแต่ละช่วงการเปลี่ยนแปลงสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

ในช่วงแรกของแผนภูมิเมื่ออุณหภูมิการอบเพิ่มขึ้นค่าความแข็งของวัสดุจะมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างน้อย ดังจะเห็นจากเส้นกราฟที่มีลักษณะคล้ายเส้นตรงในแนวราบ แต่เส้นกราฟช่วงนี้จะมีความยาวไม่เท่ากัน โดยหากพิจารณาเวลาในการอบอ่อนที่เท่ากันจะพบว่าปะเก็นที่มีความลึกของรอยกดมากจะมีความยาวของเส้นกราฟในช่วงแรกนี้สั้นกว่าปะเก็นที่มีความลึกของรอยกด

น้อย ซึ่งสามารถเห็นได้ชัดเจนจากภาพที่ 4.15 แต่ถ้าหากพิจารณาจากค่าความลึกของรอยกดที่เท่ากันจะพบว่า ประเด็นที่ใช้เวลาในการอบอ่อนมากจะมีความยาวของเส้นกราฟในช่วงแรกนี้สั้นกว่า ประเด็นที่ใช้เวลาในการอบอ่อนน้อย โดยสามารถเห็นได้ชัดเจนจากภาพที่ 4.18 4.19 และ 4.20

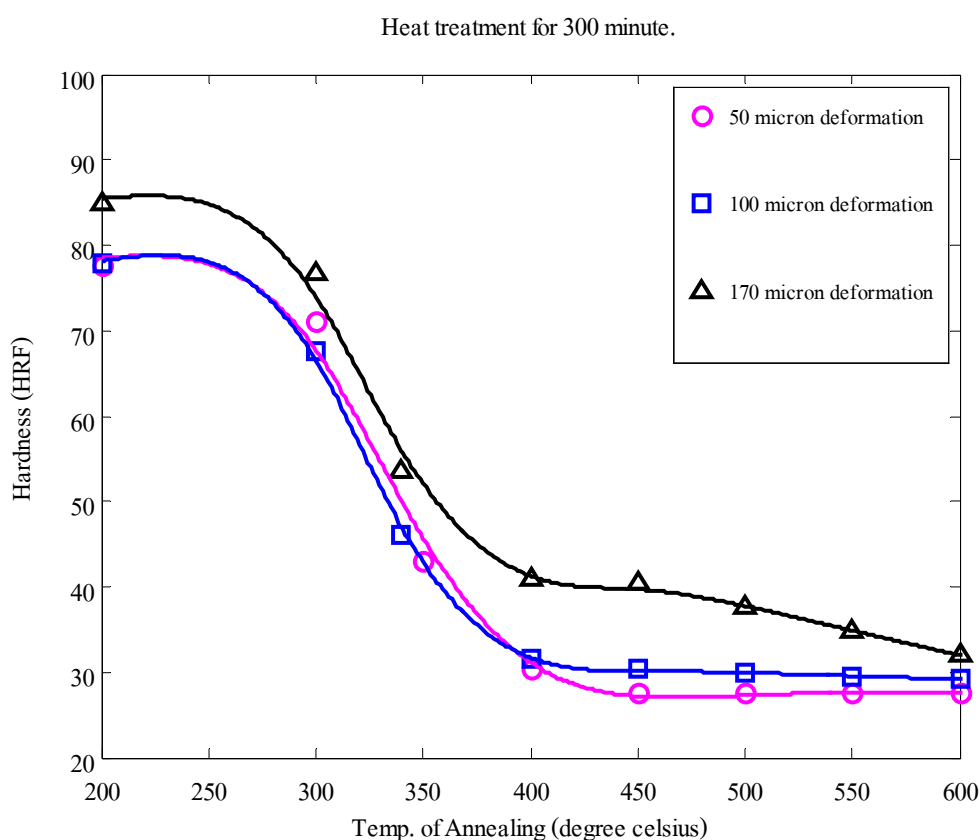


รูปที่ 4.16 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิการอบและค่าความแข็งในเวลา 60 นาที

ในช่วงที่สองของการอบอ่อนจะสังเกตเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิการอบเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อย ค่าความแข็งวัสดุก็จะลาดเอียงลงมาก่อนข้างฉับพลัน สังเกตได้จากเส้นกราฟที่มีความชันค่อนข้างสูง ซึ่งในช่วงที่สองนี้จะสัมพันธ์กันกับความยาวของเส้นกราฟในช่วงแรกโดยตรง โดยจะพบว่าประเด็นที่มีความยาวของเส้นกราฟในช่วงแรกสั้น การลดลงของความแข็งอย่างค่อนข้างฉับพลันก็จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่าประเด็นที่มีความยาวของเส้นกราฟในช่วงแรกยาว

ช่วงสุดท้ายของการอบอ่อนจะเป็นช่วงที่เกิดขึ้นหลังจากที่การลดลงของความแข็งอย่างค่อนข้างฉับพลันสิ้นสุดลง โดยจะพบว่าเมื่ออุณหภูมิการอบเพิ่มขึ้นค่าความแข็งของวัสดุก็จะเริ่มไม่มีการเปลี่ยนแปลงหรือมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะค่อยๆ ลาดเอียงลงไป ถึงแม้ว่าจะเพิ่มอุณหภูมิการอบขึ้นไปเรื่อยๆ ก็ตาม

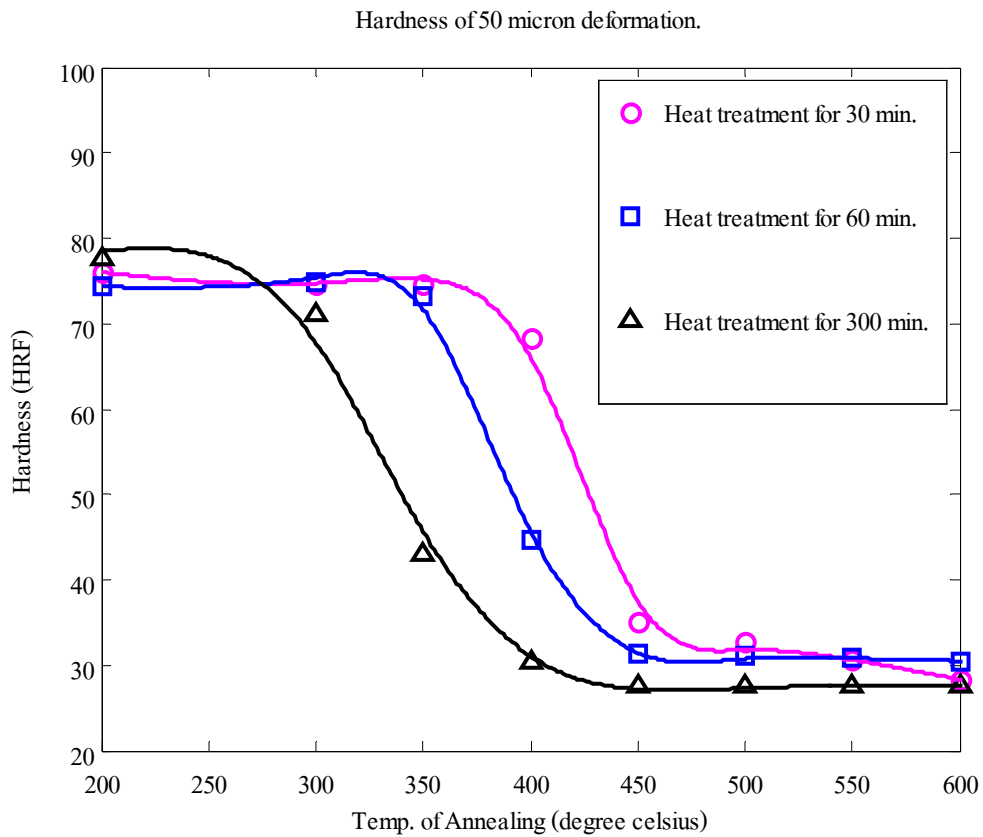
จากผลการทดลองอบปะเก็นทองแดงที่ใช้แล้วด้วยความร้อน นอกจากจะพบว่าแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของเส้นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการอบอ่อนกับค่าความแข็งของวัสดุ จะมีความคล้ายคลึงกันทั้งสามช่วงดังได้กล่าวไว้แล้ว ซึ่งการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวนี้ให้ผลที่สอดคล้องกับผลการทดลองของ Svetlana Nestorovic, 2003 (ดังรายละเอียดในรูปที่ 2.8) และเมื่อพิจารณาร่วมกันกับรูปที่ 2.12 จะพบว่าการเปลี่ยนแปลงทั้งสามช่วงดังกล่าวก็คือกระบวนการย่อยๆของการอบอ่อนนั่นเอง โดยในช่วงแรกเรียกว่า กระบวนการอบคืนตัว หรือการอบคลายความเครียด ถัดมาคือกระบวนการเกิดผลึกใหม่ และสุดท้ายคือการ โตขึ้นของขนาดผลึกใหม่



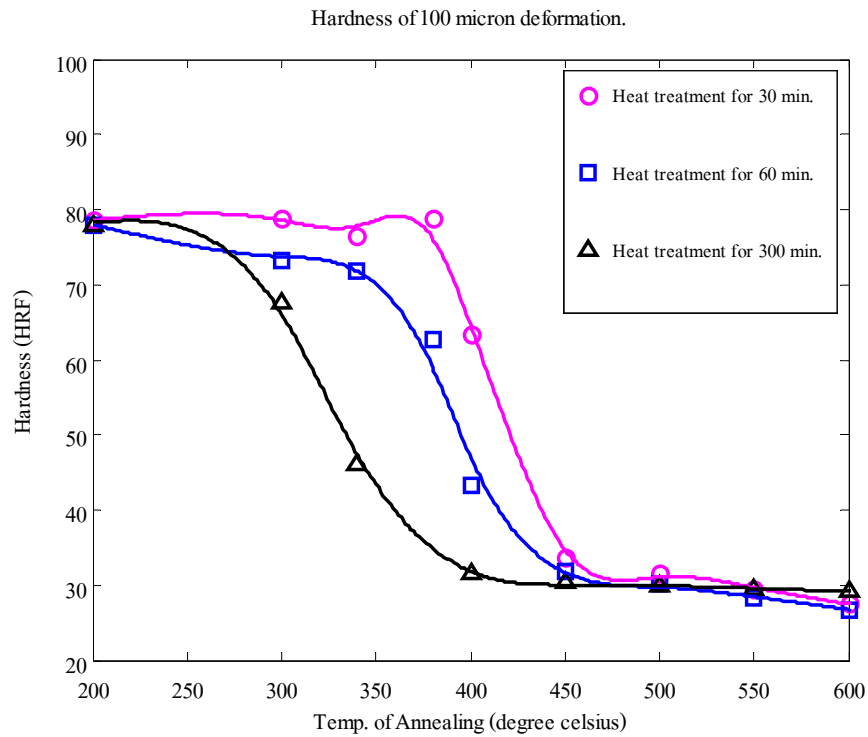
รูปที่ 4.17 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิการอบและค่าความแข็งในเวลา 300 นาที

จากรูปที่ 4.15 ถึง 4.17 ซึ่งเป็นผลการทดลองโดยกำหนดให้เวลาในการอบอ่อนคงที่ แต่อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแตกต่างกันไป จะพบว่าปะเก็นทองแดงที่มีความลึกของรอยกดมาก จะมีช่วงของกระบวนการอบคืนตัวสั้นและส่งผลให้อุณหภูมิเริ่มต้นของกระบวนการเกิดผลึกใหม่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่าปะเก็นที่มีความลึกของรอยกดน้อย และนอกจากนั้นเมื่อกระบวนการเกิดผลึกใหม่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำย่อมทำให้กระบวนการเกิดผลึกใหม่มีจุดสิ้นสุดของกระบวนการที่อุณหภูมิต่ำ

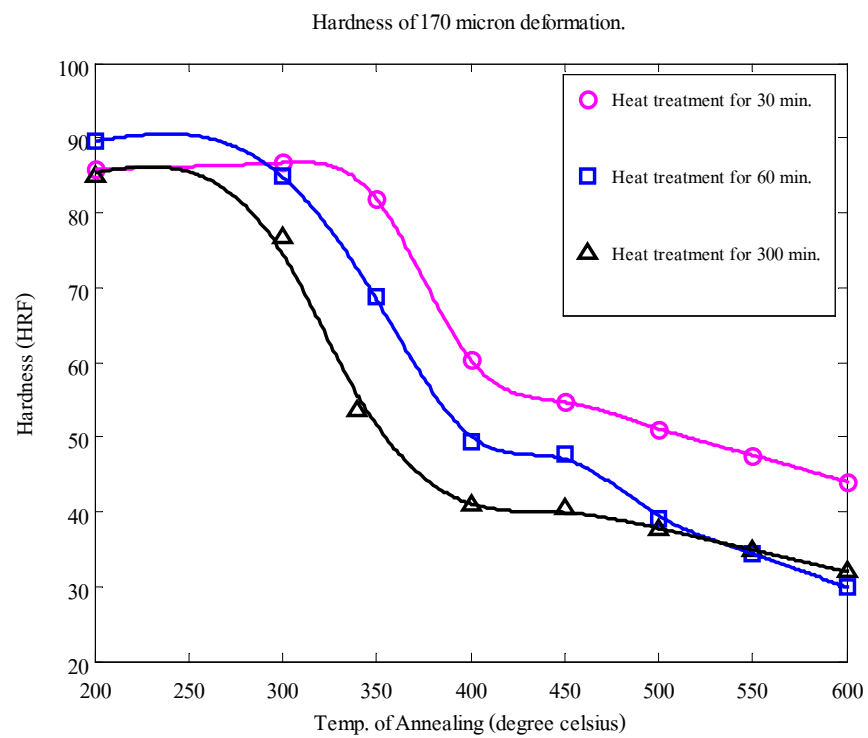
ด้วยเช่นกัน ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนจากรูปที่ 4.15 ซึ่งสอดคล้องกับแผนภูมิแสดงผลของเปอร์เซ็นต์การขึ้นรูปยื่นต่อกระบวนการเกิดผลึกใหม่ โดย Charlie R. Brooks, 1997 ในรูปที่ 2.14 ส่วนในรูปที่ 4.16 และ 4.17 จะไม่เห็นปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้ชัดเจนนัก ทั้งนี้ อาจเกิดจากการวัดค่าความแข็งและความลึกของรอยกดที่ไม่เท่ากันถึงแม้จะเป็นรอยกดบนปะเก็นชั้นเดียวกันก็ตาม



รูปที่ 4.18 อุณหภูมิการอบและค่าความแข็งของปะเก็นที่มีความลึกของรอยกด 50 μm



รูปที่ 4.19 อุณหภูมิการอบและค่าความแข็งของปะเก็นที่มีความลึกของรอยกด 100 μm



รูปที่ 4.20 อุณหภูมิการอบและค่าความแข็งของปะเก็นที่มีความลึกของรอยกด 170 μm

การพิจารณาผลการทดลองในรูปที่ 4.18 ถึง 4.20 ซึ่งเป็นผลจากการทดลองโดยเลือกเอาปะเก็นที่มีความลึกของรอยกดเท่ากัน มาอบอ่อนโดยใช้อุณหภูมิในการอบแตกต่างกันไป จะพบว่าปะเก็นที่ใช้เวลาในการอบมาก จะทำให้ช่วงของกระบวนการอบคืนตัวสั้นและทำให้กระบวนการเกิดผลึกใหม่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่าปะเก็นที่ใช้เวลาในการอบน้อย และนอกจากนั้นเมื่อกระบวนการเกิดผลึกใหม่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำย่อมทำให้กระบวนการเกิดผลึกใหม่มีจุดสิ้นสุดที่อุณหภูมิต่ำด้วยเช่นกัน ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับแผนภูมิแสดงผลของเวลาในการอบอ่อนต่อกระบวนการเกิดผลึกใหม่ โดย Charlie R. Brooks, 1997 ในรูปที่ 2.13 และจากผลการทดลองนี้เองที่สามารถนำไปสู่แนวทางที่เหมาะสมสำหรับการอบอ่อนปะเก็นทองแดง โดยจากสมมติฐานเมื่อนำปะเก็นไปทำการบำบัดด้วยกระบวนการทางความร้อนที่อุณหภูมิและเวลาอย่างเหมาะสม จนกระทั่งเกิดกระบวนการเกิดผลึกใหม่ขึ้นอย่างสมบูรณ์จะสามารถทำให้โครงสร้างและคุณสมบัติเชิงกลต่างๆ ที่เปลี่ยนแปลงไป พื้นคืนสภาพสู่ภาวะเดิมและพร้อมที่จะสามารถใช้งานได้อีกครั้ง ซึ่งเมื่อทำการวิเคราะห์จากผลการทดลองในรูปที่ 4.18 ถึง 4.20 จึงพบว่าที่อุณหภูมิ 400 °C เวลาในการอบ 300 นาที เป็นสถานะที่กระบวนการเกิดผลึกใหม่สามารถเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์กับปะเก็นทุกระดับความลึกของรอยกดที่เกิดขึ้น ดังนั้นสถานะดังกล่าวจึงเป็นสถานะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับใช้ในการอบอ่อนปะเก็นทองแดงที่ใช้งานแล้วต่อไป

