

**สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง**

**การศึกษาอิทธิพลของการบ่มต่อคุณสมบัติทางกลของ  
โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว**



เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 83174  
วัน,เดือน,ปี..... - 6 ส.ค. 2551

b. 110 20 15 3  
i. ....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**INFLUENCE OF AGING TREATMENT ON  
MECHANICAL BEHAVIORS OF  
LEAD-FREE SOLDER ALLOYS**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR OF ENGINEERING IN INDUSTRIAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2007**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองปริญญาโท

หัวข้อปริญญาโทเรื่อง การศึกษาอิทธิพลของการบ่มต่อคุณสมบัติทางกลของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว  
Influence of aging treatment on mechanical behaviors of lead-free solder alloys

นักศึกษา นายพงศกร บุญรอด รหัสประจำตัว 47010470  
นายสิทธิชัย แก้วสองศรี รหัสประจำตัว 47010833  
นายสุทัศน์ ปฐมกุล รหัสประจำตัว 47010864  
นายอาทิตย์ หุตะประทีน รหัสประจำตัว 47010980

หลักสูตร วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาโท

(ผศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ)

(ดร.อนิรุท ไชยจรรณิข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

|                                 |  |            |                       |
|---------------------------------|--|------------|-----------------------|
| <b>หัวข้อปริญญานิพนธ์เรื่อง</b> | การศึกษาอิทธิพลของการบ่มต่อคุณสมบัติทางกลของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว |            |                       |
| <b>นักศึกษา</b>                 | นายพงศกร   | บุญรอด     | รหัสประจำตัว 47010470 |
|                                 | นายสิทธิชัย  | แก้วสองศรี | รหัสประจำตัว 47010833 |
|                                 | นายสุทัศน์   | ปฐมกุล     | รหัสประจำตัว 47010864 |
|                                 | นายอาทิตย์   | หุตะประพิน | รหัสประจำตัว 47010980 |
| <b>หลักสูตร</b>                 | วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม                     |            |                       |
|                                 | สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง                     |            |                       |
| <b>ปีการศึกษา</b>               | 2550   |            |                       |
| <b>อาจารย์ที่ปรึกษา</b>         | ผศ.ดร.กรรณชัย  | กัลยาศิริ  |                       |
|                                 | ดร.อนิรุท  | ไชยจารุวิช |                       |

### บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการศึกษาถึงค่าความแข็งและแรงดึงของ โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วเทียบกับ โลหะบัดกรีที่มี ตะกั่วเป็นส่วนผสม โดยจะเก็บผลค่าความแข็ง (Hardness) กับ แรงดึง (Tensile strength) หลังจากโลหะบัดกรีผ่านการ บ่มที่ระยะเวลาต่างกัน โดยโลหะบัดกรีที่ศึกษาเป็นโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วทั้งหมด 5 ชนิด และโลหะบัดกรีที่มีตะกั่ว 1 ชนิด เวลาที่ใช้ในการบ่มคือ 0, 3, 5 และ 7 วัน ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 85% จากนั้น โลหะ บัดกรีจะถูกนำไปทดสอบความแข็ง ศึกษาจุลโครงสร้างของโลหะบัดกรี และในที่สุดท้ายจะเป็นการทดสอบค่า Tensile strength ซึ่งผลที่ได้จากโครงการนี้แสดงให้เห็นว่า การบ่มมีผลต่อค่าความแข็งและแรงดึงของโลหะบัดกรี ซึ่ง จุลโครงสร้างที่เปลี่ยนแปลงไปหลังจากทำการบ่มจะถูกศึกษาในโครงการนี้ด้วยเช่นกัน

**Thesis Title** Influence of aging treatment on mechanical behavior lead-free solder alloy

**Student** Mr. Pongsakorn Boonrod  
Mr. Sittichai Kawsongsri  
Mr. Suthat Pathomkul  
Mr. Athit Hutaprapin

**Degree** Bachelor of Engineering in Industrial Engineering  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

**Academic Year** 2550

**Project Advisor** Asst. Prof. Dr.Kannachai Kanlayasiri  
Dr. Anirut Chaijaruwanch

### Abstract

This project studied hardness and tensile strength of lead and lead-free solders after aging in different aging time. All solders, lead solder and 5 types of lead-free solders, were aged for 0, 3, 5, and 7 days, respectively. Aging temperature was 80 degree celcius and relative humidity was 85%. Solders were then examined on hardness, microstructure and tensile strength. Results showed that aging time had effects on hardness and tensile strength of the solder alloys. Microstructures of the alloys were also studied and discussed in this project.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เรื่องการศึกษาอิทธิพลของการบ่มต่อคุณสมบัติทางกลของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วฉบับนี้ สามารถดำเนินการจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีนั้น เนื่องมาจากความพยายามและตั้งใจของคณะผู้จัดทำ ซึ่งทางคณะผู้จัดทำได้หวังเป็นอย่างยิ่งว่าปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จะประโยชน์กับท่านผู้สนใจบ้างไม่มากก็น้อย รวมถึงเป็นข้อมูลช่วยเหลือประกอบการพิจารณาการใช้งานโลหะบัดกรีต่อไปในอนาคต

ผู้จัดทำขอขอบคุณอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ศศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ และ ดร.อนิรุท ไชยจรรวมวิษ สำหรับคำแนะนำรวมถึงเสนอความคิดและแนวทางในการแก้ไขปัญหาและข้อบกพร่องต่างๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างทำโครงการขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการขอใช้เครื่องกลึงอัตโนมัติ CNC รวมถึงเครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile strength) และขอบคุณบริษัท อุตครีเอทีฟ จำกัด สำหรับการสนับสนุนและช่วยเหลือติดต่อในเรื่องของโลหะบัดกรีทั้งหมดเพื่อทำการทดสอบคุณสมบัติทางกล รวมถึงสถาบันเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ (Thai Microelectronics Center-TMEC) ในการให้ความอนุเคราะห์ใช้อุปกรณ์กล้อง SEM และ EDX เพื่อศึกษาตรวจจุลโครงสร้างของโลหะบัดกรี หลังจากการบ่ม โดยไม่คิดค่าใช้จ่ายใดๆ ในการให้บริการแก่ทางสถาบัน

ท้ายสุดนี้ทางคณะผู้จัดทำขอขอบคุณบิดามารดาผู้ให้กำเนิด เป็นกำลังใจที่ดีในการให้ความสนับสนุนในทุกๆ ด้านตลอดมา และขอขอบคุณอาจารย์และเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรมทุกท่าน ที่ให้คำแนะนำและช่วยเหลือในทุกๆ เรื่อง ซึ่งนับเป็นส่วนที่สำคัญมากที่ทำให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้

นายพงศกร บุญรอด  
นายสิทธิชัย แก้วสองศรี  
นายสุทัศน์ ปุ่มบุกุล  
นายอาทิตย์ หุตะประพิน

## สารบัญ

|   | หน้า |
|---|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย.....  | ก    |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....   | ข    |
| กิตติกรรมประกาศ.....  | ค    |
| สารบัญ.....   | ง    |
| สารบัญตาราง.....  | ช    |
| สารบัญรูป.....  | ณ    |
| <b>บทที่ 1 บทนำ</b>   |      |
| 1.1. ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ.....  | 1    |
| 1.2. วัตถุประสงค์ของโครงการ.....  | 1    |
| 1.3. ขอบเขตของโครงการ.....  | 1    |
| 1.4. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....   | 1    |
| <b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>  |      |
| 2.1. ระเบียบว่าด้วยการจัดการใช้สารอันตรายบางชนิดในผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ (RoHS) ของกลุ่มประเทศสหภาพยุโรป..... | 2    |
| 2.2. ตัวอย่างการใช้งาน.....   | 3    |
| 2.3. คุณสมบัติราคาของลวดบัดกรีไร้สารตะกั่วตระกูล SAC.....   | 4    |
| 2.3.1. เงิน.....  | 4    |
| 2.3.2. ดีบุก.....   | 5    |
| 2.3.3. ทองแดง.....  | 6    |
| 2.4. ข้อควรพิจารณาเบื้องต้นในการใช้ลวดบัดกรีแบบไร้สารตะกั่ว.....  | 7    |
| 2.5. การวิจัยอ้างอิงและตัวอย่างอุปกรณ์ลวดเชื่อมไร้สารตะกั่ว.....  | 8    |
| 2.6. ทฤษฎีการบ่ม (Aging).....   | 11   |
| 2.7. มาตรฐาน ASTM.....  | 13   |
| 2.7.1. ความเป็นมาของ ASTM.....  | 13   |
| 2.7.2. การจัดแบ่งมาตรฐาน ASTM.....  | 13   |
| 2.7.3. การจัดพิมพ์ Annual book of ASTM standards.....   | 14   |
| 2.8. ความแข็งและการทดสอบ.....   | 15   |
| 2.8.1. การทวนสอบเครื่องทดสอบความแข็ง.....   | 17   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

|   | หน้า |
|---|------|
| 2.8.2. การสอบเทียบแผ่นความแข็งมาตรฐาน.....                  | 18   |
| 2.8.3. การทดสอบความแข็งแบบร็อกเวลล์.....                    | 19   |
| 2.8.4. การทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์.....                     | 21   |
| 2.8.5. การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ส.....                    | 22   |
| 2.8.6. การทดสอบความแข็งแบบ Shore.....                       | 23   |
| 2.8.7. สเกลความแข็งแบบ Mohs.....                            | 24   |
| 2.8.8. การทดสอบความแข็งแบบ Barcol.....                      | 25   |
| 2.9. คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ.....                           | 26   |
| 2.9.1. ความเครียด.....                                      | 26   |
| 2.9.2. ความเค้น.....  | 27   |
| 2.9.3. ความแข็งกด.....                                      | 27   |
| 2.9.4. ชีดจำกัดยืดหยุ่น.....                                | 27   |
| 2.9.5. ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่น.....                       | 28   |
| 2.9.6. ชีดจำกัดเชิงอัตราส่วน.....                           | 28   |
| 2.9.7. ความแข็งเฉือน.....                                   | 28   |
| 2.9.8. ความแข็งดึง.....                                     | 28   |
| 2.9.9. จุดคราก.....   | 29   |
| 2.9.10. ความแข็งคราก.....                                   | 29   |
| 2.9.11. การเปลี่ยนรูป.....                                  | 29   |
| 2.9.12. ความยืดหยุ่น.....                                   | 29   |
| 2.9.13. พลาสติกซิตี.....                                    | 29   |
| 2.10. แรงดึงและการทดสอบ.....                                | 30   |
| 2.11. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....              | 33   |
| 2.11.1. ข้อแตกต่างระหว่าง SEM กับ TEM.....                  | 34   |
| 2.11.2. ข้อแตกต่างระหว่าง OM และ SEM.....                   | 34   |
| 2.11.3. การทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด..... | 35   |
| 2.12. Transmission Electron Microscope (TEM).....           | 37   |
| 2.12.1. การทำงานของ TEM.....                                | 37   |
| 2.13. เครื่องตรวจสอบส่วนประกอบของวัสดุ.....                 | 38   |
| 2.14. ความชื้นสัมบูรณ์และความชื้นสัมพัทธ์.....              | 39   |
| 2.14.1. ความชื้นสัมบูรณ์.....                               | 39   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

|  | หน้า |
|--|------|
| 2.14.2. ความชื้นสัมพัทธ์.....  | 39   |
| 2.15. ตารางเปรียบเทียบคุณสมบัติลวดเชื่อม.....                            | 41   |
| <b>บทที่ 3 การออกแบบและวิธีการดำเนินงาน</b>                              |      |
| 3.1. โลหะบัดกรีที่ใช้ในงานวิจัย.....                                     | 42   |
| 3.1.1. การบ่มโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว.....                                 | 43   |
| 3.2. การทดสอบหาค่าความแข็ง.....  | 45   |
| 3.2.1. การเตรียมชิ้นผิวชิ้นงานทดสอบ.....                                 | 45   |
| 3.3. ผลการเตรียมชิ้นงานก่อนการศึกษาจุล โครงสร้างที่สถาบัน TMEC.....      | 47   |
| 3.4. การตรวจสอบจุล โครงสร้างโดยใช้กล้อง Optical Microscope.....          | 49   |
| 3.4.1. ขั้นตอนการตรวจสอบจุล โครงสร้างโดยใช้กล้อง Optical Microscope..... | 49   |
| 3.5. การเตรียม โลหะบัดกรีรูปแบบมาตรฐานก่อนการทดสอบค่า Tensile.....       | 54   |
| 3.6. การทดสอบค่า Tensile Test.....                                       | 55   |
| <b>บทที่ 4 ผลการทดลอง</b>  |      |
| 4.1. ผลค่าความแข็งของ โลหะบัดกรี.....                                    | 57   |
| 4.1.1. โลหะบัดกรีที่ไม่ผ่านการบ่ม.....                                   | 57   |
| 4.1.2. โลหะบัดกรีที่ผ่านการบ่ม 3 วัน.....                                | 58   |
| 4.1.3. โลหะบัดกรีที่ผ่านการบ่ม 5 วัน.....                                | 59   |
| 4.1.4. โลหะบัดกรีที่ผ่านการบ่ม 7 วัน.....                                | 60   |
| 4.1.5. สรุปผลจากการทดสอบความแข็ง.....                                    | 61   |
| 4.2. ผลค่าแรงดึงของ โลหะบัดกรี.....                                      | 62   |
| 4.2.1. โลหะบัดกรีที่ไม่ผ่านการบ่ม.....                                   | 62   |
| 4.2.2. โลหะบัดกรีที่ผ่านการบ่ม 3 วัน.....                                | 65   |
| 4.2.3. โลหะบัดกรีที่ผ่านการบ่ม 5 วัน.....                                | 68   |
| 4.2.4. โลหะบัดกรีที่ผ่านการบ่ม 7 วัน.....                                | 71   |
| 4.2.5. สรุปผลจากการทดสอบค่า Tensile strength.....                        | 74   |
| 4.3. ผลค่า Elongation ของ โลหะบัดกรี.....                                | 75   |
| 4.3.1. โลหะบัดกรีที่ไม่ผ่านการบ่ม.....                                   | 75   |
| 4.3.2. โลหะบัดกรีที่ผ่านการบ่ม 3 วัน.....                                | 78   |
| 4.3.3. โลหะบัดกรีที่ผ่านการบ่ม 5 วัน.....                                | 81   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

|   | หน้า |
|---|------|
| 4.3.4. โลหะบัดกรีที่ผ่านการบ่ม 7 วัน.....   | 84   |
| 4.3.5. สรุปผลจากการทดสอบค่า Elongation..... | 87   |
| <b>บทที่ 5 สรุปผล</b>                       |      |
| 5.1. สรุปผล.....                            | 88   |
| หนังสืออ้างอิง.....                         | 89   |
| ภาคผนวก.....                                | ผ1   |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

|   | หน้า |
|---|------|
| ตารางที่ 2.1 สเกลความแข็งของรีอควอลล์.....                              | 20   |
| ตารางที่ 2.2 ชนิดของเครื่องทดสอบความแข็ง Shore Durometer.....           | 24   |
| ตารางที่ 2.3 แสดงความแข็งของวัสดุในสเกลความแข็งแบบ Mohs.....            | 25   |
| ตารางที่ 2.4 เปรียบเทียบคุณสมบัติลวดเชื่อม.....                         | 41   |
| ตารางที่ 3.1 จำนวนจำนวนชิ้นงานทดสอบที่ใช้ในการบ่ม.....                  | 42   |
| ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบค่าความแข็งของโลหะบัดกรีที่ไม่ผ่านการบ่ม.....    | 57   |
| ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบค่าความแข็งของโลหะบัดกรีที่ผ่านการบ่ม 3 วัน..... | 58   |
| ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบค่าความแข็งของโลหะบัดกรีที่ผ่านการบ่ม 5 วัน..... | 59   |
| ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบค่าความแข็งของโลหะบัดกรีที่ผ่านการบ่ม 7 วัน..... | 60   |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

|   | หน้า |
|---|------|
| รูปที่ 2.1 ตัวอย่างวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ECU ที่ใช้ในการควบคุมการทำงานตามส่วนต่างๆของรถยนต์.....   | 3    |
| รูปที่ 2.2 แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งได้มีการเชื่อมต่อกันของส่วนประกอบต่างๆ ทางอิเล็กทรอนิกส์<br>เพื่อใช้ในการควบคุมวงจรการทำงานของระบบไฟฟ้า.....  | 4    |
| รูปที่ 2.3 โครงสร้างของโลหะบัดกรี 96.5Sn3.5Ag ซึ่งยังไม่ได้ผ่านการบ่มซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนว่า<br>อนุภาค Ag <sub>3</sub> Sn ยังมีลักษณะที่เป็นเม็ดละเอียด ซึ่งยังทำให้มีค่า yield strength ที่คืออยู่..... | 8    |
| รูปที่ 2.4 โครงสร้างของโลหะบัดกรี 96.5Sn3.5Ag ซึ่งได้ผ่านการบ่มมาแล้วซึ่งจะเห็น ได้ชัดเจนว่า<br>อนุภาค Ag <sub>3</sub> Sn มีลักษณะที่หยาบขึ้น ซึ่งมีผลทำให้มีค่า Yield Strength ที่ต่ำลง.....           | 8    |
| รูปที่ 2.5 แสดงถึงลักษณะ โครงสร้างของโลหะบัดกรี Sn-Ag .....   | 9    |
| รูปที่ 2.6 ถึงลักษณะอนุภาค Ag <sub>3</sub> Sn ที่มีลักษณะคล้ายเข็ม โดยที่มีสาเหตุมาจาก<br>Cooling Rate ที่ช้า ซึ่งจะส่งผลทำให้มีค่า Yield Strength ที่ต่ำ.....  | 9    |
| รูปที่ 2.7 กราฟของความเค้นและความเครียดของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว96.5Sn3.5Ag โดยที่ขึ้นงาน<br>ผ่านการบ่มและไม่ผ่านการบ่ม.....  | 10   |
| รูปที่ 2.8 กราฟของความเค้นและความเครียดของการทดสอบค่า Tensile Test ของโลหะบัดกรี<br>ไร้สารตะกั่ว 96.5Sn3.5Ag โดยที่มีขนาดของชิ้นงานต่างกัน.....   | 10   |
| รูปที่ 2.9 ลำดับชั้นของพลังงานความร้อนที่สะสมอยู่ในโลหะผสมที่ได้รับการบ่ม.....  | 11   |
| รูปที่ 2.10 อนุภาค Microstructure ที่มีโครงสร้างที่เปลี่ยน ไปตามพลังงานความร้อนที่อนุภาค<br>ได้สะสมไว้ตามระยะเวลาที่ทำการบ่ม ณ อุณหภูมิหนึ่ง .....  | 12   |
| รูปที่ 2.11 หลักการความแข็งร็อคเวลล์.....   | 20   |
| รูปที่ 2.12 แสดงหลักการความแข็งบริเนลล์.....  | 22   |
| รูปที่ 2.13 หลักการความแข็งวิกเกอร์ส.....   | 23   |
| รูปที่ 2.14 เครื่องทดสอบความแข็ง Shore Sclerocscope.....  | 23   |
| รูปที่ 2.15 เครื่องทดสอบความแข็ง Shore Durometer.....   | 23   |
| รูปที่ 2.16 เครื่องทดสอบความแข็ง Barcol.....  | 26   |
| รูปที่ 2.17 ความเครียดเชิงเส้นและความเครียดเฉือน.....   | 26   |
| รูปที่ 2.18 ความเค้นและความเครียดในแนว 3 มิติ.....  | 27   |
| รูปที่ 2.19 วิธีการหาโมดูลัสแบบต่างๆ จากกราฟความเค้นและความเครียดแบบไม่เป็นเส้นตรง.....   | 28   |
| รูปที่ 2.20 ภาพรวมของกราฟแรง-การเปลี่ยนรูปของผลิตภัณฑ์.....   | 29   |
| รูปที่ 2.21 ระดับความยืดหยุ่นจากกราฟที่มีภาวะและคิงภาวะออก.....   | 30   |
| รูปที่ 2.22 กราฟความเค้น-ความเครียดของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำในสภาพอบอ่อน.....  | 31   |
| รูปที่ 2.23 กราฟความเค้น-ความเครียดของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำผ่านการชุบแข็ง (A) และ<br>ที่ผ่านการชุบแข็งและอบคืนตัว (B).....  | 32   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

|  | หน้า |
|--|------|
| รูปที่ 2.24 กราฟความเค้น-ความเครียดของเหล็กกล้าคาร์บอนที่ผ่านอบอ่อนและรีดปรับผิว .....             | 33   |
| รูปที่ 2.25 ความสามารถในการแยกจุด 2 จุด.....   | 33   |
| รูปที่ 2.26 ความแตกต่างของกล้อง OM, TEM และ SEM .....  | 34   |
| รูปที่ 2.27 ขั้นตอนการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด .....                            | 35   |
| รูปที่ 2.28 ส่วนประกอบและการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....                       | 36   |
| รูปที่ 2.29 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด .....  | 37   |
| รูปที่ 2.30 ส่วนประกอบและการทำงานของเครื่อง TEM .....  | 38   |
| รูปที่ 2.31 เครื่อง TEM.....   | 38   |
| รูปที่ 2.32 ระบบการทำงานของเครื่อง EDX.....  | 38   |
| รูปที่ 2.33 เครื่อง EDX.....   | 39   |
| รูปที่ 2.34 โนโมกราฟและการใช้งาน .....   | 40   |
| รูปที่ 3.1 การจัดวางโลหะบัดกรีในคู่ออบ.....  | 43   |
| รูปที่ 3.2 อุณหภูมิและความชื้นที่ใช้ในการอบ.....   | 44   |
| รูปที่ 3.3 หีบโลหะบัดกรีออกจากคู่ออบ.....  | 44   |
| รูปที่ 3.4 นำโลหะบัดกรีแช่ทิ้งไว้ในน้ำจนอุณหภูมิลดลง.....  | 44   |
| รูปที่ 3.5 โลหะบัดกรีก่อนการตัด.....   | 45   |
| รูปที่ 3.6 รูปชิ้นงานหลังทำการตัดแบ่งเพื่อใช้ในการทดสอบความแข็ง.....                               | 45   |
| รูปที่ 3.7 การเตรียมชิ้นทดลองในแบบหล่อ.....  | 46   |
| รูปที่ 3.8 เครื่องขัดผิวละเอียดและลักษณะการขัด.....  | 46   |
| รูปที่ 3.9 เครื่อง Energy Dispersive X-Ray Spectrometer (EDX).....                                 | 47   |
| รูปที่ 3.10 Field Emission Cathode - Scanning Electron Microscope (FE-SEM).....                    | 47   |
| รูปที่ 3.11 เครื่องขัดชิ้นงานแบบละเอียด.....   | 48   |
| รูปที่ 3.12 เครื่องตัดชิ้นงาน .....  | 48   |
| รูปที่ 3.13 เครื่อง Optical Microscope.....  | 49   |
| รูปที่ 3.14 การส่องเกรนของโลหะบัดกรี.....  | 50   |
| รูปที่ 3.15 โครงสร้างโลหะบัดกรีส่วนผสม 96.5Sn/3Ag/0.5Cu ในช่วงเวลาการบ่ม 0, 3, 5 และ 7 วัน .....   | 50   |
| รูปที่ 3.16 โครงสร้างโลหะบัดกรีส่วนผสม 95.8Sn/3.5Ag/0.7Cu ในช่วงเวลาการบ่ม 0, 3, 5 และ 7 วัน ..... | 51   |
| รูปที่ 3.17 โครงสร้างโลหะบัดกรีส่วนผสม 98.3Sn/1Ag/0.7Cu ในช่วงเวลาการบ่ม 0, 3, 5 และ 7 วัน .....   | 51   |
| รูปที่ 3.18 โครงสร้างโลหะบัดกรีส่วนผสม 99.3Sn/0.7Cu ในช่วงเวลาการบ่ม 0, 3, 5 และ 7 วัน .....       | 52   |
| รูปที่ 3.19 โครงสร้างโลหะบัดกรีส่วนผสม 99Sn/0.3Ag/0.7Cu ในช่วงเวลาการบ่ม 0, 3, 5 และ 7 วัน .....   | 52   |
| รูปที่ 3.20 โครงสร้างโลหะบัดกรีส่วนผสม 63Sn/37Pb ในช่วงเวลาการบ่ม 0, 3, 5 และ 7 วัน.....           | 53   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ญ  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

|   | หน้า |
|---|------|
| รูปที่ 3.21 จุดโครงสร้างเฟส Sn-Matrix ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วตระกูล SAC ส่วนผสม 96.5Sn/3Ag/.05Cu โดยรูป A มีกำลังขยาย 20000 เท่า และรูป B มีกำลังขยาย 100000 เท่า.....          | 53   |
| รูปที่ 3.22 จุดโครงสร้างเฟส Ag <sub>3</sub> Sn ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วตระกูล SAC ส่วนผสม 96.5Sn/3Ag/.05Cu โดยรูป A มีกำลังขยาย 20000 เท่า และรูป B มีกำลังขยาย 100000 เท่า..... | 54   |
| รูปที่ 3.23 ขนาดชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM.....   | 55   |
| รูปที่ 3.24 ชั้นทดสอบที่ได้ขนาดตามมาตรฐาน (ASTM).....   | 56   |
| รูปที่ 3.25 เครื่องทดสอบแรงดึง.....   | 56   |
| รูปที่ 3.26 ชิ้นงานที่ขาดเนื่องจากการดึง.....   | 56   |
| รูปที่ 4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งเทียบกับลวดบัดกรีแต่ละส่วนผสม ที่ผ่านการบ่มในเวลาต่างกัน.....  | 61   |
| รูปที่ 4.2 กราฟค่า Force Peak, Strain Peak และ Stress Peak ของส่วนผสม 96.5Sn-3Ag-0.5Cu.....   | 62   |
| รูปที่ 4.3 กราฟค่า Force Peak, Strain Peak และ Stress Peak ของส่วนผสม 95.8Sn-3.5Ag-0.7Cu.....   | 62   |
| รูปที่ 4.4 กราฟค่า Force Peak, Strain Peak และ Stress Peak ของส่วนผสม 98.3Sn-1Ag-0.7Cu.....   | 63   |
| รูปที่ 4.5 กราฟค่า Force Peak, Strain Peak และ Stress Peak ของส่วนผสม 99.3Sn-0.7Cu.....   | 63   |
| รูปที่ 4.6 กราฟค่า Force Peak, Strain Peak และ Stress Peak ของส่วนผสม 99Sn-0.3Ag-0.7Cu.....   | 64   |
| รูปที่ 4.7 กราฟค่า Force Peak, Strain Peak และ Stress Peak ของส่วนผสม 63Sn-37Cu.....  | 64   |
| รูปที่ 4.8 กราฟค่า Force Peak, Strain Peak และ Stress Peak ของส่วนผสม 96.5Sn-3Ag-0.5Cu.....   | 65   |
| รูปที่ 4.9 กราฟค่า Force Peak, Strain Peak และ Stress Peak ของส่วนผสม 95.8Sn-3.5Ag-0.7Cu.....   | 65   |
| รูปที่ 4.10 กราฟค่า Force Peak, Strain Peak และ Stress Peak ของส่วนผสม 98.3Sn-1Ag-0.7Cu.....  | 66   |
| รูปที่ 4.11 กราฟค่า Force Peak, Strain Peak และ Stress Peak ของส่วนผสม 99.3Sn-0.7Cu.....  | 66   |
| รูปที่ 4.12 กราฟค่า Force Peak, Strain Peak และ Stress Peak ของส่วนผสม 99Sn-0.3Ag-0.7Cu.....  | 67   |
| รูปที่ 4.13 กราฟค่า Force Peak, Strain Peak และ Stress Peak ของส่วนผสม 63Sn-37Cu.....   | 67   |
| รูปที่ 4.14 กราฟค่า Force Peak, Strain Peak และ Stress Peak ของส่วนผสม 96.5Sn-3Ag-0.5Cu.....  | 68   |
| รูปที่ 4.15 กราฟค่า Force Peak, Strain Peak และ Stress Peak ของส่วนผสม 96.5Sn-3Ag-0.5Cu.....  | 68   |
| รูปที่ 4.16 กราฟค่า Force Peak, Strain Peak และ Stress Peak ของส่วนผสม 98.3Sn-1Ag-0.7Cu.....  | 69   |
| รูปที่ 4.17 กราฟค่า Force Peak, Strain Peak และ Stress Peak ของส่วนผสม 99.3Sn-0.7Cu.....  | 69   |
| รูปที่ 4.18 กราฟค่า Force Peak, Strain Peak และ Stress Peak ของส่วนผสม 99Sn-0.3Ag-0.7Cu.....  | 70   |
| รูปที่ 4.19 กราฟค่า Force Peak, Strain Peak และ Stress Peak ของส่วนผสม 63Sn-37Cu.....   | 70   |
| รูปที่ 4.20 กราฟค่า Force Peak, Strain Peak และ Stress Peak ของส่วนผสม 96.5Sn-3Ag-0.5Cu.....  | 71   |
| รูปที่ 4.21 กราฟค่า Force Peak, Strain Peak และ Stress Peak ของส่วนผสม 95.8Sn-3.5Ag-0.7Cu.....  | 71   |
| รูปที่ 4.22 กราฟค่า Force Peak, Strain Peak และ Stress Peak ของส่วนผสม 98.3Sn-1Ag-0.7Cu.....  | 72   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ฅ  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