4.3 การทดสอบประสิทธิภาพปะเก็นที่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อน

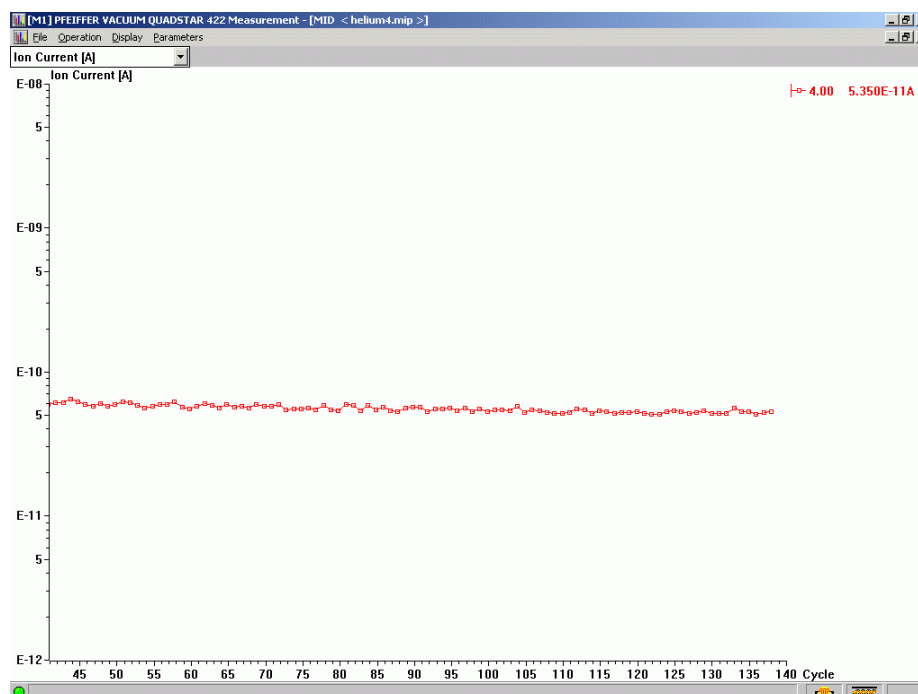
4.3.1 ผลจากการสูมตัวอย่างปะเก็นที่ใช้แล้วมาทำการทดสอบประสิทธิภาพ

ในการทดสอบประสิทธิภาพของปะเก็นที่ผ่านการอบอ่อนมาแล้วนั้น จะใช้อุปกรณ์และขั้นตอนเดียวกันกับการทดสอบประสิทธิภาพของปะเก็นทองแดงจากการสูมตัวอย่างดังกล่าวไว้แล้วในบทที่ 3 โดยมีเงื่อนไขการพิจารณาหลักๆ คือความสามารถของปะเก็นในการรักษาระดับความดันภายในห้องสุญญากาศที่ 10^{-7} Torr หรือน้อยกว่าได้ ดังรูปที่ 4.21 โดยในภาพจะเป็นค่าความดันที่อ่านได้ในขณะทดสอบซึ่งค่าดังกล่าวจะต้องเป็นค่าที่สม่ำเสมอ ไม่เกิดการแกว่งตัวจนมาสามารถพิจารณาได้ โดยใช้แรงบิดในการขันอัดสลักเกลียวและแป้นเกลียวขนาด M6×1 จำนวน 6 ตัวไม่เกิน 110 kg-cm. นอกจากความความดันและค่าแรงบิดแล้ว การพิจารณาประสิทธิภาพยังต้องคำนึงถึงค่า Ion Current จากเครื่องวิเคราะห์ก๊าซที่เหลืออยู่ในระบบจะต้องไม่เกิน 10^{-10} A ซึ่งในการทดสอบนี้ได้ใช้แก๊สฮีเลียมเป็นแก๊สทดสอบหาการรั่วซึมเข้าสู่ระบบ โดยเครื่องวิเคราะห์ก๊าซที่เหลืออยู่จะทำการตรวจจับปริมาณแก๊สฮีเลียมในระบบแล้วแสดงผลออกมาในรูปของปริมาณไฟฟ้า ดังรูปที่ 4.22 ซึ่งเป็นผลการทดสอบดังกล่าว โดยในรูปที่เห็นนั้นแกน X จะเป็นรอบเวลา (Cycle Time) ในการวัดค่า Ion Current ซึ่งสามารถตั้งค่าได้ ส่วนแกน Y จะเป็นค่า Ion

Current มีหน่วยเป็น A และที่มุมบนด้านขวาของรูปจะเป็นค่า Ion Current ที่อ่านได้ ณ เวลานั้นๆ (Real Time) โดยในรูปอ่านค่าได้ 5.30×10^{-11} A



รูปที่ 4.21 ภาพแสดงค่าความดันที่อ่านได้ในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.22 ค่า Ion Current ของแก๊สฮีเลียมจากเครื่องวิเคราะห์ก๊าซที่เหลือในระบบสุญญากาศ

ผลจากการสุ่มตัวอย่างปะเก็นที่ใช้แล้วมาทำการทดสอบประสิทธิภาพโดยที่ยังไม่ได้ผ่านการบำบัดแต่อย่างใด พบว่าสามารถใช้งานได้ร้อยละ 20 แต่เมื่อทดสอบกับปะเก็นที่ใช้แล้ว โดยให้ผ่านกระบวนการทางความร้อน ที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 300 นาที พบว่าสามารถใช้งานได้ร้อยละ 87.5 ซึ่งจากผลการวิจัยดังกล่าวสามารถให้ผลเป็นที่น่าพอใจเพราะสามารถเพิ่มความเชื่อถือให้กับปะเก็นทองแดงที่ใช้แล้ว และเมื่อพิจารณาต่อไปในเรื่องของต้นทุนในการบำบัดด้วยความร้อน การทำความสะอาดผิวปะเก็นด้วยสารเคมี ตลอดจนการทดสอบประสิทธิภาพของปะเก็นที่ผ่านการบำบัดแล้ว เพื่อนำผลไปเปรียบเทียบกับราคาต้นทุนของปะเก็นทองแดง OFHC โดยมีรายละเอียดต่างๆ ของการคิดต้นทุนดังต่อไปนี้

1. ต้นทุนค่าไฟฟ้า

1.1 เตอบ 5 ชั่วโมง 6.5 kW-h (หน่วย) ต่อปะเก็น 10 ชิ้น คิดเป็น	6.50 หน่วย
ค่าพลังงานไฟฟ้าต่อหน่วย 1.9712 บาท เป็นเงิน	12.81 บาท
ค่าบริการ 225.17 บาท (225.17+12.81) เป็นเงิน	237.98 บาท
ค่า Ft ต่อหน่วย 0.4328 บาท (0.4328 x 12.81) เป็นเงิน	5.55 บาท
ภาษี 7 % (0.07 x (12.81+237.98+5.55)) เป็นเงิน	17.94 บาท
ค่าไฟฟ้ารวม	274.28 บาท
ค่าไฟฟ้าต่อชิ้น (274.28/10)	27.42 บาท
1.2 เครื่องวัดความหยาบผิว 1 ชั่วโมง 0.2 kW-h ต่อปะเก็น 40 ชิ้น	0.20 หน่วย
ค่าพลังงานไฟฟ้าต่อหน่วย 1.9712 บาท เป็นเงิน	0.39 บาท
ค่าบริการ 225.17 บาท (225.17+0.39) เป็นเงิน	225.56 บาท
ค่า Ft ต่อหน่วย 0.4328 บาท (0.4328 x 0.39) เป็นเงิน	0.17 บาท
ภาษี 7 % (0.07 x (0.39+225.56+0.17)) เป็นเงิน	15.83 บาท
ค่าไฟฟ้ารวม	241.96 บาท
ค่าไฟฟ้าต่อชิ้น (241.96/40)	6.05 บาท
1.3 ป้อนสูญญากาศและ RGA 1 ชั่วโมง 1.2 kW-h ต่อปะเก็น 5 ชิ้น	1.20 หน่วย
ค่าพลังงานไฟฟ้าต่อหน่วย 1.9712 บาท เป็นเงิน	2.37 บาท
ค่าบริการ 225.17 บาท (225.17+2.37) เป็นเงิน	227.54 บาท
ค่า Ft ต่อหน่วย 0.4328 บาท (0.4328 x 2.37) เป็นเงิน	1.02 บาท
ภาษี 7 % (0.07 x (2.37+227.54+1.02)) เป็นเงิน	16.16 บาท
ค่าไฟฟ้ารวม	247.09 บาท
ค่าไฟฟ้าต่อชิ้น (247.09/5)	6.18 บาท

หมายเหตุ ค่าไฟฟ้าอัตราประเภทที่ 6 ส่วนราชการและองค์กรที่ไม่แสวงหากำไร กรณีอัตราปกติ
การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

2. ต้นทุนทางเคมี

2.1 ค่าสารเคมีในการทำความสะอาดผิวปะเก็นจำนวน 12 ชิ้น

กรดไนตริก (535 บาท/2.5 L) ใช้ 250 ml เป็นเงิน	53.50	บาท
กรดซัลฟูริก (415 บาท/2.5 L) ใช้ 600 ml เป็นเงิน	99.60	บาท
กรดไฮโดรคลอริก (380 บาท/2.5 L) ใช้ 30 ml เป็นเงิน	3.04	บาท
น้ำกลั่น (8 บาท/1 L) ใช้ 130 ml เป็นเงิน	1.04	บาท
ค่าสารเคมีรวม	157.18	บาท
ค่าสารเคมีต่อชิ้น (157.18/12)	13.10	บาท

หมายเหตุ สํารวจราคาจากบริษัท แบนด์เทรคดิง จำกัด เมื่อวันที่ 5 มกราคม 2549 ซึ่งเป็นบริษัทที่
ให้ราคาต่ำที่สุดจากการสำรวจทั้งสิ้น 4 ราย

จากรายละเอียดของการคิดต้นทุนในการนำกลับมาใช้งานซ้ำของปะเก็นทองแดง OFHC ที่ใช้แล้ว จะพบว่าราคาต้นทุนต่อชิ้นมีค่าเท่ากับ 52.75 บาท จากนั้นเมื่อเปรียบเทียบกับราคาต้นทุนที่จำเป็นต้องใช้ในการนำเข้าปะเก็นทองแดง OFHC จากต่างประเทศ โดยสำรวจจาก www.mdcvacuum.com ซึ่งเป็นบริษัทผลิตอุปกรณ์เกี่ยวกับระบบสุญญากาศในประเทศอังกฤษและเคยถูกส่งเข้ามาใช้งาน โดยคิดอัตราแลกเปลี่ยนเงินตราระหว่างประเทศของกรมศุลกากรเมื่อวันที่ 4 มกราคม 2549 พบว่าราคาต้นทุนต่อชิ้นในการนำเข้าปะเก็นทองแดง OFHC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 48 mm. มีค่าเท่ากับ 123.01 บาท

ดังนั้นในการวิจัยนี้นอกจากจะได้แสดงให้เห็นว่าร้อยละ 87.5 ของปะเก็นทองแดงที่ใช้งานแล้ว สามารถนำกลับมาใช้งานซ้ำได้อีกครั้ง โดยมีราคาต้นทุนในการนำกลับมาใช้ซ้ำต่อชิ้น 52.75 บาท สามารถประหยัดค่าใช้จ่ายลงได้ 70.26 บาทต่อชิ้น ซึ่งเป็นการลดการนำเข้าปะเก็นทองแดงจากต่างประเทศได้ อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าราคาต้นทุนในการนำกลับมาใช้ซ้ำต่อชิ้นจะต่ำกว่าราคาต้นทุนของปะเก็นใหม่ แต่ปัจจัยเสี่ยงต่อการใช้ปะเก็นทองแดงที่ผ่านการบำบัดแล้วไม่ได้ขึ้นกับราคาเพียงอย่างเดียว โดยยังคงมีปะเก็นทองแดงที่ผ่านการบำบัดแล้วร้อยละ 12.5 ซึ่งไม่สามารถใช้งานได้ และการที่จะจำแนกปะเก็นทองแดงที่ผ่านการบำบัดแล้วว่าสามารถใช้งานได้หรือไม่นั้นยังคงเป็นไปได้ยาก โดยในการวิจัยที่ผ่านมา หลังจากปะเก็นผ่านกระบวนการอบอ่อนและล้างทำความสะอาดผิวแล้ว จะไม่สามารถทราบถึงประสิทธิภาพของปะเก็นทองแดงได้เลย จำเป็นต้องทำการทดสอบประสิทธิภาพโดยนำไปใช้จริงในระบบสุญญากาศเท่านั้น ซึ่งอาจจะต้องมีการศึกษา

เพิ่มเติมต่อไปถึงการจำแนกปะเก็นทองแดงที่ผ่านการบำบัดแล้วว่าสามารถใช้งานได้หรือไม่ รวมไปถึงความลึกของรอยกัดก็จำเป็นต้องพิจารณาด้วย โดยอาจจะต้องทำการศึกษาว่าขนาดความลึกมากที่สุดเท่าใดที่ยังคงสามารถใช้กระบวนการทางความร้อนในการบำบัดได้

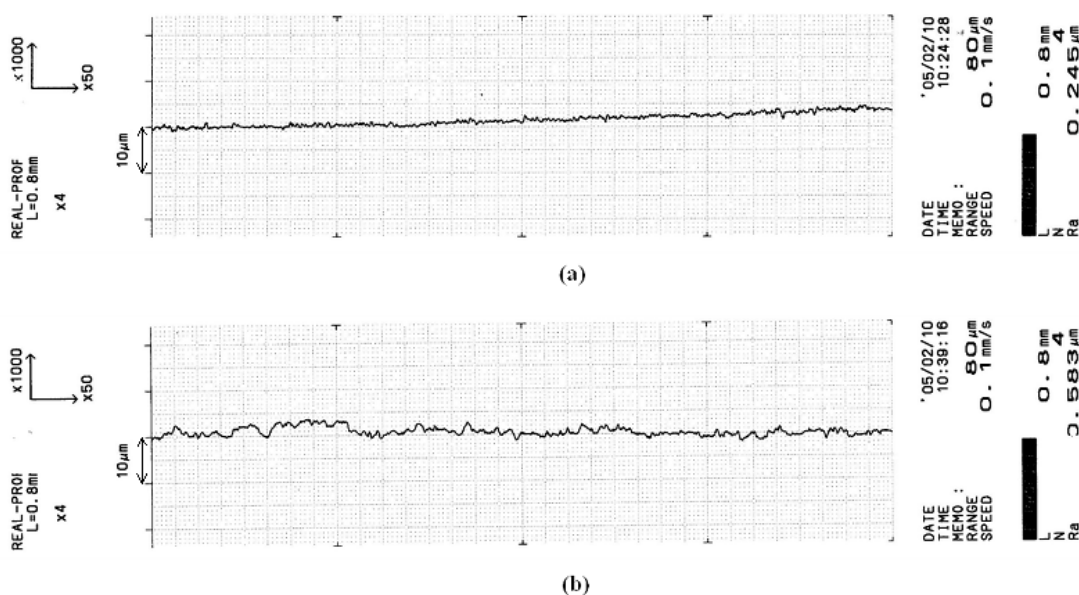
4.3.2 ปัจจัยของความหนาและความหยาบผิวของปะเก็น

ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของปะเก็นทองแดงนั้นมีมากมาย และสิ่งที่จะนำมาพิจารณาต่อไปนี้เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลโดยตรงนั่นคือ ความหนาและความหยาบผิวของปะเก็น ทั้งนี้เนื่องมาจากการอบอ่อนปะเก็นนั้นกระทำในเตาอบที่สัมผัสกับอากาศ (ดังภาพที่ 3.3) ทำให้ปะเก็นทองแดงที่ผ่านกระบวนการอบอ่อนมาแล้วนั้น เกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศเป็นสารประกอบสีดำ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องนำปะเก็นที่ผ่านการอบอ่อนมาแล้ว ผ่านกระบวนการล้างทำความสะอาดผิวเพื่อกำจัดสารประกอบสีดำดังกล่าวและสิ่งสกปรกอื่นๆ ที่อาจจะติดอยู่ที่ปะเก็น ก่อนที่จะนำปะเก็นไปทำการทดสอบหาประสิทธิภาพต่อไป กระบวนการล้างทำความสะอาดจะใช้วิธีการทางเคมีโดยมีกรดไนตริก 250 ml กรดซัลฟูริก 600 ml และกรดไฮโดรคลอริก 20 ml เจือจางกับน้ำ 130 ml แล้วนำปะเก็นลงแช่ไว้ในสารละลายดังกล่าวจนสะอาด ซึ่งเวลาที่ใช้ขึ้นอยู่กับปริมาณสารประกอบว่าจะมากน้อยเพียงใด หลังจากผ่านกระบวนการดังกล่าวแล้ว พบว่าความหนาโดยเฉลี่ยของปะเก็นมีค่าเท่ากับ 2.006 mm. ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับความหนาเฉลี่ยเดิมคือ 2.033 mm. ฉะนั้นจึงกล่าวได้ว่าผลจากกระบวนการล้างทำความสะอาดด้วยวิธีการทางเคมีนั้นจะทำให้ความหนาโดยเฉลี่ยของปะเก็นลดลง 0.027 mm. คิดเป็น 1.328 % ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่าการเปลี่ยนแปลงความหนาของปะเก็นทองแดง