|   | หน้า |
|---|------|
| รูปที่ 4.23 กราฟค่า Force Peak, Strain Peak และ Stress Peak ของส่วนผสม 99.3Sn-0.7Cu.....                                | 72   |
| รูปที่ 4.24 กราฟค่า Force Peak, Strain Peak และ Stress Peak ของส่วนผสม 99Sn-0.3Ag-0.7Cu .....                           | 73   |
| รูปที่ 4.25 กราฟค่า Force Peak, Strain Peak และ Stress Peak ของส่วนผสม 63Sn-37Cu.....                                   | 73   |
| รูปที่ 4.26 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Stress Peak เทียบกับลวดบังคับกรีแต่ละส่วนผสม<br>ที่ผ่านการบ่ม ในเวลาต่างกัน..... | 74   |
| รูปที่ 4.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Force กับ Elongation ของส่วนผสม 96.5Sn-3Ag-0.5Cu.....                        | 75   |
| รูปที่ 4.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Force กับ Elongation ของส่วนผสม 95.8Sn-3.5Ag-0.7Cu.....                      | 75   |
| รูปที่ 4.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Force กับ Elongation ของส่วนผสม 98.3Sn-1Ag-0.7Cu.....                        | 76   |
| รูปที่ 4.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Force กับ Elongation ของส่วนผสม 99.3Sn-0.7Cu.....                            | 76   |
| รูปที่ 4.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Force กับ Elongation ของส่วนผสม 99Sn-0.3Ag-0.7Cu.....                        | 77   |
| รูปที่ 4.32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Force กับ Elongation ของส่วนผสม 63Sn-37Pb.....                               | 77   |
| รูปที่ 4.33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Force กับ Elongation ของส่วนผสม 96.5Sn-3Ag-0.5Cu.....                        | 78   |
| รูปที่ 4.34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Force กับ Elongation ของส่วนผสม 95.8Sn-3.5Ag-0.7Cu.....                      | 78   |
| รูปที่ 4.35 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Force กับ Elongation ของส่วนผสม 98.3Sn-1Ag-0.7Cu.....                        | 79   |
| รูปที่ 4.36 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Force กับ Elongation ของส่วนผสม 99.3Sn-0.7Cu.....                            | 79   |
| รูปที่ 4.37 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Force กับ Elongation ของส่วนผสม 99Sn-0.3Ag-0.7Cu.....                        | 80   |
| รูปที่ 4.38 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Force กับ Elongation ของส่วนผสม 63Sn-37Pb.....                               | 80   |
| รูปที่ 4.39 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Force กับ Elongation ของส่วนผสม 96.5Sn-3Ag-0.5Cu.....                        | 81   |
| รูปที่ 4.40 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Force กับ Elongation ของส่วนผสม 95.8Sn-3.5Ag-0.7Cu.....                      | 81   |
| รูปที่ 4.41 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Force กับ Elongation ของส่วนผสม 98.3Sn-1Ag-0.7Cu.....                        | 82   |
| รูปที่ 4.42 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Force กับ Elongation ของส่วนผสม 99.3Sn-0.7Cu.....                            | 82   |
| รูปที่ 4.43 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Force กับ Elongation ของส่วนผสม 99Sn-0.3Ag-0.7Cu.....                        | 83   |
| รูปที่ 4.44 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Force กับ Elongation ของส่วนผสม 63Sn-37Pb.....                               | 83   |
| รูปที่ 4.45 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Force กับ Elongation ของส่วนผสม 96.5Sn-3Ag-0.5Cu.....                        | 84   |
| รูปที่ 4.46 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Force กับ Elongation ของส่วนผสม 95.8Sn-3.5Ag-0.7Cu.....                      | 84   |
| รูปที่ 4.47 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Force กับ Elongation ของส่วนผสม 98.3Sn-1Ag-0.7Cu.....                        | 85   |
| รูปที่ 4.48 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Force กับ Elongation ของส่วนผสม 99.3Sn-0.7Cu.....                            | 85   |
| รูปที่ 4.49 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Force กับ Elongation ของส่วนผสม 99Sn-0.3Ag-0.7Cu.....                        | 86   |
| รูปที่ 4.50 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Force กับ Elongation ของส่วนผสม 63Sn-37Pb.....                               | 86   |
| รูปที่ 4.51 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Elongation เทียบกับลวดบังคับกรีแต่ละส่วนผสม<br>ที่ผ่านการบ่ม ในเวลาต่างกัน.....  | 87   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ฅ  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1. ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ

ในปัจจุบันประเทศไทยได้มีการพัฒนาทางด้านอุตสาหกรรมเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และก้าวไปพร้อมกับความก้าวหน้าทางด้านเทคโนโลยี แต่อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ในปัจจุบันนี้ ยังใช้โลหะบัดกรีที่มีส่วนผสมของตะกั่วอยู่ ทำให้เกิดปัญหามลพิษทางด้านสิ่งแวดล้อมและเป็นเหตุทำให้เกิดขยะอิเล็กทรอนิกส์มากขึ้น ขยะเหล่านี้เช่นแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งในแผงวงจรนี้จะมีงานบัดกรีที่มีส่วนผสมของตะกั่ว ซึ่งตะกั่วจะเป็นมลพิษสิ่งแวดล้อมส่งผลกระทบต่อสุขภาพของประชาชนทำให้เกิดการสะสมของสารตะกั่วในร่างกายได้ และโลหะบัดกรีที่มีส่วนผสมของตะกั่วจะถูกบังคับให้เลิกใช้ตั้งแต่วันที่ 1 กรกฎาคม 2549 โดยจะมีโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วเข้ามาแทนที่ ด้วยเหตุผลนี้ จึงเป็นที่มาของการศึกษาถึงผลกระทบของการบัดกรีด้วยโลหะบัดกรี เพื่อเป็นแนวทางหนึ่งในการพัฒนาคุณภาพของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วต่อไปในอนาคต

### 1.2. วัตถุประสงค์ของโครงการ

เพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกลของ โลหะบัดกรีก่อนและหลังทำการบ่ม (Aging) ที่เวลาต่างๆ

### 1.3. ขอบเขตของโครงการ

ทำการทดสอบคุณสมบัติทางกล ได้แก่ ความแข็งและความเหนียวของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว หลังจากผ่านกระบวนการบ่ม (Aging) ที่อุณหภูมิและเวลาตามที่ได้กำหนดไว้ โดยมีส่วนผสม ดังนี้ 63Sn-37Pb, Sn-0.3Ag-0.7Cu, Sn-1.0Ag-0.7Cu, Sn-0.3Ag-0.5Cu, Sn-3.5Ag-0.7Cu, Sn-0.7Cu

### 1.4. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาและปรับปรุงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วในอนาคต
2. ได้รับความรู้เกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกลของวัสดุที่ผ่านการบ่ม ที่ช่วงเวลาและส่วนผสมต่างๆ
3. เพื่อเป็นองค์ความรู้ที่สามารถนำไปใช้งานได้เมื่อจบการศึกษา

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1. ระเบียบว่าด้วยการจำกัดการใช้สารอันตรายบางชนิดในผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ (RoHS) ของกลุ่มประเทศสหภาพยุโรป

ในอดีตโลหะบัดกรีจะประกอบด้วยดีบุกและตะกั่วเป็นหลัก ซึ่งตะกั่วเป็นธาตุที่มีอันตรายต่อสภาพแวดล้อมและชีวิตมนุษย์ โลหะบัดกรีแบบไร้สารตะกั่วจึงเป็นทางเลือกใหม่ที่จะมาทดแทนโลหะบัดกรีแบบเดิม จึงมีระเบียบข้อกำหนดที่เป็นสากลมาจำกัดการใช้สารที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม ได้แก่ ระเบียบ RoHS

ระเบียบ RoHS เป็นระเบียบที่มุ่งเน้นการจำกัดการใช้สารที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมที่ต้นเหตุ โดยจำกัดการใช้สารอันตรายบางประเภทในผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ และทำให้การนำทรัพยากรกลับคืนและการทิ้งซากผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าฯ ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด ระเบียบนี้ครอบคลุมผลิตภัณฑ์เดียวกับ WEEE ยกเว้นเฉพาะผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในกลุ่ม 8 และ 9 (เครื่องมือแพทย์ และเครื่องมือวัดและควบคุม ตามลำดับ) โดยระเบียบนี้เสนอให้ใช้สารอื่นทดแทน สารตะกั่ว สารปรอท สารแคดเมียม สารโครเมียม-เฮกซะวาเลนต์ (Cr-VI) สารโพลีโบรมิเนท-ไบฟีนิล (PolyBrominated Biphenyls-PBB) และ สารโพลีโบรมิเนท-ไดฟีนิล-อีเทอร์ (PolyBrominated DiphenylEthers-PBDE) ในผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าฯ ภายในวันที่ 1 กรกฎาคม 2549 ทั้งนี้ไม่รวมชิ้นส่วนที่นำเข้ตลาดก่อนปี พ.ศ. 2546 แต่มีข้อยกเว้นสารตะกั่ว ปรอท แคดเมียม และ โครเมียม-เฮกซะวาเลนต์ (Cr VI) ในผลิตภัณฑ์บางชนิดดังนี้

- สารปรอท ใน Compact fluorescent lamps ในปริมาณไม่เกิน 5 มิลลิกรัมต่อหลอด
- สารปรอท ในหลอดฟลูออเรสเซนต์ แบบตรงสำหรับใช้งานทั่วไป โดย
- หลอดที่ใช้ Halophosphate ให้มีปรอทได้ไม่เกิน 10 มิลลิกรัมต่อหลอด
- Triphosphate ที่มีช่วงชีวิตปกติ ไม่เกิน 5 มิลลิกรัมต่อหลอด
- Triphosphate ที่มีช่วงชีวิตยาว ไม่เกิน 8 มิลลิกรัมต่อหลอด
- สารปรอท ในหลอดหลอดฟลูออเรสเซนต์ แบบตรง สำหรับใช้งานพิเศษ
- สารปรอท ในหลอดไฟที่ไม่ได้กล่าวในที่นี้
- สารตะกั่ว ที่ผสมในแก้วของ หลอดภาพ ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ และ หลอดฟลูออเรสเซนต์
- สารตะกั่ว ที่ใช้ใน โลหะอัลลอย (Alloying element)
- ในเหล็ก ให้ที่มีปริมาณตะกั่วได้ไม่เกิน 0.35% โดยน้ำหนัก
- ในอลูมิเนียม ให้มีปริมาณตะกั่วได้ไม่เกิน 0.4% โดยน้ำหนัก
- ในทองแดง ให้มีปริมาณตะกั่วได้ไม่เกิน 4% โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
2

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

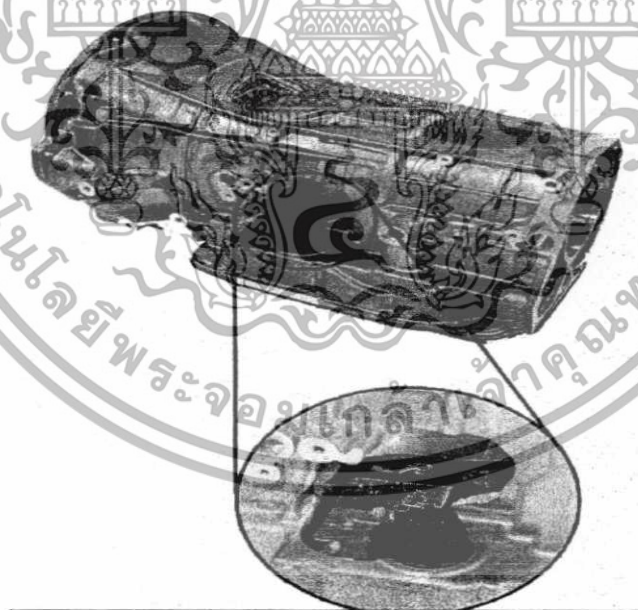
- สารตะกั่วในสารบัดกรีชนิดจุดหลอมเหลวสูง ตะกั่วบัดกรีใน เครื่องคอมพิวเตอร์แม่ข่าย หน่วยเก็บข้อมูล และชุดเก็บข้อมูล (ได้รับการยกเว้นถึงปี ค.ศ. 2010) ตะกั่วบัดกรีในระบบเครือข่ายคอมพิวเตอร์ที่ใช้สำหรับสวิทซ์ซึ่งให้ สัญญาณ ส่งผ่านข้อมูล รวมถึงการบริหารเครือข่ายในการสื่อสาร และสารตะกั่ว ในชิ้นส่วนเซรามิกอิเล็กทรอนิกส์
- สารแคดเมียม ในการเคลือบผิวหน้าเพื่อป้องกันการกัดกร่อนในการใช้งานบางประเภท
- สาร โครเมียม-เฮกซะวาเลนซ์ ในการป้องกันการกัดกร่อนเหล็กคาร์บอนในระบบหล่อเย็นใน Absorption refrigerators

ชนิดของสารอันตรายที่ห้ามใช้ รวมถึงรายการข้อยกเว้นที่ได้มีการระบุในระเบียบนี้ อาจมีการเพิ่มหรือลด ได้ อีกในอนาคตทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความก้าวหน้าทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีในสาขาที่เกี่ยวข้อง

แต่ในปัจจุบันความเข้าใจเกี่ยวกับพฤติกรรมและกลไกต่างๆของ โลหะเชื่อมไร้สารตะกั่วยังไม่อยู่ในระดับที่ เพียงพอ ดังนั้นการศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับโลหะเชื่อมไร้สารตะกั่วจึงมีความจำเป็นเพื่อใช้ในการพัฒนาอุปกรณ์ต่างๆให้ มีประสิทธิภาพสูงสุด ตัวอย่างเช่น ECU

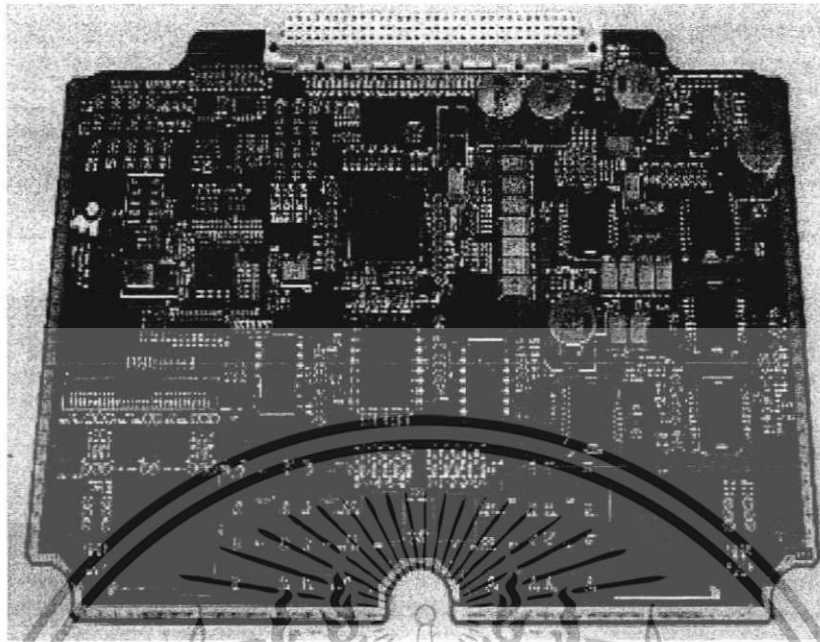
## 2.2. ตัวอย่างการใช้งาน

ECU เป็นอุปกรณ์วงจรทางอิเล็กทรอนิกส์ที่ต้องมีการเชื่อมต่อกันของแต่ละชิ้นส่วนเพื่อใช้ในการควบคุม วงจร ไฟฟ้าภายในรถยนต์ รอยเชื่อมในอุปกรณ์และวงจรอิเล็กทรอนิกส์ทั่วไปจะทำหน้าที่เป็นทั้งตัวนำกระแสไฟฟ้า และมีหน้าที่ ในการยึดอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ในวงจรเข้าไว้ด้วยกัน



รูปที่ 2.1 ตัวอย่างวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ECU ที่ใช้ในการควบคุมการทำงานตามส่วนต่างๆของรถยนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 แสดงแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งได้มีการเชื่อมต่อกันของส่วนประกอบต่างทางอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อใช้ในการควบคุมวงจรการทำงานของระบบไฟฟ้า

การที่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ประกอบด้วยวัสดุหลากหลายชนิดอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงในวงจรจึงเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญโดยอาจส่งผลให้เกิดการขยายตัวและหดตัวที่ไม่เท่ากันของส่วนประกอบต่างๆ เนื่องจากโลหะเชื่อมเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงและจุดหลอมเหลวต่ำ การเปลี่ยนแปลงส่วนใหญ่จึงเกิดในบริเวณโลหะเชื่อม และสะสมตามจำนวนรอบของวงจรเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจนนำไปสู่ความเสียหายของรอยเชื่อมในที่สุด ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อทรัพย์สิน หรือชีวิตมนุษย์ได้

### 2.3. คุณสมบัติธาตุของลวดบัดกรีไร้สารตะกั่วตระกูล SAC

ลวดบัดกรีไร้สารตะกั่วตระกูล SAC จะเป็นลวดบัดกรีไร้สารตะกั่วที่มีเงิน (Silver) ดีบุก (Tin) และทองแดง (Copper) เป็นส่วนประกอบ ซึ่งอาจจะมีส่วนผสมในปริมาณที่แตกต่างกันออกไป แล้วแต่ผู้ทำการผสม ซึ่งปริมาณของธาตุที่ต่างกันออกไป ก็ทำให้ลวดบัดกรีไร้สารตะกั่วนี้แสดงคุณสมบัติทางกลแตกต่างกันออกไปด้วย

#### 2.3.1. เงิน (Silver)

|               |   |
|---------------|---|
| สัญลักษณ์ธาตุ | Ag  |
| เลขอะตอม      | 47 (เป็นธาตุลำดับที่ 2 ของหมู่ IB ในตารางธาตุ จัดเป็นโลหะทรานซิชัน) |
| น้ำหนักอะตอม  | 107.870 amu   |
| จุดหลอมเหลว   | 961.93 องศาเซลเซียส   |
| จุดเดือด      | 2210 องศาเซลเซียส   |
| ความหนาแน่น   | 10.5 g/cm <sup>3</sup> ที่ 20 องศาเซลเซียส                          |

เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับสำหรับใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### การใช้ประโยชน์

1. ใช้ทำขดลวดแลกเปลี่ยนความร้อน (heat exchange coils) และอุปกรณ์การระเหย
2. ใช้ทำอุปกรณ์สำหรับทำปฏิกิริยาเคมี
3. ใช้เตรียมซิลเวอร์ในครด ซิลเวอร์โบรไมด์ ซึ่งใช้เป็นน้ำยาการถ่ายภาพ
4. ใช้ในอุตสาหกรรมเภสัชภัณฑ์
5. ใช้เป็นตัวเร่ง (Catalyst) ในปฏิกิริยาหลายประเภท เช่น ปฏิกิริยาการเตรียมเอทีลิน

### ความเป็นพิษ

เงินในรูปของธาตุอิสระเป็นพิษไม่มากนัก แต่เกลือส่วนใหญ่เป็นพิษ (เพราะแอนไอออน) สารประกอบของเงินเมื่อเข้าสู่ร่างกายจะถูกดูดเข้าสู่ระบบการหมุนเวียนของโลหิตได้ และถูกรีดิวซ์ ทำให้โลหะเงินตกค้างตามเนื้อเยื่อต่างๆ ผลก็คือผิวหนังเกิดจุดสีเทา สภาวะเช่นนี้เรียกว่า Argyria

### 2.3.2. ดีบุก (Tin)

|                    |  |
|--------------------|--|
| สัญลักษณ์ธาตุ      | Sn   |
| เลขอะตอม           | 50 (เป็นธาตุลำดับที่ 4 ของหมู่ IV A ในตารางธาตุ จัดเป็นโลหะ) |
| น้ำหนักอะตอม       | 118.7 amu  |
| จุดหลอมเหลว        | 231.97 องศาเซลเซียส  |
| จุดเดือด           | 2270 องศาเซลเซียส  |
| ความหนาแน่น        | 7.31 g/cm <sup>3</sup> ที่ 20 องศาเซลเซียส                   |
| เลขออกซิเดชันสามัญ | +4, +2   |

### การใช้ประโยชน์

ดีบุกเป็นโลหะชนิดหนึ่งที่มีการใช้ประโยชน์กันอย่างกว้างขวาง ตัวอย่างการใช้ประโยชน์ที่สำคัญมีดังนี้

1. ใช้ทำแผ่นดีบุก (tinplate) ซึ่งเป็นแผ่นเหล็กกล้าบาง มีปริมาณคาร์บอนต่ำ เคลือบด้วยดีบุก โดยกระบวนการ Electrodeposition ปริมาณกึ่งหนึ่งของดีบุกที่ผลิตได้นำไปใช้ประโยชน์ในการผลิตแผ่นดีบุกนี้ แผ่นดีบุกใช้ทำกระป๋อง และภาชนะต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกระป๋องและภาชนะบรรจุอาหาร
2. ใช้ทำโลหะเชื่อมกับโลหะอื่นๆ เช่น เชื่อมกับตะกั่วเกิดโลหะเชื่อมที่นิยมเรียกว่า soft solders เชื่อมกับทองแดง เรียกว่า tin-bronzes เชื่อมกับพลวงและทองแดงใช้ทำ Pewterware เป็นต้น
3. ใช้เคลือบผิวโลหะอื่นๆ
4. ใช้เตรียมสารประกอบต่างๆ ของดีบุก

### ความเป็นพิษ

โลหะดีบุกในปริมาณเล็กน้อยไม่ปรากฏความเป็นพิษต่อร่างกาย ดังนั้นอาหารที่บรรจุด้วยกระป๋องดีบุกจึงปลอดภัยจากความเป็นพิษจากดีบุก

### 2.3.3. ทองแดง (Copper)

|                    |  |
|--------------------|--|
| สัญลักษณ์ธาตุ      | Cu   |
| เลขอะตอม           | 29   |
| น้ำหนักอะตอม       | 63.546 amu                                 |
| จุดหลอมเหลว        | 1084 องศาเซลเซียส                          |
| จุดเดือด           | 2567 องศาเซลเซียส                          |
| ความหนาแน่น        | 8.92 g/cm <sup>3</sup> ที่ 20 องศาเซลเซียส |
| เลขออกซิเดชันสามัญ | +1,+2                                      |

#### การใช้ประโยชน์

ทองแดงและทองแดงผสมมีสมบัติดีเด่นหลายประการ เช่น

1. มีความแข็งแรงในช่วงที่ทอใช้งานได้ ทั้งยังสามารถปรับปรุงคุณสมบัติทางกลได้หลายระดับ (ขึ้นกับชนิดของทองแดง และกรรมวิธีการผลิต)
2. ความเหนียวของทองแดงสูงมาก สามารถขึ้นรูปโดยไม่เสี่ยงต่อการแตกหัก
3. เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีมาก
4. เป็นตัวนำความร้อนที่ดีมาก
5. กลึงไสเข้ารูปได้ง่าย เมื่อผสมธาตุบางตัวเข้าไป
6. ต้านทานความล้าได้ดีพอสมควร
7. ไม่เป็นสารแม่เหล็ก
8. ทนทานต่อการกัดกร่อน โดยเฉพาะเมื่อใช้กับกรดและน้ำทะเล
9. ทนทานต่อการสึกกร่อนได้ดีพอสมควร

โดยทั่วไป เราจะเรียกว่า ทองแดงบริสุทธิ์ (Copper) เมื่อทองแดงมีธาตุหรือสิ่งแปลกปลอมอื่นๆ ปนอยู่ไม่เกิน 0.5% โดยน้ำหนัก ส่วนทองแดงผสม คือ มีทองแดงเป็นส่วนผสมอยู่ระหว่าง 40-99 % โดยน้ำหนัก

โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่มีส่วนประกอบทั้ง Sn และ Ag จะมีโครงสร้างของ Sn-Ag eutectic และ Sn-dendrite โดยจะมี Ag<sub>3</sub>Sn กระจายตัวอยู่ระหว่างโครงสร้างทั้งสองซึ่ง Ag<sub>3</sub>Sn จะมีทั้งอนุภาคที่เป็นทั้งทรงกลมเล็กละเอียดและเป็นแท่ง หลังจากทำการบ่ม จะเกิดการรวมกันของ Sn และ Ag<sub>3</sub>Sn อย่างรวดเร็ว ทำให้จุดโครงสร้างมีขนาดใหญ่ขึ้นและมีลักษณะค่อนข้างหยาบและโครงสร้าง Eutectic จะมีการกระจายตัวน้อยใน Phase ของ Ag<sub>3</sub>Sn ที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งการที่จุดโครงสร้าง มีขนาดใหญ่ขึ้นและมีลักษณะค่อนข้างหยาบ จากผลการวิจัยของวารสารทางวิชาการต่างๆ จะพบว่า มีผลทำให้คุณสมบัติทางกลของ โลหะบัดกรีมีค่าที่ลดลง

## 2.4. ข้อควรพิจารณาเบื้องต้นในการใช้โลหะบัดกรีแบบไร้สารตะกั่ว (Lead-free)

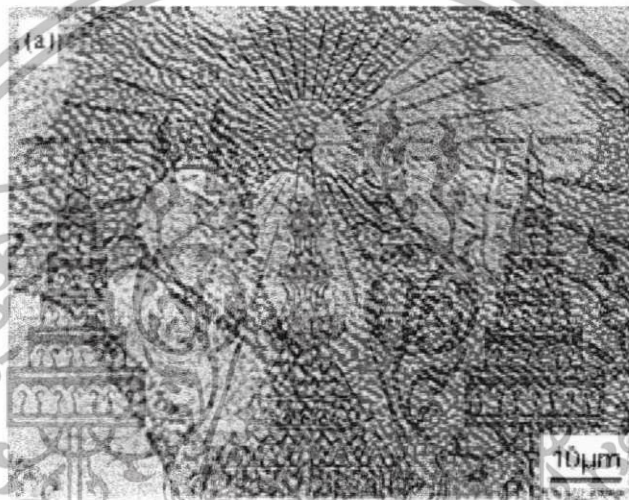
โลหะบัดกรีที่เป็นส่วนผสมระหว่าง สารดีบุกและสารตะกั่ว โดยส่วนผสมที่นิยมใช้งาน คือ 63Sn/37Pb ซึ่งมีข้อดีหลายประการ เช่น ราคาถูก จุดบัดกรีมีความแข็งแรงและความเงางาม นำไฟฟ้าได้ดี เป็นต้น ดังนั้นการที่จะนำโลหะบัดกรีชนิดไม่มีสารตะกั่ว (Lead-free) มาใช้งานแทนโลหะบัดกรีชนิด 63Sn/37Pb นั้น มีข้อควรพิจารณาเบื้องต้นดังนี้