ลำดับ	ความหนาของปะเก็น		
	ก่อนการอบ(mm.)	หลังการอบและทำความสะอาดแล้ว(mm.)	ผลต่าง(mm.)
1	2.03	2.01	0.02
2	2.01	2.00	0.01
3	2.03	1.98	0.05
4	2.02	2.00	0.02
5	2.02	2.00	0.02
6	2.04	1.99	0.05
7	2.00	2.00	0.00
8	2.14	2.10	0.04
9	2.12	2.05	0.07
10	2.14	2.09	0.05
11	2.13	2.10	0.03
12	2.00	1.97	0.03
13	1.99	1.99	0.00
14	2.01	1.99	0.02
15	2.00	1.98	0.02
16	2.00	2.00	0.00
17	2.00	1.99	0.01
18	2.03	1.98	0.05
19	2.04	2.02	0.02
20	2.01	1.98	0.03
21	2.02	1.99	0.03
22	2.03	2.00	0.03
23	1.99	1.99	0.00
24	1.99	1.98	0.01
เฉลี่ย	2.033	2.006	0.027

ส่วนในกรณีของความหยาบผิวนั้น ผลที่ได้จากการวัดความหยาบผิวของปะเก็นก่อนและหลังการอบอ่อน โดยเครื่องวัดความหยาบผิววัสดุซึ่งปรากฏผลดังตัวอย่างในภาพที่ 4.23 และเมื่อคำนวณเฉลี่ยพบว่า ค่าความหยาบผิวโดยเฉลี่ยก่อนการอบอ่อนเท่ากับ $0.290 \mu\text{m}$ หลังการอบอ่อนและล้างทำความสะอาดแล้วมีค่าเท่ากับ $0.628 \mu\text{m}$ ฉะนั้นจึงกล่าวได้ว่าผลจากการอบอ่อนและกระบวนการล้างทำความสะอาดด้วยวิธีการทางเคมีนั้น ทำให้ความหยาบผิวของปะเก็นเพิ่มขึ้น $0.338 \mu\text{m}$ รายละเอียดดูได้จากภาพผนวก ง.



รูปที่ 4.23 ตัวอย่างค่าความหยาบผิวของปะเก็น (a) ความหยาบผิวก่อนการอบอ่อน $0.245 \mu\text{m}$
(b) ความหยาบผิวหลังการอบอ่อนและผ่านการล้างทำความสะอาดแล้ว $0.583 \mu\text{m}$

จากผลการทดสอบดังกล่าวทำให้สรุปได้ว่าผลของความหนาและความหยาบผิวของปะเก็น ไม่ได้มีการเปลี่ยนแปลงมากนัก โดยเฉพาะความหนาซึ่งมีค่าลดลงน้อยมาก ประมาณ 1.305 % ของความหนาเดิม แต่ในกรณีของความหยาบผิวนั้น หากเปรียบเทียบกันจะพบว่าหลังการอบอ่อนและล้างทำความสะอาดแล้วจะมีค่าเพิ่มขึ้นมาก (จาก $0.290 \mu\text{m}$ เป็น $0.628 \mu\text{m}$) หรือประมาณ 216.75 % การเพิ่มขึ้นดังกล่าวเป็นผลมาจากการกัดผิวของสารเคมีที่ใช้ในการล้างทำความสะอาดปะเก็นที่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อนมาแล้ว แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาจากค่าความหยาบผิวที่ต้องการสำหรับปะเก็นทองแดงแบบ Conflat Seal ซึ่งระบุไว้ที่ $32 \mu\text{-inch}$ หรือ $0.813 \mu\text{m}$ (A. Roth, 1992, p339) จะพบว่าการเพิ่มขึ้นของความหยาบผิวดังกล่าวนั้นยังอยู่ในช่วงที่ไม่เกินค่าความหยาบผิวที่ต้องการสำหรับปะเก็นทองแดงแบบ Conflat Seal

บทที่ 5

บทสรุป

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 ปะเก็นทองแดงที่ใช้งานในระบบสุญญากาศในบริเวณข้อต่อแบบ Conflat Seal จะเกิดการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรเป็นรอยกดรูปสามเหลี่ยมด้านไม่เท่า การเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรดังกล่าวมีลักษณะที่คล้ายคลึงทั้งหมดแต่มีความลึกที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรไม่เท่ากัน โดยมีระดับความลึกตั้งแต่ 50 μm ถึง 170 μm นอกจากนี้แล้วลำดับและขนาดของแรงที่ไม่สัมพันธ์กันในการขันอัดหน้าแปลนเข้าด้วยกันจะทำให้หน้าแปลนลาดเอียงไปด้านใดด้านหนึ่ง ซึ่งส่งผลทำให้ความลึกของรอยกดบนปะเก็นด้านเดียวกันมีความลึกไม่เท่ากัน

5.1.2 การเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรที่เห็นเป็นรอยกดนั้นเกิดขึ้นบนเนื้อปะเก็นเฉพาะบางส่วนเท่านั้น ซึ่งจะทำให้ความแข็งแรงบริเวณรอยกดดังกล่าวมีค่าความแข็งแรงมากกว่าบริเวณทั่วไปบนปะเก็น และจะมีค่าความแข็งแรงสูงขึ้นตามความลึกของรอยกดบนปะเก็น

5.1.3 ผลการคำนวณจากโปรแกรม Solidworks และ COSMOS สรุปได้ว่าการกระจายตัวของความเค้นบนปะเก็นจะเกิดขึ้นสูงสุดที่บริเวณรอยกด จนทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร การเปลี่ยนรูปในทิศทางความหนาของปะเก็นมีค่าการเปลี่ยนรูปโดยเฉลี่ยทั้งพื้นผิววงในและวงนอกของปะเก็นมีค่าน้อยมาก

5.1.4 ผลที่ได้จากการทดสอบความแข็งแรงและการคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์การขึ้นรูปเย็นของปะเก็นที่เกิดขึ้น ให้ผลที่สอดคล้องและเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับผลการทดสอบของ The Copper Development Association, UK

5.1.5 เมื่อนำปะเก็นทองแดงที่ใช้แล้วไปทำการบำบัดด้วยกระบวนการทางความร้อนที่อุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสม จนกระทั่งบริเวณรอยกดเกิดกระบวนการเกิดผลึกใหม่อย่างสมบูรณ์ ซึ่งกระบวนการอบอ่อนจะทำให้ความแข็งแรงที่เปลี่ยนแปลงไป พื้นผิวสภาพสู่ภาวะเดิมและพร้อมที่จะสามารถใช้งานอีกครั้ง โดยสภาพที่เหมาะสมที่สุดทั้งอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการอบอ่อนปะเก็นที่ใช้แล้วคือ 400 °C เป็นเวลา 300 นาที ซึ่งสามารถใช้ได้กับปะเก็นทุกระดับความลึกของรอยกดที่เกิดขึ้น

5.1.6 ผลจากการสุ่มตัวอย่างปะเก็นที่ใช้แล้วมาทำการทดสอบประสิทธิภาพโดยที่ยังไม่ได้ผ่านการบำบัดแต่อย่างใดพบว่า สามารถใช้งานได้ร้อยละ 20 แต่เมื่อทดสอบกับปะเก็นที่ใช้แล้ว โดยให้ผ่านกระบวนการทางความร้อน ที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 300 นาที พบว่าสามารถใช้งานปะเก็นได้ร้อยละ 87.5

5.1.7 ผลของความหนาและความหยาบผิวของปะเก็น ก่อนและหลังการอบอ่อนไม่ได้มีการเปลี่ยนแปลงมากนัก โดยความหนามีค่าลดลงน้อยมาก ประมาณ 1.328 % ของความหนาเดิม แต่ในกรณีของความหยาบผิวนั้น เมื่อเปรียบเทียบกันแล้วสรุปได้ว่า หลังการอบอ่อนและล้างทำความสะอาดแล้วจะมีค่าความหยาบผิวเพิ่มขึ้นจาก 0.290 μm เป็น 0.628 μm แต่การเพิ่มดังกล่าวยังอยู่ในช่วงของค่าความหยาบผิวที่ยอมรับได้สำหรับปะเก็นทองแดงแบบ Conflat Seals ซึ่งระบุไว้ที่ 0.813 μm

5.2 ข้อจำกัดของการวิจัย

5.2.1 การบำบัดด้วยความร้อนในงานวิจัยนี้ใช้เตาอบแบบธรรมดาซึ่งสัมผัสกับอากาศโดยตรงทำให้ทองแดงเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศ ณ อุณหภูมิสูง ส่งผลให้เกิดสนิมทองแดงและสิ่งสกปรกอื่นๆ บนปะเก็น จึงจำเป็นต้องใช้กระบวนการทางเคมีที่เหมาะสมช่วยในการกำจัดคราบสนิมทองแดงและสิ่งสกปรกอื่นๆ ออกไป แต่ถ้าหากใช้เตาอบแบบไม่สัมผัสกับอากาศ จะทำให้ความหนาและความหยาบผิวของปะเก็นก่อนและหลังการอบไม่มีการเปลี่ยนแปลงหรือมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ทั้งนี้เนื่องจากทองแดงไม่เกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศส่งผลให้ไม่ต้องใช้กระบวนการทางเคมีเข้ามาเกี่ยวข้อง

5.2.2 บริเวณที่เป็นรอยกดบนปะเก็นนั้นทำให้คุณสมบัติเชิงกลต่างๆ เปลี่ยนแปลงไปและเนื่องจากเป็นบริเวณที่เล็กมาก คุณสมบัติเชิงกลที่เหมาะสมและสะดวกต่อการทดสอบมากที่สุดคือความแข็ง ดังนั้นในการศึกษานี้จึงจำเป็นต้องศึกษาความแข็งของวัสดุและเปอร์เซ็นต์การขึ้นรูปเย็น ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สามารถยอมรับได้ในการศึกษาเชิงมหภาคทั่วไป

5.3 ข้อเสนอแนะในการวิจัยต่อไป

จากสิ่งที่พบจากการทดลองของงานวิจัยที่ผ่านมา ทำให้ทราบว่าสมมติฐานต่างๆ ที่ตั้งไว้สามารถพิสูจน์ได้ ซึ่งดูได้จากการที่สามารถใช้งานปะเก็นทองแดงได้อีกครั้ง ถึงแม้จะยังไม่ครอบคลุมทั้งหมด ซึ่งยังคงมีบางส่วนที่ไม่สามารถใช้งานได้ ผลดังกล่าวอาจจะมาจากปัจจัยอื่นๆ ที่มีได้พิจารณาซึ่งจะได้ให้ข้อเสนอแนะเพื่อให้การวิจัยเกี่ยวกับเรื่องนี้เกิดความสมบูรณ์ต่อไป

5.3.1 ทำการศึกษาในเชิงโครงสร้างของโลหะ เนื่องจากการวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเชิงมหภาคทั่วไป ไม่ได้รวมไปถึงการศึกษาในเชิงโครงสร้างของโลหะซึ่งถือว่าเป็นการศึกษาในเชิงจุลภาค โดยในการศึกษาเชิงจุลภาคนั้นสามารถพิจารณาปัจจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องจนสามารถระบุได้อย่างชัดเจนว่ากระบวนการเกิดผลึกใหม่นั้นเกิดขึ้นโดยสมบูรณ์เพียงใด เช่นระบุได้จากขนาดของเกรน การทราบถึงสิ่งเจือปนที่อาจจะเกิดขึ้นขณะทำการอบอ่อน เป็นต้น

5.3.2 ทำการทดสอบกับปะเก็นทองแดงขนาดอื่นๆ เนื่องจากในการวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบกับปะเก็นทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 48 แล้วพบว่าส่วนใหญ่สามารถใช้งานได้ ดังนั้นเพื่อเป็นการพิสูจน์สมมติฐานของงานวิจัยและนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับจึงน่าจะทดสอบกับปะเก็นทองแดงที่มีขนาดหรือปะเก็นทองแดงที่มีรูปแบบการกันรั่วแบบอื่นๆ ด้วย โดยคาดว่าผลการทดสอบกับปะเก็นทองแดงขนาดอื่นๆ จะได้ผลที่ไม่แตกต่างกันมากนัก แต่ในกรณีปะเก็นทองแดงที่มีรูปแบบการกันรั่วแบบอื่นๆ คาดว่าจะได้ผลที่ไม่แตกต่างกันพอสมควร ทั้งนี้เนื่องมาจากลักษณะของรอยกวดที่ไม่เหมือนกัน

5.3.3 ทดลองใช้สารเคมีอื่นในการล้างทำความสะอาด เนื่องจากกระบวนการทางเคมีที่ใช้ในการวิจัยนี้ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงต่อสภาพผิวของทองแดง ดังนั้นหากมีสารเคมีอื่นที่เหมาะสมกว่าเช่น กรดอะซิติก ผลที่ได้อาจจะทำให้ความหยาบผิวของปะเก็นก่อนและหลังการอบไม่มีการเปลี่ยนแปลงหรือมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก

5.3.4 การศึกษาเพิ่มเติมต่อไปถึงกระบวนการจำแนกปะเก็นทองแดงที่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อนมาแล้วว่าสามารถใช้งานได้หรือไม่ โดยไม่จำเป็นต้องทำการทดสอบใช้จริงในระบบสุญญากาศ เพราะนอกจากจะเป็นการเพิ่มความมั่นใจในประสิทธิภาพของปะเก็นที่ผ่านการบำบัดแล้ว ยังจะทำให้โอกาสในการใช้ซ้ำของปะเก็นทองแดงมีความเป็นไปได้สูงขึ้น รวมไปถึงสามารถลดค่าต้นทุนของการนำกลับมาใช้ซ้ำได้อีกด้วย อย่างไรก็ตามการศึกษาเพิ่มเติมถึงความลึกของรอยกวดบนปะเก็นก็จำเป็นต้องพิจารณาด้วย โดยอาจจะต้องทำการศึกษาว่าขนาดความลึกมากที่สุดเท่าใดที่ยังคงสามารถใช้กระบวนการทางความร้อนในการบำบัดได้

รายการอ้างอิง

- กนต์ธร ชำนิประศาสน์. (2543). **กลศาสตร์วัสดุขั้นสูง** (ฉบับปรับปรุง). สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- ชาญวุฒิ ตั้งจิตวิทยา และ สาโรช ฐิติเกียรติพงศ์ (2541). **วัสดุในงานวิศวกรรม**. กรุงเทพมหานคร: ซีเอ็ดยูเคชั่น.
- ตระการ ก้าวกสิกรรม, นาวาอากาศโท. (2521). **คู่มือปะเก็นแก๊สเก็ท(Gasket)**. กรุงเทพมหานคร: ซีเอ็ดยูเคชั่น.
- ทวี อิมพิทักษ์ และ เทพนารินทร์ ประพันธ์พัฒน์. (ม.ป.ป.). **วัสดุอุตสาหกรรม**. กรุงเทพมหานคร: ศูนย์ส่งเสริมอาชีพ.
- วริทธิ์ อิงภากรณ์และชาญ ถนัดงาน. (2544). การออกแบบเครื่องจักรกล. กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดยูเคชั่น.
- วิระพันธ์ สิทธิพงศ์. (2539). **โลหะวิทยากายภาพสำหรับวิศวกร ภาค1**. กรุงเทพมหานคร: นิยมวิทยา.
- สมิทซ์, เอฟ. วิลเลียม. (2539). **วัสดุวิศวกรรมเบื้องต้น เล่ม 1**. แปลโดย ชาตรี หล้าทอง, สุมาลี วงจันทร์และประสงค์ ศรีเจริญชัย. กรุงเทพมหานคร: แมคกรอ-ฮิล.
- สมิทซ์, เอฟ. วิลเลียม. (2541). **วัสดุวิศวกรรม**. แปลโดย แม้น อมรสิทธิ์ และสมชัย อัครทิวา. กรุงเทพมหานคร: แมคกรอ-ฮิล.
- Hall, Holowenko, Laughlin. (1982, 1961,1980). **ทฤษฎีและตัวอย่างโจทย์การออกแบบเครื่องจักรกล**. แปลโดย กรรมมันต์ ชูประเสริฐ, อนันต์ อภิษฐชาติและทวี งามวิไล. (2539).กรุงเทพมหานคร: แมคกรอ-ฮิล.
- ASM International. Handbook Committee. (1987). (Volume 4, **Heat Treating of Copper Alloys**). Materials Park, OH: ASM International.
- Bolton, W. (William). (1993). **Materials for Engineering**. Oxford ; Boston : Butterworth-Heinemann, 1994.
- Berman, A. (1992). **Vacuum Engineering Calculations, Formulas, and Solved Exercises**. California : Academic Press.
- Boon's MMD (ม.ป.ป.). **Annealing** (การอบอ่อน). [On-line]. Available: [http : // mmdboon . hypermart.net/annealing.pdf](http://mmdboon.hypermart.net/annealing.pdf)