1. ราคาของโลหะบัดกรีชนิดไม่มีสารตะกั่ว (Lead-free) โดยทั่วไปจะสูงกว่าโลหะบัดกรี 63Sn/37Pb อย่างน้อย 35 % เนื่องจากโลหะที่จะนำมาแทนสารตะกั่วจะเป็นโลหะที่หายากและมีอยู่อย่างจำกัด เช่น บิสมัท (Bismuth) อินเดียม (Indium) หรือเงิน (Silver) เป็นต้น จะส่งผลให้ต้นทุนของสินค้าสูงขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าเป็นการใช้โลหะบัดกรีแบบแท่ง (Solder bar) สำหรับเครื่อง Wave soldering หรือโลหะบัดกรีแบบเส้น (Solder wire) สำหรับการบัดกรีด้วยมือจะมีปริมาณการใช้สูงกว่าตะกั่วหลว (solder paste) ซึ่งโดยทั่วไปปริมาณโลหะบัดกรีแบบแท่งหรือแบบเส้นที่ใช้ จะเป็นส่วนประกอบหลักของต้นทุนการผลิต
2. จุดหลอมเหลวของโลหะบัดกรีชนิดไม่มีสารตะกั่ว โดยทั่วไปจะสูงกว่าโลหะบัดกรีชนิด 63Sn/37Pb การที่โลหะบัดกรีมีจุดหลอมเหลวสูง ก็หมายถึงเราต้องปรับตั้งอุณหภูมิของเครื่องหลอมตะกั่วให้สูงขึ้นด้วย ซึ่งอาจทำให้ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์เสียหายได้ หรืออาจทำให้แผงวงจรเกิดการเปลี่ยนสี บิดงอเนื่องจากอุณหภูมิที่สูงเกินไป
3. ความสามารถในการนำไฟฟ้าต้องดีพอที่จะ ไม่ทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ลดลง
4. ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนที่เกิดจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต้องดีพอ
5. ต้องมีความเป็นพิษต่อร่างกายต่ำ ซึ่งก็คือวัตถุประสงค์หลักของการใช้โลหะบัดกรีชนิดไม่มีสารตะกั่ว
6. ต้องใช้ได้ดีกับเครื่องหลอมตะกั่วที่มีอยู่ โดยไม่ต้องคิดแปลงมาก หรือต้องซื้อระบบใหม่ อาจยอมรับการเปลี่ยนแปลงโดยเล็กน้อย เช่น เพิ่มระบบจ่ายก๊าซ ไนโตรเจน ( $N_2$ ) ในเครื่อง Wave Soldering หรือเครื่อง Reflow Soldering เพื่อปรับปรุงคุณภาพของจุดบัดกรี เนื่องจากต้นทุนของการติดตั้งระบบจ่ายก๊าซ ไนโตรเจนโดยทั่วไปจะไม่สูงมากนัก
7. คุณสมบัติทางกายภาพ เช่น ความแข็งแรง ความทนทานของจุดบัดกรีต้องไม่ด้อยไปกว่าลวดบัดกรีชนิด 63Sn/37Pb
8. ควรมีจุดหลอมเหลวคงที่ เนื่องจากในการผลิตสินค้าปริมาณมากๆ (Mass Volume) จะต้องมีกระบวนการควบคุมความผันแปรต่างๆ ในกระบวนการผลิต เพื่อไม่ให้ปริมาณของเสียในการผลิตมีมากเกินไป ซึ่งจะสังเกตได้ว่าโลหะบัดกรีที่มีส่วนผสมของโลหะตั้งแต่ 4 ชนิดขึ้นไป จะมีจุดหลอมเหลวที่มีลักษณะเป็นช่วงอุณหภูมิไม่คงที่ที่อุณหภูมิใดอุณหภูมิหนึ่ง ดังนั้นการเลือกใช้โลหะบัดกรีประเภทนี้ จะทำให้ประสบปัญหาในกระบวนการผลิตได้
9. ความสวยงามของจุดบัดกรี (Solder joint cosmetics) ควรจะใกล้เคียงกับโลหะบัดกรีชนิด 63Sn/37Pb
10. โลหะที่จะนำมาทดแทนสารตะกั่วต้องหาได้ง่าย ผู้ผลิตสามารถผลิตออกมาแข่งขันกันได้อย่างกว้างขวาง ซึ่งจะส่งผลให้ราคาลดลงในอนาคต
11. ถึงแม้กระแสด้านความต้องการโลหะบัดกรีชนิดไม่มีสารตะกั่วกำลังมาแรง ดังที่กล่าวมาข้างต้น แต่ก็ต้องยอมรับว่าแผ่นวงจรพิมพ์ (PCB) และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดติดตั้งบนพื้นผิว (SMD) หลายรายยังคงไม่สามารถเลิกใช้สารตะกั่วในเวลาอันสั้น ดังนั้นข้อของอุปกรณ์ SMD หรือลายวงจบบนแผ่นวงจรพิมพ์ ก็ยังคงมีสารตะกั่วเป็นส่วนประกอบที่สำคัญ ดังนั้น จึงต้องพิจารณาถึงความสามารถในการเชื่อมประสานกันระหว่างโลหะบัดกรีแบบไม่มีสารตะกั่วกับสารตะกั่วที่อยู่บนข้อของอุปกรณ์ SMD และแผ่นวงจรพิมพ์ด้วย ซึ่งถ้าไม่สามารถเชื่อมประสานกันได้ดี อาจทำให้จุดบัดกรี ไม่แข็งแรงเพียงพอต่อการนำไปใช้งาน หรือมีผลกับการใช้งานของผลิตภัณฑ์ในระยะยาว

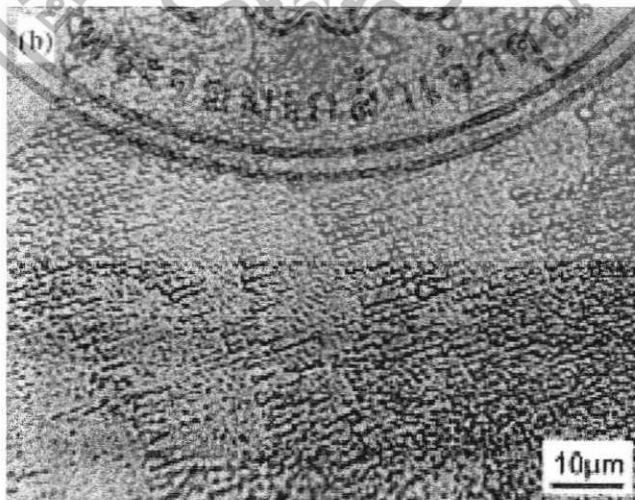
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5. การวิจัยอ้างอิงและตัวอย่างอุปกรณ์โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว

โดยผลการวิจัยอ้างอิงหนึ่งที่ทางคณะผู้จัดทำได้ทำการศึกษาถึงอิทธิพลของการทำการบ่ม (Aging treatment) ต่อพฤติกรรมการเสีรูปร่างหลังจากการทดสอบแรงดึง (Situ tensile) ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วซึ่งมีส่วนผสม 96.5Sn3.5Ag โดยผลปรากฏว่า ด้วยอิทธิพลของโครงสร้างอนุภาค  $Ag_3Sn$  ในโลหะบัดกรีมีผลในการขัดขวางการเกิด Dislocation ภายในตัวโลหะบัดกรี ทำให้โลหะบัดกรีที่ไม่ได้ผ่านการบ่ม ที่มีโครงสร้างของ  $Ag_3Sn$  ที่เป็นทรงกลมเม็ดละเอียด มีค่า Yield strength ที่สูงกว่าโลหะบัดกรีที่ผ่านการบ่มที่มีโครงสร้าง  $Ag_3Sn$  ที่มีลักษณะที่หยาบ และบวกกับโครงสร้าง  $Ag_3Sn$  ที่มีลักษณะที่หยาบหลังบ่มไปกระตุ้นการกระจายตัวของ โครงสร้าง Eutectic ซึ่งเป็นอีกปัจจัยหนึ่งในการลดค่า Yield strength ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วหลังจากทำบ่ม



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของโลหะบัดกรี 96.5Sn3.5Ag ซึ่งยังไม่ได้ผ่านการบ่มซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนว่าอนุภาค  $Ag_3Sn$  ยังมีลักษณะที่เป็นเม็ดละเอียด จึงยังทำให้มีค่า Yield strength ที่ดีอยู่



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของโลหะบัดกรี 96.5Sn3.5Ag ซึ่งได้ผ่านการบ่มมาแล้วซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนว่าอนุภาค  $Ag_3Sn$  เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับวารสารเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า มีลักษณะที่หยาบขึ้น จึงมีผลทำให้มีค่า Yield strength ที่ต่ำลง ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

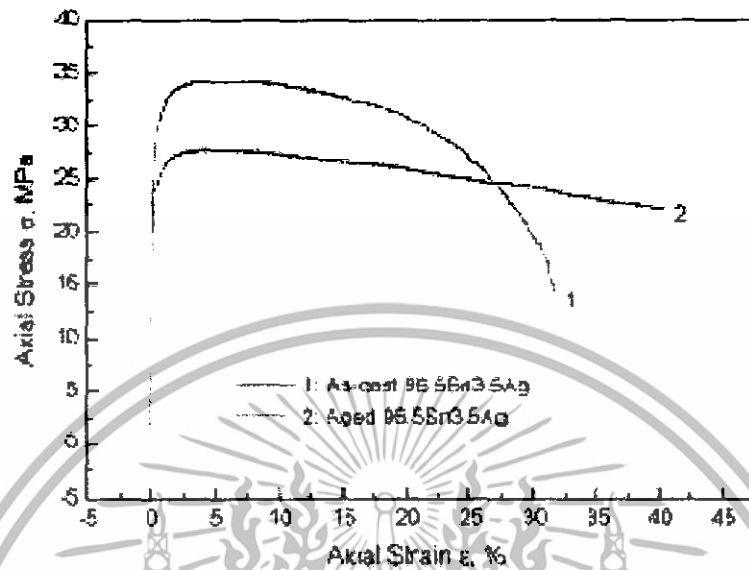
สำหรับอิทธิพลของการเย็นตัวก็มีผลต่อค่า Yield strength เช่นกัน ซึ่งถ้ามีอัตราการ การเย็นตัวที่เร็วจะได้ อนุภาคลักษณะ  $Ag_3Sn$  ที่มีลักษณะละเอียดมีผลให้ค่า Yield strength มีค่าสูงกว่าอัตราการเย็นตัวที่ช้า ซึ่งจะ ได้ลักษณะ อนุภาค  $Ag_3Sn$  ที่มีลักษณะคล้ายเข็มซึ่งจะให้ค่า Yield strength ที่ต่ำ



รูปที่ 2.6 ลักษณะอนุภาค  $Ag_3Sn$  ที่มีลักษณะคล้ายเข็ม โดยที่มีสาเหตุมาจากการเย็นตัวที่ช้า ซึ่งจะส่งผลทำให้มีค่า Yield strength ที่ต่ำ

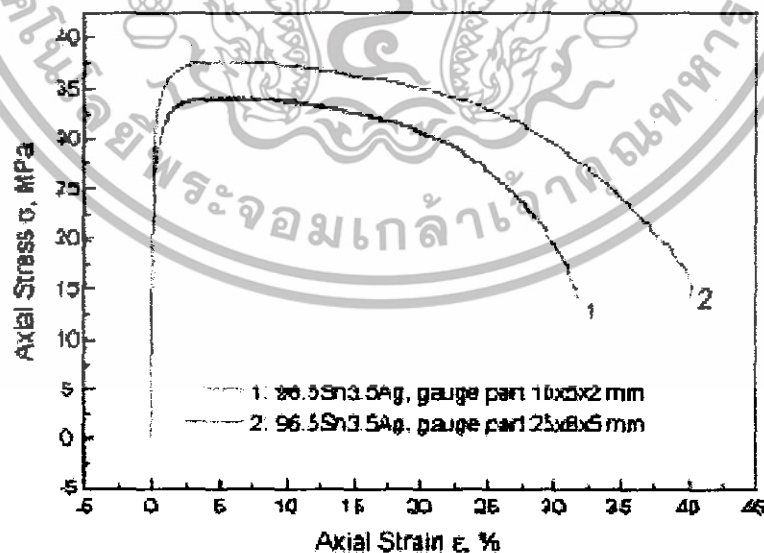
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรืออาจจะกล่าวโดยสรุปก็คือ โลหะบัดกรี 96.5Sn3.5Ag ที่ผ่านการบ่มมาแล้วนั้นจะมีค่า Yield strength ที่ต่ำกว่าโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วธรรมดาแต่จะมีค่า Strain-to-failure ที่สูงกว่า



รูปที่ 2.7 กราฟของความเค้นและความเครียดของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว 96.5Sn3.5Ag โดยที่ชิ้นงานผ่านการบ่มและไม่ผ่านการบ่ม

ส่วนอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อค่า Yield strength ก็คือขนาดของชิ้นงานทดลอง ซึ่งจากการอ้างอิงผลการวิจัยหนึ่งนั้น ได้สรุปไว้ว่า ชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่มักจะให้ค่า Yield strength ที่สูงกว่า



รูปที่ 2.8 กราฟของความเค้นและความเครียดของการทดสอบค่า Tensile test ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว 96.5Sn3.5Ag โดยที่มีขนาดของชิ้นงานต่างกัน

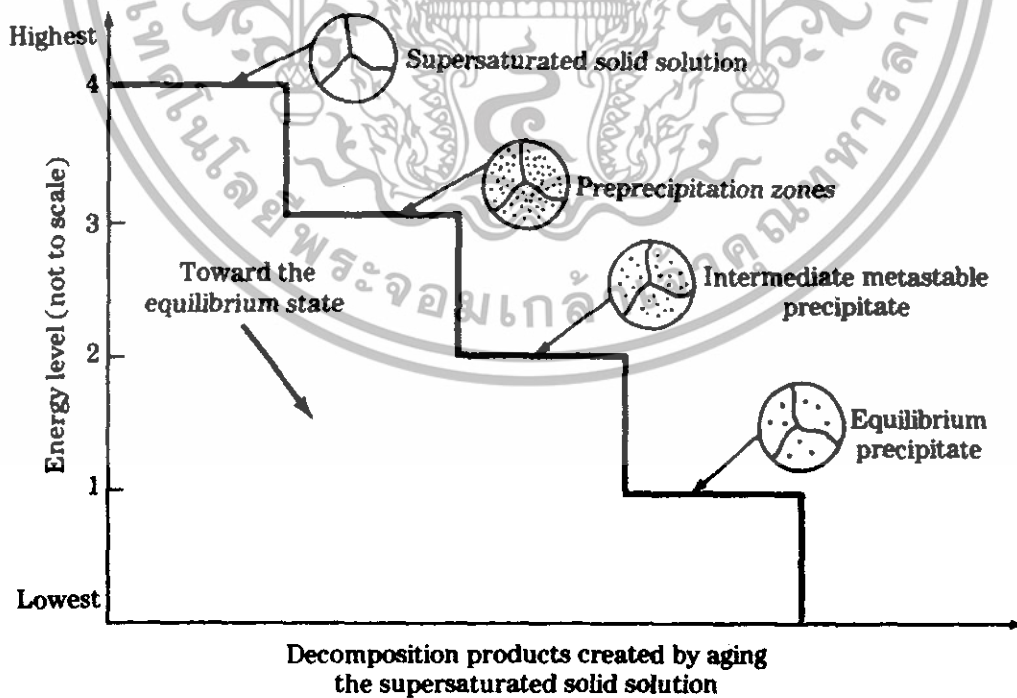
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะผู้จัดทำได้ทำการวิจัยถึงโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วตระกูล SAC (โลหะบัดกรีที่มีส่วนประกอบที่สำคัญหลักๆอยู่ด้วยกัน 3 ตัว คือ Sn Ag และ Cu โดยอาจจะมีส่วนผสมที่แตกต่างกันออกไปตามแต่ผู้จัดทำทำขึ้น) ซึ่งการที่มีธาตุ Cu เข้ามาเป็นส่วนประกอบเพราะว่า ธาตุ Cu ช่วยให้เกิดกระบวนการ Wetting ของรอยบัดกรีมีลักษณะที่ดีขึ้น ช่วยให้ได้รอยบัดกรีที่มีคุณภาพ รวมถึงการที่มีความนิยมในการเลือกใช้โลหะบัดกรีตระกูลนี้เนื่องมาจาก โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วตระกูลนี้ จะให้ลักษณะของลักษณะของครีพ (Creep) และคุณสมบัติของความล้า (Fatigue properties) ที่ดีที่สุดเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับโลหะบัดกรีชนิดอื่น รวมถึงสามารถตอบสนองความต้องการที่ต้องการให้จุดหลอมเหลว (Melting point) ของโลหะบัดกรีที่มีค่าตั้งแต่ 150 องศาเซลเซียสขึ้นไป โดยความต้องการนี้เนื่องมาจากถ้ามีการเชื่อมโลหะบัดกรีเหล่านี้กับวัสดุต่างๆแล้ว โลหะบัดกรีต้องมีจุดหลอมเหลวที่มากกว่าเพราะเมื่อเรานำไปใช้งานเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิหลังจากมีการใช้งานเป็นระยะเวลาที่นาน ถ้าโลหะบัดกรีมีจุดหลอมเหลวที่ต่ำกว่าวัสดุที่ถูกทำการบัดกรี จะส่งผลให้โลหะบัดกรีเกิดการละลาย หรืออาจจะทำให้เกิดความเสียหายแก่วัสดุนั้นได้ ด้วยเหตุนี้จึงมีความต้องการพื้นฐานที่จะให้โลหะบัดกรีมีจุดหลอมเหลวอย่างต่ำที่ 150 องศาเซลเซียส ซึ่งจากการค้นคว้าของคณะผู้จัดทำจะพบได้ว่าโลหะบัดกรีที่มีตะกั่ว (Pb) เป็นส่วนประกอบจะมีจุดหลอมเหลวโดยประมาณอยู่ที่ 200 องศาเซลเซียส ส่วนโลหะบัดกรีตระกูล SAC จะมีจุดหลอมเหลวอยู่ที่ 183 องศาเซลเซียส

## 2.6. ทฤษฎีการบ่ม (AGING)

การบ่ม เป็นขั้นตอนสุดท้ายในกระบวนการ Precipitation-strengthening ซึ่งขั้นตอนการบ่ม เป็นขั้นตอนที่จำเป็น เพราะจะทำให้เกิดการกระจายตัวของอนุภาคอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งถือได้ว่าเป็นวัตถุประสงค์ของการทำ Precipitation-strengthening ตะกอนละเอียดที่เกิดขึ้นในโลหะผสมนี้ จะขัดขวางการเคลื่อนที่ของแนว Dislocation ในระหว่างการถูกทำให้เสียรูป ทำให้โลหะผสมที่ผ่านกระบวนการ Precipitation-strengthening นี้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น



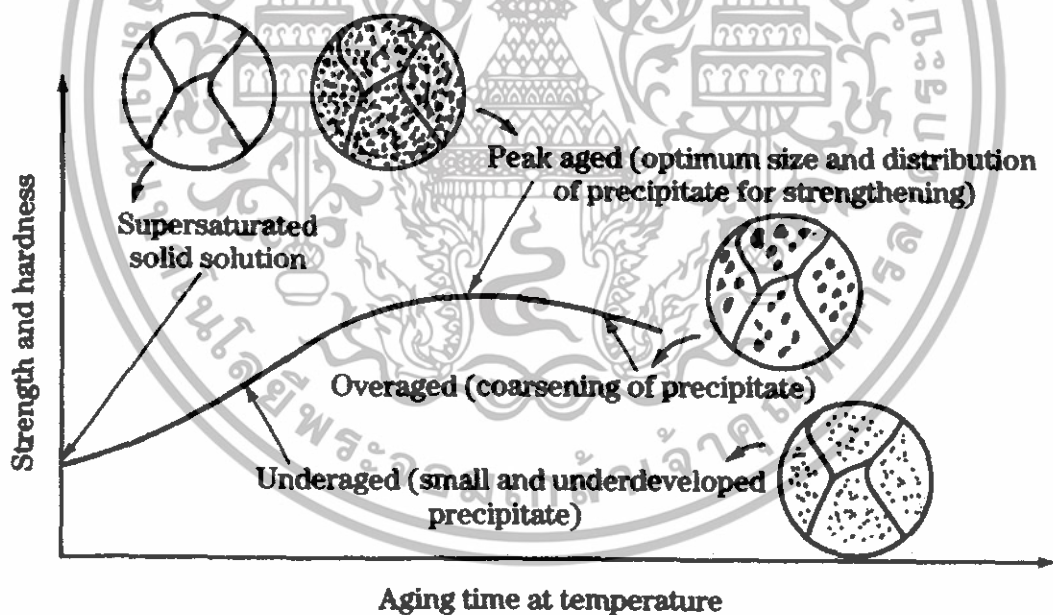
รูปที่ 2.9 ลำดับขั้นของพลังงานความร้อนที่สะสมอยู่ในโลหะผสมที่ได้รับการบ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
11

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โลหะผสมที่ผ่านกระบวนการ ของแข็งอิ่มตัวด้วยตัวแข็ง ดังที่ได้กล่าวไว้ในข้างต้นจะอยู่ที่ระดับพลังงานที่ 4 (Supersaturated solid solution) เมื่อโลหะผสมที่อยู่ในสภาวะสารละลายของแข็งอิ่มตัวด้วยตัวแข็งนี้ ถูกกระตุ้น โดยการให้พลังงานความร้อนที่อุณหภูมิค่อนข้างต่ำ ซึ่งจะทำให้มีการเก็บสะสมพลังงานกระตุ้นที่ค่อนข้างน้อย อะตอมของโลหะที่ถูกให้พลังงานความร้อนนี้จะเกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่ม ซึ่งเรียกรวมกลุ่มนี้ว่า Precipitation zones หรือ GP zones ดังที่ได้เห็นในระดับพลังงาน 3 และเมื่อทำการให้พลังงานความร้อนต่อไปอีก หรือมีพลังงานกระตุ้นมากเพียงพอโดยการเพิ่มอุณหภูมิในการ การบ่ม บริเวณ GP zones นี้จะมีถูกกระตุ้นจากพลังงานความร้อนนี้ให้มีขนาดที่ใหญ่ขึ้น (Intermediate metastable precipitate) ดังแสดงในระดับพลังงาน 2 และถ้ายังคงมีการบ่ม ที่อุณหภูมิสูงต่อไป หรือมีพลังงานกระตุ้นสูงขึ้นไปมากเพียงพอ Intermediate metastable precipitate เหล่านี้จะเปลี่ยนเป็นเฟสที่มีความสมดุล (Equilibrium precipitate) มากขึ้น ดังแสดงในระดับพลังงาน 1

ผลของการบ่มสามารถแสดงได้ด้วยเส้นโค้ง (Aging curve) กราฟของเส้นโค้งการบ่ม เป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงหรือความแข็ง กับเวลาในการการบ่ม (Aging time) ที่อุณหภูมิคงที่ใดๆ เมื่อเวลาในการบ่มเพิ่มขึ้น Precipitation zones จะเริ่มเกิดและขนาดก็จะค่อยๆ ใหญ่ขึ้น ทำให้โลหะผสมนั้นมีความแข็งแรงและความแข็งเพิ่มขึ้นแต่ความเหนียวลดลง จนกระทั่งมีค่าสูงสุดเมื่ออุณหภูมิในการบ่มสูงเพียงพอ ในช่วงนี้จะเป็นช่วงที่เกิด Intermediate metastable precipitate และถ้าการบ่มยังคงดำเนินต่อไป Intermediate precipitate จะเริ่มหยาบขึ้น ทำให้โลหะผสมนั้นจะเริ่มมีความแข็งแรงลดลง



รูปที่ 2.10 อนุภาค Micro structure ที่มีโครงสร้างที่เปลี่ยนไปตามพลังงานความร้อนที่อนุภาค ได้สะสมไว้ตามระยะเวลาที่ทำการบ่ม ณ อุณหภูมิหนึ่ง

## 2.7. มาตรฐาน ASTM

จากที่การวิจัยของคณะผู้จัดทำได้มีการทำการทดสอบคุณสมบัติต่างๆของวัสดุจึงทำให้มีความจำเป็นที่จะต้องมีการอ้างอิงถึงมาตรฐาน ASTM ซึ่งเป็นมาตรฐานข้อกำหนดในการทำโครงการต่างๆ ซึ่งมาตรฐานนี้ เป็นที่ยอมรับกันอย่างกว้างขวางสากล เพื่อให้ผลในการวิจัยของโครงการนี้เป็นที่ยอมรับทางคณะผู้จัดทำจึงต้องทำการศึกษาข้อมูลต่างๆ รวมถึงข้อกำหนดต่างๆ ของมาตรฐาน ASTM ที่สอดคล้องกับขั้นตอนการทำงานวิจัยในครั้งนี้

### 2.7.1. ความเป็นมาของ ASTM

ASTM (American Society for Testing and Materials) นับได้ว่าเป็น สมาคมวิชาชีพทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีที่กำหนดและจัดทำมาตรฐาน ซึ่งเป็นที่นิยมใช้และเป็นที่ยอมรับทั่วโลก สมาคม ASTM จัดตั้งขึ้นในสหรัฐอเมริกา เมื่อปี ค.ศ. 1989 ทำหน้าที่ส่งเสริมสนับสนุนทางด้านวิชาการ เพื่อเป็นการช่วยเหลืออุตสาหกรรมหน่วยงานของรัฐ และสาธารณชนทั่วไป โดยการพัฒนามาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับลักษณะและการทำงานของวัสดุผลิตภัณฑ์ การบริการ ระบบการใช้งาน

ASTM ถือได้ว่าเป็นสมาคมที่ใหญ่ที่สุดในโลก ในด้านของระบบการพัฒนามาตรฐาน ที่ใช้โดยความสมัครใจ มาตรฐาน ASTM จัดขึ้น โดยมติของกรรมการวิชาการเฉพาะสาขาวิชาต่างๆ ถึง 132 คณะ และมีการจัดพิมพ์มาตรฐานมากกว่า 9,800 เรื่องในแต่ละปี โดยมีสมาชิกที่ทรงคุณวุฒิทางวิชาการถึง 35,000 คน ประกอบด้วย ตัวแทนกลุ่มผู้ผลิต ผู้บริโภค และผู้สนใจทั่วไป รวมทั้งองค์การที่เกี่ยวข้องต่างๆ ทั้งภาครัฐและภาคเอกชน ทำให้เชื่อได้ว่ามาตรฐาน ASTM นี้ ครอบคลุมวิชาการต่างๆ มากมาย และมีความละเอียดลึกซึ้ง นอกจากนี้มาตรฐาน ASTM ยังได้รับการพิจารณา ทบทวนปรับปรุง และแก้ไขเพิ่มเติมอยู่ตลอดเวลา ทำให้ทันสมัยอยู่เสมอ

### 2.7.2. การจัดแบ่งมาตรฐาน ASTM

มาตรฐาน ASTM ที่ผ่านการรับรองของสมาคมฯ และประกาศใช้เป็นมาตรฐาน สามารถแบ่งตามเนื้อหาออกได้เป็นประเภทต่างๆ ดังนี้

- 1) Classification เป็นมาตรฐานของระบบการจัดการ และการจัดแบ่งวัสดุผลิตภัณฑ์ การบริการระบบหรือการใช้งาน ออกเป็นกลุ่มๆ โดยอาศัยคุณลักษณะที่เหมือนกัน เช่น แหล่งกำเนิด ส่วนประกอบ คุณสมบัติหรือประโยชน์ใช้สอย
- 2) Specification เป็นข้อกำหนดที่ระบุแน่นอน ถึงคุณลักษณะและสมบัติต่างๆ ที่ต้องการของวัสดุ ผลิตภัณฑ์ระบบ หรือการใช้งาน ข้อกำหนดเหล่านี้มักจะแสดงค่าเป็นตัวเลข และมีข้อกำหนดไว้พร้อมทั้งวิธีหาค่าเหล่านั้นด้วย
- 3) Terminology เป็นเอกสารมาตรฐาน ที่กำหนดคำนิยาม คุณลักษณะ คำอธิบายของศัพท์ต่างๆ เรื่องหมาย ตัวอย่าง คำย่อที่ใช้ในมาตรฐานต่างๆ
- 4) Test method เป็นมาตรฐานเกี่ยวกับกรรมวิธี ที่ใช้ในการตรวจสอบ และปริมาณคุณภาพคุณสมบัติอย่างใดอย่างหนึ่ง หรือหลายอย่างของวัสดุ ระบบหรือการใช้งาน ซึ่งมีผลการทดสอบที่สามารถนำไปใช้ ในการประเมินค่าตามข้อกำหนด
- 5) Guide เป็นคำแนะนำ ให้ผู้ใช้เลือกใช้เทคนิคต่างๆ ที่มีอยู่ รวมทั้งสิ่งที่จะ ได้จากการประเมินมาตรฐานที่ใช้นั้นๆด้วย
- 6) Practice เป็นวิธีการปฏิบัติเฉพาะ สำหรับงานเฉพาะอย่าง ได้แก่ การเขียนรายงาน การสุ่มตัวอย่าง ความแม่นยำ ความละเอียด การเลือก การเตรียม การประยุกต์ การตรวจสอบ ข้อควรระวังในการใช้ การกำจัดทิ้ง การติดตั้ง การบำรุงรักษา ตลอดจนการใช้เครื่องมือทดสอบ นอกจากนี้ ASTM มีการจัดแบ่งมาตรฐานออกเป็นกลุ่มๆ เฉพาะเรื่องโดย ใช้ตัวอักษร เป็นสัญลักษณ์แทนกลุ่มของเนื้อเรื่อง เรียงตามลำดับดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
13

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- A : Ferrous metals
- B : Nonferrous metals
- C : Cementitious, Ceramic, Concrete, and Masonry materials
- D : Miscellaneous materials
- E : Miscellaneous subjects
- F : Materials for specific applications
- G : Corrosion, deterioration, and degradation of materials

เดิม ASTM ได้แบ่งประเภทมาตรฐาน ตามลักษณะการกำหนดมาตรฐาน ออกเป็น 3 ชนิดคือ

- 1) Standards เป็นมาตรฐานที่จัดทำขึ้น ตามมติเอกฉันท์ของสมาชิก และผ่านการรับรองตามขั้นตอนและกฎของสมาคมฯ เรียบร้อยแล้ว
- 2) ES.(Emergency standard) เป็นเอกสารที่จัดพิมพ์ตามความต้องการเร่งด่วน แต่ยังไม่ผ่านการรับรองของสมาคมฯ เพียงแต่ผ่านการพิจารณา ของคณะกรรมการบริหาร
- 3) P. (Proposal) เป็นเอกสารมาตรฐานที่พิมพ์เพื่อเผยแพร่ ก่อนที่จะลงมติให้ใช้เป็นมาตรฐาน แต่ในปี ค.ศ. 1995 สมาคม ASTM ได้กำหนดให้ใช้ PS. (Provisional standards) ซึ่งเป็นเอกสาร ที่ถูกจัดพิมพ์ขึ้นมาใช้แทน ES. และ P.