- Cahn, R. W., Haasen, P., and Kramer E. J.(1996). **Materials Science and Technology** (Volume 8, Structure and Properties of Nonferrous Alloys). Amsterdam ; New York : North-Holland.
- Cahn, R. W., Haasen, P., and Kramer E. J.(1996). **Materials Science and Technology** (Volume 13, Structure and Properties of Composites). Amsterdam ; New York : North-Holland.
- Cahn, R. W., Haasen, P., and Kramer E. J.(1996). **Materials Science and Technology** (Volume 15, Processing of Metals and Alloys). Amsterdam ; New York : North-Holland.
- Callister, D. Williams Jr., (1996). **Materials Science and Engineering, An Introduction**, (Fourth Edition). Toronto: John Wiley and Sons.
- Chavez, K. L., and Hess, D. W. (2001). A Novel Method of Etching Copper Oxide Using Acetic Acid. In **Journal of The Electrochemical Society**, 148 (11) G640-G643.
- Chemical Engineering: University of New Brunswick. (2003). **Part II: Deformation, Hardness, and Recrystallization of Metals** [On-line]. Available: <http://www.unb.ca/che/Undergrad/lab/deformation.pdf>
- Daniel E. Czernik, (1976). **Gaskets Design, Selection, and testing**, New York: McGraw-Hill.
- Davis, J. R. (1998). **Prepared under the direction of The ASM International. Handbook Committee**, (Second Edition). Materials Park, OH: ASM International.
- Dechaumphai, P. (2004). Finite Element Method. In **Journal of Research in Engineering and Technology., Vol. 1** (pp 190-204). A Publication of Faculty of Engineering, Kasetsart University.
- E. Paul Degarmo. (2003). **Materials and Processes in Manufacturing**, (Nine Edition). USA: John Wiley and Sons.
- Fend, H. (1996). Progress in metal sealing techniques. In **Vacuum/volume47/number 6-8**. (pp 527-529). Great Britain : Elsevier Science.
- George Hees, William Eaton and Joseph Lech. (1956). The Knife Edge Vacuum Seal. In **Trans. AVS Nat. Vac. Symp. 1955, p. 75**. Pergamon Press: Oxford.
- Gonczy, J. D., Ferry, R. J., Nieman, R. C., and Roop, B. (1991). UHV Seal Studies for the Advanced Photon Source Storage Ring Vacuum System. In **Proceeding of the 1991 Particle Accelerator Conference**. (pp 2304-2306).

- Grant, A. F., Fell, B. D. (n.d.). **An Effective Cooling Arrangement for an Infrared Mirror Subject to High Heat Loads at the SRS** [On-line]. Available: http://www.astec.ac.uk/Preprint%20Articles/epac94/WRL-Cooling_Paper.pdf
- Green L. A., and Miles H. T. (1959). A dismantable vacuum joint suitable for bakeable glass vacuum system. In **J. Sci.**, **36**, **324**.
- Gupta, R. B. (2000). **Material Science & Processes**, (Tenth Edition). New Delhi: STM. SUMITRA HANDA.
- Heerden P. J. van. (1955). Metal gaskets for demountable vacuum system. In **Rev. Sci. Instr.**, **26**, **1131**.
- Hees G. W., Eaton W., and Lech J. (1956) The knife-edge vacuum seal. In **Trans. AVS Nat. Vac. Symp. 1955**. (pp 75). Pergamon Press, Oxford.
- Hilleret, N. (n.d.). **Leak Detection** [On-line]. Available: <http://www.cientificosaficionados.com/libros/CERN/vacio16-CERN.pdf>
- Holland L. (1961). Problem in the construction and operation of bakeable and non-bakeable vacuum systems. In **Trans. AVS Nat. Vac. Symp. 1960**. (pp 172). Pergamon Press, Oxford.
- Juvinall, Robert C., Marshek, Kurt M. (1991). **Fundamentals of Machine Component Design**, (Second Edition). NJ: John Wiley and Sons.
- Kenneth S. Edwards, JR. Robert and B. McKee. (1991). **Fundamental of Mechanical Component Design**, (International Edition). Singapore: McGraw-Hill, Inc.
- Mark J. T., and Dreyer K. (1960). Ultra high vacuum system developments for Model-C Stellarator. In **Trans. AVS Nat. Vac. Symp. 1959**. (pp 177). Pergamon Press, Oxford.
- M. F. Spotts, T. E. Shoup and L. E. Hornberger. (2004). **Design of Machine Elements**, (Eighth Edition). Pearson Prentice Hall.
- Mikell P. Groover, (2002). **Fundamentals of Modern Manufacturing**, (Second Edition). NJ: John Wiley and Sons.
- Norton, Robert L. (2000). **Machine Design : an Integrated Approach**, (Second Edition). Upper Saddle River, N.J. :Prentice-Hall.
- Ohring, Milton, (1936). **Engineering Materials Science**. San Diego: Academic Press.

- P. A. Redhead, J. P. Hobson and E. V. Kornelsen. (1968). **The physical basis of ultrahigh vacuum**, London : Chapman and Hall.
- Roth, A. (1994). **American Vacuum Society Classics: Vacuum Sealing Techniques**, New York : AIP Press.
- Roth, A. (1990). **Vacuum Technology**, (Third, Updated and Enlarged Edition). Amsterdam : Elsevier Science Publishers B.V.
- Svetlana Nestorovic, Desimir Markovic and Ljubica Ivanic. (2003). Influence of degree of deformation in rolling on anneal hardening effect of a cast copper alloy. In **Bull. Mater. Sci., Vol. 26** (pp 601-604). Indian Academy of Sciences.
- Sidney H. Avner, (1974). **Introduction to Physical Metallurgy**, second edition, McGraw-Hill, Inc.
- Wheeler W. R. (1963). Theory and application of metal gasket seals. In **1963 Trans. American Vacuum Soc.** (pp 159). New York, Macmillan.

ภาคผนวก ก

การทดสอบความแข็งของวัสดุ

การทดสอบความแข็งของวัสดุ

ความแข็ง (Hardness) เป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งของวัสดุ ในการต้านทานการกดเจาะและการขีดข่วนต่างๆ การทดสอบความแข็งของวัสดุมีอยู่หลายวิธี วิธีที่ง่ายที่สุดคือวิธีขีดข่วน โดยมีหลักการว่าวัสดุที่แข็งกว่าสามารถขูดบนวัสดุที่อ่อนกว่าให้เป็นรอยข่วนได้โดยที่ตัวเองไม่เป็นรอย (ชาญวุฒิ และสาโรช, 2541) หน่วยที่ใช้ทดสอบความแข็งนี้เรียกว่า มอส์สเกล (Moh scale) ซึ่งจำแนกระดับความแข็งของวัสดุต่างๆ ออกเป็น 10 ระดับด้วยกัน โดยถือว่าเพชรมีความแข็งเท่ากับ 10 ซึ่งมากที่สุดและหินทัลค์มีความแข็งน้อยที่สุดตามสเกลนี้คือแข็งเท่ากับ 1 นั่นเอง นอกจากนี้แล้วยังมีการทดสอบความแข็งอีกหลายวิธีด้วยกันแต่จะขอกกล่าวในที่นี้เพียง 3 วิธีที่นิยมทดสอบโดยทั่วไปคือ

ก.1 การทดสอบความแข็งแบบบริเนล (Brinell hardness test)

การทดสอบความแข็งแบบบริเนลนั้น J. A. Brinell ได้เป็นผู้เสนอแนะการทดสอบแบบดังกล่าวเมื่อปี ค.ศ. 1900 โดยสามารถสรุปขั้นตอนการทดสอบได้ดังนี้

- (1) ให้แรง (ส่วนมากเป็น 3000 kg) กดลงบนผิววัสดุที่ต้องการทดสอบ ผ่านหัวกดซึ่งทำด้วยโลหะแข็ง มีรูปร่างครึ่งทรงกลม เรียกว่า หัวบอลล์ (Ball) เส้นผ่านศูนย์กลาง ปกติเป็น 10 mm.
- (2) ให้หัวบอลล์กดอยู่ในเนื้อวัสดุประมาณ 30 วินาที จากนั้นจึงยกหัวบอลล์ออก
- (3) วัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกดที่เกิดขึ้น เพื่อคำนวณพื้นที่ผิวของวัสดุส่วนที่ถูกหัวบอลล์กด

(4) ความแข็งแบบบริเนล (Brinell Hardness Number, BHN) เท่ากับ ขนาดของแรงกดหารด้วยพื้นที่ผิวของวัสดุส่วนที่ถูกหัวบอลล์กด

โดยให้

P	=	แรงกดลงบนวัสดุ
D	=	เส้นผ่านศูนย์กลางของหัวบอลล์
d	=	เส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกดที่เกิดขึ้นบนวัสดุ

จะได้

$$\text{พื้นที่ผิวของวัสดุ} = \frac{\pi D}{2} [D - \sqrt{D^2 - d^2}] \quad (\text{ก-1})$$

ดังนั้น

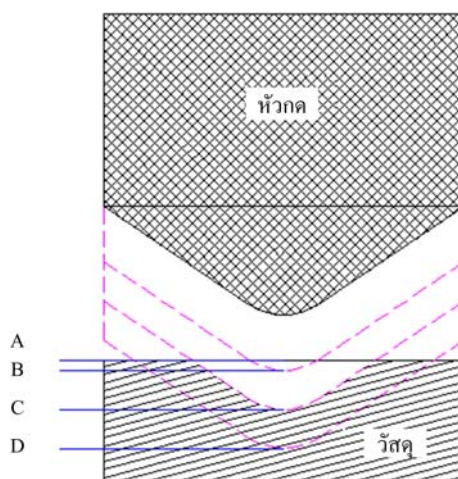
$$\text{ความแข็งแบบบริเนล BHN} = \frac{2P}{\pi D [D - \sqrt{D^2 - d^2}]} \quad (\text{ก-2})$$

- หมายเหตุ (1) เนื่องจากแรงกด P และเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวบอลล์นั้นทราบค่าแล้ว ดังนั้นเพียงผู้ทดสอบวัดค่า d แล้ว ก็สามารถเปิดตารางหาค่าความแข็งแบบบริเนล BHN ได้ทันที
- (2) หน่วยของ BHN นั้นเป็น kg/mm^2 แต่โดยทั่วไปในการแสดงค่า ไม่นิยมเขียนหน่วยกำกับ ถือเป็นที่ยอมรับโดยทั่วไป
- (3) สำหรับวัสดุที่มีความแข็งไม่มาก จะใช้แรงกดเพียง 500 kg แทน 3000 kg ดังนั้นในการรายงานค่าความแข็งของวัสดุจึงต้องระบุค่าของแรงกดที่ใช้ในการทดสอบไว้ด้วย

ก.2 การทดสอบความแข็งแบบรีคเวล (Rockwell hardness test)

การทดสอบความแข็งแบบรีคเวล ถือได้ว่าเป็นวิธีทดสอบที่ได้รับความนิยมอย่างมากในปัจจุบัน หลักการทดสอบความแข็งแบบรีคเวลคือการวัดความลึกของรอยกดที่เกิดขึ้นบนวัสดุแทนที่จะวัดพื้นที่ของรอยกด ตามรายละเอียดดังรูปที่ ก.1 ฉะนั้นจึงสะดวกกว่าวิธีอื่นๆ โดยสามารถสรุปขั้นตอนการทดสอบได้ดังนี้

- (1) ให้แรงกดนำ (Minor load) ขนาด 10 kg กดเจาะลงบนผิววัสดุที่ต้องการทดสอบ ผ่านหัวกดซึ่งทำด้วยโลหะแข็ง หัวกดจะฝังจมอยู่ในเนื้อวัสดุที่ระดับ B



รูปที่ ก.1 หลักการวัดความแข็งแบบรีคเวล

- (2) ตั้งเข็มบนหน้าปัดของเครื่องวัดความลึก ไปอยู่ที่ 0 การให้ความลึกเป็น 0 ที่ระดับ B แทนที่จะเป็นระดับ A นั้นก็เพื่อขจัดอิทธิพลของแผ่นฟิล์มบางๆ ที่ติดอยู่บนผิวของโลหะนั้น ให้หัวบอลล์กดอยู่ในเนื้อวัสดุประมาณ 30 วินาที จากนั้นจึงยกหัวบอลล์ออก

(3) ให้แรงกดตาม (Major load) กดเจาะลงบนผิววัสดุที่ต้องการทดสอบ โดยมีขนาดของแรงต่างๆ กันขึ้นกับความแข็งของวัสดุและมาตรการความแข็งที่ต้องการทดสอบ โดยการกดครั้งนี้ จะทำให้หัวกดคลิกลงไปในเนื้อวัสดุเท่าที่วัสดุจะรับได้เป็นระยะ BD เข็มบนหน้าปัดจะหมุนไปข้างหน้าจนกระทั่งหยุดนิ่ง

(4) ให้หัวกดอยู่ในเนื้อวัสดุประมาณ 30 วินาที จากนั้นจึงเอาแรงกดตามออกเหลือไว้แต่แรงกดนำเท่านั้น (ปกติแล้วเครื่องทดสอบจะเอาแรงกดตามออกเอง) วัสดุบางส่วนจะมีการคืนรูปและดันให้หัวกดสูงขึ้นจากระดับ D มาอยู่ระดับใหม่ที่ C ซึ่งในขณะนั้นเข็มบนหน้าปัดจะหมุนถอยหลังไป จนกระทั่งหยุดนิ่ง ซึ่งระยะซึ่งจะมีค่าเท่ากับ BC ซึ่งก็คือค่าความแข็งของวัสดุแบบรีอคเวลนั่นเอง

หัวกดของเครื่องวัดแบบรีอคเวลแบ่งออกเป็น 2 ชนิดใหญ่ๆ คือ แบบครึ่งทรงกลมเรียกว่า หัวบอลล์ (Ball) ซึ่งเหมาะสำหรับวัสดุที่มีความแข็งไม่มาก ทำด้วยโลหะแข็งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 1/16, 1/8, 1/4 และ 1/2 Inch. ขึ้นอยู่กับขนาดแรงกดนำและมาตรที่ใช้วัด ส่วนหัวกดอีกแบบหนึ่งมีรูปร่างเป็นทรงกรวยทำด้วยโลหะแข็งหรือกากเพชร ยอดกรวยทำมุม 120 องศา เรียกหัวกดนี้ว่า เบรล (Brale) เหมาะสำหรับวัสดุที่มีความแข็งค่อนข้างมาก

มาตร (Scale) ที่แสดงค่าความแข็งแบบรีอคเวลมีหลายชนิด แต่ละชนิดจะเหมาะสมกับวัสดุที่มีความแข็งแตกต่างกัน นอกจากนั้นยังมีข้อจำกัดในการเลือกใช้หัวกดและแรงกดตามด้วย รายละเอียดได้แสดงไว้ในตารางที่ ก.1

ตารางที่ ก.1 มาตรฐานของสเกลความแข็งแบบรีอคเวล แรงกดนำ 10 kg (ตาม ASTM E 18)