### 2.7.3. การจัดพิมพ์ Annual book of ASTM standards

ASTM standards จัดพิมพ์รวมเล่มเป็นชุดประจำปี ใช้ชื่อว่า Annual book of ASTM standards มาตรฐานที่พิมพ์รวมเล่มนี้ ต้องผ่านการรับรองของสมาคมฯ มาแล้วอย่างน้อย 6 เดือน เมื่อใช้ไปครบทุก 5 ปี จะได้รับการพิจารณา ทบทวนจาก คณะกรรมการวิชาการ ซึ่งอาจมีการปรับปรุงใหม่ มาตรฐานที่นำมาพิมพ์ ในแต่ละปี จึงมีทั้งเรื่องใหม่ ๆ รวมทั้งเรื่องใหม่ และเรื่องที่ได้รับการปรับปรุง ซึ่งมีประมาณร้อยละ 30 ของเรื่องทั้งหมดในแต่ละเล่ม ผู้ใช้สามารถ ทราบว่า มาตรฐานนั้นๆ เป็นเรื่องเดิม หรือปรับปรุงใหม่ ได้จากปีที่กำกับอยู่ ที่ย่อบริษัทตัวอักษร ที่ ASTM กำหนดให้ใช้ สำหรับมาตรฐานแต่ละเรื่อง การจัดพิมพ์รวมเล่ม เอกสารมาตรฐาน ASTM นี้ จะรวมเรื่อง ประเภทเดียวกัน ไว้ในเล่ม เดียวกัน และมีการพัฒนา จัดแบ่งเล่มใหม่อยู่เสมอ และในระหว่างปี ค.ศ. 1974-1982 Annual book of ASTM standards มี 47 เล่ม และเล่มที่ 48 เป็นครุฑนี้รวม เอกสารมาตรฐาน ASTM และในปี ค.ศ.1983 ได้ปรับปรุงรูปเล่มขึ้นใหม่ จำนวน 66 เล่ม โดยจัดเรื่องเป็นกลุ่มๆ รวม 16 กลุ่มดังนี้

- Section 1 : Iron and steel products
- Section 2 : Nonferrous metal products
- Section 3 : Metals test methods and analytical procedures
- Section 4 : Construction
- Section 5 : Petroleum products, lubricants and fossil fuels
- Section 6 : Paints, related coatings, and aromatics
- Section 7 : Textiles
- Section 8 : Plastics

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
14

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Section 9 : Rubber

Section 10 : Electrical insulation and electronics

Section 11 : Water and environmental technology

Section 12 : Nuclear, solar, and geothermal energy

Section 13 : Medical devices

Section 14 : General methods and instrumentation

Section 15 : General products, chemical specialties, and end use products

Section 00 : Index

การจัดพิมพ์เรื่องราว รายละเอียดของมาตรฐานในแต่ละเล่ม จะจัดเรียงลำดับตามรหัสตัวอักษร และตัวเลข ยกเว้นเล่มที่ 05.04, 11.01 และ 11.02 จะเรียงเรื่องตามกลุ่มวิชา และเล่มที่ 06.03 จะเรียงเรื่องตามกลุ่มคณะกรรมการ ที่ กำหนดเรื่อง แต่อย่างไรก็ตาม ในแต่ละกลุ่ม ยังคงเรียงลำดับรหัสตัวอักษร และตัวเลขที่กำหนดประจำแต่ละเรื่อง ASTM ได้มีการจัดพิมพ์ และปรับปรุงรูปแบบของ Annual book of ASTM standards อยู่ตลอดเวลา

## 2.8. ความแข็งและการทดสอบ

ความแข็ง คือ คุณสมบัติของวัสดุที่สามารถต้านทานหรือทนต่อการเสียรูปแบบพลาสติก โดยปกติเกิดจากการ ทำให้เป็นรอยจากการกด อย่างไรก็ตามความแข็งอาจรวมถึง ความต้านทานต่อการตัด การขีดการขีด และการตัด

การทดสอบความแข็ง ของวัสดุมีหลายวิธี และการทดสอบความแข็งเพียงวิธีเดียวไม่สามารถตอบเกี่ยวกับ สมบัติที่แท้จริงของวัสดุได้อย่างสมบูรณ์ บางครั้งอาจจะต้องนำผลการทดสอบที่ได้ ไปเปรียบเทียบกับผลการทดสอบ ความแข็งวิธีอื่นๆ โดยใช้วิธีทดสอบเดียวกัน การทดสอบความแข็งแต่ละวิธีจะมีจุดประสงค์ของการทดสอบความแข็ง แตกต่างกันไป เช่น การทดสอบบางวิธีผลการทดสอบบอกถึงความยาก-ง่ายในการแปรรูป วัสดุนั้นๆ หรืออาจบอกถึง ความต้านทานการสึกหรอ ความต้านทานต่อการนำไปตกแต่งด้วยเครื่องจักร หรือสมบัติในการที่จะนำไปทำขดลวด สปริง ซึ่งจะเห็นว่า การทดสอบความแข็งให้ความหมายได้กว้างหลายประการ และยังไม่มีระเบียบวิธีข้อดีข้อเสีย ของการทดสอบความแข็งแต่ละวิธีไว้ เพียงแต่มีข้อกำหนดเกี่ยวกับขีดจำกัดของการทดสอบแต่ละวิธีไว้เท่านั้น

การทดสอบความแข็ง หากแบ่งประเภท ของการทดสอบความแข็ง ตามลักษณะการทดสอบ อาจแบ่งได้เป็น 2 แบบคือ การทดสอบความแข็ง โดยการขีดขีด ขีดสี (Scratching) และการทดสอบความแข็งจากการใช้แรงกดให้เกิดรอย ที่ผิว (Indentation) ซึ่งลักษณะการทดสอบทั้งสองแบบนี้ สามารถจำแนกออกเป็น 5 วิธีที่แตกต่างกัน ตามจุดประสงค์ ของการใช้งาน หรือปัจจัยที่จะมีผลกระทบต่อวัสดุนั้นๆ เมื่อใช้งาน ซึ่งมีวิธีการทดสอบ ดังนี้คือ

1. วัดความต้านทานต่อการตัดหรือเจาะ (Resistance to cutting or drilling) โดยการทดสอบความสามารถ ในการนำไป ตกแต่ง ด้วยเครื่องจักร (Machinability) เป็นการทดสอบ ความแข็งโดยพิจารณา จากความยากง่าย ของการนำไปตัด หรือเจาะด้วยเครื่องจักร ซึ่งเป็นวิธีที่ อาศัยประสบการณ์ของผู้ปฏิบัติงาน กับเครื่องจักร แล้วสรุปว่า วัสดุใดแข็งหรือ อ่อนกว่ากันเท่านั้น แต่ไม่สามารถระบุค่าความแข็งเป็นตัวเลขได้ จึงไม่เป็นวิธีการทดสอบความแข็งที่ได้มาตรฐาน
2. วัดความต้านทานต่อการเสียดสี (Resistance to abrasion) โดยการทดสอบการเสียดสี (Wear hardness test) เป็นวิธี การทดสอบความแข็ง ที่พิจารณาจากการสึกหรอของผิววัสดุเมื่อ ใช้งานที่ต้องเสียดสีกัน ถ้าวัสดุใดอ่อนกว่าก็จะถูก เสียดสีทำให้เกิดการสึกหรอมากกว่า การทดสอบโดยการเสียดสีนี้ อาจจะใช้ตะไบทดสอบได้ (File test) คือทำการ

ตะไบที่ผิวงานทดสอบ ถ้าผิวงานแข็งก็จะตะไบไม่เข้า ผิวงานสึกหรอน้อย แต่ถ้าผิวงานอ่อนก็จะสามารถตะไบได้ ลึก ผิวงานสึกหรอมาก ซึ่งจะสังเกตเห็นว่าเป็นวิธีทดสอบที่ง่าย สะดวกรวดเร็ว แต่ไม่สามารถระบุค่าความแข็งของ ผิวงานทดสอบได้ และผลการทดสอบก็ไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับประสบการณ์ของผู้ทดสอบด้วย การทดสอบโดยการ เสียดสีนี้สามารถระบุได้เพียงว่าวัสดุใดแข็งหรืออ่อนกว่ากันเท่านั้น จึงไม่เป็นวิธีการทดสอบความแข็งที่ได้มาตรฐานเช่นเดียวกัน

สำหรับการทดสอบ ทางเซรามิกมีการใช้การทดสอบความต้านทานต่อการเสียดสี เพื่อพิจารณาว่าผิว ผลิตภัณฑ์ทนต่อการเสียดสี ที่เกิดขึ้นขณะใช้งานมากน้อยเพียงใด ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่นิยมทดสอบคือ กระเบื้องปูพื้น โดยใช้เครื่องทดสอบความต้านทานต่อการเสียดสีของเคลือบ (Resistance to abrasion of glazed) หลักการทดสอบ คือ เครื่องจะทำการเขย่าวัสดุ ชักดูที่มีลักษณะเป็นเม็ดทรงกลมเล็กๆ บนผิวผลิตภัณฑ์ในระยะเวลาที่กำหนด ซึ่งการ ทดสอบต้องควบคุมชนิดของวัสดุชักดู ปริมาณ ขนาดของวัสดุชักดู แรงเขย่า และระยะเวลาที่ใช้ทดสอบ หลังจากนั้น จึงนำผลิตภัณฑ์มาพิจารณา ความมันของเคลือบที่หายไป หรือพิจารณาความลึกที่เกิดจากการขัด หรืออาจใช้ การชั่งน้ำหนักที่สูญเสียบไป เนื่องจากการขัด ซึ่งการรายงานผลเป็นน้ำหนักนี้จะเชื่อถือได้มากที่สุด

3. วัดความต้านทานต่อการขีดข่วน (Resistance to scratching) โดยการทดสอบการขีดข่วน (Scratch hardness test) เป็น วิธีการทดสอบความแข็ง ที่ได้รับความสนใจ และนิยมใช้ของนักธรณีวิทยา ที่ใช้ในการทดสอบความแข็งของหินแร่ การทดสอบโดยการขีดข่วน เป็นวิธีการทดสอบที่สะดวกรวดเร็ว เพราะอาศัยหลักการที่ว่า วัสดุที่แข็งกว่าจะ สามารถขีดข่วนเป็นรอยบนผิววัสดุที่อ่อนกว่าได้ แต่วัสดุที่อ่อนกว่าจะ ไม่สามารถขีดข่วนเป็นรอยบนผิววัสดุที่แข็ง กว่าได้
4. วัดการสะสมพลังงานภายใต้แรงกระแทก (Energy absorption under impact loads) ทดสอบ โดยใช้ลูกตุ้มกระทบผิว แล้วสะท้อนกลับ (Rebound hardness test) เป็นวิธีทดสอบความแข็ง โดยการปล่อยลูกตุ้มให้กระทบผิวขึ้นทดสอบ แล้วพิจารณาค่าความสูงของการสะท้อนกลับของลูกตุ้มภายหลังกระทบ ซึ่งจะสังเกตเห็นว่าเป็นวิธีการทดสอบ ความแข็งที่ใช้แรงเคลื่อนที่กระทบผิววัสดุ ดังนั้นบางครั้งจึงเรียกวัดวิธีการทดสอบความแข็งแบบนี้ว่า การทดสอบ ความแข็งทางพลวัต (Dynamic hardness test) และเป็นวิธีที่นิยมใช้ทดสอบความแข็งของโลหะที่อุณหภูมิสูงเพราะ ลูกตุ้มจะไม่ได้รับผลกระทบของความร้อน เนื่องจากระยะเวลาที่ตกกระทบและสัมผัสผิวขึ้นทดสอบนั้นน้อยมาก จากหลักการทดสอบดังกล่าวนี้เองที่ถูกนำไปสร้างอุปกรณ์ทดสอบความแข็งที่นิยมใช้เรียกว่า ชอร์สเคลโรสโคป (Shore-scleroscope) เหตุนี้เองจึงเรียกรูปการทดสอบนี้ว่า การทดสอบความแข็งด้วย ชอร์สเคลโรสโคป
5. วัดความต้านทานต่อการกดให้เกิดรอยบุ๋มถาวร (Resistance to permanent indentation) การทดสอบโดยการกดให้ เกิดรอยบุ๋ม (Indentation hardness test) เป็นวิธีการทดสอบความแข็งที่นิยมใช้ในงานวิศวกรรม เพราะเป็นวิธีการ ทดสอบที่ได้มาตรฐาน ให้ผลการทดสอบที่ถูกต้องแน่นอน และสามารถระบุค่าความแข็งได้ เนื่องจากใช้เครื่อง ทดสอบที่เป็นมาตรฐาน ในการทดสอบสำหรับหลักการของการทดสอบความแข็ง โดยวิธีนี้คือ ใช้เครื่องทดสอบกด บนผิวขึ้นทดสอบ ทำให้เกิดรอยบุ๋มถาวร (Permanent indentation) แล้ววัดขนาดความโศหรือความลึกของรอยบุ๋ม ถ้าทดสอบกับวัสดุอ่อน ก็จะทำให้เกิดรอยบุ๋ม ขนาดใหญ่ หรือลึกมาก แต่ถ้าทดสอบกับวัสดุแข็งก็จะทำให้เกิดรอย บุ๋มขนาดเล็ก หรือลึกลึกน้อย จากหลักการดังกล่าว ได้ถูกนำไปสร้างเครื่องทดสอบมาตรฐานและวิธีการทดสอบ ที่เป็น มาตรฐานดังนี้

## **สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง**

- การทดสอบความแข็งบริเนลล์ (Brinell hardness test)
- การทดสอบความแข็งวิกเกอร์ส (Vickers hardness test)
- การทดสอบความแข็งน็อพ (Knoop hardness test)
- การทดสอบความแข็งร็อคเวลล์ (Rockwell hardness test)

ความแตกต่าง ของการทดสอบทั้ง 4 ประเภทที่เห็นได้ชัดเจน คือความแตกต่าง ของลักษณะหัวเข็มทดสอบ หรือรูปร่างของเข็มทดสอบ (Shape of indentation) สำหรับหน่วย ของการวัดความแข็ง ด้วยเครื่องทดสอบ เพื่อหาความต้านทาน ต่อการกดให้เกิดรอยบุ๋มถาวร จะมีหน่วยการวัดเป็นกิโลกรัม ต่อตารางมิลลิเมตร

สำหรับการทดสอบ ความแข็งในทางเซรามิก นอกจากจะทดสอบ ความแข็งของ ผลิตภัณฑ์สำเร็จรูป เพื่อควบคุม คุณภาพแล้ว ยังมีทดสอบ เนื้อดินปั้นสำหรับ การขึ้นรูปที่อยู่ในลักษณะดินเหนียว โดยใช้เครื่องมือวัด ความแข็งของดินเหนียว (Clay hardness meter) มีลักษณะ คล้ายเข็มฉีดยา ผู้ทดสอบจะกด เครื่องมือวัดลง ในก้อนดินเหนียว ที่ต้องการทดสอบ แรงกดมาก – น้อย ที่แตกต่างกันเป็นผลให้ ระดับความแข็ง ของดินเหนียวบนสเกล มีค่าต่างกัน ซึ่งค่าความแข็ง ของดินเหนียว นี้จะบอกได้ว่ามีปริมาณน้ำในส่วนผสมมาก หรือน้อยเกินไป หากมีน้ำน้อยจะส่งผลให้ ดินเหนียวมีความแข็งสูง นิยมทดสอบ ดินที่ผ่านเครื่องนวด (Extruder) ก่อนนำไปใช้ ขึ้นรูป หากดินมีความแข็งสูง สามารถลดความแข็งโดยการนำก้อนดินจุ่มน้ำ และผ่านเข้าเครื่องนวดอีกครั้ง

การทดสอบความแข็งถูกนำไปใช้ในหลายสาขา และนิยมใช้ทดสอบกับวัสดุที่เป็นโลหะมากกว่าวัสดุอื่น การทดสอบความแข็งมีหลายวิธี เช่น พิจารณาจากความยากง่ายของการนำไปตัด พิจารณาจากความเสียสึ โดยใช้ตะไบทดสอบ พิจารณาโดยการขีดข่วนเพราะอาศัยหลักการที่ว่าวัสดุที่แข็งกว่าจะสามารถขีดข่วนเป็นรอยบนผิววัสดุที่อ่อนกว่าได้ พิจารณาจากค่าความสูงของการสะท้อนกลับของลูกคลื่นภายหลังจากกระทบ พิจารณารอยบุ๋มจากการกดบนวัสดุ การทดสอบ โดยการกดให้เกิดรอยบุ๋มเป็นที่นิยมมากในงานวิศวกรรมเพราะเป็นวิธีการทดสอบมาตรฐานที่ให้ผลการทดสอบที่ถูกต้องแม่นยำ และสามารถระบุค่าความแข็ง

การทดสอบความแข็งโดยการเปรียบเทียบมีข้อจำกัดในการใช้งานและ ไม่สามารถให้ข้อมูลตัวเลขที่แม่นยำ หรือกำหนดสเกลเฉพาะสำหรับวัสดุและ โลหะสมัยใหม่ วิธีโดยปกติเพื่อหาค่าความแข็งคือ การวัดจากความลึกหรือพื้นที่ของรอยกดที่เหลือทิ้งไว้จากหัวกดที่มีรูปร่างภาระ (Load) และเวลาที่เจาะจง วิธีมาตรฐานหลัก 3 มาตรฐาน สำหรับการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งและขนาดของรอยกด คือร็อคเวลล์ บริเนลล์ และวิกเกอร์ส แต่ละวิธีของมาตรฐาน ได้ถูกแบ่ง เป็นสเกล กำหนดโดยภาระที่ใช้และลักษณะของหัวกด ด้วยเหตุผลของการใช้งาน การทวนสอบและการสอบเทียบ

การทวนสอบ (Verification) หมายถึง การยืนยันโดยการตรวจสอบและจัดทำหลักฐาน เพื่อแสดงว่าเป็นไปตามข้อกำหนดที่ระบุ

### **2.8.1. การทวนสอบเครื่องทดสอบความแข็ง (Verification of hardness testing machine)**

เครื่องทดสอบความแข็ง เมื่อถูกใช้งานไปนานๆ ค่าพิกัดต่างๆของเครื่อง เช่น แรงกด หัวกด เป็นต้นอาจมีความคลาดเคลื่อนไปจากเดิม ทำให้ค่าความแข็งที่ได้จากการทดสอบผิดพลาดไป จึงต้องมีการทวนสอบ เพื่อปรับปรุงสภาพของเครื่องให้อยู่ในพิกัด การทวนสอบเครื่องทดสอบความแข็ง สามารถทำได้ 2 วิธีคือ

## 1. การทวนสอบทางตรง

การทวนสอบทางตรง เป็นการตรวจสอบพิถีพิถันการทำงานของอุปกรณ์ของเครื่องทดสอบความแข็ง ซึ่งสามารถแบ่ง ได้เป็น 3 รายการคือ

### 1) การทวนสอบแรงกด

สำหรับเครื่องวัดความแข็งแบบบริเนลล์และวิกเกอร์ส จะใช้เครื่องมือวัดขนาดแรงกด (elastic proving device) ซึ่งในแต่ละเครื่องจะมีแรงกดหลายขนาด ทำการวัดแต่ละขนาดของแรงกด จำนวน 3 ครั้ง เกณฑ์กำหนดความคลาดเคลื่อนของขนาดแรงกด อยู่ในช่วง  $\pm 0.2\%$  ตามมาตรฐาน ISO 156 และ 146 สำหรับเครื่องวัดความแข็งแบบร็อคเวลล์ ทำการทดสอบเช่นเดียวกัน เพียงแต่แรงกดแบ่งออกเป็น แรงกดนำ และแรงกดรวม ตามมาตรฐาน ISO 716 เกณฑ์กำหนดความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง  $\pm 0.2\%$  เช่นเดียวกัน

### 2) การทวนสอบหัวกด

สำหรับหัวกดแบบทรงกลมของเครื่องทดสอบแบบ บริเนลล์ และร็อคเวลล์ หัวกดต้องเป็นเงาวาวและปราศจากรอยตำหนิ สำหรับหัวกดเพชรรูปปิรามิดและรูปกรวยของเครื่องทดสอบแบบ วิกเกอร์สและร็อคเวลล์ ด้านข้างของปิรามิดและกรวย ต้องเป็นเงาวาว และปราศจากรอยตำหนิ หัวกดทั้งหมดของเครื่องทดสอบทั้ง 3 ชนิด จะต้องถูกนำมาวัดขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง, มุมของยอดแหลม และวัดความแข็ง ค่าทั้งหมดนี้จะต้องอยู่ในเกณฑ์กำหนดความคลาดเคลื่อนตามมาตรฐาน ISO 156, 146 และ 716 มิฉะนั้นจะไม่ผ่านการทวนสอบ

### 3) การทวนสอบเครื่องมือวัด

สำหรับเครื่องวัดความแข็งแบบบริเนลล์และวิกเกอร์ส เครื่องมือวัดความแข็งเป็น ไมโครมิเตอร์สำหรับวัดเส้นผ่านศูนย์กลาง และ เส้นทะแยงมุมของรอยกด หลังจากนั้นนำค่าที่ได้มาเทียบกับตารางเพื่อหาค่าความแข็ง เกณฑ์กำหนดความคลาดเคลื่อนตามมาตรฐาน ISO 156 และ 146 กำหนดอยู่ในช่วง  $\pm 0.5\%$  สำหรับเครื่องวัดความแข็งแบบร็อคเวลล์ เครื่องมือวัดจะใช้เป็นแบบเครื่องวัดความลึกของรอยกดแล้วอ่านค่าความแข็งได้โดยตรงจากนาฬิกาวัดความแข็ง เกณฑ์กำหนดความคลาดเคลื่อนตามมาตรฐาน ISO 716 กำหนดไว้มีค่า  $\pm 0.001$  มม. หรือประมาณ  $\pm 0.5$  ของแต่ละหน่วยสเกลที่ใช้วัด

## 2. การทวนสอบทางอ้อม

การทวนสอบทางอ้อม คือ การใช้แผ่นความแข็งมาตรฐาน ในการทวนสอบเครื่องทดสอบความแข็งทั้ง 3 ชนิด โดยทดสอบแต่ละขนาดของแรงกดและหัวกด เพื่อตรวจสอบค่าความแข็งที่ได้มาเทียบกับค่าความแข็งของแผ่นความแข็งมาตรฐาน ตามมาตรฐาน ISO

### 2.8.2. การสอบเทียบแผ่นความแข็งมาตรฐาน (Calibration of standardized block)

แผ่นความแข็งมาตรฐานเมื่อเก็บไว้นานๆ ค่าความแข็งอาจเปลี่ยนแปลงไปได้ จึงจำเป็นต้องตรวจสอบและทำการสอบเทียบว่าอยู่ในมาตรฐานหรือไม่ การตรวจสอบแผ่นความแข็งมาตรฐานมีวิธีดังนี้

- 1) การตรวจสอบด้วยตาเปล่า แผ่นความแข็งต้องเป็นเนื้อเดียวกันตลอด และสม่ำเสมอ มีผิวที่ราบเรียบ
- 2) แผ่นความแข็งมาตรฐานจะต้องไม่เป็นแม่เหล็ก
- 3) จะต้องมีความหนาสองด้านขนานกัน
- 4) ผิวราบจะต้องไม่มีรอยขีดข่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
18

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ขั้นตอนการสอบเทียบแผ่นความแข็งมาตรฐาน

1. เครื่องทดสอบความแข็ง ที่จะใช้สอบเทียบแผ่นความแข็งมาตรฐานจะต้องผ่านการสอบรับรอง ในหัวข้อที่กล่าวมาแล้ว การทดสอบจะทำที่อุณหภูมิ  $23 \pm 5$  °C
2. เครื่องทดสอบความแข็งบริเนลล์ เวลาที่ใช้กดอยู่ระหว่าง 6-8 วินาที เวลาถดถอยบนผิวอยู่ระหว่าง 10-15 วินาที
3. เครื่องทดสอบความแข็งวิกเกอร์ส เวลาที่ใช้กดอยู่ระหว่าง 6-8 วินาที ความเร็วอยู่ระหว่าง 0.05-1 มม./วินาที
4. เครื่องทดสอบความแข็งร็อคเวลล์ เวลาที่ใช้แรงกดนำอยู่ระหว่าง 1-10 วินาที เวลาที่ใช้กดแรงกดรวมอยู่ระหว่าง 3-5 วินาที
5. ทำการทดสอบหาค่าความแข็ง 5 ครั้งต่อ 1 แผ่นความแข็งมาตรฐาน
6. ค่าความไม่สม่ำเสมอของค่าความแข็ง (Non-uniformity) ซึ่งได้จากการนำค่าความแข็งสูงสุดลบค่าต่ำสุด กำหนดเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนไว้ในมาตรฐาน ISO 726, 640 และ 674 ซึ่งเป็นการพิสูจน์ว่าแผ่นความแข็งมาตรฐาน อยู่ในเกณฑ์ใช้งานได้หรือไม่

### 2.8.3. การทดสอบความแข็งแบบร็อคเวลล์ (Rockwell hard test)

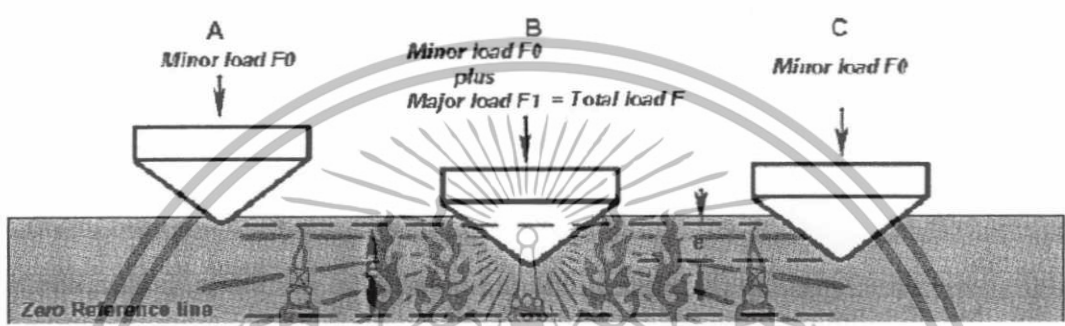
สำหรับหลักการทดสอบความแข็งร็อคเวลล์นี้ จะแตกต่างจากการทดสอบความแข็งบริเนลล์คือ วิธีบริเนลล์จะวัดขนาดความโค้งของรอยบุ๋มถาวรภายหลังการกด แต่การทดสอบความแข็งร็อคเวลล์จะวัดความลึกของรอยบุ๋มถาวร ซึ่งวัดได้ด้วยเครื่องทดสอบ แล้วอ่าน ได้โดยตรงจากหน้าปัดที่แสดงค่าความแข็ง และการทดสอบความแข็งร็อคเวลล์ไม่ว่าจะเป็นสเกลใดก็ตาม จะต้องกดทดสอบด้วยแรงกดนำ (Minor load) ขนาด 10 กิโลกรัมก่อนเสมอ เพื่อให้หัวกดทดสอบฝังจมอยู่ในเนื้อผิวของโลหะ ซึ่งเป็นการป้องกันการลื่นของหัวกดทดสอบ ขณะกดด้วยแรงรวม (Major load) หลังจากการกดทดสอบด้วยแรงกดนำแล้ว ก็ต้องกดทดสอบด้วยแรงกดรวมซึ่งมีขนาดต่างๆ กันขึ้นกับสเกลความแข็งร็อคเวลล์

วิธีทดสอบความแข็งแบบร็อคเวลล์ประกอบด้วย การกดวัสดุ ทดสอบด้วยหัวกดเพชรรูปกรวยหรือหัวกดลูกบอลเหล็กชุบแข็ง ให้ภาระหัวกด กดวัสดุทดสอบภายใต้ภาระเริ่มต้น 10 กิโลกรัมแรง เมื่อถึงภาวะคงที่ โดยเข็มชี้จะเคลื่อนที่ตามการเคลื่อนที่ของหัวกดและยังตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความลึกของรอยกดจากหัวกด ถูกกำหนดให้เป็น ตำแหน่งศูนย์ ในขณะที่ให้ภาระเริ่มต้นก็เพิ่มภาระหลักด้วย ส่งผลต่อการเพิ่มขนาดของรอยกด เมื่อถึงภาวะคงที่อีกครั้ง ภาระหลัก ได้ถูกเอาออก แต่ภาระเริ่มต้นยังคงไว้ การเอาภาระหลักออกส่งผลให้มีการคืนตัวบางส่วน เป็นผลให้ความลึกของรอยกดลดลง การเพิ่มขึ้นความลึกของรอยกดอย่างถาวรเป็นผลจากการเพิ่มและเอาภาระหลักออก ใช้คำนวณค่าความแข็งร็อคเวลล์

$$HR = E - e$$

|       |   |                                |
|-------|---|--------------------------------|
| $F_0$ | = | ภาระเริ่มต้น หน่วย กิโลกรัมแรง |
| $F_1$ | = | ภาระหลัก หน่วย กิโลกรัมแรง     |
| $F$   | = | ภาระรวม หน่วย กิโลกรัมแรง      |

- e = การเพิ่มขึ้นถาวรของความลึกจากภาระหลัก ในหน่วยของ 0.002 มิลลิเมตร ( 0.002 มิลลิเมตรมีค่าเท่ากับ 1 หน่วย)
- E = ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับรูปร่างของหัวกด : 100 หน่วย สำหรับหัวกดเพชร, 130 หน่วย สำหรับหัวกดลูกบอลเหล็ก
- HR = ค่าความแข็งร็อคเวลล์
- D = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกบอลเหล็ก



รูปที่ 2.11 หลักการความแข็งร็อคเวลล์

ตารางที่ 2.1 สเกลความแข็งของร็อคเวลล์

| สเกล | หัวกด             | ภาระเริ่มต้น          | ภาระหลัก              | ภาระรวม | ค่าของ E |
|------|-------------------|-----------------------|-----------------------|---------|----------|
|      |                   | Minor load<br>F0, kgf | Major load<br>F1, kgf | F, kgf  |          |
| A    | เพชรรูปกรวย       | 10                    | 50                    | 60      | 100      |
| B    | ลูกบอลเหล็ก 1/16" | 10                    | 90                    | 100     | 130      |
| C    | เพชรรูปกรวย       | 10                    | 140                   | 150     | 100      |
| D    | เพชรรูปกรวย       | 10                    | 90                    | 100     | 100      |
| E    | ลูกบอลเหล็ก 1/8"  | 10                    | 90                    | 100     | 130      |
| F    | ลูกบอลเหล็ก 1/16" | 10                    | 50                    | 60      | 130      |
| G    | ลูกบอลเหล็ก 1/16" | 10                    | 140                   | 150     | 130      |
| H    | ลูกบอลเหล็ก 1/8"  | 10                    | 50                    | 60      | 130      |
| K    | ลูกบอลเหล็ก 1/8"  | 10                    | 140                   | 150     | 130      |
| L    | ลูกบอลเหล็ก 1/4"  | 10                    | 50                    | 60      | 130      |
| M    | ลูกบอลเหล็ก 1/4"  | 10                    | 90                    | 100     | 130      |
| P    | ลูกบอลเหล็ก 1/4"  | 10                    | 140                   | 150     | 130      |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการเรียนการสอนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ผู้อื่นไปใช้ประโยชน์ในการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 สเกลความแข็งของร็อกเวลล์ (ต่อ)

| สเกล | หัวกด            | ภาระเริ่มต้น<br>Minor load<br>F0, kgf | ภาระหลัก<br>Major load<br>F1, kgf | ภาระรวม<br>F, kgf | ค่าของ E |
|------|------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|-------------------|----------|
| R    | ลูกบอลเหล็ก 1/2" | 10                                    | 50                                | 60                | 130      |
| S    | ลูกบอลเหล็ก 1/2" | 10                                    | 90                                | 100               | 130      |
| V    | ลูกบอลเหล็ก 1/2" | 10                                    | 140                               | 150               | 130      |

ข้อดีของการทดสอบ สามารถอ่านค่าตัวเลขความแข็งได้โดยตรงและเวลาทดสอบที่รวดเร็ว  
ข้อเสียของการทดสอบ สเกลที่มีไม่มีความสัมพันธ์กันและมีผลกระทบจากแท่นรองตัวอย่าง

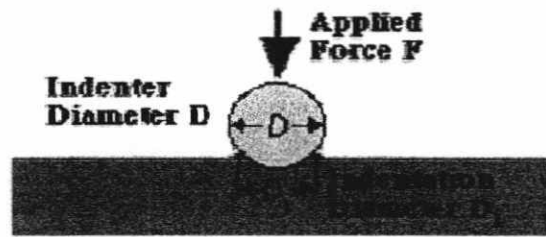
2.8.4. การทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์ (Brinell Hardness Test)

หลักการทดสอบความแข็งบริเนลล์ คือ กดหัวกดด้วยแรงกดที่ลงไปบนผิวโลหะชิ้นทดสอบ ปล่อยให้อยู่  
ภายใต้แรงกดชั่วระยะเวลาหนึ่งจึงเอาแรงกดออก ซึ่งจะทำให้เกิดรอยบุ๋มถาวรบนผิวโลหะชิ้นทดสอบ แล้ววัดขนาดเส้น  
ผ่านศูนย์กลางของรอยบุ๋ม เพื่อหาค่าความแข็ง สำหรับค่าความแข็งบริเนลล์จะเป็นอัตราส่วนระหว่างแรงที่ใช้กดต่อพื้นที่  
ที่ตามผิวโค้งของรอยบุ๋ม

วิธีทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์ประกอบด้วยการใช้การกดหัวกดทดสอบด้วยลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็งหรือลูกบอล  
คาร์ไบด์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มม. ภายใต้ภาระ 3000 กิโลกรัมแรง สำหรับวัสดุที่อ่อนสามารถลดภาระที่ 1500  
กิโลกรัมแรง หรือ 500 กิโลกรัมแรง เพื่อหลีกเลี่ยงรอยกดที่มากเกินไปปกติจะคงภาระไว้ 10-15 วินาที ในกรณีเหล็กหล่อ  
และเหล็กกล้า และอย่างน้อย 30 วินาที ในกรณีโลหะอื่นๆ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกดที่เหลืออยู่บนวัสดุ  
ทดสอบ จะถูกวัดโดยกล้องขยายกำลังต่ำ ค่าความแข็งคำนวณได้จากผลการหารภาระที่ใช้ด้วยพื้นที่ผิวของรอยกด

$$BHN = \frac{F}{(7/3)D \times (D - \sqrt{D^2 - d_1^2})}$$

- BHN = ค่าความแข็งบริเนลล์
- F = ภาระ หน่วย กิโลกรัมแรง
- D = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวกด หน่วย มิลลิเมตร
- Di = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรอยกด หน่วย มิลลิเมตร



รูปที่ 2.12 แสดงหลักการความแข็งบริเนลล์

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกดที่ใช้คำนวณ เป็นค่าเฉลี่ยจากการอ่านค่าสองครั้งตั้งฉากกัน การใช้ตารางค่าความแข็งบริเนลล์สามารถทำให้การหาค่าความแข็งบริเนลล์ง่ายขึ้น รูปการแสดงค่าความแข็งบริเนลล์สามารถแสดงให้เห็นสภาวะของการทดสอบ เช่น 75 HB 10/500/30 หมายความว่า ค่าความแข็ง 75 ใช้ลูกบอลเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มม. ภาระ 500 กิโลกรัมแรง เป็นระยะเวลา 30 วินาที สำหรับตรวจสอบโลหะที่มีความแข็งมาก อาจใช้ลูกบอลทั้งสแตน-คาร์ไบด์แทนลูกบอลเหล็ก เปรียบเทียบการทดสอบความแข็งบริเนลล์กับวิธีการทดสอบความแข็งแบบอื่นๆ ลูกบอลเหล็กของบริเนลล์สามารถสร้างรอยกดที่ลึกและกว้าง ดังนั้นการทดสอบความแข็งจะเฉลี่ยความแข็งปริมาณเนื้อวัสดุที่มากกว่า ซึ่งจะให้ความถูกต้องกับ โครงสร้างเกรนที่ซับซ้อนและไม่สม่ำเสมอในความเป็นเนื้อเดียวกันของวัสดุ วิธีนี้ดีที่สุดเพื่อหาความแข็งมหภาค โดยเฉพาะวัสดุที่โครงสร้างไม่เป็นเนื้อเดียวกัน

### 2.8.5. การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ส (Vickers hardness test)

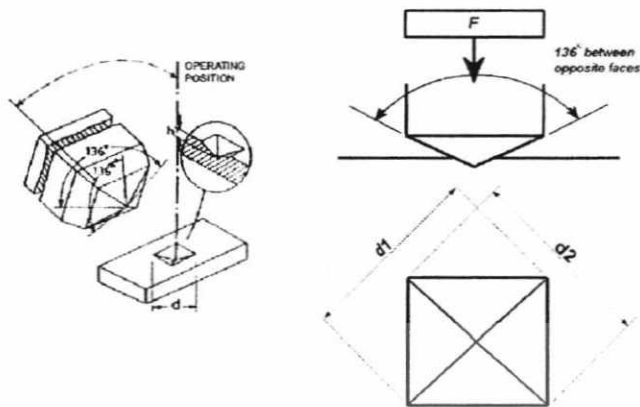
หลักการทดสอบความแข็งวิกเกอร์ส ก็เหมือนกับการทดสอบความแข็งบริเนลล์ ต่างกันที่ใช้หัวกดทดสอบเป็นเพชรรูปปิรามิดฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัส มุมที่ยอดแหลม 136 องศา กดลงไปบนผิววัสดุที่ทดสอบ ด้วยแรงกดทดสอบคงที่ซึ่งมีขนาดต่างๆกัน ภายหลังจากกดชั่วระยะเวลาหนึ่งจึงเอาแรงกดออก ซึ่งจะทำให้เกิดรอยบุ๋มถาวรบนผิวโลหะที่ทดสอบ แล้ววัดขนาดเส้นทแยงมุมของรอยบุ๋มเพื่อหาค่าความแข็ง

วิธีทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ประกอบด้วยการกดวัสดุทดสอบด้วยหัวกดเพชรรูปปิรามิดฐานสี่เหลี่ยมและมุม 136 องศา ระหว่างผิวหน้าตรงกันข้าม ภายใต้ภาระ 1-100 กิโลกรัมแรง เป็นระยะเวลา 10-15 วินาที เส้นทแยงที่หลงเหลือบนผิวหน้าของวัสดุภายหลังจากนำภาระออก จะถูกวัดโดยกล้องจุลทรรศน์ และคำนวณค่าเฉลี่ยของเส้นทแยงพื้นที่ผิวเฉียงของรอยกดจะได้อ่านค่าความแข็งคำนวณจากผลหารภาระต่อพื้นที่สี่เหลี่ยมของรอยกด ดังนี้

$$HV = \frac{2F \sin(136^\circ/2)}{d^2}$$

$$HV = 1.854 (F/d^2)$$

- F = ภาระ หน่วย กิโลกรัมแรง
- D = ค่าเฉลี่ยของเส้นทแยงมุมทั้งสอง
- HV = ความแข็งวิกเกอร์ส

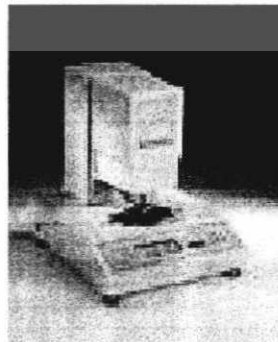
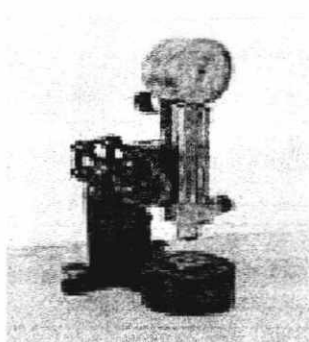


รูปที่ 2.13 หลักการความแข็งวิกเกอร์ส

เมื่อหาค่าเฉลี่ยเส้นทแยงมุม ได้ค่าความแข็งวิกเกอร์สคำนวณได้จากสูตร แต่จะสะดวกมากขึ้นเมื่อใช้ตารางความแข็งวิกเกอร์ส ตารางจะรายงานดังนี้ 800 HV/10 หมายความว่า ความแข็งวิกเกอร์ส 800 โดยใช้ภาระ 10 กิโลกรัมแรง การให้ภาระที่แตกต่างกันจะให้ค่าความแข็งที่เท่ากันบนวัสดุที่เป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งดีกว่าการเปลี่ยนสเกลด้วยวิธีทดสอบความแข็งแบบอื่น ข้อได้เปรียบของการทดสอบความแข็งวิกเกอร์ส คือการอ่านค่าที่แม่นยำสูง และหัวกดแบบเดียวสามารถใช้ได้กับทุกประเภทของวัสดุและการชุบแข็งผิว แม้ว่าความแม่นยำและการปรับเปลี่ยนได้สะดวกสำหรับการทดสอบวัสดุที่แข็งมากและอ่อนมาก ภายใต้ภาระที่เปลี่ยนแปลงได้ เครื่องทดสอบความแข็งวิกเกอร์ส มีราคาแพงกว่าเครื่องทดสอบความแข็งบริเนลล์ และร็อคเวลล์

**2.8.6. การทดสอบความแข็งแบบ Shore (Shore hardness test)**

วิธีทดสอบความแข็ง Shore scleroscope วัดความแข็งในเทอมความยืดหยุ่นของวัสดุ ทดสอบโดยปล่อยหัวค้อนปลายเพชร (ขนาด 40 เกรน; 2.5 กรัม; 0.0914 ออนซ์) ตกด้วยน้ำหนักของตัวเองและจากความสูงที่ทราบค่า (10 นิ้ว; 254 มิลลิเมตร) ในท่อแก้ว ความสูงที่กระดอนกลับวัดได้จากสเกลที่ได้แบ่งเป็น 100 ส่วน ซึ่งแสดงค่าเฉลี่ยจากการกระดอนของเหล็กกล้าคาร์บอนชุบแข็งที่สมบูรณ์ สเกลมากกว่า 100 จะเป็นโลหะที่มีความแข็งมากเกิน ค่าความแข็งขึ้นอยู่กับความสูงที่กระดอนกลับของหัวค้อน วัสดุที่แข็ง ความสูงกระดอนจะมาก ความแข็งก็จะมาก วัสดุที่อ่อน ความสูงกระดอนจะน้อย ความแข็งก็จะน้อย



รูปที่ 2.14 เครื่องทดสอบความแข็ง Shore Scleroscope      รูปที่ 2.15 เครื่องทดสอบความแข็ง Shore Durometer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปเผยแพร่เป็นการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบแบบ Shore durometer ใช้หัวกดรูปแข็ง สปรिंगที่ได้ปรับค่าอย่างถูกต้อง ความลึกของหัวกด และ แผ่นกด หัวกดจะถูกติดตั้งตรงกลางของฐานกดและมีระยะยึดตัว 2.5 มม. จากผิวของฐาน ตำแหน่งระยะยึดตัวเต็มที่ เข็มชี้แสดงค่าศูนย์ เมื่อหัวกดถูกกดจนกระทั่งแบบติดผิวหน้าฐานกด คิวบ์ซึ่งแสดงค่า 100 ดังนั้นทุกๆ จุดของ Shore มีค่าเท่ากับ ระยะกด 0.0025 มม. (สเกล M เท่ากับ 0.00125 มม.)

ตารางที่ 2.2 ชนิดของเครื่องทดสอบความแข็ง Shore durometer

| เครื่องทดสอบ - Shore durometer type A and D |   |                   |
|---|---|-------------------|
| Durometer                                   | แผ่นกด (Indenting foot)   | ภาระที่ใช้ (กรัม) |
| Type A                                      | แท่งเหล็กชุบแข็ง $\varnothing$ 1.1-1.4 มม. ปลายรูปกรวยมุม $35^\circ$ $\varnothing$ 0.79 มม. | 822               |
| Type B                                      | แท่งเหล็กชุบแข็ง $\varnothing$ 1.1-1.4 มม. ปลายรูปกรวยมุม $30^\circ$ รัศมีปลาย 0.1 มม.      | 4550              |

การทดสอบความแข็งพลาสติกส่วนมาก วัดด้วยเครื่องทดสอบ Shore durometer หรือการทดสอบความแข็งรีดอคเวลล์ ทั้งสองวิธีวัดความต้านทานของพลาสติกต่อรอยกด ทั้งสองสเกลให้ค่าความแข็งตามหลักการไม่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติและคุณลักษณะพื้นฐาน ความแข็ง Shore A หรือ D เป็นวิธีที่นิยมใช้สำหรับยางอีลาสโตเมอร์ และปกติใช้กับพลาสติกอ่อนเช่นพอลิเอทิลีนฟลูออโรพอลิเมอร์ และไวนิล Shore A ใช้สำหรับยางอ่อนในขณะที่ Shore D ใช้สำหรับยางที่แข็งกว่า ความแข็ง Shore A คือค่าความแข็งสัมพัทธ์ของวัสดุยืดหยุ่น เช่น ยาง หรือพลาสติกอ่อน สามารถที่จะหาได้ด้วยเครื่องมือที่เรียกว่า Shore A durometer เนื่องจากความยืดหยุ่นของยางและพลาสติก การอ่านค่าจะเปลี่ยนแปลงตามเวลา ดังนั้นเวลาการกดบางครั้งจะถูกรายงานรวมกับค่าความแข็ง

#### 2.8.7. สเกลความแข็งแบบ Mohs (Mohs hardness scale)

สเกลความแข็ง Mohs ได้มีใช้มาตั้งแต่ปี 1822 กำหนดโดยการวัดความทนต่อการขีดของวัตถุ โดยวัตถุอื่นเป็นการวัดค่าความแข็งหลายๆ ประกอบด้วยแร่ 10 ชนิด จัดลำดับจาก 1-10 เพชรจัดอันดับแข็งที่สุดและแสดงค่าเป็น 10 Talc อ่อนที่สุดแสดงค่าเป็น 1 แร่แต่ละชนิดในสเกลจะขีดแร่ที่ลำดับต่ำกว่าเป็นรอย ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2.3 แสดงความแข็งของวัสดุในสเกลความแข็งแบบ Mohs (Mohs hardness scale)

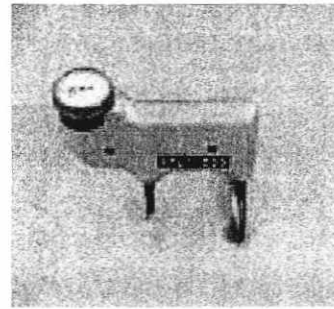
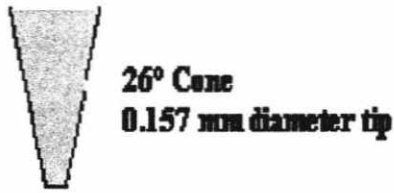
| วัสดุ                 | ระดับความแข็ง |
|-----------------------|---------------|
| Diamond               | 10            |
| Corundum              | 9             |
| Topaz                 | 8             |
| Quartz                | 7             |
| Orthoclase (Feldspar) | 6             |
| Apatite               | 5             |
| Fluorite              | 4             |
| Calcite               | 3             |
| Gypsum                | 2             |
| Talc                  | 1             |

ถ้าระดับความแข็ง Mohs มีค่าไม่เท่ากันและความแตกต่างระหว่างความแข็งไม่เท่ากัน เช่น ความแข็ง 9 และ 10 มากกว่า ความแข็งระหว่าง 1 และ 2 ความแข็งวัด โดยหว่านแร่มาตรฐานชนิดใด ชนิดแรกที่ติดการทดสอบเป็นรอยและไม่เป็นรอย ค่าความแข็งจะตกอยู่ระหว่างสองจุดบนสเกล จุดแรกเป็นแร่ซึ่งจะขีดเป็นรอย และจุดถัดไปเป็นแร่ซึ่งขีดไม่เป็นรอย ในกระบวนการทดสอบ ต้องแน่ใจว่ารอยขีดที่เกิดเป็นรอยขีดที่เกิดจริงๆ ไม่ใช่เพียงรอยขีดที่สามารถขีดออกได้ การทดสอบอาจเป็นเพียงทำให้เม็ดเกรนหลุดออก โดยไม่ได้ทดสอบผิวของตัวแท้จริงๆ ดังนั้นเนื้อหรือเม็ดเกรนอาจจะบดบึงและขีดขวางการทดสอบหาความแข็งที่แท้จริง ตัวอย่างของความแข็งโลหะโดยทั่วไปในสเกล Mohs เช่น ทองแดงมีค่าความแข็ง ระหว่าง 2 และ 3 และเหล็กเครื่องมือมีค่าความแข็งระหว่าง 7 และ 8 การทดสอบนี้เป็นการทดสอบอย่างง่าย ๆ ซึ่งเป็นตัวเลขที่ไม่แม่นยำและตัวเลขค่าความแข็งถูกกำหนดเป็นค่าที่เจาะจง

### 2.8.8. การทดสอบความแข็งแบบ Barcol (Barcol hardness test)

ความแข็ง Barcol เป็นวิธีหาค่าความแข็งโดยการวัดความต้านทานต่อการเจาะของเหล็กปลายแหลมภายใต้ภาระจากสปริง เครื่องมือซึ่งเรียกว่าตัวกด Barcol อ่านค่าโดยตรงจากสเกล 0 – 100 ซึ่งสเกลความแข็งแต่ละสเกลแสดงระยะการเจาะ 0.0076 มิลลิเมตร บ่อยครั้งค่าความแข็ง Barcol ใช้วัดระดับการบ่มตัวของพลาสติกและเรซิน โดยพิจารณาว่าบ่มได้ที่เมื่อค่าความแข็งมากกว่าหรือเท่ากับ 90% ของค่าความแข็งผิว

การทดสอบความแข็ง Barcol ตามมาตรฐาน ASTM D 2583 ใช้วัดความแข็งของพลาสติกแข็งเสริมแรงและไม่เสริมแรงวางขึ้นทดสอบภายใต้หัวกดของเครื่องทดสอบความแข็ง Barcol และให้แรงกดที่สม่ำเสมอกับขึ้นทดสอบจนกระทั่งเข็มขึ้นหน้าปัดมีแสดงค่าสูงสุด ความลึกของการเจาะถูกแปลงเป็นค่าความแข็ง Barcol



รูปที่ 2.16 เครื่องทดสอบความแข็ง Barcol

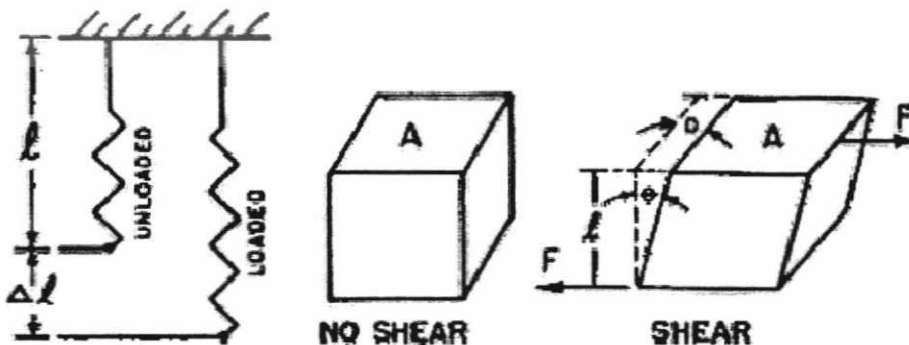
## 2.9. คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ

มาตรฐานคำนิยามของ ASTM ที่เกี่ยวข้องกับสมบัติทางเชิงกล

### 2.9.1. ความเครียด (Strain)

ความเครียด คือ การเปลี่ยนแปลงต่อหน่วยในด้านของขนาดหรือรูปร่างของวัตถุอันเนื่องมาจากแรงเมื่อเทียบกับขนาดหรือรูปร่างดั้งเดิม ความเครียดเป็นปริมาณที่ไม่มีหน่วย (Nondimensional unit) แต่ก็สามารถแสดงหน่วยได้เป็น นิ้ว/นิ้ว หรือ ซม./ซม.

1. ความเครียดเชิงเส้น (Tensile หรือ Compressive strain) คือการเปลี่ยนแปลงต่อหน่วยความยาวอันเนื่องมาจากแรงในมิติเชิงเส้นเดียวกัน
2. ความเครียดแนวแกน (Axial strain) เป็นความเครียดเชิงเส้นในระนาบซึ่งขนานกับแนวแกนยาวของชิ้นงานตัวอย่างนั้น
3. ความเครียดแนวขวาง (Transverse strain) เป็นความเครียดเชิงเส้นในระนาบที่ตั้งฉากกับแนวแกนยาวของชิ้นงานตัวอย่าง
4. ความเครียดเฉือนหรือความเครียดเชิงมุม (Shear strain หรือ Angular strain) คือการเปลี่ยนแปลงระหว่างเส้น 2 เส้นซึ่งตอนแรกตั้งฉากซึ่งกันและกัน
5. ความเค้นจริง (True strain) เป็นอัตราส่วนของความยาว ณ ตำแหน่งที่ใด ๆ ในสเกลลอการิทึมธรรมชาติ ( $\ln$ ) ต่อความยาวเริ่มต้น



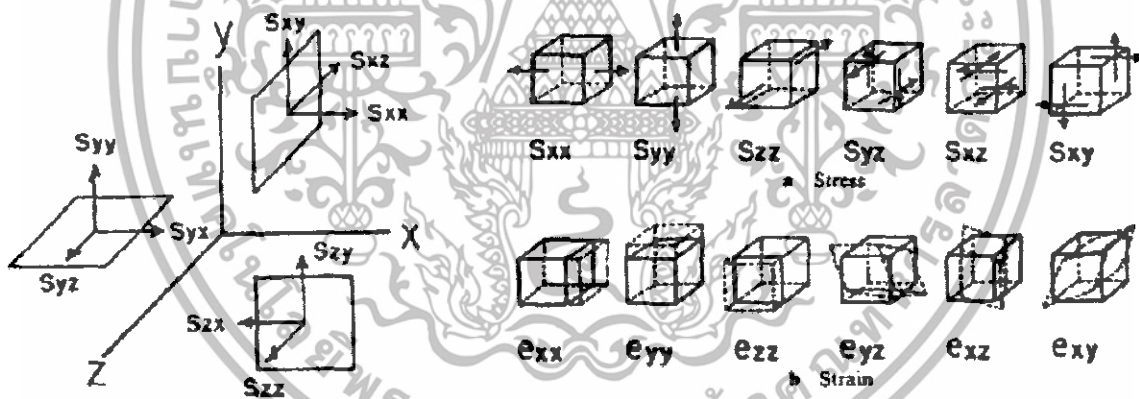
รูปที่ 2.17 ความเครียดเชิงเส้นและความเครียดเฉือน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.9.2. ความเค้น (Stress)

ความเค้น คือความเข้มของแรงภายในเทหะวัตถุหรือองค์ประกอบของแรงซึ่งกระทำต่อระนาบผ่านจุดใดจุดหนึ่ง ความเค้นสามารถนิยามได้ว่าเป็นอัตราส่วนระหว่างแรงต่อหน่วยพื้นที่

1. **ความเค้นรวม (Nominal stress)** คือความเค้น ณ จุดที่คำนวณบนพื้นที่หน้าตัดรวม โดยทฤษฎีความยืดหยุ่นไม่ได้คำนึงถึงผลของความเค้นที่เกิดจากความไม่ต่อเนื่องระหว่างเนื้อสัมผัสภายในวัตถุนั้นๆ เช่น รุหรือภายในรอยบาก เป็นต้น
2. **ความเค้นปกติ (Normal stress)** คือองค์ประกอบความเค้นที่ตั้งฉากกับระนาบที่แรงกระทำอยู่ สามารถแบ่งได้เป็น
  - ความเค้นดึง (Tensile stress) เป็นความเค้นปกติเนื่องจากแรงกระทำในทิศทางพุ่งออกจากระนาบที่แรงกระทำอยู่
  - ความเค้นกด (Compressive stress) เป็นความเค้นปกติเนื่องจากแรงกระทำในทิศทางที่พุ่งเข้าหาระนาบที่แรงกระทำอยู่
3. **ความเค้นเฉือน (Shear stress)** เป็นองค์ประกอบความเค้นในแนวสัมผัสกับระนาบซึ่งแรงนั้นกระทำอยู่
4. **ความเค้นบิด (Torsion stress)** เป็นความเค้นเฉือนบนภาคตัดขวางซึ่งเป็นผลมาจากการบิด
5. **ความเค้นจริง (True stress)** เป็นความเค้นในแนวแกน (ความเค้นดึงหรือความเค้นกด) ที่คำนวณโดยอาศัยพื้นที่หน้าตัด ณ เวลาปัจจุบันแทนที่จะคำนวณโดยใช้พื้นที่หน้าตัด ณ เวลาเริ่มต้น
6. **ความเค้นแตกหัก (Fracture stress)** เป็นความเค้นจริงบนพื้นที่หน้าตัดที่น้อยที่สุดที่วัตถุกำลังจะเริ่มแตกหัก



รูปที่ 2.18 ความเค้นและความเครียดในแนว 3 มิติ

2.9.3. **ความแข็งแรงกด (Compressive strength)** คือความเค้นสูงสุดซึ่งวัตถุจะสามารถคงรูปอยู่ได้ ความแข็งแรงกดสามารถคำนวณได้จากอัตราส่วนระหว่างภาระกระทำสูงสุดระหว่างทดสอบกดต่อพื้นที่หน้าตัดเริ่มต้น

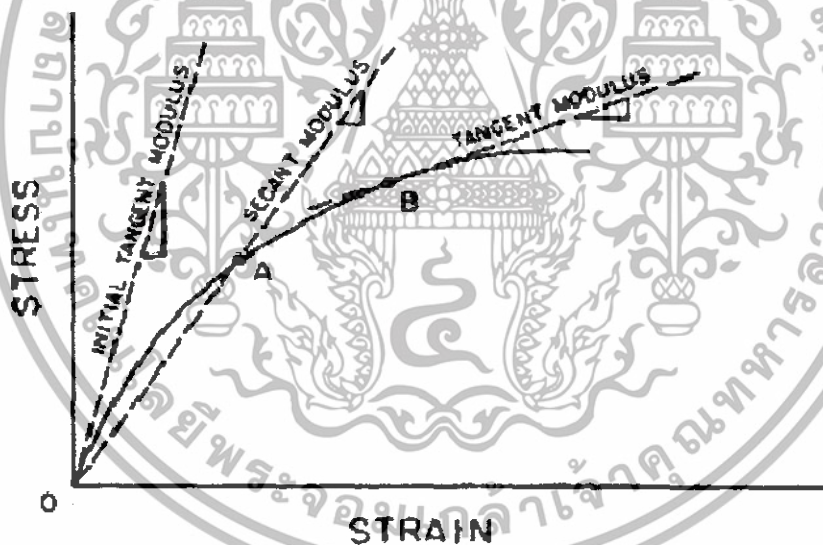
2.9.4. **ขีดจำกัดยืดหยุ่น (Elastic limit)** คือค่าความเค้นสูงสุดซึ่งวัสดุสามารถคงรูปอยู่ได้โดยปราศจากการเปลี่ยนแปลงแบบถาวรหลังจากการปลดปล่อยความเค้นออกไป