มาตร	หัวกด	แรงกดตาม (กก.)	สีของตัวเลข บนหน้าปัด	หมายเหตุ
B	หัวบอลล์ \varnothing 1/16 Inch.	100	แดง	สำหรับวัสดุที่มีความแข็งในช่วง B ₀ ถึง B ₁₀₀ เช่นทองเหลือง เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำและคาร์บอนปานกลางที่อยู่ในสภาพอบอ่อน อะลูมิเนียม
C	เบอร์ล	150	ดำ	สำหรับวัสดุที่มีความแข็งในช่วง C ₀ ถึง C ₁₀₀ หรือที่มีความแข็งเกิน B ₁₀₀ เช่น เหล็กกล้าที่ชุบแข็งแล้ว
A	เบอร์ล	60	ดำ	สำหรับวัสดุที่มีความแข็งมากๆ เช่นทั้งสแตนคาร์ไบด์หรือเหล็กที่ชุบแข็งเฉพาะผิว นอกจากนี้ยังอาจใช้สเกลนี้ในกรณีทดสอบด้วยแรงกดตาม 150 kg แล้วเกิดการลื่นไถลหรือแตกเป็นเสี่ยงได้
D	เบอร์ล	100	ดำ	สำหรับวัสดุที่มีความแข็งอยู่ระหว่าง A และ C เช่นเหล็กที่ชุบแข็งเฉพาะผิวบางชนิด
E	หัวบอลล์ \varnothing 1/8 Inch.	100	แดง	สำหรับทดสอบวัสดุที่อ่อนข้างอ่อนและต่ำกว่า B ₀ เช่นโลหะที่ใช้ทำเบร้ง เหล็กหล่อ
F	หัวบอลล์ \varnothing 1/16 Inch.	60	แดง	ใช้งานเช่นเดียวกับสเกล E เช่นโลหะแผ่นบาง
G	หัวบอลล์ \varnothing 1/16 Inch.	150	แดง	ใช้งานในกรณีที่วัสดุที่มีความแข็งสูงกว่า B ₁₀₀ เล็กน้อย เช่นบรอนซ์ ฟอสฟอรัส บรอนซ์เบรลเรียม
H	หัวบอลล์ \varnothing 1/8 Inch.	60	แดง	อะลูมิเนียม สังกะสี ตะกั่ว
K	หัวบอลล์ \varnothing 1/8 Inch.	150	แดง	สำหรับทดสอบวัสดุที่อ่อนมากๆ และพวกโลหะบางๆ
L	หัวบอลล์ \varnothing 1/4 Inch.	60	แดง	สำหรับทดสอบวัสดุที่อ่อนมากๆ และพวกโลหะบางๆ
M	หัวบอลล์ \varnothing 1/4 Inch.	100	แดง	สำหรับทดสอบวัสดุที่อ่อนมากๆ และพวกโลหะบางๆ
P	หัวบอลล์ \varnothing 1/4 Inch.	150	แดง	สำหรับทดสอบวัสดุที่อ่อนมากๆ และพวกโลหะบางๆ
R	หัวบอลล์ \varnothing 1/2 Inch.	60	แดง	สำหรับทดสอบวัสดุที่อ่อนมากๆ และพวกโลหะบางๆ
S	หัวบอลล์ \varnothing 1/2 Inch.	100	แดง	สำหรับทดสอบวัสดุที่อ่อนมากๆ และพวกโลหะบางๆ
V	หัวบอลล์ \varnothing 1/2 Inch.	150	แดง	สำหรับทดสอบวัสดุที่อ่อนมากๆ และพวกโลหะบางๆ

ที่มา: ชาญวุฒิ ตั้งจิตวิทยา และ สาโรช วิฑิตีเกิดดิพงษ์ (2541)

เนื่องจากการทดสอบความแข็งแบบรีอคเวลนั้นมีมาตร (Scale) ที่แสดงค่าความแข็งหลายชนิดดังนั้นการรายงานค่าความแข็งของวัสดุแบบรีอคเวลจะต้องกำกับมาตรที่ใช้ไว้ด้วย เพื่อไม่ให้เกิดความสับสน เช่น Rc 20 หมายความว่ามีความแข็งแบบรีอคเวล 20 มาตร C เป็นต้น

ก.3 การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers hardness test)

การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์นี้ถูกพัฒนาขึ้นในช่วงต้นของปี ค.ศ. 1920 ซึ่งจะใช้หัวกดรูปปิรามิดฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัส ยอดปิรามิดทำมุมระหว่างด้านตรงข้าม 136 องศา หัวปิรามิดทำด้วยเพชร แรงที่ใช้กดเปลี่ยนแปลงได้ตั้งแต่ 1 – 120 kg ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความแข็งวัสดุที่ต้องการ

ทดสอบโดยมีหลักการคล้ายกับการทดสอบความแข็งแบบบริเนล ซึ่งสามารถสรุปขั้นตอนการทดสอบได้ดังนี้

- (1) ให้แรงกดหัวพีรามิดลงบนผิววัสดุที่ต้องการทดสอบ จนเกิดรอยกดเป็นรูปพีรามิดขึ้น
- (2) ให้หัวพีรามิดกดอยู่ในเนื้อวัสดุไม่น้อยกว่า 30 วินาที จากนั้นจึงยกหัวพีรามิดออก
- (3) วัดความยาวของเส้นทแยงมุมของรอยกดที่เกิดขึ้น เพื่อคำนวณพื้นที่ผิวของวัสดุส่วนที่ถูกหัวพีรามิดกดหรือพื้นที่รอยกดนั่นเอง

(4) ความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers hardness number, VHN) หรือบางที่เรียกว่า Diamond Pyramid Hardness Number (DPH) มีค่าเท่ากับ ขนาดของแรงกดหารด้วยพื้นที่ผิวของรอยกดที่เกิดขึ้น

โดยกำหนดให้

P = แรงกดลงบนวัสดุ

d = เส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกดบนวัสดุ

จะได้

$$\text{พื้นที่ผิวของวัสดุ} = \frac{d^2}{2\sin\left(\frac{136^\circ}{2}\right)} \quad (\text{ก-3})$$

ดังนั้น

$$\text{ความแข็งแบบวิกเกอร์ VHN} = \text{DPH} = \frac{2P\sin\left(\frac{136^\circ}{2}\right)}{d^2} \quad (\text{ก-4})$$

หรือ

$$= \frac{1.854P}{d^2} \quad (\text{ก-5})$$

หมายเหตุ หน่วยของ VHN หรือ DPH นั้นเป็น kg/mm^2 แต่โดยทั่วไปในการแสดงค่า ไม่นิยมเขียนหน่วยกำกับ ถือเป็นที่เข้าใจโดยทั่วไป

ตารางที่ ก.2 การแปลงหน่วยความแข็งของทองแดง (Hardness Conversion Table)

ASTM E-140 Table IV

Vickers	B Scale	F-Scale	30-T Scale	45-T Scale
Hardness	100-kg	60-kg	30-kg	45-kg
Number	1/16-in.Ball	1/16-in.Ball	1/16-in.Ball	1/16-in.Ball
(HV)	(HRB)	(HRF)	(HR 30-T)	(HR 45-T)
196	93.5	110	77.5	66
194	...	109.5	...	65.5
192	93	...	77	65
190	92.5	109	76.5	64.5
188	92	...	...	64
186	91.5	108.5	76	63.5
184	91	...	75.5	63
182	90.5	108	...	62.5
180	90	107.5	75	62
178	89	...	74.5	61.5
176	88.5	107	...	61
174	88	...	74	60.5
172	87.5	106.5	73.5	60
170	87	...	...	59.5
168	86	106	73	59
166	85.5	...	72.5	58.5
164	85	105.5	72	58
162	84	105	...	57.5
160	83.5	...	71.5	56.5
158	83	104.5	71	56
156	82	104	70.5	55.5
154	81.5	103.5	70	54.5
152	80.5	103	...	54
150	80	...	69.5	53.5
148	79	102.5	69	53
146	78	102	68.5	52.5
144	77.5	101.5	68	51.5

Vickers	B Scale	F-Scale	30-T Scale	45-T Scale
Hardness	100-kg	60-kg	30-kg	45-kg
Number	1/16-in.Ball	1/16-in.Ball	1/16-in.Ball	1/16-in.Ball
(HV)	(HRB)	(HRF)	(HR 30-T)	(HR 45-T)
142	77	101	67.5	51
140	76	100.5	67	50
138	75	100	66.5	49
136	74.5	99.5	66	48
134	73.5	99	65.5	47.5
132	73	98.5	65	46.5
130	72	98	64.5	45.5
128	71	97.5	63.5	45
126	70	97	63	44
124	69	96.5	62.5	43
122	68	96	62	42
120	67	95.5	61	41
118	66	95	60.5	40
116	65	94.5	60	39
114	64	94	59.5	38
112	63	93	58.5	37
110	62	92.6	58	35.5
108	61	92	57	34.5
106	59.5	91.2	56	33
104	58	90.5	55	32
102	57	89.8	54.5	30.5
100	56	89	53.5	29.5
98	54	88	52.5	28
96	53	87.2	51.5	26.5
94	51	86.3	50.5	24.5
92	49.5	85.4	49	23
90	47.5	84.4	48	21
88	46	83.5	47	19
86	44	82.3	45.5	17

Vickers	B Scale	F-Scale	30-T Scale	45-T Scale
Hardness	100-kg	60-kg	30-kg	45-kg
Number	1/16-in.Ball	1/16-in.Ball	1/16-in.Ball	1/16-in.Ball
(HV)	(HRB)	(HRF)	(HR 30-T)	(HR 45-T)
84	42	81.2	44	14.5
82	40	80	43	12.5
80	37.5	78.6	41	10
78	35	77.4	39.5	7.5
76	32.5	76	38	4.5
74	30	74.8	36	1
72	27.5	73.2	34	...
70	24.5	71.8	32	...
68	21.5	70	30	...
66	18.5	68.5	28	...
64	15.5	66.8	25.5	...
62	12.5	65	23	...
60	10	62.5	...	...
58	...	61	18	...
56	...	58.8	15	...
54	...	56.5	12	...
52	...	53.5	...	...
50	...	50.5	...	...
49	...	49	...	...
48	...	47	...	...
47	...	45	...	...
46	...	43	...	...
45	...	40	...	...
44	...	38.9	...	...
43	...	36.6	...	...
42	...	34.1	...	...
41	...	31.5	...	...
40	...	28.6	...	...
39	...	25.5	...	...

Vickers	B Scale	F-Scale	30-T Scale	45-T Scale
Hardness	100-kg	60-kg	30-kg	45-kg
Number	1/16-in.Ball	1/16-in.Ball	1/16-in.Ball	1/16-in.Ball
(HV)	(HRB)	(HRF)	(HR 30-T)	(HR 45-T)
38	...	22	...	...
37	...	18.1	...	...
36	...	13.7	...	...
35	...	8.4	...	...

ภาคผนวก ข

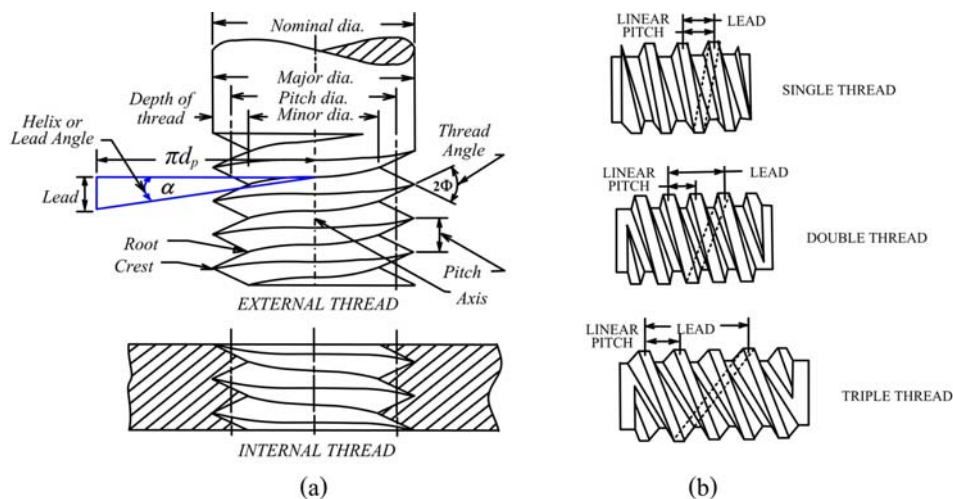
การคำนวณแรงหนีจากแรงบิดของสลักเกลียว

สกรูส่งกำลัง (Power Screw)

สกรูส่งกำลังเป็นอุปกรณ์ทางกลที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยสกรูส่งกำลังจะถูกใช้งานในลักษณะเปลี่ยนการหมุนให้เป็นการเลื่อนเพื่อยกน้ำหนัก ตัวอย่างของการใช้สกรูส่งกำลังในเครื่องจักรกล ได้แก่ แม่แรง ปากกาจับชิ้นงาน

ข.1 ลักษณะเกลียวสกรู (Thread Form)

ลักษณะเกลียวสกรูสามารถอธิบายควบคู่กับรูปที่ ข.1 โดยใน(a) จะเป็นลักษณะโครงสร้างและรูปแบบมาตรฐานของเกลียวสกรูซึ่งส่วนนิยมใช้เป็นอุปกรณ์ยึดรอยต่อเช่น สลักเกลียว (Bolt) สตั๊ด (Stud Bolt) สกรูกล (Machine Screw) ส่วนรูป (b) จะเป็นชนิดของเกลียวสกรู



รูปที่ ข.1 ลักษณะ โครงสร้างเกลียวแบบ ISO Standard

ข.2 คำจำกัดความ (Definition)

1. เส้นผ่านศูนย์กลางหลัก (Major Diameter) หมายถึงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ใหญ่ที่สุดของสกรูโดยรวมความสูงของเกลียวเข้าไปด้วย และโดยทั่วไปจะใช้เส้นผ่านศูนย์กลางหลักในการกำหนดขนาดระบุ (Nominal Diameter) ของสกรูด้วย

2. เส้นผ่านศูนย์กลางพิตช์ (Pitch Diameter) หมายถึงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกระบอกที่มีแกนกลางร่วมศูนย์กลางกับสกรูและมีผิวตัดกับตำแหน่งที่ทำให้ความกว้างของเกลียวเท่ากันกับความกว้างของพื้นที่ว่าง

3. เส้นผ่านศูนย์กลางเล็ก (Minor Diameter) หมายถึงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กที่สุดของสกรูโดยไม่รวมเอาความสูงของสกรู

4. ระยะพิทช์ (Pitch) หมายถึงระยะที่วัดตามแนวแกนของสกรูจากจุดหนึ่งบนเกลียว ไปยังจุดเดียวกันบนเกลียวที่อยู่ถัดไป ซึ่งโดยทั่วไปนิยามที่จะวัดระยะจากสันเกลียวไปยังอีกสันเกลียวที่อยู่ติดกัน ดังในรูปที่ ข.1 (a)

5. ระยะลีด (Lead) หมายถึงระยะที่สกรูหมุนไปตามแนวแกนหลักของเกลียวครบหนึ่งรอบ ดังรายละเอียดในรูปที่ ข.1 (b) โดยถ้าเป็นสกรูเกลียวเดี่ยว (Single Thread) หรือเรียกอีกชื่อว่า “สกรูหนึ่งปาก” ระยะลีดจะมีค่าเท่ากับระยะพิทช์ ส่วนในกรณีสกรูเกลียวคู่ (Double Thread) หรือเรียกอีกชื่อว่า “สกรูสองปาก” ระยะลีดจะมีค่าเป็นสองเท่าของระยะพิทช์ และสุดท้ายหากเป็นสกรูเกลียวสาม (Triple Thread) หรือ “สกรูสามปาก” ระยะลีดจะมีค่าเป็นสามเท่าของระยะพิทช์

6. มุมเกลียว (Thread Angle) หมายถึง มุมที่อยู่ระหว่างความเอียงของแต่ละเกลียว

7. มุมเฮลิคัลหรือมุมลีด (Helix or Lead Angle) หมายถึงมุมที่วัดระหว่างระนาบสัมผัสกับความเอียงของเกลียวและระนาบที่ตั้งฉากกับแกนของสกรูดังในรูปที่ ข.1 (a) d_p คือเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของสกรู ซึ่งหากนำระยะที่สกรูหมุนไปหนึ่งรอบมาคูณออก (πd_p) ก็จะได้ความสัมพันธ์กับมุมลีดเป็น

$$\tan \alpha = \frac{\text{Lead}}{\pi d_m} \quad (\text{ข-1})$$

8. ยอดเกลียว (Crest) หมายถึง ส่วนที่อยู่บริเวณปลายสุดของเกลียว ซึ่งจะมีรูปแบบที่แตกต่างกันไปตามชนิดของเกลียว โดยอาจจะเป็นแบบมนหรือแบบเรียบก็ได้

9. รากเกลียว (Root) หมายถึงส่วนที่อยู่บริเวณที่ลึกที่สุดของเกลียว ซึ่งจะมีรูปแบบที่แตกต่างกันไปตามชนิดของเกลียว โดยอาจจะเป็นแบบมนหรือแบบเรียบก็ได้

ข.3 สัญลักษณ์ (Symbol)

จากรูปที่ ข.1 กำหนดให้ใช้สัญลักษณ์ดังต่อไปนี้

d_m	หมายถึง Major Diameter
d_p	หมายถึง Pitch Diameter
d_f	หมายถึง Minor Diameter
p	หมายถึง Pitch
L	หมายถึง Lead

2Φ หมายถึง Thread Angle

α หมายถึง Lead Angle

โดยมีความสัมพันธ์

$$d_p = d_m - 0.649519p \text{ และ } d_r = d_m - 1.226869p \quad (\text{Robert L. Norton, 1998})$$

ข.4 แรงบิดสำหรับขันสกรู (Torque for Screw Turning)

โดยทั่วไปจะใช้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดภาระงานในแนวแกน จากความสัมพันธ์

$$T = \frac{Wd_m}{2} \left[\frac{\mu + \cos \Phi \tan \alpha}{\cos \Phi - \mu \tan \alpha} \right] + \mu_c W \frac{d_c}{2} \quad (\text{วริทธิ์ อึ้งภากรณ์, 2544})$$

เมื่อกำหนดให้	T	คือ Torque (N-m)
	W	คือ Load (N)
	μ	คือ Coefficient of friction
	μ_c	คือ Coefficient of friction in thrust bearing
	2Φ	คือ Thread Angle
	α	คือ Lead Angle
	d_p	คือ Pitch Diameter (m)
	d_c	คือ Mean diameter of thrust collar, $2r_c$ (m)

หมายเหตุ μ และ μ_c มีค่าอยู่ในช่วง 0.08 – 0.2 ขึ้นกับสภาวะพื้นผิวสัมผัส (Robert C. Juvinall and Kurt M. Marshek, 1991)

ตารางที่ ข.1 ค่าแรงผนึกที่คำนวณได้จากแรงบิดของสลักเกลียว สำหรับหน้าแปลน CF70

DN70 CF114

ISO M6 x 1.00	6	Pcs.
Collar washer OD.	12.8	mm.
Collar washer ID.	6.5	mm.
$r_c=0.25x(OD,+ID.)$	4.825	mm.
Friction(f)	0.15	
Thread Angle	30	degree
L	1	mm.
p	1	mm.
$d_p = d - 0.649519p =$	5.350	mm.
$d_r = d - 1.226869p =$	4.773	mm.
Dia. of ridge =	4.200	cm.
Circum. of ridge =	13.20	cm.