2.9.5. ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่น (Modulus of elasticity) คืออัตราส่วนระหว่างความเค้นต่อความเครียดที่ ณ ตำแหน่งเดียวกันซึ่งต่ำกว่าขีดจำกัดเชิงอัตราส่วน (Proportional limit) สำหรับวัสดุที่มีความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและความเครียดเป็นเส้น โค้งแทนที่จะเป็นเส้นตรง อาจใช้คำนิยามได้จากข้างล่างดังนี้

- ก. โมดูลัสสัมผัสเริ่มต้น (Initial tangent modulus) เป็นความชันสัมผัสของเส้น โค้งความเค้น-ความเครียด ณ จุดเริ่มต้น
- ข. โมดูลัสสัมผัส (Tangent modulus) เป็นความชันสัมผัสของเส้น โค้งความเค้น-ความเครียด ณ ตำแหน่งใดๆ ที่ศึกษาอยู่
- ค. โมดูลัสซีแคน (Secant modulus) เป็นความชันของเส้น โค้งความเค้น-ความเครียดคำนวณจากจุดเริ่มต้นถึงจุดใด ๆ บนเส้น โค้งความเค้น-ความเครียดนั้น ๆ
- ง. โมดูลัสคอร์ด (Cord modulus) เป็นความชันของเส้น โค้งความเค้น-ความเครียดซึ่งลากระหว่างจุดใด ๆ 2 จุด

2.9.6. ขีดจำกัดเชิงอัตราส่วน (Proportional limit) คือค่าความเค้นมากที่สุดซึ่งวัสดุจะสามารถคงรูปอยู่ได้โดยปราศจากการเปลี่ยนแปลงจากการเป็นอัตราส่วนของความเค้นและความเครียด (Hooke's law)

2.9.7. ความแข็งแรงเฉือน (Shear strength) คือค่าความเค้นเฉือนสูงสุดที่วัสดุสามารถคงรูปอยู่ได้ ความเค้นเฉือนสามารถคำนวณได้จากภาระสูงสุดขณะทดสอบการเฉือนหรือบิด ความแข็งแรงเฉือนคำนวณอยู่บนพื้นฐานของพื้นที่หน้าตัดเริ่มต้นของชิ้นงานทดสอบ



รูปที่ 2.19 วิธีการหาโมดูลัสแบบต่างๆ จากกราฟความเค้นและความเครียดแบบไม่เป็นเส้นตรง

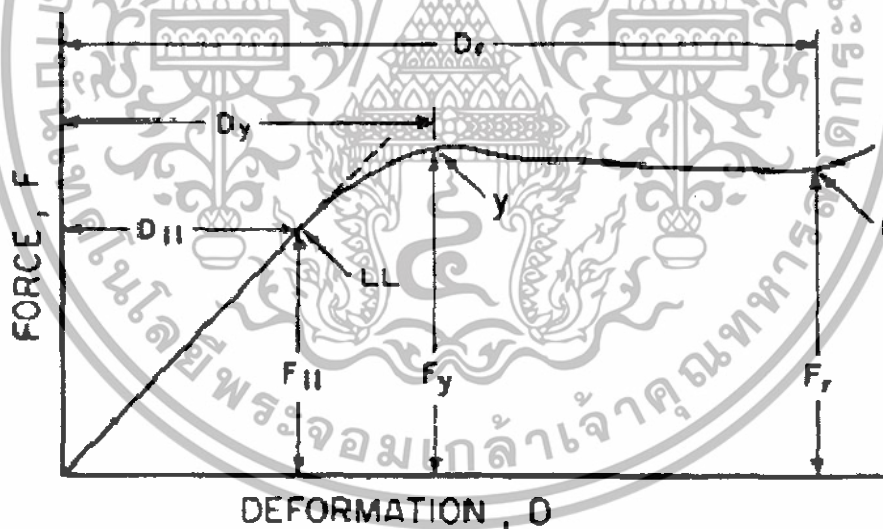
2.9.8. ความแข็งแรงดึง (Tensile strength) คือค่าความเค้นดึงสูงสุดที่วัสดุสามารถคงรูปอยู่ได้ ความเค้นดึงคำนวณได้จากภาระสูงสุดระหว่างการทดสอบดึงเพื่อให้วัสดุแตกหัก ความแข็งแรงดึงคำนวณอยู่บนพื้นฐานของพื้นที่หน้าตัดเริ่มต้นของชิ้นงานทดสอบ

2.9.9. จุดคราก (Yield point) คือค่าความเค้นจุดแรกในวัสดุ (น้อยกว่าค่าความเค้นสูงสุด) ที่ซึ่งความเครียดเพิ่มขึ้นแต่ความเค้นไม่เพิ่ม วัสดุบางชนิดที่มีปรากฏการณ์ “คราก” เท่านั้นจึงจะแสดงจุดคราก

2.9.10. ความแข็งแรงคราก (Yield strength) คือค่าความเค้นของวัสดุ ณ จุดซึ่งแสดงขีดจำกัดเบี่ยงเบนไปจากความเป็นอัตราส่วนระหว่างความเค้น-ความเครียด ซึ่งการเบี่ยงเบนดังกล่าวสามารถแสดงได้ในรูปของความเครียด ส่วนใหญ่แล้วเราสามารถหาค่าความแข็งแรงครากได้โดยวิธีเยื้อง (Offset method) ซึ่งปกติแล้วจะกำหนดที่ 0.2 เปอร์เซ็นต์ของความเครียด

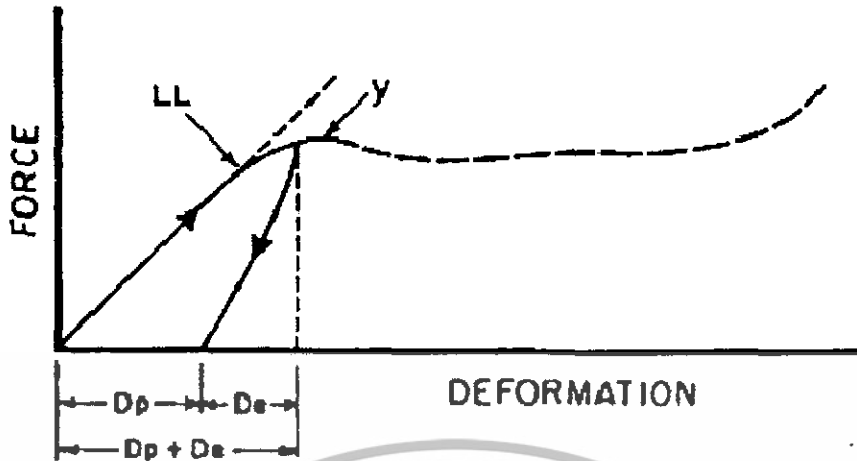
2.9.11. การเปลี่ยนรูป (Deformation) คือการเปลี่ยนตำแหน่งหรือการบิดเบี้ยวภายในวัสดุ การเปลี่ยนรูป เช่น ความเค้นเป็นปริมาณเวกเตอร์ ปกติแล้วการเปลี่ยนรูปจะเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนปริมาตรหรือรูปร่างด้วย การเปลี่ยนปริมาตรเกิดขึ้นได้จากการกระทำของความเค้นไอโซทรอปิก (Isotropic stress) เช่น ความดันสถิตย (Hydrostatic pressure) เป็นต้น ส่วนการเปลี่ยนรูปร่างจะนำมาสู่การเกิดความเค้นเฉือน วัสดุต่าง ๆ สามารถเกิดการเปลี่ยนรูปได้โดยการกด การดึงในเชิงแกนเดียว การเฉือน และการกดแบบกลุ่มก้อน (Bulk compression)

2.9.12. ความยืดหยุ่น (Elasticity) คือความสามารถของวัสดุที่มีความยืดหยุ่นหรือการเปลี่ยนรูปที่คืนตัวได้ ความยืดหยุ่น คือ ส่วนที่อยู่ก่อนถึงจุด LL ในรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 ภาพรวมของกราฟแรง-การเปลี่ยนรูปของผลิตภัณฑ์: LL-ขีดจำกัดเส้นตรง, y-จุดครากชั่วคราว, R-จุดแตกหัก

2.9.13. พลาสติกซิตี้ (Plasticity) คือความสามารถของวัสดุที่จะเปลี่ยนรูปได้อย่างถาวร ไม่สามารถคืนรูปเดิมได้ เนื่องจากการเปลี่ยนรูปจากจุดครากชั่วคราวถึงจุดแตกหักเป็นสิ่งที่ไม่สามารถคืนรูปเดิมได้ ดังนั้นการเปลี่ยนรูปในส่วนดังกล่าวจึงเป็นจุดชี้วัดการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกระดับความยืดหยุ่น (Degree of elasticity) คืออัตราส่วนการเปลี่ยนรูปในช่วงยืดหยุ่นต่อผลรวมของการเปลี่ยนรูปทั้งแบบยืดหยุ่นและแบบพลาสติกเมื่อวัสดุถูกกระทำโดยภาระระดับหนึ่งแล้วจึงภาระออกโดยสมบูรณ์ (ดูรูปที่ 2.21 ประกอบ)



รูปที่ 2.21 ระดับความยืดหยุ่นจากกราฟที่มีภาวะและดึงการรื้อออก:  $D_e =$  Elastic or recoverable deformation;

$D_p =$  Plastic or residual deformation;  $D_e/(D_p+D_e) =$  Degree of elasticity

## 2.10. แรงดึงและการทดสอบ

การทดสอบแรงดึง เกี่ยวกับการดึงกระทำบนวัสดุชิ้นทดสอบ เพื่อหาค่าความสัมพันธ์ระหว่าง แรงการแยก และแรงที่จุดเสียหาย ขั้นตอนการทดสอบถูกกำหนดไว้กับชนิดของวัสดุจริง เช่น โลหะ พลาสติก กระจก ยาง ฟิสิกส์ ลวด เชือก เป็นต้น มีคุณสมบัติของวัสดุจำนวนมากสามารถหาค่าโดยการทดสอบแรงดึง เช่น วัสดุที่ถูกดึงจะพบว่ามีความพร้อมกับการยืดมีค่าเท่าไร ข้อมูลที่ได้จากทดสอบจะถูกนำไปใช้หาค่า Elastic limit, Elongation, Modulus of elasticity, Proportional limit, Reduction in area, Yield strength, Yield point และคุณสมบัติอื่นๆ การทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ให้ใช้ข้อกำหนดของข้อมูลครีท การพิจารณาเพื่อการทดสอบแรงดึงของโลหะถูกกำหนดไว้ใน ASTM E-8 ขั้นตอนการทดสอบแรงดึงของพลาสติกถูกสรุปไว้ใน ASTM D-618 และ ASTM D-2289 (High strain rate) และ ASTM D-882 (Thin sheet), ASTM D-2343 สรุปขั้นตอนเพื่อการทดสอบแรงดึงของ Glass fiber, ASTM D-897 (Adhesive), ASTM D-412 (Vulcanized rubber)

การทดสอบแรงดึง เป็นวิธีที่นิยมใช้เพื่อวัดคุณสมบัติความต้านทานของวัสดุต่อแรงที่มากระทำ โดยเริ่มจาก

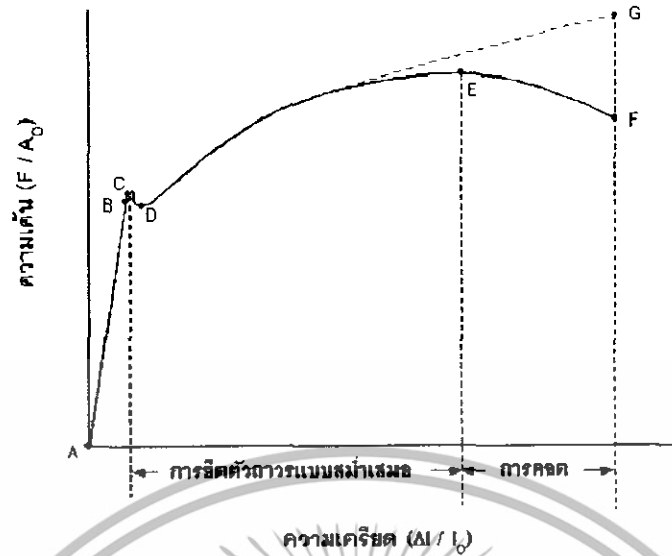
- การกัด (Milling) ชิ้นงานสำหรับทดสอบให้ได้ขนาดตามมาตรฐานที่ต้องการทดสอบ เช่น สมอ, JIS
- เช็ดสารหล่อลื่นที่ติดมากับชิ้นงานที่กัดเสร็จแล้วให้สะอาด และอาจใช้กระดาษทรายลูบชิ้นงาน

ทดสอบ ถ้าผิวเหล็กมีสนิม (Scale เช่น ในกรณีของเหล็กแผ่นรีดร้อน) เพื่อป้องกันการเลื่อน (Slip) ของชิ้นงานจากหัวจับขณะทำการดึง

- ตรวจสอบความเร็วของชิ้นงาน โดยจะต้องไม่โก่งงอ เพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้องจากการทดสอบ
- ทำการวัดและบันทึกค่าขนาดของชิ้นทดสอบที่ได้จากการเตรียม และตรวจสอบซ้ำเพื่อให้แน่ใจว่าขนาด

(Dimension) ของชิ้นทดสอบอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ของมาตรฐานทดสอบนั้นๆ

- ทำการดึงด้วยเครื่องดึง (Tensile machine) ซึ่งเมื่อดึงเสร็จสิ้น (ชิ้นงานขาดจากกันเป็นสองส่วน) โปรแกรมของเครื่องส่วนใหญ่จะทำการวาดกราฟและคำนวณค่าต่างๆ ที่เราต้องการ



รูปที่ 2.22 กราฟความเค้น-ความเครียดของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำในสภาพอบอ่อน

กราฟข้างบนแสดงค่าความเค้น (Stress) เทียบกับความเครียด (Strain) จากการทดสอบแรงดึงเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำโดยค่าต่างๆ ในกราฟคำนวณจาก

$$\text{ความเค้น (Stress)} = \frac{\text{แรงที่กระทำ}}{\text{พื้นที่หน้าตัดที่รับแรงนั้น}}$$

(หน่วยของความเค้นอาจเป็น  $\text{N/mm}^2$  หรือ  $\text{MPa}$  หรือ  $\text{kgf/mm}^2$  หรือ  $\text{psi}$  หรือ  $\text{ksi}$  ก็ได้)

โดยพื้นที่หน้าตัดที่ใช้ในการคำนวณค่าความเค้นมักจะใช้พื้นที่หน้าตัดเริ่มต้นก่อนที่จะทำการทดสอบ

( $A_0$ ) เราเรียกค่าความเค้นนี้ว่า Engineering stress ซึ่งแสดงดังเส้นโค้ง ABCDEF ในกราฟรูปที่ 2.22 ซึ่งค่าความเค้นจะลดลงในช่วงปลายของการยืดตัวเนื่องจากเกิดการคด (Necking) ทำให้ชิ้นงานรับแรงได้น้อยลงอย่างมาก (แต่ถ้าคำนวณความเค้นจากพื้นที่หน้าตัด ณ ช่วงเวลาใดเวลาหนึ่งที่หน้าตัดเล็กลง เราจะเรียกค่าความเค้นจากการคำนวณนี้ว่า True Stress ซึ่งแสดงดังเส้นโค้ง ABCDG ซึ่งความเค้นในช่วงปลายของการยืดตัวยังคงสูงขึ้นเนื่องจากใช้พื้นที่จริงๆ ขณะนั้นเป็นตัวหาร)

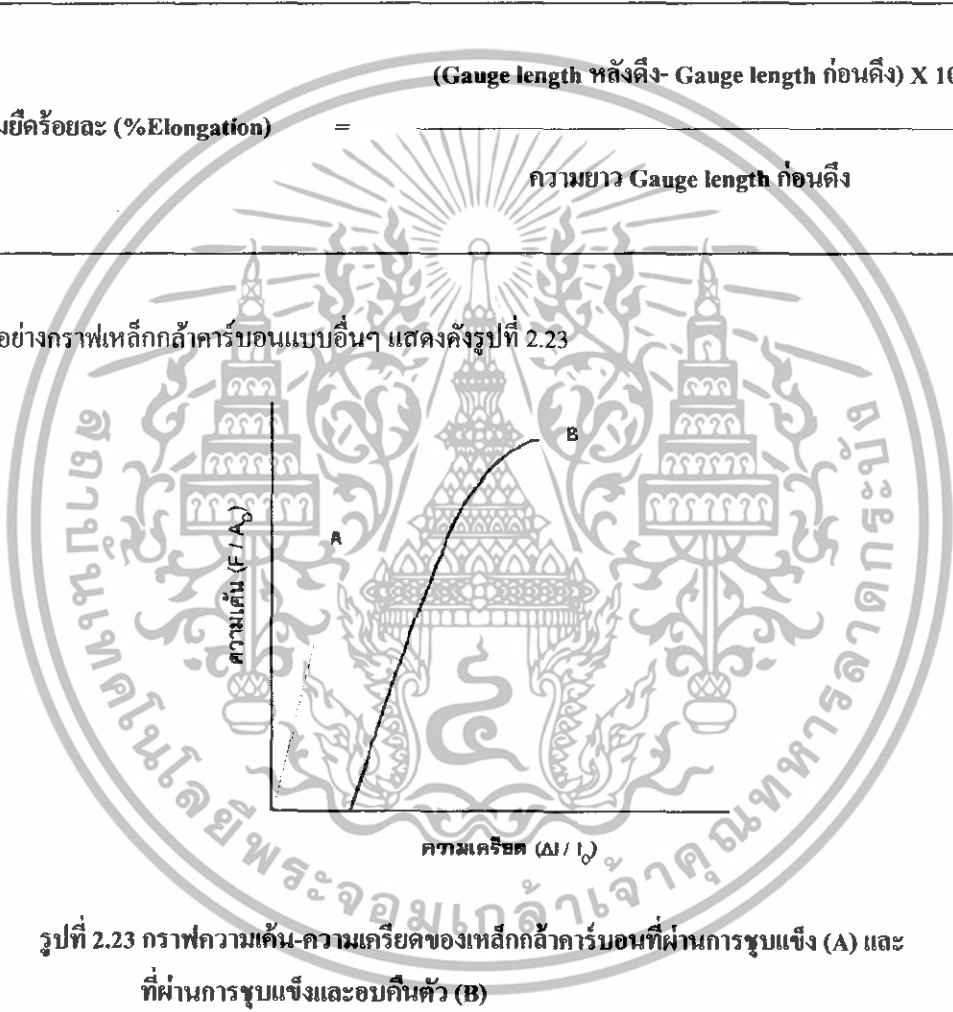
$$\text{ความเครียด (Strain)} = \frac{\text{ความยาวที่ยืดออก}}{\text{ความยาวเริ่มต้น}}$$

ในทำนองเดียวกัน เราเรียกค่าความเครียดที่คำนวณโดยการใช้ค่าความยาวเริ่มต้น ( $l_0$ ) เป็นตัวเทียบนี้ว่า Engineering strain ช่วงต่างๆ ของกราฟความเค้น-ความเครียดที่น่าสนใจได้แก่ ช่วง AB เป็นช่วงที่วัสดุเริ่มยืดตัว โดยที่ระยะยืดตัวจะมีความสัมพันธ์กับแรงที่มาดึงเป็นแนวเส้นตรง เราเรียกช่วงนี้ของกราฟว่า Proportional limit หรือ Limit of proportionality โดยความชันของเส้นตรงดังกล่าวจะเรียกว่า Young's modulus of elasticity เมื่อวัสดุยืดตัวอีกเล็กน้อยจะถึงจุด C ซึ่งเป็นจุดที่เริ่มที่จะมีการแปรรูปแบบถาวร (Plastic deformation) โดยวัสดุที่ได้รับแรงดึงในช่วง AC เมื่อทำการหยุดดึงชิ้นงานจะหดกลับไปยังความยาวเริ่มแรกของวัสดุนั้น เราเรียกการแปรรูปในช่วง AC ว่า Elastic deformation ในทางปฏิบัติ จุด B และ C จะอยู่ใกล้กันมากจนสามารถถือได้ว่าเป็นจุดเดียวกันสำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนเมื่อทำการแปรรูปต่อจากจุด C ความเค้นจะลดลงและคงที่โดยวัสดุสามารถยืดตัวออกไปได้เองโดยไม่ต้องเอกลำนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

เพิ่มความเค้น ซึ่งเป็นคุณสมบัติเฉพาะของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เราเรียกค่าความเค้นที่จุด D ว่า ความต้านทานแรงดึงที่จุดคราก (Yield strength) เมื่อดึงวัสดุออกจากจุด D ไปเรื่อยๆ ค่าความเค้นจะค่อยเพิ่มขึ้นเมื่อระยะยืดเพิ่มขึ้นจนถึงจุด E ซึ่งเป็นจุดที่ความเค้นสูงสุดของกราฟที่เป็นเส้นเต็ม เรียกค่าความเค้นสูงสุดนี้ว่า ความต้านทานแรงดึง (ซึ่งถ้าวัสดุถูกดึงออกจากจุด D พื้นที่หน้าตัดบางส่วนของชิ้นงานจะเริ่มเกิดการคอด (Non-uniform deformation) และทำให้รับแรงได้น้อยลง เมื่อดึงวัสดุต่อจนถึงจุด F วัสดุจะขาดในที่สุด ซึ่งเราสามารถหาค่าความยาวที่วัสดุยืดตัวออกโดยการนำเอาชิ้นงานที่ขาดมาต่อกัน แล้วหาความยาวของวัสดุหลังการดึง (Initial gauge length) ลบด้วยความยาวของวัสดุก่อนดึง (Initial gauge length) และทำการคำนวณหาค่าความยืดตัวร้อยละ (Percentage elongation) ได้โดย

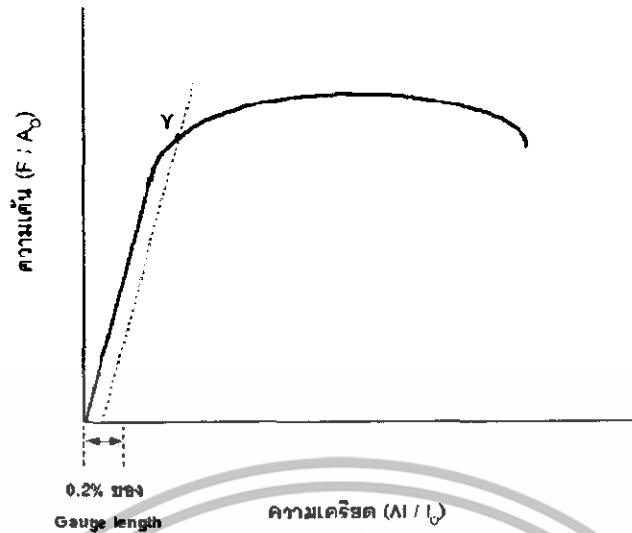
$$\text{ความยืดร้อยละ (\%Elongation)} = \frac{(\text{Gauge length หลังดึง} - \text{Gauge length ก่อนดึง}) \times 100}{\text{ความยาว Gauge length ก่อนดึง}}$$

สำหรับตัวอย่างกราฟเหล็กกล้าคาร์บอนแบบอื่นๆ แสดงดังรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 กราฟความเค้น-ความเครียดของเหล็กกล้าคาร์บอนที่ผ่านการชุบแข็ง (A) และที่ผ่านการชุบแข็งและอบคืนตัว (B)

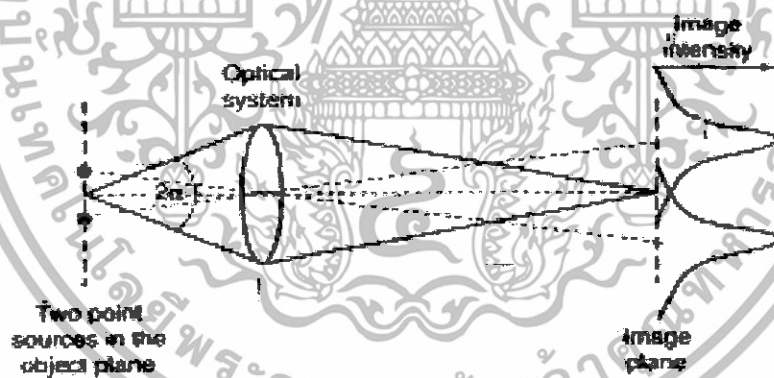
สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนเมื่อเหล็กผ่านการรีดปรับผิว (Skin pass rolling) จะไม่ปรากฏจุดครากที่แท้จริงให้เห็น ดังนั้นการคำนวณค่าความต้านทานแรงดึงที่จุดครากจะใช้วิธีการลากเส้นขนานกับเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดช่วงที่กราฟเป็นเส้นตรง (Proportional limit) หรือเรียกว่า Offset method เช่น วัดที่ระยะห่าง 0.2% ของ Gauge length ไปตัดกับเส้นกราฟที่ได้จากการดึง เราเรียกค่าความเค้นตรงจุดที่ทั้งสองตัดกันเรียกว่า ค่าความเค้นพิสูจน์ (Proof stress) ที่ 0.2% เป็นต้น



รูปที่ 2.24 กราฟความเค้น-ความเครียดของเหล็กกล้าคาร์บอนที่ผ่านอบอ่อนและรีดปรับผิว (As annealed & skin pass rolled)

2.11 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)

การมองเห็นภาพด้วยตา มีข้อจำกัดหลายอย่าง โดยเฉพาะ Resolution ซึ่ง Resolution คือความสามารถในการแยกจุด 2 จุดออกจากกันจากรูป



รูปที่ 2.25 ความสามารถในการแยกจุด 2 จุด

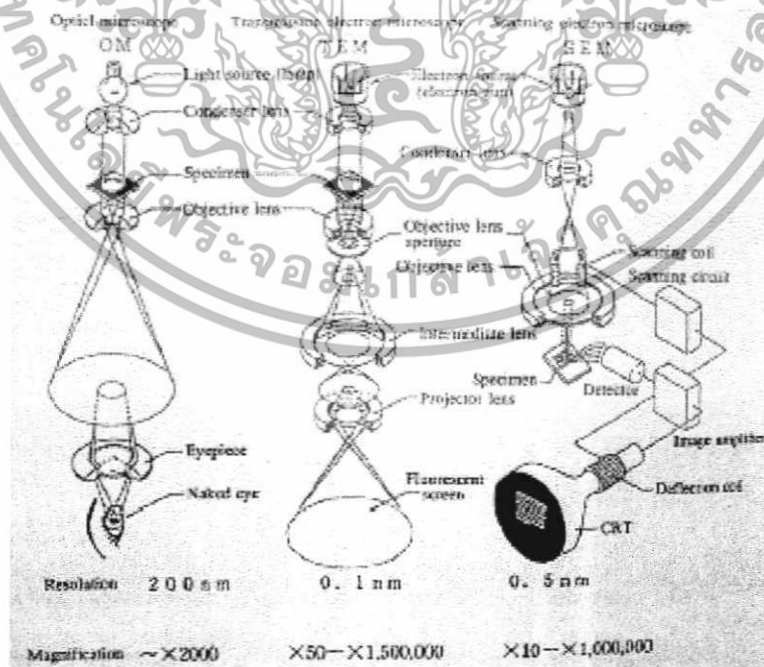
การศึกษาสิ่งซึ่งมีขนาดเล็ก ๆ หรือที่เรียกว่า จุลทรรศน์ (Microscopy) นั้น นับว่าเป็นศาสตร์หนึ่ง ที่มีความสำคัญ อย่างมากในวิทยาการหลายสาขา ในปัจจุบัน เราอาจขยายภาพวัตถุในระดับ 10 เท่า โดยใช้แว่นขยาย ระดับ 10 – 1,000 เท่า โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (OM , Optical microscope) ระดับ 50 – 1,500,000 เท่า โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนผ่านได้ (TEM, Transmission electron microscope) และระดับ 10 – 1,000,000 เท่า โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน(EM, Electron microscope )

### 2.11.1. ข้อแตกต่างระหว่าง SEM กับ TEM

ในเรื่องของกำลังขยาย SEM กำลังขยายสูงสุดประมาณ 100,000 เท่า TEM กำลังขยายสูงสุดประมาณ 1,000,000 เท่า ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสภาพตัวอย่างด้วย เรื่องของการสร้างภาพ SEM สร้างภาพจากสัญญาณที่สะท้อนจากชิ้นงานมาสร้างภาพเสมือนบนจอ TEM เกิดภาพจริง (คล้ายๆ กับเงา) กำลังขยายสูงลงบนจอร์ับภาพด้านล่างชิ้นงาน (คล้าย ๆ กับฉากหนังตะลุง) โดยมิติในการมอง SEM สามารถมองภาพได้ลักษณะ 3 มิติ (เห็นส่วนลึกได้ในระดับหนึ่ง) TEM มองได้แค่ภาพ 2 มิติ เนื่องจากเป็นภาพฉาย (ทุกอย่าง จะปะทะซ้อนทับกันหมด) ซึ่งการเตรียมชิ้นงาน SEM สามารถนำเป็นชิ้นเล็ก ๆ ไปดูได้เลย (อาจมีการเตรียมเพิ่มหรือ coat ทองนำไฟฟ้า) TEM ทำอย่างไรก็ได้ ให้ชิ้นงาน มีขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง น้อยกว่า 3 mm (มิลลิเมตร) และความหนาไม่เกิน 100 nm (นาโนเมตร) ซึ่งการเตรียมชิ้นงานนี้เป็นข้อที่ยากมากของ TEM เป็นการทำให้ชิ้นงานบางอย่างมากโดยไม่เสียหาย

### 2.11.2. ข้อแตกต่างระหว่าง OM และ SEM

กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical microscope : OM) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope : SEM) ต่างเป็นเครื่องมือทำงานด้านวิทยาศาสตร์แทบทุกสาขา จำเป็นต้องมีไว้ใช้งานแต่ถึงแม้ว่าเครื่องมือทั้งสองจะใช้เพื่อการขยายภาพวัตถุต่างๆ เช่นเดียวกัน แต่หลักการทำงานต่างกันอย่างมาก กล้องจุลทรรศน์แบบแสงนั้น เป็นเครื่องมือที่มีการใช้งานมากกว่า เนื่องจากใช้งานง่าย สามารถศึกษาวัตถุ หรือตัวอย่างในบรรยากาศปกติหรือในของเหลว เช่น น้ำหรือน้ำมันได้ ภาพขยายของตัวอย่างที่ได้ จะให้สีจริงตามธรรมชาติและสามารถขยายภาพของตัวอย่างได้ตั้งแต่ 10-1,000 เท่า ซึ่งปัจจุบัน สามารถดูภาพผ่านจอทีวีหรือคอมพิวเตอร์ได้ ทำให้พิมพ์ภาพ หรือเก็บข้อมูลเพื่อใช้ประมวลผล เช่น การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคได้สะดวกขึ้น แต่กล้องจุลทรรศน์แบบแสงก็มีข้อจำกัดที่ ความชัดลึก (Depth of field) ของภาพขยาย ยิ่งกำลังขยายมากขึ้น ระยะชัดลึกยิ่งน้อยลง



รูปที่ 2.26 ความแตกต่างของกล้อง OM, TEM และ SEM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด มีจุดเด่น คือ มีระยะชัดลึกมากกว่า และมีอำนาจแยกแยะเชิงระยะ (Spatial resolution) สูงกว่ากล้องจุลทรรศน์แบบแสง ทั้งนี้เพราะอุปกรณ์ทั้งสอง ใช้แหล่งกำเนิดคลื่นซึ่งมีความยาวคลื่นต่างกันเป็นตัวสร้างภาพ กล้องจุลทรรศน์แบบแสงใช้คลื่นแสง (แสงที่ตามนุษย์มองเห็น) ซึ่งมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 400-700 นาโนเมตร ทำให้กล้องจุลทรรศน์แบบแสง ไม่สามารถขยายวัตถุที่เล็กกว่า 0.2 ไมครอนได้ ส่วนกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดจะใช้คุณสมบัติคลื่นของอิเล็กตรอน ซึ่งมีความยาวคลื่นสั้นกว่า ทำให้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด มีอำนาจแยกแยะเชิงระยะได้มากถึง 0.2 นาโนเมตร และด้วยความสามารถในการบีบลำอิเล็กตรอนให้เป็นมุมแคบๆ ได้ ทำให้ได้ภาพที่มีความชัดลึกสูง นอกจากนี้ SEM ยังสามารถใช้ร่วมกับเทคนิคอื่น เช่น Energy dispersive spectrometry (EDS) และ Wavelength dispersive spectrometry (WDS) เพื่อให้ข้อมูลด้านองค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างได้อีกด้วย

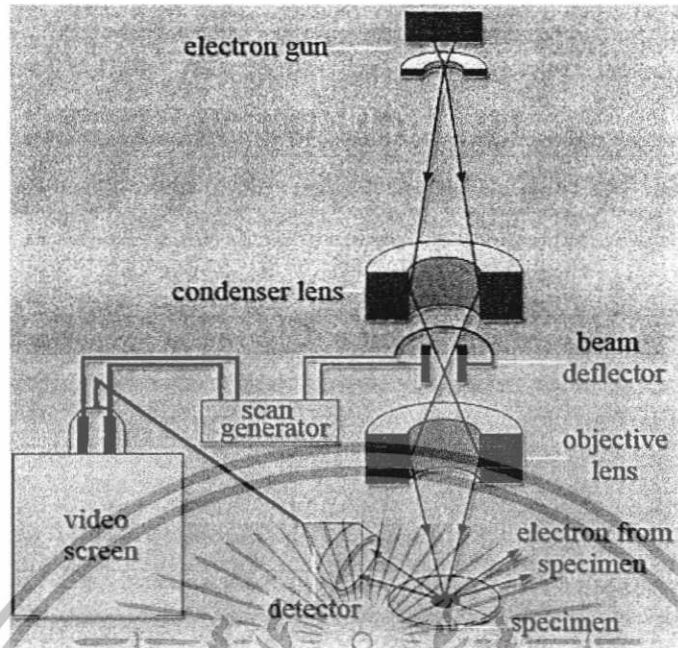
### 2.11.3. การทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ส่วนประกอบและหลักการทำงาน โดยสังเขปของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงในรูปที่ 2.28 ส่วนบนสุด เป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน ที่ เรียกว่า ปืนอิเล็กตรอน (Electron gun) อิเล็กตรอนจากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งให้เคลื่อนที่ลงมาตามคอลัมน์ซึ่งมีสภาพสุญญากาศ ด้วยความต่างศักย์แรง (Accelerating voltage) ในช่วง 0-30 kV (บางเครื่องอาจทำได้สูงถึง 50 kV) โดยที่สทังการเคลื่อนที่จะถูกควบคุมด้วยเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic lens) 2 ชุด หรือมากกว่า และปริมาณของอิเล็กตรอนจะถูกควบคุมโดยเอพเพอเจอร์ (Aperture) หรือช่องเปิด ซึ่งมีขนาดต่างๆ กันตามลักษณะการใช้งาน



รูปที่ 2.27 ขั้นตอนการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

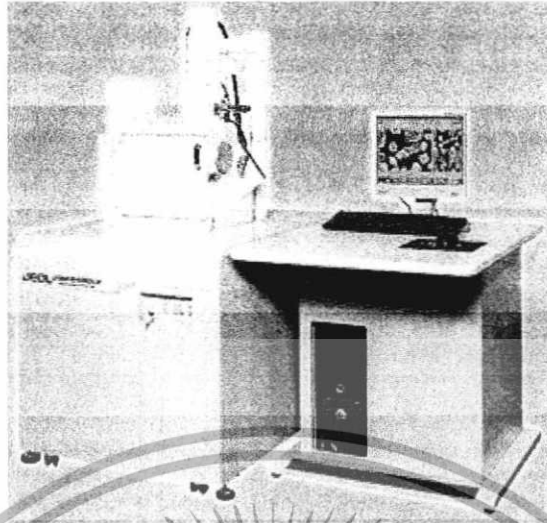


รูปที่ 2.28 ส่วนประกอบและการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

เลนส์แม่เหล็กไฟฟ้าชุดแรก ที่เรียกว่า เลนส์คอนเดนเซอร์ (Condenser lens) นับว่าเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญที่สุดต่อการควบคุมทัศนศาสตร์อิเล็กตรอน (Electron optics) เพราะเป็นเลนส์ที่ทำหน้าที่บีบอิเล็กตรอนที่วิ่งลงมาจากแหล่งกำเนิดให้เป็นลำที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัดเล็กลง ส่วนเลนส์วัตถุ (Objective lens) ซึ่งเป็นเลนส์ชุดสุดท้ายจะทำหน้าที่โฟกัสลำอิเล็กตรอน (Electron beam) ให้ไปตกบนผิวของตัวอย่าง โดยมีสแกนคอยล์ (Scan coil) ทำหน้าที่กวาดลำอิเล็กตรอนให้ไปบนผิวของตัวอย่างภายในกรอบพื้นที่สี่เหลี่ยมเล็กๆ ซึ่งพื้นที่ผิวของตัวอย่างบริเวณที่ถูกยิงด้วยลำอิเล็กตรอนนี้ จะเกิดสัญญาณต่างๆ ขึ้นหลายชนิดในเวลาเดียวกัน และจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดจะมีอุปกรณ์สำหรับตรวจจับสัญญาณ (Detector) ชนิดต่างๆ เหล่านี้ แล้วส่งไปประมวลผลเป็นภาพแสดงบนจอภาพต่อไป ตัวอย่างสัญญาณที่เกิดขึ้นนั้น ได้แก่

1. อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electrons : SE) สัญญาณชนิดนี้จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างเป็นสัญญาณที่ถูกนำมาใช้ในการสร้างภาพมากที่สุด ภาพที่ได้จากสัญญาณชนิดนี้ เรียกว่า ภาพอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron image : SEI)
2. อิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Back scattered electrons, BSE) ให้ข้อมูลเกี่ยวกับส่วนประกอบทางเคมีบนผิวของตัวอย่างและแสดงให้เห็นลักษณะความสูงต่ำของพื้นผิว

นอกเหนือจากสัญญาณเหล่านี้แล้ว ยังมีสัญญาณอีกหลายชนิดที่เกิดขึ้น เช่น เอ็กซ์เรย์ (X-Ray) ,คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic wave), ไอเจอิเล็กตรอน (Auger electron) เป็นต้น ซึ่งสัญญาณแต่ละชนิดจะให้ข้อมูลของตัวอย่างแตกต่างกันไป



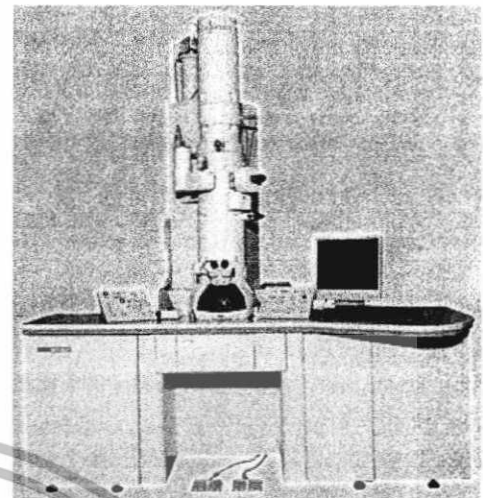
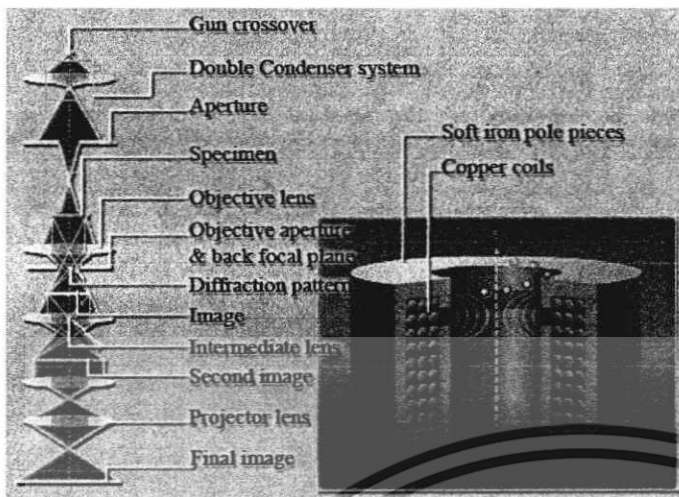
รูปที่ 2.29 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

## 2.12. Transmission electron microscope (TEM)

กล้อง Transmission electron microscope (TEM) เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่ใช้ศึกษาตัวอย่างชนิดบาง ซึ่งเตรียมขึ้น โดยวิธีพิเศษเพื่อให้ลำอนุภาคอิเล็กตรอนผ่านทะลุได้ การสร้างภาพจากกล้องประเภทนี้จะทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่ทะลุผ่านตัวอย่างนั่นเอง เครื่อง TEM เหมาะสำหรับการศึกษารายละเอียดขององค์ประกอบภายในของตัวอย่าง เช่น องค์ประกอบภายในเซลล์ ลักษณะของเยื่อหุ้มเซลล์ พลังเซลล์ เป็นต้น ซึ่งจะให้รายละเอียดสูงกว่ากล้องจุลทรรศน์ชนิดอื่นๆ เนื่องจากมีกำลังขยายและประสิทธิภาพในการแจกแจงรายละเอียดสูงมาก (กำลังขยายสูงสุดประมาณ 0.1นาโนเมตร)

### 2.12.1. การทำงานของ TEM

TEM จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (Condenser lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ จากนั้นลำอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างที่จะศึกษา (Specimen) ไป ซึ่งตัวอย่างที่จะศึกษาจะต้องมีลักษณะที่แบนและบางมาก (บ่อยครั้งที่พบว่าอยู่ในช่วงระหว่าง 1 - 100 นาโนเมตร) จากนั้นจะเกิดการกระเจิงอนุภาคขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนทะลุผ่านตัวอย่างไป และอิเล็กตรอนที่ทะลุผ่านตัวอย่างนี้ก็จะถูกปรับโฟกัสของภาพโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (Objective lens) ซึ่งเป็นเลนส์ที่ทำหน้าที่ขยายภาพให้ได้รายละเอียดมากที่สุด จากนั้นจะได้รับการขยายด้วยเลนส์ถ่ายภาพไปสู่จอรับ (Projector lens) และปรับโฟกัสของลำอนุภาคอิเล็กตรอนให้ยาวพอดีที่จะปรากฏบนฉากเรืองแสง สุดท้ายจะเกิดการสร้างภาพขึ้นมาได้

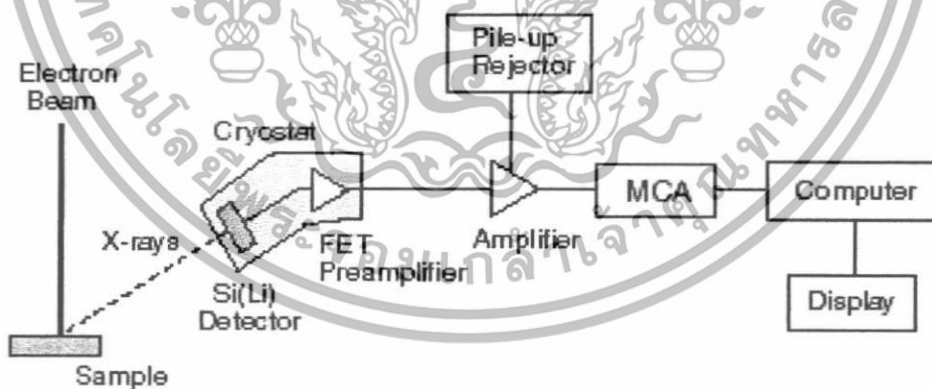


รูปที่ 2.30 ส่วนประกอบและการทำงานของเครื่อง TEM

รูปที่ 2.31 เครื่อง TEM

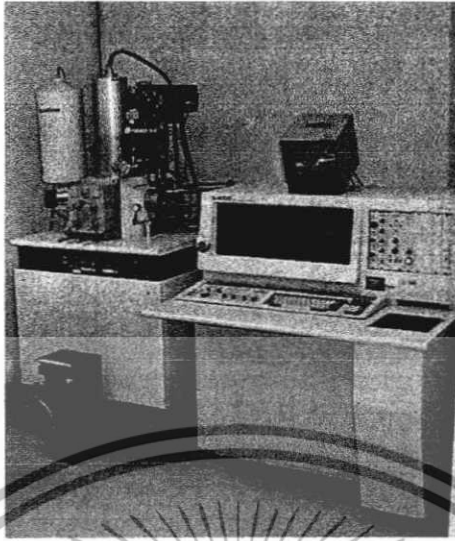
### 2.13. เครื่องตรวจสอบส่วนประกอบของวัสดุ (Energy dispersive x-ray spectromete : EDX)

เป็นเครื่องมือวิเคราะห์หาปริมาณธาตุได้ทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ สามารถทดสอบชิ้นงานที่เป็นของแข็งของเหลว หรือเป็นผงได้ ในระดับหน่วยการวัดเป็น % หรือ ppm โดยใช้หลักการยิงรังสี X-ray ไปยังชิ้นงานตัวอย่าง และวัดระดับการกระจายพลังงาน (Energy dispersive) ที่สะท้อนออกมาในรูป X-ray fluorescence จะทำให้ทราบว่ามีธาตุใดผสมอยู่บ้าง ในปริมาณเท่าไร สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งบรรยากาศแบบปกติ แบบสุญญากาศ หรือก๊าซฮีเลียมได้ เพื่อความหลากหลายในการประยุกต์ใช้งาน



รูปที่ 2.32 ระบบการทำงานของเครื่อง EDX

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.33 เครื่อง EDX

## 2.14. ความชื้นสัมบูรณ์และความชื้นสัมพัทธ์

ความชื้นเป็นคุณสมบัติอันเกิดจากการมีไอน้ำอยู่ในสิ่งที่เรากำลังสนใจ ไม่ว่าจะเป็นวัสดุหรือในอากาศ แต่สิ่งที่เราต้องการศึกษาขณะนี้เกี่ยวข้องกับไอน้ำที่อยู่ในอากาศเท่านั้น

### 2.14.1. ความชื้นสัมบูรณ์ (Specific Humidity)

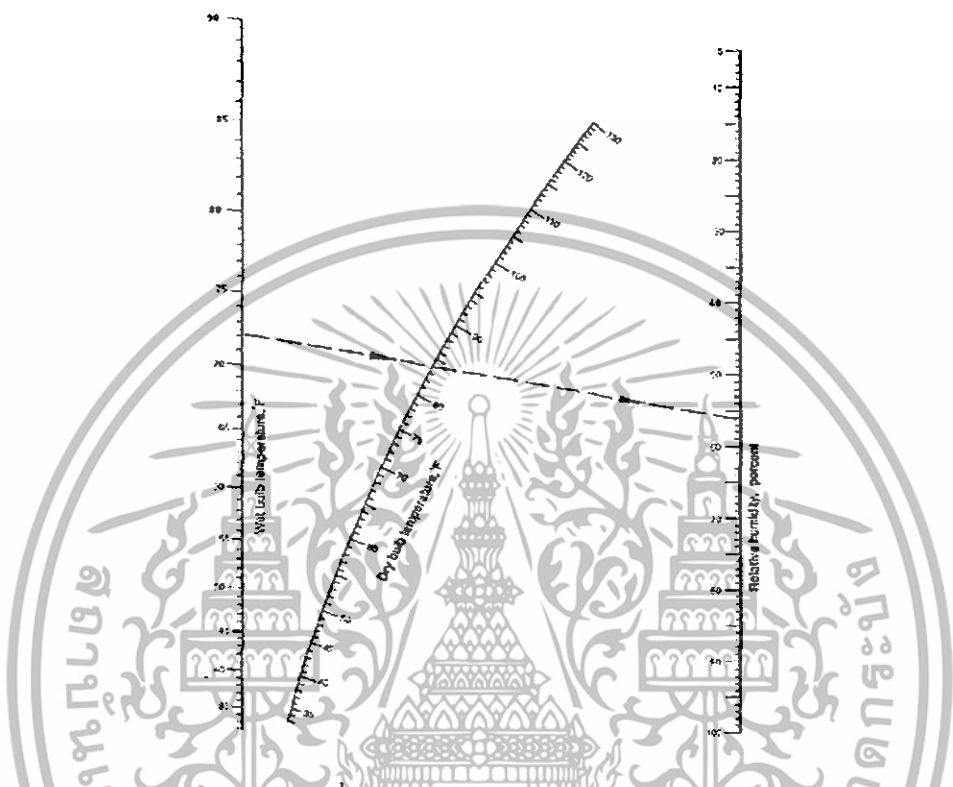
นิยามคือ ปริมาณของไอน้ำ (โดยมวล) ต่อ ปริมาณของอากาศ (โดยมวล) ในปริมาตรหนึ่งที่อุณหภูมิหนึ่งๆ สำหรับคุณสมบัติของอากาศแล้ว อากาศที่อุณหภูมิสูงขึ้น จะสามารถเก็บ (Contain) ปริมาณไอน้ำไว้ได้มากกว่าอากาศที่อุณหภูมิต่ำกว่า โดยทั่วไปบอกเป็น Grains ของความชื้นคือน้ำหนักเป็นปอนด์ของอากาศแห้ง โดย 7,000 grains มีค่าเท่ากับหนึ่งปอนด์

### 2.14.2. ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity)

นิยามคือ อัตราส่วนโดยมวลของไอน้ำในอากาศในขณะหนึ่ง (ที่อุณหภูมิหนึ่ง) ต่อ ไอน้ำสูงสุดที่อากาศ (ที่อุณหภูมินั้น) สามารถแบกรับไว้ได้

การที่เรามีอากาศหนึ่งที่มีความชื้นสัมบูรณ์เป็น 100% จะหมายความว่าอากาศนั้นได้ "อิ่มตัว" (Saturated) และไม่สามารถรับไอน้ำไว้ได้อีกต่อไป ถ้าเราพยายามใส่ไอน้ำเป็นปริมาณเกินกว่าที่อากาศสามารถแบกรับไว้ได้แล้ว ไอน้ำส่วนที่เกินนั้นจะ "กลั่นตัว" (Condense) ออกมาเป็นหยดน้ำเหลือไว้แต่เพียงปริมาณไอน้ำที่ยังคงอิ่มตัวและมีความชื้นสัมพัทธ์เป็น 100% อยู่ เราคุ้นเคยกับปรากฏการณ์นี้ว่าการเกิดฝนนั่นเอง (ความชื้นสัมพัทธ์บริเวณก้อนเมฆสูงถึง 100% ในขณะที่ความชื้นสัมพัทธ์บริเวณใกล้พื้นดินอาจจะต่ำกว่านั้นมาก) เมื่ออากาศมีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ น้ำจะสามารถระเหยกลายเป็นไอได้ มากและเร็ว (เนื่องจากว่ายังมี "ที่เหลือ" สำหรับไอน้ำในอากาศนั้นได้อีกมาก) ซึ่งอัตราการระเหยที่เร็ว (และสามารถพาความร้อนออกไปจากกระเปาะเปียกได้มาก) นี้ จะทำให้อุณหภูมิจากกระเปาะเปียกต่ำกว่ามากว่า อุณหภูมิของกระเปาะแห้งมาก ในขณะที่หากความชื้นในอากาศสูงมากขึ้น อัตราการระเหยการเป็นไอของน้ำในกระเปาะเปียกจะน้อยลง ทำให้น้ำพาความร้อนออกไปได้น้อยลง ผลก็คือความแตกต่างของอุณหภูมิของกระเปาะทั้งสองจะมีน้อยลง และเมื่อใดที่ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเป็น 100% อัตราการระเหยของน้ำในกระเปาะเปียกจะเป็นศูนย์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วย ทำให้ไม่มีความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของกระเปาะเปียกและกระเปาะแห้งทั้งสอง เมื่อเราทราบอุณหภูมิของกระเปาะเปียกและกระเปาะแห้งแล้ว เราสามารถหาความชื้นสัมพัทธ์ได้จากกราฟเทียบกับชาร์ตที่เรียกว่า โนโมกราฟ (Nomograph) หรือ ไฮโคเมตริกชาร์ต (Psychrometric chart) โดยที่การหาจากโนโมกราฟจะสะดวกรวดเร็วกว่าในกรณีนี้ (แต่ไฮโคเมตริกชาร์ตจะให้รายละเอียดอย่างอื่นด้วย)



รูปที่ 2.34 โนโมกราฟและการใช้งาน

ตัวอย่างการใช้โนโมกราฟแสดงในรูปข้างล่าง สมมติว่าอุณหภูมิกระเปาะเปียกเป็น 22.2 องศาเซลเซียส (72 องศาฟาเรนไฮต์) และอุณหภูมิกระเปาะแห้งเป็น 28.8 องศาเซลเซียส (84 องศาฟาเรนไฮต์) จะหาความชื้นสัมพัทธ์ได้เป็น 56% ในประเทศที่มีอากาศหนาวเย็น เมื่อเราอยู่ในห้องหรืออาคารที่ทำการปรับอากาศ จะรู้ดีกว่าอากาศ (ภายในอาคารนั้น) แห้งมาก ทั้งนี้เนื่องจากความสามารถในการเก็บกักไอน้ำของอากาศเย็น (ภายนอกอาคาร) ค่ากว่าของอากาศร้อน เช่น อากาศเย็นปริมาตร 10,000 ลูกบาศก์ฟุตที่อุณหภูมิ 10 องศาฟาเรนไฮต์ สามารถเก็บไอน้ำได้ 7,700 Grains สมมติว่าอากาศภายนอกอาคารมีความชื้นสัมพัทธ์สูงมากคือ 100% (อากาศมีไอน้ำอิ่มตัว) ต่อมาอากาศนั้นถูกทำให้อุ่นขึ้น (ภายในอาคาร) จนมีอุณหภูมิ 70 องศาฟาเรนไฮต์ซึ่งอากาศที่อุณหภูมิ 70 องศาฟาเรนไฮต์สามารถเก็บไอน้ำไว้ได้ 80,500 Grains (ในขณะที่มีปริมาณไอน้ำในอากาศคงที่เป็น 7,700 Grains) ดังนั้นจะทำให้สัดส่วนของไอน้ำที่มีอยู่ในอากาศจริงต่อไอน้ำที่อากาศที่ 70 องศาฟาเรนไฮต์สามารถเก็บอุ้มไว้ได้ (ก็คือความชื้นสัมพัทธ์นั่นเอง) มีค่าต่ำมากเป็น  $7,700/80,500$  หรือต่ำกว่า 10% จึงเป็นเหตุผลที่ทำให้อากาศภายในอาคารที่ปรับอากาศให้อุ่นกว่าอากาศภายนอกอาคารมีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำมาก ยิ่งหากเมื่ออากาศเย็นที่ 10 องศาฟาเรนไฮต์ดั้งเดิมไม่ได้มีความชื้นสัมพัทธ์เป็น 100% ด้วย ยิ่งทำให้อากาศนั้นเมื่อถูกทำให้อุ่นขึ้นจนเป็น 70 องศาฟาเรนไฮต์มีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำกว่า 10% ลงไปอีก

## 2.15. ตารางเปรียบเทียบคุณสมบัติลวดเชื่อม

ตารางที่ 2.4 เปรียบเทียบคุณสมบัติลวดเชื่อม

| A.C. | Chemical Composition | Elastic Modulus |      | 0.2% Yield Strength |      | Tensile Strength |      | Relative Elongation (%) |       | Strength Coefficient |      | Hardening Exponent |
|------|----------------------|-----------------|------|---------------------|------|------------------|------|-------------------------|-------|----------------------|------|--------------------|
|      | Wt%                  | ksi             | GPa  | psi                 | MPa  | psi              | MPa  | Uni-form                | Total | psi                  | MPa  |                    |
| A1   | Sn-37Pb              | 2,273           | 15.7 | 3,950               | 27.2 | 4,442            | 30.6 | 3                       | 48    | 4,917                | 33.9 | 0.033              |
| A2   | Sn-2Ag-36Pb          | 2,617           | 18.0 | 6,287               | 43.3 | 6,904            | 47.6 | 1                       | 31    | 7,223                | 49.8 | 0.011              |
| A3   | Sn-97Pb              | 2,753           | 19.0 | 1,126               | 7.8  | 2,383            | 16.4 | 27                      | 38    | 3,934                | 27.1 | 0.235              |
| A4   | Sn-3.5Ag             | 3,793           | 26.2 | 8,256               | 22.5 | 3,873            | 26.7 | 3                       | 24    | 4,226                | 29.1 | 0.026              |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### การออกแบบและวิธีการดำเนินงาน

#### 3.1. โลหะบัดกรีที่ใช้ในงานวิจัย

โลหะบัดกรีทั้งหมดที่ใช้ในการวิจัย ทางคณะผู้จัดทำได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัทอัสตราคอร์ จำกัด ซึ่งทางบริษัทได้จัดหาโลหะบัดกรีที่ใช้ในงานวิจัยมีจำนวนทั้งสิ้น 72 ชิ้น โดยมีทั้งหมด 6 ส่วนผสม แบ่งเป็นส่วนผสมละ 12 ชิ้น ต่อมาทำการบ่มโลหะบัดกรีทั้งหมดโดยแบ่งเป็นการบ่ม 3 วัน 5 วัน 7 วัน และไม่บ่ม โดยในแต่ละวันที่ใช้ทดลองจะมีโลหะบัดกรีที่มีส่วนผสมเดียวกัน 3 ชิ้น ดังแสดงในตาราง

ตารางที่ 3.1 จำนวนจำนวนชิ้นงานทดสอบที่ใช้ในการบ่ม

| ส่วนผสมของโลหะบัดกรี | จำนวนชิ้นงานทดสอบที่นำไปบ่มในแต่ละช่วงเวลา(ชิ้น) |       |       |       |
|----------------------|--|-------|-------|-------|
|                      | ไม่บ่ม   | 3 วัน | 5 วัน | 7 วัน |
| 1. Sn-37Pb           | 3  | 3     | 3     | 3     |
| 2. Sn-0.3Ag-0.7Cu    | 3  | 3     | 3     | 3     |
| 3. Sn-1.0Ag-0.7Cu    | 3  | 3     | 3     | 3     |
| 4. Sn-3.0Ag-0.5Cu    | 3  | 3     | 3     | 3     |
| 5. Sn-3.5Ag-0.7Cu    | 3  | 3     | 3     | 3     |
| 6. Sn-0.7Cu          | 3  | 3     | 3     | 3     |
| ตัวอย่างทั้งหมด      | 18   | 18    | 18    | 18    |