Torque(kgf-cm)	Force per unit nut(kgf)	Total Force(kgf)	Sealing Force(kgf/cm)
50	369.620	2,217.718	168.009
55	406.582	2,439.489	184.810
60	443.544	2,661.261	201.611
65	480.506	2,883.033	218.412
70	517.467	3,104.805	235.212
75	554.429	3,326.577	252.013
80	591.391	3,548.348	268.814
85	628.353	3,770.120	285.615
90	665.315	3,991.892	302.416
95	702.277	4,213.664	319.217
100	739.239	4,435.435	336.018
105	776.201	4,657.207	352.819
110	813.163	4,878.979	369.620
115	850.125	5,100.751	386.421
120	887.087	5,322.523	403.221
125	924.049	5,544.294	420.022
130	961.011	5,766.066	436.823
135	997.973	5,987.838	453.624
140	1,034.935	6,209.610	470.425
145	1,071.897	6,431.381	487.226
150	1,108.859	6,653.153	504.027
155	1,145.821	6,874.925	520.828
160	1,182.783	7,096.697	537.629
165	1,219.745	7,318.468	554.429
170	1,256.707	7,540.240	571.230
175	1,293.669	7,762.012	588.031
180	1,330.631	7,983.784	604.832
185	1,367.593	8,205.556	621.633
190	1,404.555	8,427.327	638.434
195	1,441.517	8,649.099	655.235
200	1,478.478	8,870.871	672.036

ตารางที่ ข.2 ค่าแรงฉีกที่คำนวณได้จากแรงบิดของสลักเกลียว สำหรับหน้าแปลน CF114

DN63 CF114

ISO M8 x 1.25	8	Pcs.
Collar washer OD.	17.8	mm.
Collar washer ID.	8.68	mm.
$r_c=0.25x(OD.+ID.)$	6.62	mm.
Friction(f)	0.15	
Thread Angle	30	degree
L	1.25	mm.
p	1.25	mm.
$d_p = d - 0.649519p =$	7.188	mm.
$d_r = d - 1.226869p =$	6.466	mm.
Dia. of ridge =	7.680	cm.
Circum. of ridge =	24.14	cm.

Torque(kg-cm.)	Force per unit nut(kg)	Total Force(kg)	Sealing Force(kg/cm.)
50	274.364	2,194.912	90.935
55	301.800	2,414.403	100.029
60	329.237	2,633.894	109.122
65	356.673	2,853.385	118.216
70	384.110	3,072.876	127.309
75	411.546	3,292.367	136.403
80	438.982	3,511.859	145.496
85	466.419	3,731.350	154.590
90	493.855	3,950.841	163.683
95	521.292	4,170.332	172.777
100	548.728	4,389.823	181.870
105	576.164	4,609.314	190.964
110	603.601	4,828.805	200.057
115	631.037	5,048.297	209.151
120	658.473	5,267.788	218.244
125	685.910	5,487.279	227.338
130	713.346	5,706.770	236.431
135	740.783	5,926.261	245.525
140	768.219	6,145.752	254.618
145	795.655	6,365.244	263.712
150	823.092	6,584.735	272.805
155	850.528	6,804.226	281.899
160	877.965	7,023.717	290.992
165	905.401	7,243.208	300.086
170	932.837	7,462.699	309.179
175	960.274	7,682.191	318.273
180	987.710	7,901.682	327.366
185	1,015.147	8,121.173	336.460
190	1,042.583	8,340.664	345.553
195	1,070.019	8,560.155	354.647
200	1,097.456	8,779.646	363.740

ตารางที่ ข.3 ค่าแรงฉีกที่คำนวณได้จากแรงบิดของสลักเกลียว สำหรับหน้าแปลน CF152

DN100 CF152

ISO M8 x 1.25	16	Pcs.
Collar washer OD.	17.8	mm.
Collar washer ID.	8.68	mm.
$r_c=0.25 \times (OD.+ID.)$	6.62	mm.
Friction(f)	0.12	
Thread Angle	30	degree
L	1.25	mm.
p	1.25	mm.
$d_p = d - 0.649519p =$	7.188	mm.
$d_r = d - 1.226869p =$	6.466	mm.
Dia. of ridge =	11.520	cm.
Circum. of ridge =	36.21	cm.

Torque(kg-cm.)	Force per unit nut(kg)	Total Force(kg)	Sealing Force(kg/cm.)
50	334.065	5,345.036	147.630
55	367.471	5,879.540	162.393
60	400.878	6,414.043	177.156
65	434.284	6,948.547	191.919
70	467.691	7,483.051	206.681
75	501.097	8,017.554	221.444
80	534.504	8,552.058	236.207
85	567.910	9,086.562	250.970
90	601.317	9,621.065	265.733
95	634.723	10,155.569	280.496
100	668.130	10,690.072	295.259
105	701.536	11,224.576	310.022
110	734.942	11,759.080	324.785
115	768.349	12,293.583	339.548
120	801.755	12,828.087	354.311
125	835.162	13,362.590	369.074
130	868.568	13,897.094	383.837
135	901.975	14,431.598	398.600
140	935.381	14,966.101	413.363
145	968.788	15,500.605	428.126
150	1,002.194	16,035.109	442.889
155	1,035.601	16,569.612	457.652
160	1,069.007	17,104.116	472.415
165	1,102.414	17,638.619	487.178
170	1,135.820	18,173.123	501.941
175	1,169.227	18,707.627	516.704
180	1,202.633	19,242.130	531.467
185	1,236.040	19,776.634	546.230
190	1,269.446	20,311.138	560.993
195	1,302.853	20,845.641	575.756
200	1,336.259	21,380.145	590.519

ตารางที่ ข.4 ค่าแรงฉีกที่คำนวณได้จากแรงบิดของสลักเกลียว สำหรับหน้าแปลน CF203

DN100 CF203

ISO M8 x 1.25	20	Pcs.
Collar washer OD.	17.8	mm.
Collar washer ID.	8.68	mm.
$r_c=0.25x(OD.+ID.)$	6.62	mm.
Friction(f)	0.12	
Thread Angle	30	degree
L	1.25	mm.
p	1.25	mm.
$d_p = d - 0.649519p =$	7.188	mm.
$d_r = d - 1.226869p =$	6.466	mm.
Dia. of ridge =	16.580	cm.
Circum. of ridge =	52.11	cm.

Torque(kg-cm.)	Force per unit nut(kg)	Total Force(kg)	Sealing Force(kg/cm.)
50	334.065	6,681.295	128.219
55	367.471	7,349.425	141.041
60	400.878	8,017.554	153.862
65	434.284	8,685.684	166.684
70	467.691	9,353.813	179.506
75	501.097	10,021.943	192.328
80	534.504	10,690.072	205.150
85	567.910	11,358.202	217.972
90	601.317	12,026.331	230.794
95	634.723	12,694.461	243.616
100	668.130	13,362.590	256.437
105	701.536	14,030.720	269.259
110	734.942	14,698.850	282.081
115	768.349	15,366.979	294.903
120	801.755	16,035.109	307.725
125	835.162	16,703.238	320.547
130	868.568	17,371.368	333.369
135	901.975	18,039.497	346.191
140	935.381	18,707.627	359.012
145	968.788	19,375.756	371.834
150	1,002.194	20,043.886	384.656
155	1,035.601	20,712.015	397.478
160	1,069.007	21,380.145	410.300

ตารางที่ ข.5 ค่าแรงผนึกที่คำนวณได้จากแรงบิดของสลักเกลียว สำหรับหน้าแปลน CF254

DN100 CF254

ISO M8 x 1.25	24	Pcs.
Collar washer OD.	17.8	mm.
Collar washer ID.	8.68	mm.
$r_c=0.25x(OD.+ID.)$	6.62	mm.
Friction(f)	0.12	
Thread Angle	30	degree
L	1.25	mm.
p	1.25	mm.
$d_p = d - 0.649519p =$	7.188	mm.
$d_r = d - 1.226869p =$	6.466	mm.
Dia. of ridge =	21.420	cm.
Circum. of ridge =	67.32	cm.

Torque(kg-cm.)	Force per unit nut(kg)	Total Force(kg)	Sealing Force(kg/cm.)
50	334.065	8,017.554	119.096
55	367.471	8,819.310	131.006
60	400.878	9,621.065	142.915
65	434.284	10,422.821	154.825
70	467.691	11,224.576	166.735
75	501.097	12,026.331	178.644
80	534.504	12,828.087	190.554
85	567.910	13,629.842	202.463
90	601.317	14,431.598	214.373
95	634.723	15,233.353	226.283
100	668.130	16,035.109	238.192
105	701.536	16,836.864	250.102
110	734.942	17,638.619	262.012
115	768.349	18,440.375	273.921
120	801.755	19,242.130	285.831
125	835.162	20,043.886	297.740
130	868.568	20,845.641	309.650
135	901.975	21,647.397	321.560
140	935.381	22,449.152	333.469
145	968.788	23,250.907	345.379
150	1,002.194	24,052.663	357.289
155	1,035.601	24,854.418	369.198
160	1,069.007	25,656.174	381.108
165	1,102.414	26,457.929	393.017
170	1,135.820	27,259.685	404.927
175	1,169.227	28,061.440	416.837
180	1,202.633	28,863.195	428.746
185	1,236.040	29,664.951	440.656
190	1,269.446	30,466.706	452.565
195	1,302.853	31,268.462	464.475
200	1,336.259	32,070.217	476.385

ตารางที่ ข.6 ค่าแรงผนึกที่คำนวณได้จากแรงบิดของสลักเกลียว สำหรับหน้าแปลน CF304

DN100 CF304

ISO M8 x 1.25	32	Pcs.
Collar washer OD.	17.8.8	mm.
Collar washer ID.	8.68	mm.
$r_c=0.25x(OD.+ID.)$	6.62	mm.
Friction(f)	0.12	
Thread Angle	30	degree
L	1.25	mm.
p	1.25	mm.
$d_p = d - 0.649519p =$	7.188	mm.
$d_r = d - 1.226869p =$	6.466	mm.
Dia. of ridge =	26.240	cm.
Circum. of ridge =	82.47	cm.

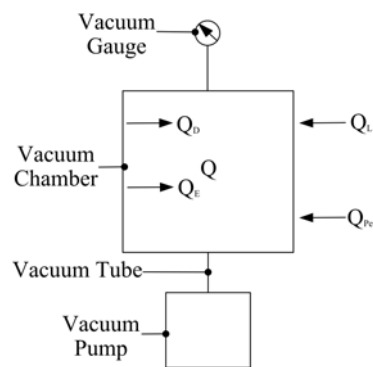
Torque(kg-cm.)	Force per unit nut(kg)	Total Force(kg)	Sealing Force(kg/cm.)
50	334.065	10,690.072	129.626
55	367.471	11,759.080	142.589
60	400.878	12,828.087	155.551
65	434.284	13,897.094	168.514
70	467.691	14,966.101	181.476
75	501.097	16,035.109	194.439
80	534.504	17,104.116	207.402
85	567.910	18,173.123	220.364
90	601.317	19,242.130	233.327
95	634.723	20,311.138	246.289
100	668.130	21,380.145	259.252
105	701.536	22,449.152	272.215
110	734.942	23,518.159	285.177
115	768.349	24,587.166	298.140
120	801.755	25,656.174	311.102
125	835.162	26,725.181	324.065
130	868.568	27,794.188	337.028
135	901.975	28,863.195	349.990
140	935.381	29,932.203	362.953
145	968.788	31,001.210	375.915
150	1,002.194	32,070.217	388.878
155	1,035.601	33,139.224	401.841
160	1,069.007	34,208.232	414.803
165	1,102.414	35,277.239	427.766
170	1,135.820	36,346.246	440.728
175	1,169.227	37,415.253	453.691
180	1,202.633	38,484.261	466.654
185	1,236.040	39,553.268	479.616
190	1,269.446	40,622.275	492.579
195	1,302.853	41,691.282	505.541
200	1,336.259	42,760.290	518.504

ภาคผนวก ค

การคำนวณอัตราการรั่วซึม

ภาระความดันที่เพิ่มขึ้นจากแก๊ส (Gas Load)

ในระบบสุญญากาศที่มีความดันต่ำมากๆ นั้น การเพิ่มขึ้นของแก๊สที่เหลืออยู่ในระบบย่อมทำให้ค่าความดันสูงขึ้นเรียกว่าภาระความดันที่เพิ่มขึ้นจากแก๊ส โดยแหล่งที่มาของแก๊สที่เหลือมาจากหลายปัจจัยดังนี้ แก๊สที่มาจากผิววัสดุ (Outgassing of material, Q_D) แก๊สที่เกิดขึ้นมาโดยการระเหยของวัสดุหรือเครื่องมือวัดต่าง (Evaporative gasses, Q_E) แก๊สที่มาจาก การรั่วซึมเข้าสู่ระบบ (Leakage, Q_L) และแก๊สจากการแทรกซึมผ่านวัสดุเข้าสู่ระบบ (Permeable gasses, Q_{Per}) ดังภาพที่ ค.1 ซึ่งแก๊สต่างๆ เหล่านี้ จะพยายามเข้าสู่ระบบทำให้ค่าความดันสูงขึ้น ดังนั้นเพื่อเป็นการรักษา ระดับความดันให้คงที่ นอกจากระบบจะมีกลไกในการป้องกันการรั่วซึมที่ดีมากแล้ว ยังจำเป็นต้องมีการดูดเอาแก๊สที่เหลืออยู่ในระบบออกเป็นช่วงๆ ของเวลาตามภาวะของความดันที่ต้องการใน ระบบสุญญากาศนั้นๆ



รูปที่ ค.1 แหล่งที่มาของแก๊สในระบบสุญญากาศ

การคำนวณหาอัตราการไหลของแก๊สจากแหล่งต่างๆ นั้นต่างกัน ซึ่งต่อไปนี้จะกล่าวถึงการคำนวณหาอัตราการไหลของแก๊สจากการรั่วซึมเข้าสู่ระบบ (Leakage, Q_L) เท่านั้น โดยอัตราการรั่วซึมของแก๊สสามารถคำนวณได้จากสมการ ค-1 (Armand Berman, 1992)

$$P_{us} = \frac{Q_L}{S_n} \quad (\text{ค-1})$$

เมื่อ	P_{us}	=	ความดันต่ำสุดในห้องสุญญากาศ (Torr)
	S_n	=	อัตราการสูบของไหลของปั๊ม (l/s)
	Q_L	=	อัตราการรั่วซึม (Torr l/s)

จากการทดสอบปะเก็นทองแดงในระบบสุญญากาศ ซึ่งใช้ปั๊มที่มีอัตราการสูบของไหล 320 l/s ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสันที่กดลงบนปะเก็น 42 mm. จากนั้นทำการคำนวณจากค่าความดันต่างๆ กัน ทำให้ค่าอัตราการรั่วซึมนั้นต่างกันไปด้วย ดังตารางที่ ค.1

ตารางที่ ค.1 อัตราการรั่วซึมของแก๊สที่ความดันต่างๆ

Pressure, P _{us}		Leak rate per unit length	
mbar	Torr	(Torr-l/s)/cm.	lusec/cm.
1.00×10^{-01}	7.52×10^{-02}	5.73	5.73×10^3
1.00×10^{-02}	7.52×10^{-03}	5.73×10^{-01}	5.73×10^2
1.00×10^{-03}	7.52×10^{-04}	5.73×10^{-02}	5.73×10^1
1.00×10^{-04}	7.52×10^{-05}	5.73×10^{-03}	5.73
1.00×10^{-05}	7.52×10^{-06}	5.73×10^{-04}	5.73×10^{-01}
1.00×10^{-06}	7.52×10^{-07}	5.73×10^{-05}	5.73×10^{-02}
5.00×10^{-07}	3.76×10^{-07}	2.87×10^{-05}	2.87×10^{-02}
1.00×10^{-07}	7.52×10^{-08}	5.73×10^{-06}	5.73×10^{-03}
5.00×10^{-08}	3.76×10^{-08}	2.87×10^{-06}	2.87×10^{-03}
1.00×10^{-08}	7.52×10^{-09}	5.73×10^{-07}	5.73×10^{-04}
5.00×10^{-09}	3.76×10^{-09}	2.87×10^{-07}	2.87×10^{-04}
1.00×10^{-09}	7.52×10^{-10}	5.73×10^{-08}	5.73×10^{-05}
5.00×10^{-10}	3.76×10^{-10}	2.87×10^{-08}	2.87×10^{-05}
1.00×10^{-10}	7.52×10^{-11}	5.73×10^{-09}	5.73×10^{-06}
5.00×10^{-11}	3.76×10^{-11}	2.87×10^{-09}	2.87×10^{-06}
1.00×10^{-11}	7.52×10^{-11}	5.73×10^{-10}	5.73×10^{-07}

หมายเหตุ: จากหนังสือ VACUUM SEALING TECHNIQUES ได้กำหนดค่าอัตราการรั่วซึมที่ยอมรับได้สำหรับปะเก็นทองแดง 3×10^{-5} lusec/cm. (A. Roth, 1994, p17)

ภาคผนวก ง

การวัดความหยาบผิว

การวัดความหยาบผิว

โดยทั่วไปกระบวนการต่างๆ อันนำไปสู่วัตถุประสงค์ในการขึ้นรูปชิ้นงานในแบบต่างๆ นั้นจะเกี่ยวข้องกับการที่ต้องนำเอาผิวของชิ้นงานออกไปบางส่วน แต่ก็มีบางกระบวนการที่ไม่เกี่ยวข้องเช่น การหล่อ การรีด เป็นต้น ถึงอย่างไรก็ตามกระบวนการต่างๆ เหล่านี้ย่อมทำให้สภาพผิวของวัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมไม่มากนักน้อย ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดและรูปแบบนั้นๆ ในการขึ้นรูปชิ้นงาน โดยสภาพพื้นผิวสุดท้ายหลังจากกระบวนการเสร็จสิ้นลงเรียกว่า “พื้นผิวสำเร็จ” (Surface Finish) ในทางวิศวกรรมการประเมินสภาพผิวสำเร็จนั้นจะคำนึงความเรียบผิวของชิ้นงาน โดยพิจารณาจาก “ความหยาบผิว” (Surface Roughness) ที่เกิดขึ้น ซึ่งหมายถึงสภาพผิวที่มีความขรุขระไม่สม่ำเสมอ และมีพื้นที่ของช่องว่างเล็กๆ เป็นจำนวนมาก

ง.1 วิธีการวัดความหยาบผิว (Measurement of Surface Roughness)

ในการวัดความหยาบของวัสดุนั้นสามารถทำได้หลายวิธีด้วยกัน โดยในที่นี้จะกล่าวถึงสามวิธีการหลักที่เป็นที่รู้จักกันโดยทั่วไปคือ (1) วิธีการเปรียบเทียบกับผิวมาตรฐาน (2) เครื่องวัดความหยาบผิวโดยใช้เข็ม และ(3) เครื่องวัดความหยาบผิวโดยใช้เทคนิคทางแสง

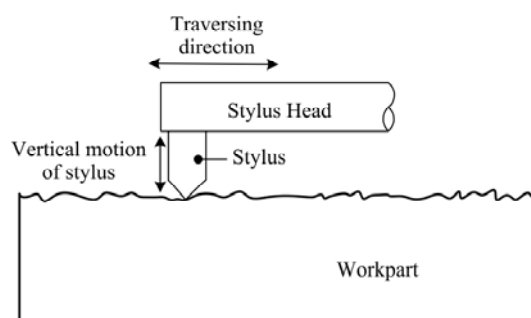
1. วิธีการเปรียบเทียบกับผิวมาตรฐาน (Standard Test Surfaces)

วิธีการนี้เป็นการเปรียบเทียบกับผิวของชิ้นงาน (Surface of Workpart) กับผิวมาตรฐานของชิ้นงานมาตรฐานที่มีอยู่แล้ว (Standard Surface Finish Blocks) ซึ่งประกอบไปด้วยชิ้นงานที่มีผิวมาตรฐานต่างๆ กัน เช่น 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128 μm เป็นต้น โดยในการเปรียบเทียบจะทำการเปรียบเทียบทั้งในเชิงของการใช้สายตาผู้ทดสอบและการทำลวดลายทดสอบ (Fingernail Test) โดยในการทดสอบผู้ใช้ต้องทำลวดลายในลักษณะเดียวกับพื้นผิวมาตรฐานซึ่งต้องใช้กระบวนการที่ทำให้เกิดรอยขีดข่วนอย่างแผ่วเบาบนชิ้นงาน เพื่อให้ได้ลวดลายที่ใกล้เคียงกันกับลวดลายที่อยู่บนพื้นผิวมาตรฐานมากที่สุด ก็คือวิธีการนี้คือความสะดวกในการประเมินสภาพผิวสำเร็จ ใช้เวลาน้อยไม่ซับซ้อนมากจึงเป็นที่นิยมใช้ในกระบวนการผลิตชิ้นงานต่างๆ ซึ่งมีค่าความหยาบผิวกำกับไว้ในแบบการผลิตชิ้นงานนั้นๆ

2. เครื่องวัดความหยาบผิวโดยใช้เข็ม (Stylus Instruments)

วิธีการนี้เป็นการวัดความหยาบผิวของชิ้นงานที่ให้ผลดีกว่าการทำลวดลายทดสอบ จึงเป็นวิธีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ลักษณะของเครื่องมือทดสอบจะประกอบด้วยอุปกรณ์หลักสองส่วนคืออุปกรณ์ที่ใช้ในการสำรวจพื้นผิว (Profiling Devices) ซึ่งใช้เข็มสำรวจ (Stylus) ซึ่งจะส่วนปลายที่เล็กและแข็งแรงมาก ส่วนใหญ่จะใช้เข็มเพชรที่มีลักษณะรูปทรงโคน รัศมีประมาณ 0.005

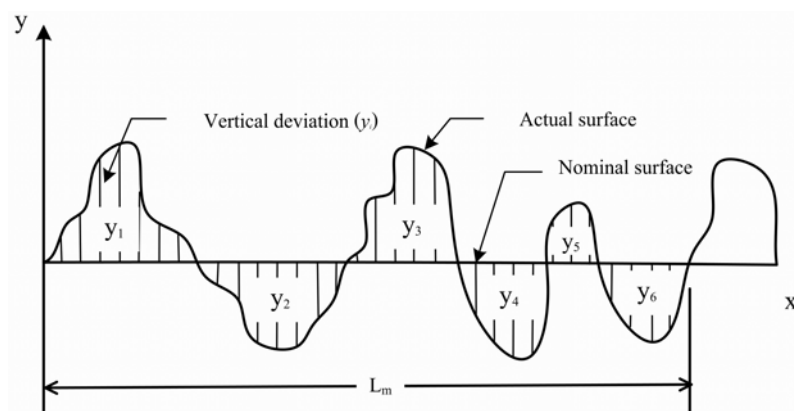
mm. มุมกว้าง 90 องศา โดยในขณะที่ทดสอบจะให้เข็มเคลื่อนที่ไปบนพื้นผิวชิ้นงานอย่างช้าๆ ตามแนวราบด้วยความเร็วคงที่ค่าใดค่าหนึ่ง ดังรูปที่ ง.1 ซึ่งจะสามารถทำให้ได้เห็นลักษณะของ



รูปที่ ง.1 การทำงานของเครื่องวัดความหยาบผิวโดยใช้เข็ม

สภาพพื้นผิวจริงบนชิ้นงาน โดยจะส่งสัญญาณไปแสดงผลยังส่วนที่สอง นอกจากนั้นส่วนที่สองยังทำหน้าที่ในการประเมินค่าความหยาบผิวที่ได้จากส่วนแรกด้วย โดยจะรับสัญญาณจากส่วนแรกแล้วทำการเฉลี่ยค่าที่ได้เพื่อลดลงความแปรปรวนของค่าความหยาบผิวจนนำไปสู่ค่าเฉลี่ยเพียงค่าเดียว (R_a) ดังรูปที่ ง.2 จึงเรียกส่วนนี้ว่าอุปกรณ์เฉลี่ยค่า (Average Devices) โดยการคำนวณจะใช้สมการที่ (ง-1) การประมาณค่าที่ได้จากสมการที่ (ง-1) นั้น จะทำให้ง่ายต่อการคำนวณมากกว่าโดยสมการที่ได้จากการประมาณสมการที่ (ง-1) คือสมการ(ง-2)

$$R_a = \int_0^{L_m} \frac{|y|}{L_m} dx \quad (\text{ง-1})$$



รูปที่ ง.2 การเฉลี่ยค่าความแปรปรวนของความหยาบผิว

$$Ra = \sum_{i=1}^n \frac{|y_i|}{n} \quad (จ-2)$$

เมื่อ	Ra	คือ Arithmetic mean value of roughness (m)
	y	คือ Vertical deviation from nominal surface (m)
	L _m	คือ Length of measurement (m)

3. เครื่องวัดความหยาบผิวโดยใช้เทคนิคทางแสง (Optical Techniques)

นอกจากเครื่องมือที่ใช้ในการวัดความหยาบผิวที่กล่าวมาแล้ว ยังมีเครื่องมืออื่นๆ ที่ใช้เทคนิคทางแสงเข้ามาช่วยในการประเมินสภาพผิว โดยเทคนิคดังกล่าวจะอาศัยหลักการสะท้อนของแสงจากพื้นผิวทดสอบ แล้วดูการกระเจิงของแสงที่ออกมารวมไปถึงเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับเลเซอร์ด้วย ปกติแล้ววิธีการนี้จะใช้ในกรณีที่เข็มสำรวจจากวิธีการที่แล้วไม่สามารถเคลื่อนที่ลงไปถึงหรือช่องว่างเล็กเกินไปทำให้ลำบากต่อการสำรวจพื้นผิว ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าวิธีการนี้เป็นวิธีเดียวที่สามารถทำการสำรวจรายละเอียดของสภาพพื้นผิวได้อย่างสมบูรณ์ที่สุด แต่ค่าที่ได้มานั้นมักจะไม่ค่อยสัมพันธ์กันกับค่าที่ได้จากเครื่องวัดความหยาบผิวโดยใช้เข็ม แต่จะให้ผลในเชิงวิทยาศาสตร์ได้มากกว่า อย่างไรก็ตามวิธีการนี้ค่อนข้างยุ่งยากต่อการทดสอบทำให้ไม่ได้รับความนิยมใช้ในเชิงอุตสาหกรรมแต่ใช้ในวงการวิทยาศาสตร์เพื่อวิจัยมากกว่าวิธีอื่นๆ

ง.2 วิธีการวัดความหยาบผิวในงานวิจัย

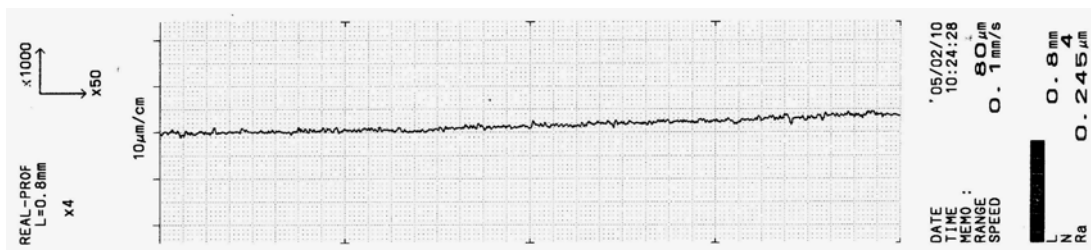
ในการวิจัยครั้งนี้ได้ใช้เครื่องวัดความหยาบผิวโดยใช้เข็ม ทำการวัดความหยาบผิวของปะเก็น โดยกำหนดพารามิเตอร์ต่างๆดังต่อไปนี้

1. กำหนดให้มาตราส่วน (Scale) ของมุมมองการขยายตัวในทิศทาง X เป็น 50 เท่า ในขณะที่ทิศทาง Y เป็น 100 เท่า ทำให้ค่าบนแกน Y ที่อ่านได้มีมาตราส่วนเป็น 10 μm/cm. ดังจะปรากฏอยู่ทางด้านขวามือของทุกรูป (รูปที่เห็นได้มาจากการสแกนภาพที่พิมพ์ออกมาทำให้มาตราส่วนที่แท้จริงคาดเคลื่อนไป)

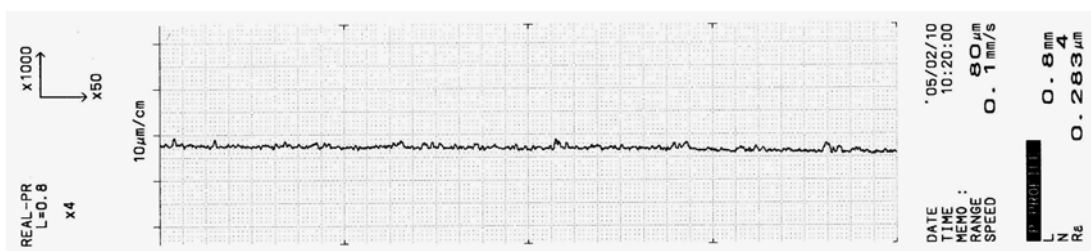
2. กำหนดช่วงของความลึกในการวัดไว้ที่ 80 μm (ในรูปเป็นค่า Range)
3. กำหนดความเร็วในการเคลื่อนที่ของเข็มสำรวจไว้ที่ 0.1 mm/s (ในรูปเป็นค่า Speed)
4. กำหนดช่วงของการทดสอบ (L_m) เท่ากับ 0.8 mm. (ในรูปเป็นค่า L)
5. กำหนดให้เครื่องทำการทดสอบติดต่อกันสี่ช่วง (ในรูปเป็นค่า N)

สุดท้ายคือค่าเฉลี่ยที่เกิดขึ้น (Ra) ซึ่งจะถูกรูปรู้อย่างอัตโนมัติ จากนั้นจึงสามารถนำผลที่ได้ไปวิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบผลดังในตารางที่ ง.1 ต่อไป

จ.3 ตัวอย่างการวัดความหยาบผิวก่อนการอบอ่อน



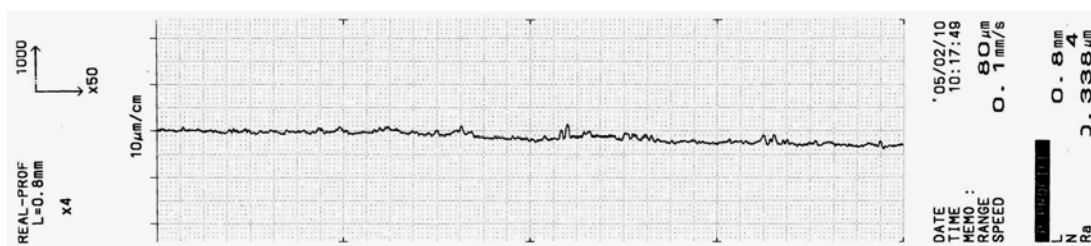
รูปที่ จ.3 ตัวอย่างค่าความหยาบผิวก่อนการอบอ่อน 0.245 μm



รูปที่ จ.4 ตัวอย่างค่าความหยาบผิวก่อนการอบอ่อน 0.283 μm

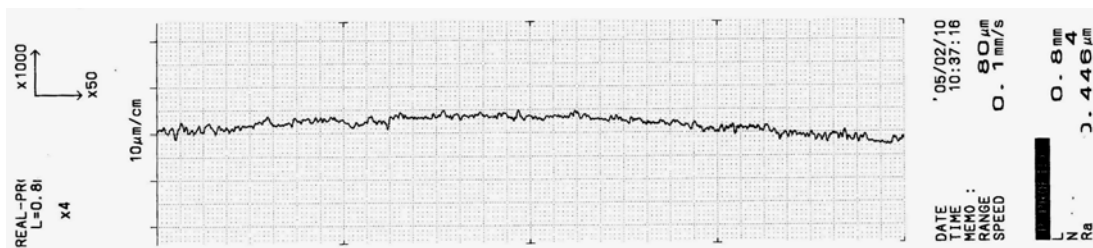


รูปที่ จ.5 ตัวอย่างค่าความหยาบผิวก่อนการอบอ่อน 0.292 μm

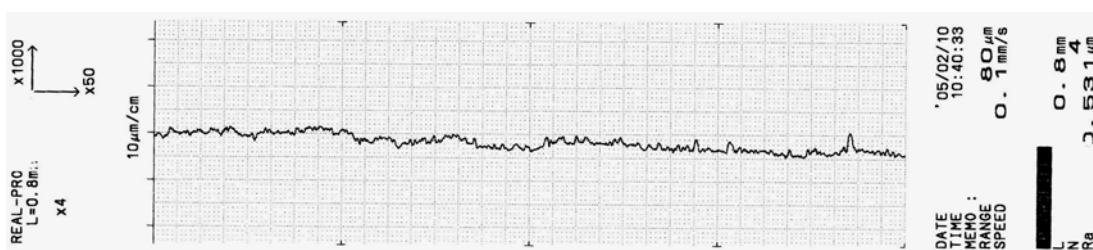


รูปที่ จ.6 ตัวอย่างค่าความหยาบผิวก่อนการอบอ่อน 0.338 μm

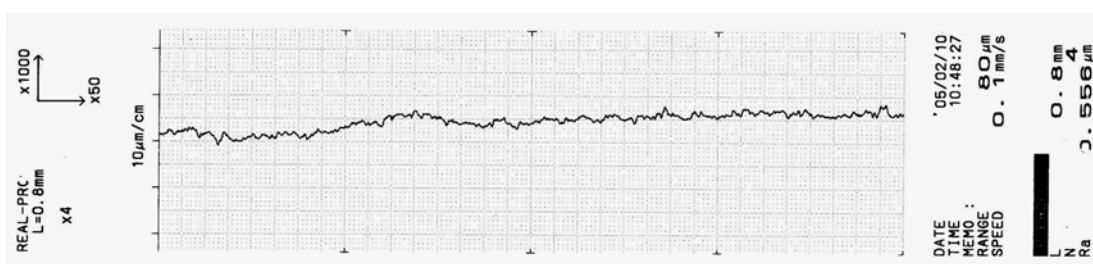
ง.4 ตัวอย่างการวัดความหยาบผิวหลังการอบอ่อนและล้างทำความสะอาด



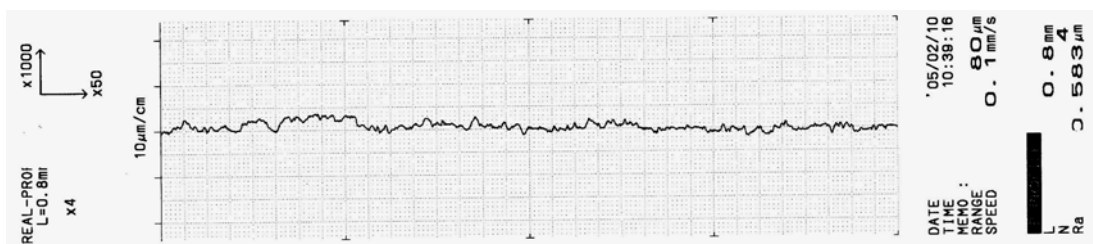
รูปที่ ง.7 ตัวอย่างค่าความหยาบผิวหลังการอบอ่อน 0.446 μm .



รูปที่ ง.8 ตัวอย่างค่าความหยาบผิวหลังการอบอ่อน 0.531 μm .



รูปที่ ง.9 ตัวอย่างค่าความหยาบผิวหลังการอบอ่อน 0.556 μm .



รูปที่ ง.10 ตัวอย่างค่าความหยาบผิวหลังการอบอ่อน 0.583 μm .

ตารางที่ ง.1 ความหยาบผิวของปะเก็นทองแดง

ลำดับ	ความหยาบผิวของปะเก็น	
	ก่อนการอบ(μm)	หลังการอบ(μm)
1	0.245	0.556
2	0.283	0.446
3	0.292	0.531
4	0.338	0.583
5	0.255	0.549
6	0.275	0.535
7	0.300	0.615
8	0.280	0.680
9	0.250	0.717
10	0.350	0.757
11	0.304	0.775
12	0.310	0.786
เฉลี่ย	0.290	0.628

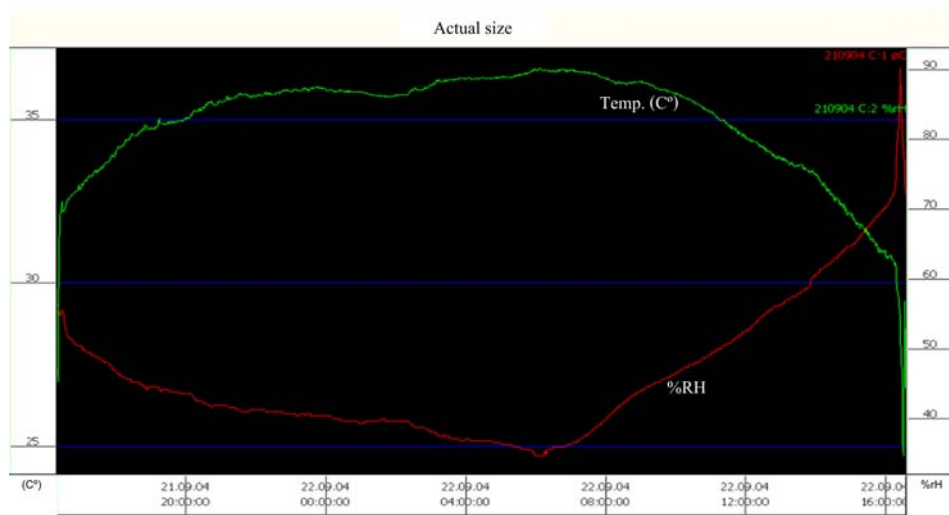
หมายเหตุ: จากหนังสือ VACUUM SEALING TECHNIQUES ได้กำหนดค่าความหยาบผิวที่ต้องการสำหรับปะเก็นทองแดงแบบ Conflat Seal ไว้ไม่เกิน 32 $\mu\text{-inch}$ หรือ 0.813 μm (A. Roth, 1994, p339)

ภาคผนวก จ

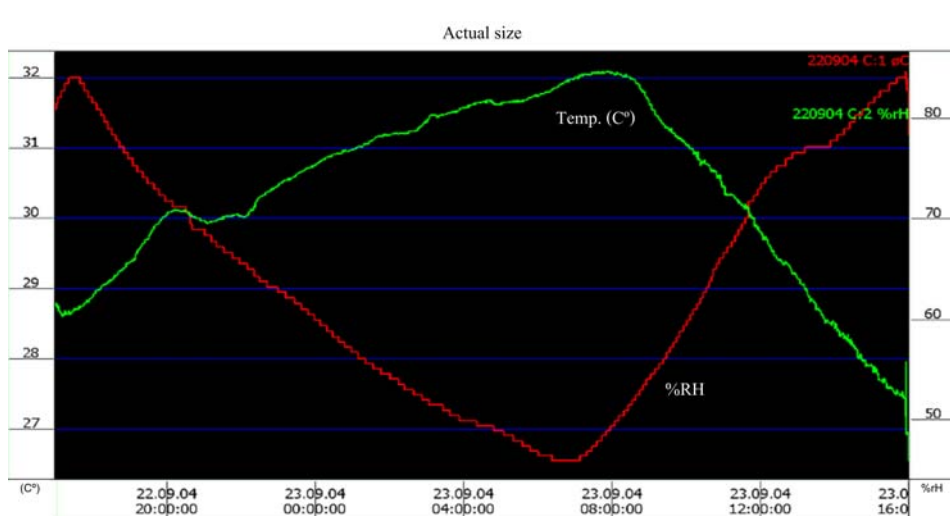
ค่าอุณหภูมิตั้งแต่ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ

การบันทึกอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์

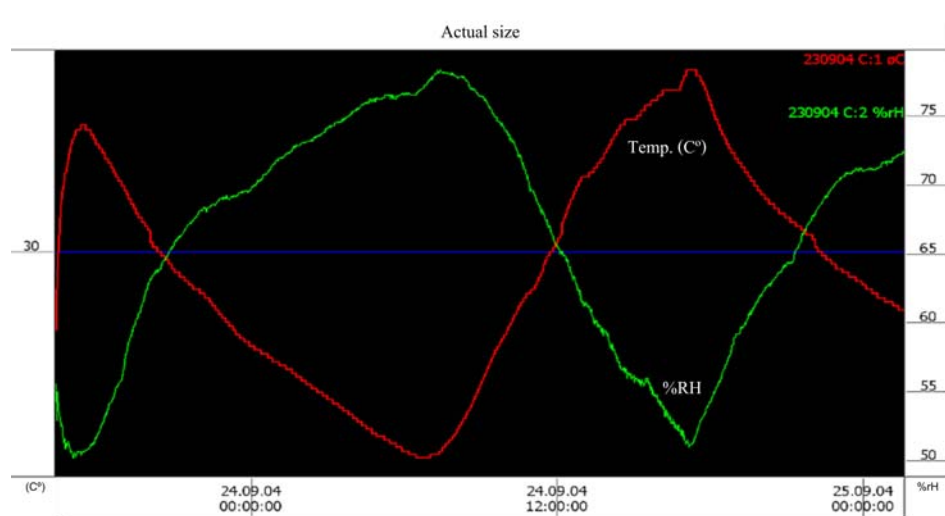
เนื่องจากรอบอ่อนปะเก็นนั้นกระทำในลักษณะสัมผัสกับอากาศและปล่อยให้เย็นตัวลงอย่างช้าภายในเตา จึงจำเป็นต้องใช้เวลาอยู่ในเตาอบค่อนข้างนาน ดังนั้นจึงทำการบันทึกค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในห้องของเตาอบไว้เป็นค่าอ้างอิงสำหรับงานวิจัยครั้งนี้และครั้งต่อไป โดยใช้อุปกรณ์ในการบันทึกข้อมูล(Data logger) ยี่ห้อ Testo รุ่น Testo 175 กำหนดให้บันทึกข้อมูลทุกๆ 1 นาที ดังปรากฏในรูปต่อไปนี้



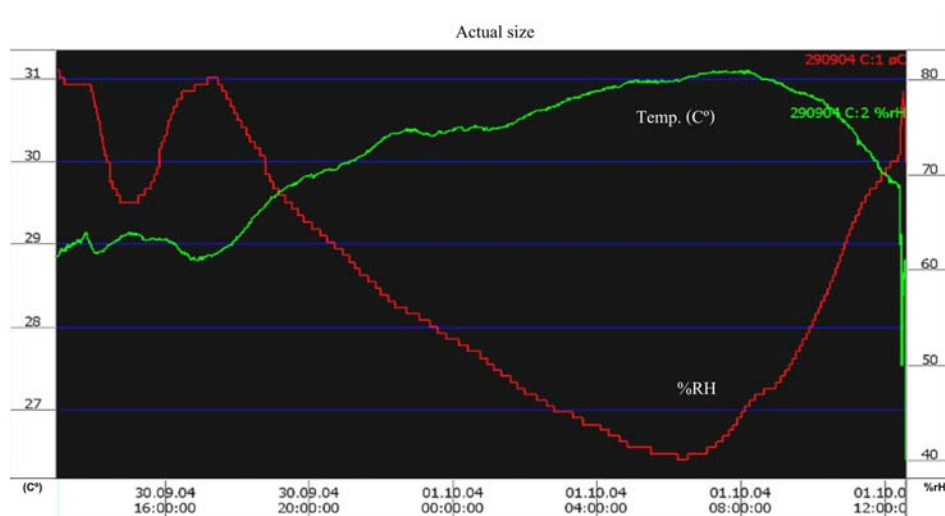
รูปที่ จ.1 ค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องเตาอบ ในวันที่ 21/09/2004



รูปที่ จ.2 ค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องเตาอบ ในวันที่ 22/09/2004.



รูปที่ จ.3 ค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องเตาอบ ในวันที่ 23/09/2004.ถึง 24/09/2004



รูปที่ จ.4 ค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องเตาอบ ในวันที่ 30/09/2004.ถึง 1/09/2004

ภาคผนวก ฉ

เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

1. เครื่องวัดความหยาบผิววัสดุ



รูปที่ ๑.1 ภาพถ่ายเครื่องวัดความหยาบผิววัสดุ

โดยมีรายละเอียดดังนี้

ผู้ผลิต	Mitutoyo / Surface Measuring Instrument		
รุ่น	SURFTEST SV-400		
หมายเลขรหัส	178-891E		
เลขหมายประจำเครื่อง	7F0137		
ช่วงความลึกการวัด(μm)	600	80	8
ความละเอียด(μm)	0.1	0.01	0.001



รูปที่ ๑.2 ภาพถ่ายเข็มสำรวจจากเครื่องวัดความหยาบผิววัสดุ

2. เครื่องวัดความแข็งวัสดุ



รูปที่ ๓.3 ภาพถ่ายเครื่องวัดความแข็ง

โดยมีรายละเอียดดังนี้

ผู้ผลิต	Wilson/Rockwell Hardness Tester
รุ่น	Series500 B503-R 220V 50Hz
เลขหมายประจำเครื่อง	97384401
ภาระกรรมหลัก	60 kg
ภาระกรรมรอง	10 kg
ขนาดหัวกด	1/16 Inch.
หน่วยที่เลือกใช้วัด	Hardness Rowell Scale F (HRF)

3. เตาอบวัสดุ



รูปที่ ๓.4 ภาพถ่ายเตาอบ

โดยมีรายละเอียดดังนี้

ผู้ผลิต	Carbolite : England
รุ่น	CWF
อุณหภูมิสูงสุด	1100 °C
ปริมาตร	13 L
ขดลวดให้ความร้อน	ฝังอยู่ด้านข้างของผนังเตาทั้ง 2 ด้าน

4. Rotary Pump



รูปที่ ๓.5 ภาพถ่าย Rotary Pump

โดยมีรายละเอียดดังนี้

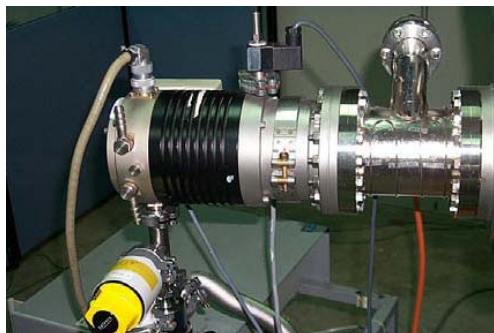
ผู้ผลิต

Alcatel : France

รุ่น

PASCAL 2015

5. Turbomolecular Pump



รูปที่ ๓.6 ภาพถ่าย Turbomolecular Pump

โดยมีรายละเอียดดังนี้

ผู้ผลิต

SHIMAZZU : Japan

รุ่น

303M EZL 159

อัตราการสูบ

320 L/sec

ความเร็วรอบ

45,000 rpm

6. เครื่องวิเคราะห์แก๊สที่เหลืออยู่ในระบบ (Residual Gasses Analyzer)



รูปที่ ๗.7 ภาพถ่ายเครื่องวิเคราะห์แก๊สที่เหลืออยู่ในระบบ

โดยมีรายละเอียดดังนี้

ผู้ผลิต

PFEIFFER : France

รุ่น

QMA 200

หมายเหตุ ในการใช้งานจะใช้แก๊สฮีเลียมเป็นแก๊สทดสอบหารอยรั่ว โดยบรรจุไว้ในดังรูปที่ ๗.8



รูปที่ ๗.8 ภาพถ่ายถังบรรจุแก๊สฮีเลียม

7. อุปกรณ์อื่นๆ

7.1 ประแจปรับขนาดแรงบิด



รูปที่ ๗.๙ ภาพถ่ายประแจปรับขนาดแรงบิด

7.2 ดิจิตอลเวอร์เนีย



รูปที่ ๗.๑๐ ภาพถ่ายการใช้เวอร์เนียวัดขนาด

7.3 ขาดังสำหรับวางปะเก็น



รูปที่ ฉ.11 ภาพถ่ายขาดังสำหรับวางปะเก็น

7.4 อุปกรณ์ให้ความร้อนขณะทำความสะอาด



รูปที่ ฉ.12 อุปกรณ์ให้ความร้อนขณะทำความสะอาด

7.5 ถุงมือ



รูปที่ ฉ.13 ภาพถ่ายถุงมือกันความร้อน

ประวัติผู้เขียน

นายเมธี โสภณ เกิดเมื่อวันที่ 17 พฤศจิกายน พุทธศักราช 2516 เริ่มเข้าศึกษาระดับปริญญาตรีสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาเมื่อปี พุทธศักราช 2540 หลังจากสำเร็จการศึกษาได้เข้าทำงานกับบริษัทไดซิน โคเกียวก จำกัด ซึ่งเป็นบริษัทผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ ต่อมาได้เข้าทำงานที่ศูนย์ปฏิบัติการวิจัยเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ในปี พุทธศักราช 2540 จากประสบการณ์การทำงานและความสนใจในวิชาชีพวิศวกรรม จึงได้ขอลาศึกษาต่อในระดับปริญญาโท โดยได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโทวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ในปี พุทธศักราช 2546