1. Sn-37Pb โดยโลหะบัดกรีชนิดที่มีตะกั่วนี้จะใช้เพื่อเป็นตัวเปรียบเทียบกับโลหะบัดกรีชนิดที่ไร้สารตะกั่ว
2. Sn-0.3Ag-0.7Cu เป็นโลหะบัดกรีที่มีส่วนประกอบของเงินในอัตราส่วนที่น้อยเพื่อลดต้นทุนในการผลิต เนื่องจากเงินเป็นโลหะที่มีราคาสูงมากเมื่อเทียบกับโลหะชนิดอื่นที่ใช้เป็นส่วนประกอบในโลหะบัดกรี
3. Sn-1.0Ag-0.7Cu เป็นโลหะบัดกรีที่มีส่วนประกอบของเงินเพิ่มขึ้นเพื่อนำไปเป็นตัวเปรียบเทียบกับโลหะบัดกรีส่วนประกอบอื่นๆ ต่อไป
4. Sn-3.0Ag-0.5Cu โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิดนี้เป็นโลหะบัดกรีที่ Iowa Stale University คิดค้นขึ้น ซึ่งโลหะบัดกรีชนิดนี้มีคุณสมบัติที่ดี เนื่องจากมีปริมาณของโลหะเงินเป็นส่วนประกอบมาก
5. Sn-3.5Ag-0.7Cu เป็นโลหะบัดกรีที่มีส่วนผสมของเงินมากสุดในการวิจัยนี้ ซึ่งเป็นที่คาดกันว่า ด้วยปริมาณเงินที่มีมากที่สุดนี้ จะทำให้โลหะบัดกรีส่วนผสมนี้มีคุณสมบัติที่ดีที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. Sn-0.7Cu โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิดนี้ถูกผลิตขึ้นเพื่อต้องการทราบคุณสมบัติของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่ไม่มีเงินเป็นส่วนประกอบว่ามีความแตกต่างจากโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่มีเงินมากน้อยแค่ไหน เพื่อจะได้ใช้เป็นตัวเลือกที่จะลงทุนในการผลิต เนื่องจากจะช่วยลดต้นทุนได้อย่างมาก

### 3.1.1 การบ่มโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว

ทางคณะผู้จัดทำได้รับความอนุเคราะห์จากทางบริษัทอัลตราคอร์ ในการใช้เตาอบของทางบริษัท ซึ่งเครื่องสามารถควบคุมได้ทั้งอุณหภูมิรวมถึงความชื้น สำหรับเรื่องของอุณหภูมิและความชื้นในการบ่ม ทางบริษัทได้กำหนดเงื่อนไขมาให้ โดยให้มีอุณหภูมิเท่ากับ 80 องศาเซลเซียส ที่ความชื้น 85%RH เหตุผลในการเลือกใช้เงื่อนไขในการบ่มที่ 80 องศาเซลเซียส และระดับความชื้นสัมพัทธ์ 85% อาจอธิบายได้ดังนี้

เนื่องจากความชื้นสัมพัทธ์ที่สูงที่สุดในประเทศไทยคือที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 90% ทางคณะผู้จัดทำจึงทำการลดลงมาเล็กน้อยที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 85%

ส่วนในเรื่องของอุณหภูมิของการบ่มนั้นขึ้นอยู่กับข้อจำกัดทางเตาอบของทางบริษัทซึ่งทำได้มากที่สุดที่ 80 องศาเซลเซียส ซึ่งถ้าเลือกใช้ที่อุณหภูมิสูงกว่าระดับนี้อาจทำให้เกิดข้อผิดพลาดได้เนื่องจากความชื้นอาจจะเหวี่ยงออกมาภายนอกได้ แล้วด้วยเหตุผลของการใช้งานอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ทั่วไปนั้น อุณหภูมิจะไม่สูงเกิน 80 องศาเซลเซียส นั้นทำให้ข้อมูลของการทดลอง โครงการนี้ก็ยังสามารถอธิบายคุณสมบัติของรอยเชื่อมของโลหะบัดกรีที่ใช้ในการทดลองนี้ได้ด้วยตนเอง โดยขั้นตอนการบ่มเพื่อทำการวิจัย มีลำดับขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. นำโลหะบัดกรีใส่เข้าไปในตู้อบ โดยแบ่งโลหะบัดกรีตามถ่วงผสม และจำนวนวันที่ใช้ในการบ่ม เพื่อความสะดวกในการจำตำแหน่ง รวมถึงเมื่อหยิบโลหะบัดกรีออกมาจากเตาอบ



รูปที่ 3.1 การจัดวางโลหะบัดกรีในตู้อบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ตั้งอุณหภูมิตั้งและ ความชื้น โดยอุณหภูมิที่ใช้คือ 80 องศาเซลเซียส และความชื้น 85% RH โดยที่ %RH คือหน่วยของความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity - RH) ซึ่งหมายถึง อัตราส่วนของปริมาณไอน้ำที่มีในอากาศ ณ ขณะนั้นเทียบกับปริมาณไอน้ำที่อากาศจะรองรับได้ หากระดับไอน้ำ ณ ขณะนั้นมากเกินไป (> 100%) ความสามารถของอากาศจะรองรับได้ ไอน้ำจะควบแน่น (Condensation) และกลายเป็นหยดน้ำในที่สุด แรงดันไอน้ำและความสามารถในการรองรับปริมาณไอน้ำ ณ อุณหภูมิที่สูงกว่า จะมีมากกว่าแรงดันไอน้ำและ ความสามารถในการรองรับปริมาณไอน้ำ ณ อุณหภูมิที่ต่ำกว่า โดยเหตุนี้การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิจะมีผลโดยตรงต่อแรงดันไอน้ำและความสามารถดังกล่าว ระดับอุณหภูมิที่ทำให้ไอน้ำเกิดการอิ่มตัว (Saturation) และควบแน่น เรียกว่า จุดน้ำค้าง (Dew point)



รูปที่ 3.2 อุณหภูมิและความชื้นที่ใช้ในการอบ

3. นำโลหะบัดกรีออกจากตู้อบตามที่กำหนด และนำไปจุ่มน้ำเพื่อปรับจุดโครงสร้าง



รูปที่ 3.3 นำโลหะบัดกรีออกจากตู้อบ



รูปที่ 3.4 นำโลหะบัดกรีแช่ทิ้งไว้ในน้ำจนอุณหภูมิลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2. การทดสอบหาค่าความแข็ง (Hardness)

ในการทดสอบหาค่าความแข็ง (Hardness) ของโลหะบัดกรีจะมีขั้นตอนต่างๆ ซึ่งจะแบ่งได้ดังนี้

#### 3.2.1. การเตรียมขั้วชิ้นงานทดสอบ

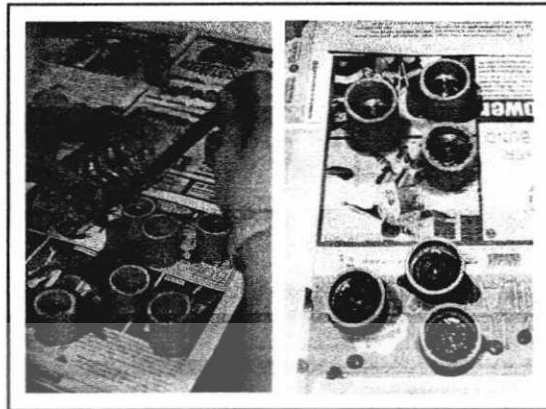
การเตรียมขั้วชิ้นงานทดสอบ ทำได้โดย นำแท่งโลหะบัดกรีที่ได้จากโรงงาน มาทำการตัดแบ่งมาบางส่วน ด้วยเครื่องตัดละเอียด เพื่อนำไปทดสอบความแข็ง เมื่อได้ชิ้นส่วนตามที่ต้องการแล้วนำชิ้นส่วนที่ได้มาทำการหล่อเรซิน โดยแม่แบบในการหล่อต้องมีขนาดที่ใหญ่กว่าชิ้นส่วนของโลหะบัดกรีที่ใช้ทดสอบ ซึ่งทางคณะผู้จัดทำได้เลือกแม่แบบในการหล่อเป็นท่อ PVC เพราะหาง่ายและสะดวกในการหล่อ



รูปที่ 3.6 รูปชิ้นงานหลังทำการตัดแบ่งเพื่อใช้ในการทดสอบความแข็ง

โดยก่อนที่จะนำท่อ PVC มาใช้หล่อได้นั้น ต้องทำให้ขั้วด้านที่ไว้วางของท่อ PVC มีขนาดเท่ากันเสียก่อน เพื่อให้การเทเรซินที่เหลวในตอนแรกไหลออกจากแบบหล่อ ซึ่งอาจจะเป็นการกลิ้งปาดหน้าท่อ PVC เพื่อให้ระนาบผิวมีระดับที่เท่ากัน หลังจากผิวหน้าของแบบหล่อมีระดับที่เท่ากันแล้ว นำชิ้นส่วนที่จะใช้ในการทดลองวางลงในแม่แบบ พร้อมกับเทเรซินที่ทำการผสมเรียบร้อยแล้วลงในแม่แบบ ซึ่งมีข้อควรระวังคือพื้นที่ใช้ในการวางแบบก่อนเทเรซินควรมีระดับที่เสมอกัน

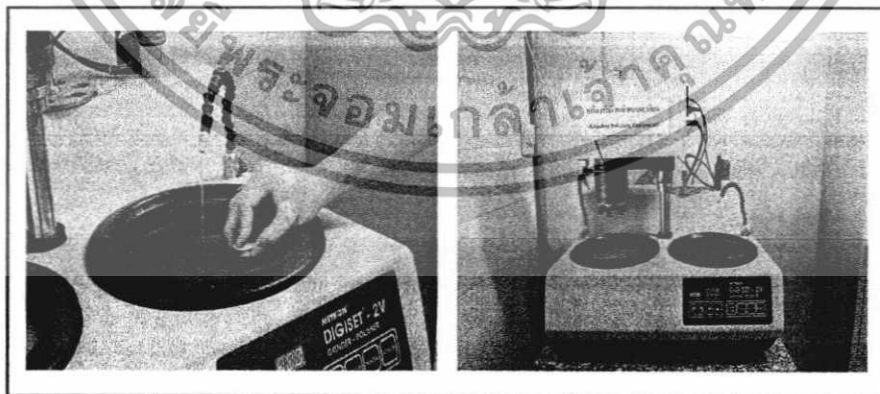
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ 45 ร้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 การเตรียมน้ำหล่อลงในแบบหล่อ

เมื่อทำการเตรียมน้ำหล่อเรียบร้อยแล้ว ทำการทิ้งไว้เป็นระยะเวลาหนึ่ง รอจนเรซินแข็งตัว แล้วจึงแกะออกจากแม่แบบ ซึ่งถ้าผู้ทำการหล่อต้องการให้ชิ้นงานออกมาจากแบบหล่อได้อย่างสะดวกนั้น ทางผู้จัดทำแนะนำให้ทำการทาวาสลินที่ผิวด้านในของแบบหล่อ (ท่อ PVC) ในคอนแรกก่อนทำการเทเรซิน ซึ่งจะช่วยให้เวลาแกะเรซินออกจากแบบหล่อ ทำได้สะดวกและรวดเร็วยิ่งขึ้น

หลังจากได้ชิ้นงานที่ถูกหล่อไว้ในเรซินแล้วต่อมาจะทำการกลึงปาดหน้าเพื่อให้ชิ้นงานมีผิวหน้าที่เรียบขึ้นเพื่อจะนำไปทดสอบความแข็ง ทางผู้จัดทำนำชิ้นงานที่ผิวหน้าเรียบแล้ว ไปทำการขัดผิวด้วยเครื่องขัดผิวละเอียดของทางภาควิชาซึ่งสามารถทำได้ทั้งการการขัดผิวหยาบ (Fine grinding) และการขัดผิวละเอียด (Polishing) โดยในการขัดจะเริ่มทำการขัดผิวหยาบก่อนด้วยกระดาษทรายเบอร์ 400-600 และ 800 ตามลำดับ ด้วยความเร็วของเครื่องขัด 300 รอบต่อนาที (rpm) ซึ่งในการขัดนั้นพื้นที่ที่ใช้วางกระดาษทรายต้องเรียบ ขณะที่ขัดต้องใช้น้ำหล่อตลอดเวลาเพื่อเป็นการระบายความร้อนและระบายเศษของชิ้นงานที่ถูกขัดออกมา การขัดหยาบควรใช้แรงกดเบาๆ เพื่อไม่ให้เศษโลหะไปฝังอยู่ในกระดาษทรายและทำให้เกิดรอยลึกบนผิวของชิ้นงาน



รูปที่ 3.8 เครื่องขัดผิวละเอียดและลักษณะการขัด

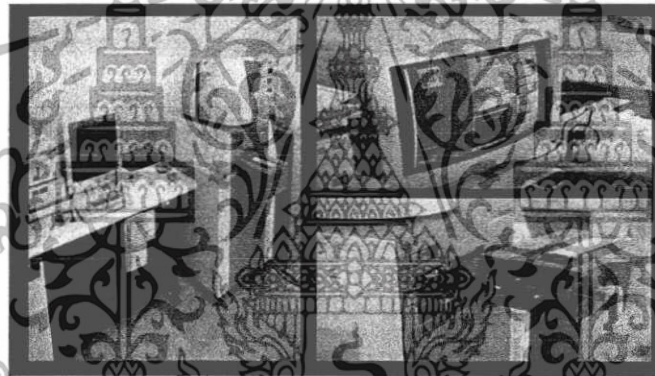
เมื่อได้ชิ้นงานที่ผิวหน้ามีความเรียบในระดับหนึ่งแล้ว ก็พร้อมที่จะนำไปทดสอบความแข็งกับเครื่องทดสอบความแข็งได้ด้วยเครื่อง Hardness vickers เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3. ผลการเตรียมชิ้นงานก่อนการศึกษาจุลโครงสร้างที่สถาบัน TMEC

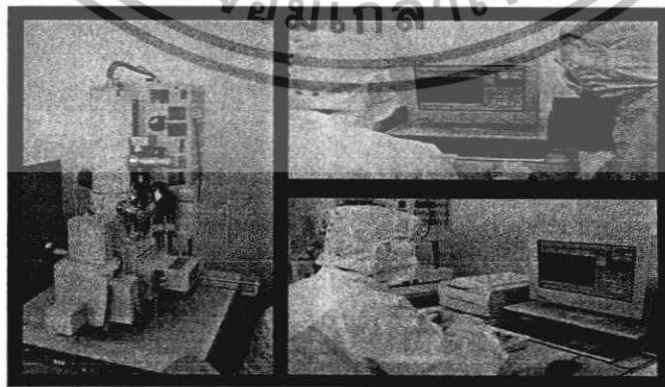
ทางคณะผู้จัดทำได้รับความอนุเคราะห์จาก ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ ( Thai microelectronicoc Center – TMEC ) ในการให้ความร่วมมือในการตรวจสอบจุลโครงสร้างของโลหะบัดกรีหลังจากการบ่ม โดยไม่คิดค่าใช้จ่ายใดๆ ในการให้บริการแก่ทางสถาบัน

TMEC เป็นสถาบันที่ทำการวิจัยและพัฒนาชิ้นแบบเชิงพาณิชย์ เช่น วงจรรวมซีมอส Microelectromechanical system (MEMS) เซ็นเซอร์ และการรวม MEMS และเซ็นเซอร์เข้ากับวงจรรวมซีมอส ซึ่งมีการทำวิจัยร่วมกับสถาบัน การศึกษา และหน่วยงานภายนอก รวมถึงยังมีหน้าที่สร้างและพัฒนาทรัพยากรบุคคล ทางด้านไมโครอิเล็กทรอนิกส์ โดยร่วมมือกับสถาบันการศึกษา และอุตสาหกรรมทั่วประเทศ สนับสนุนนักออกแบบวงจรรวมภายในประเทศ เพื่อก่อให้เกิดอุตสาหกรรมการออกแบบวงจรรวมในไทยสำหรับเครื่องที่ใช้ในการตรวจสอบจุลโครงสร้างมี 2 ชนิด คือ

1. Energy dispersive x-ray spectrometer (EDX)
2. Field emission cathode - scanning electron microscope (FE-SEM)



รูปที่ 3.9 เครื่อง Energy dispersive x-ray spectrometer (EDX)

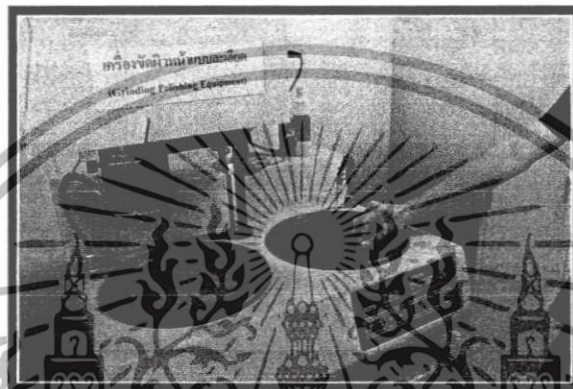


รูปที่ 3.10 Field emission cathode - scanning electron microscope (FE-SEM)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

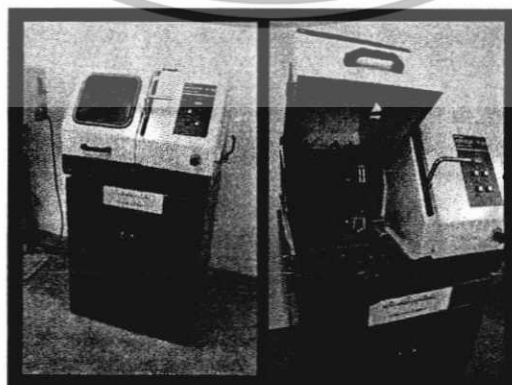
โดยที่ในการตรวจสอบจุลโครงสร้างทุกชนิดนั้น สิ่งที่สำคัญอย่างมากประการหนึ่งคือพื้นผิวที่ใช้ในการตรวจสอบ จะต้องได้รับการเตรียมมาเป็นอย่างดี ถ้าไม่เช่นนั้น อาจทำให้การตรวจสอบโครงสร้างครั้งนั้นล้มเหลวได้ โดยทางคณะผู้จัดทำ ได้ทำการจัดกระจายทรายกับชั้นทดสอบ ต่อจากการขัดเพื่อใช้ทดสอบความแข็ง โดยสามารถแยกเป็นขั้นตอนได้ดังนี้

1. นำลวดขัดกรีที่ใช้หลังจากทดสอบความแข็งแล้วมาทำการขัดอีกครั้ง โดยเริ่มจากกระดาษทรายเบอร์ 600, 800 และ 1000 ตามลำดับ โดยในการขัดครั้งนี้ ค่อนข้างเน้นเป็นพิเศษ รวมถึงต้องให้ระนาบพื้นผิวที่ทำการขัดมีระดับที่เท่ากัน



รูปที่ 3.11 เครื่องขัดชิ้นงานแบบละเอียด

2. ความพิเศษอย่างหนึ่งสำหรับการขัดผิวชิ้นงานเพื่อใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างก็คือต้องมีการขัดละเอียดครั้งสุดท้ายด้วยผงอลูมินา เพื่อให้ผิวหน้าที่ได้มีความเรียบและเงา โดยทางคณะผู้จัดทำได้ใช้ผงอลูมินาเบอร์ 0.03 ในการขัดละเอียดในครั้งนี้ โดยต้องเปลี่ยนจากการใช้กระดาษทรายในการขัด เป็นผ้าสักหลาด รวมถึงการเปิดน้ำจะเปิดเป็นหยดแทนที่จะเปิดให้ไหลปกติแบบการขัดด้วยกระดาษทราย
3. ทำการเตรียมชิ้นงานให้มีขนาดที่สามารถทำการตรวจด้วยกล้อง SEM กับ EDX ได้ โดยขนาดที่ทางคณะผู้จัดทำได้ติดต่อ ไปยัง สถาบัน TMEC ชิ้นงานจะต้องมีขนาดความสูงได้ไม่เกิน 5 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 2 เซนติเมตร ถึงจะสามารถทำการทดสอบได้ โดยทางคณะผู้จัดทำได้ทำการนำชิ้นงานที่ได้แล้วนั้นมาทำการตัดด้วยเครื่องตัดละเอียดเพื่อให้ได้มีขนาดที่กำหนด



รูป 3.12 เครื่องตัดชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ **รูป 3.12 เครื่องตัดชิ้นงาน** นั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ขั้นตอนต่อมาของการเตรียมผิวชิ้นงานในการตรวจสอบโครงสร้าง คือ นำชิ้นงานที่ผ่านการขัดผิวมาเป็นอย่างดีแล้ว มาทำการหยดกรด เพื่อให้กรดที่หยคนั้นทำการกัดผิวของวัสดุ ให้เกิดเป็นรอยเกรนขึ้นมา เมื่อนำไปส่องกล้องดู โครงสร้าง โดยกรดที่ทางคณะผู้จัดทำใช้นั้น ทำโดยการผสมกรดไนตริกกับน้ำ โดยมีข้อควรระวังคือการผสมกรด นั้นต้องทำการหยดกรดลงในน้ำ ถ้าทำการหยดน้ำลงกรด อาจเกิดปฏิกิริยาทำให้เกิดอันตรายกับผู้ทดลองได้
5. ทำการส่องดูในขั้นต้นด้วยเครื่องตรวจสอบโครงสร้าง Optical microscope ของทางภาควิชา ซึ่งเป็นการตรวจสอบ ว่าชิ้นงานที่เราทำการเตรียมเรียบร้อยแล้วนั้น สามารถตรวจสอบโครงสร้างได้ตามที่เราต้องการหรือไม่ ซึ่งถ้ายังไม่สามารถมองเห็นโครงสร้างได้ ต้องทำการขัดด้วยผงอลูมินา และหยดกรดใหม่อีกครั้ง แล้วจึงนำมาตรวจสอบโครงสร้างด้วยเครื่อง Optical microscope อีกครั้ง จนสามารถเห็น โครงสร้าง จึงถือได้ว่าได้เตรียมชิ้นงานอย่างสมบูรณ์ ก่อนจะนำไปทดสอบด้วย เครื่อง SEM และ EDX ที่สถาบัน TMEC ต่อไป



รูปที่ 3.13 เครื่อง Optical microscope

### 3.4. การตรวจสอบจุลโครงสร้างโดยใช้กล้อง Optical microscope

หลังจากการตรวจสอบคุณภาพด้วยเครื่อง FE-SEM และ EDX จากสถาบัน TMEC แล้ว ทางคณะผู้จัดทำได้ทำการตรวจสอบจุลโครงสร้างด้วยกล้อง Optical microscope ของทางภาควิชา เพื่อเป็นการเปรียบเทียบความเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างหลังจากการบ่มในระยะเวลาที่ต่างกัน ซึ่งโลหะบัดกรีที่ทางคณะผู้จัดทำใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้อง Optical microscope นี้ เป็นชิ้นโลหะบัดกรีเดียวกันกับชิ้น โลหะบัดกรีที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างด้วยเครื่อง FE-SEM และ EDX ที่สถาบัน TMEC แต่นำมาทำการขัดใหม่เพื่อลบรอยหรืออนุภาคต่างๆ ที่อาจเกิดขึ้นหลังจากการนำไปตรวจสอบคุณภาพที่สถาบัน TMEC

#### 3.4.1. ขั้นตอนการตรวจสอบจุลโครงสร้างโดยใช้กล้อง Optical microscope

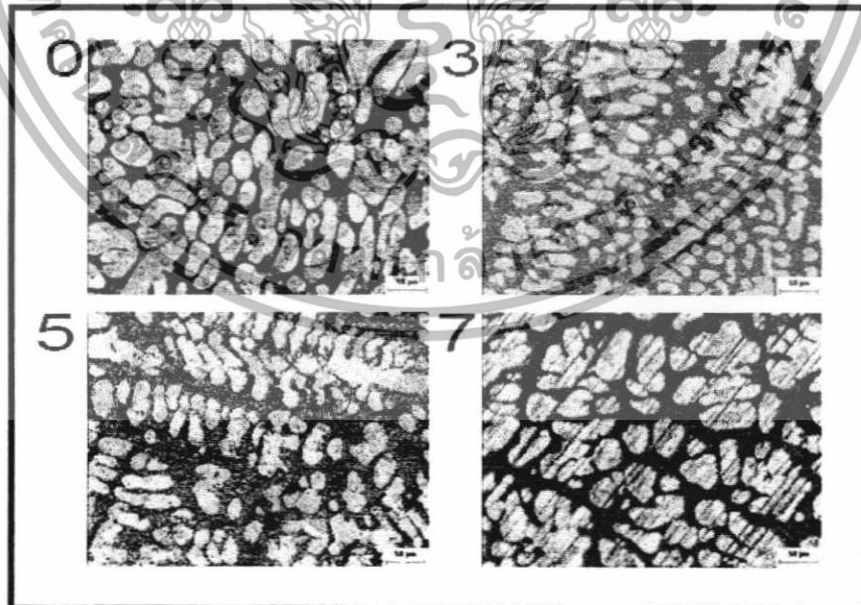
1. การเตรียมผิวชิ้นงานทดสอบ นำชิ้น โลหะบัดกรีที่นำไปตรวจสอบ โครงสร้างที่สถาบัน TMEC มาทำการขัดผิวหยาบอีกครั้ง โดยเริ่มที่กระดาษทราย เบอร์ 800 และ 1000 ตามลำดับ รวมถึงนำมาขัดผิวละเอียดด้วยผงอลูมินาและนำไปหยดกรด เช่นเดียวกับการเตรียมชิ้นงานก่อนนำไปตรวจสอบ โครงสร้างที่สถาบัน TMEC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การส่องจุล โครงสร้างของลวดบัดกรีด้วยกล้อง Optical microscope นำชิ้น โลหะบัดกรีที่ได้ไปทำการส่องด้วยกล้อง Optical microscope โดยต้องให้เห็นเป็นรอยเกรนของวัสดุ (ถ้ายังไม่เห็นเป็นรอยเกรนของวัสดุหมายความว่าหยดกรคน้อยไป แต่ถ้าส่องด้วยกล้อง Optical microscope แล้วเห็นรอยใหม่ แสดงว่าหยดกรคนานเกินไป ทั้ง 2 กรณีนี้ถือว่าชิ้น โลหะบัดกรีที่นำมาตรวจสอบนี้ยังใช้ไม่ได้ ต้องทำการขัดใหม่ ตามขั้นตอนดังข้อ 1 ใหม่อีกครั้ง จนใช้กล้อง Optical microscope ส่องแล้วเห็นเป็นรอยเกรน) โดยทำการปรับ โฟกัส กำลังขยาย รวมถึงตำแหน่งของชิ้น โลหะบัดกรีที่ทำการดูอยู่ เพื่อให้ได้ภาพที่ดีที่สุดของชิ้นงานนั้น

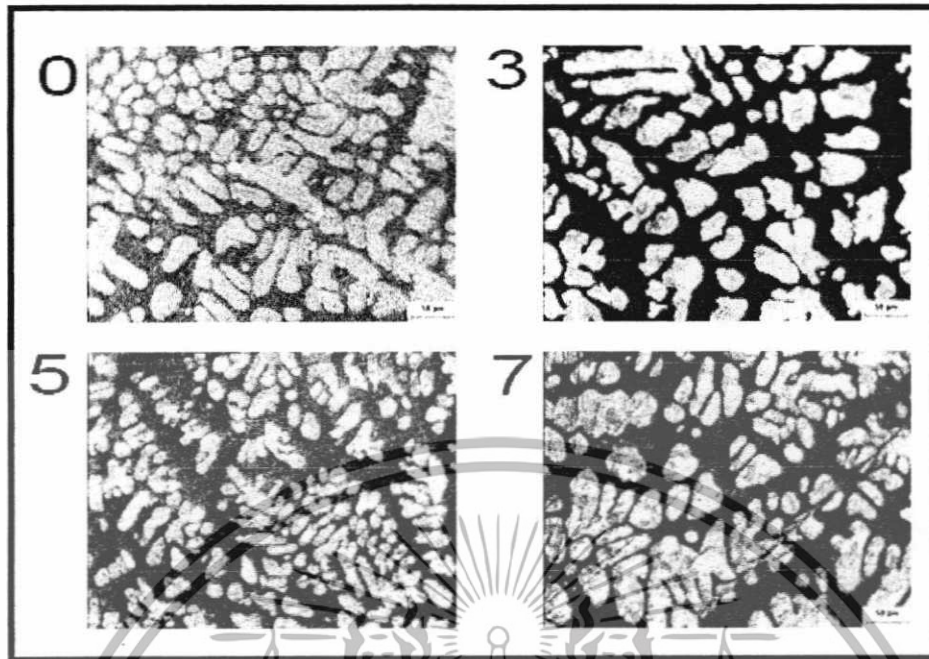


รูปที่ 3.14 การส่องเกรนของโลหะบัดกรี

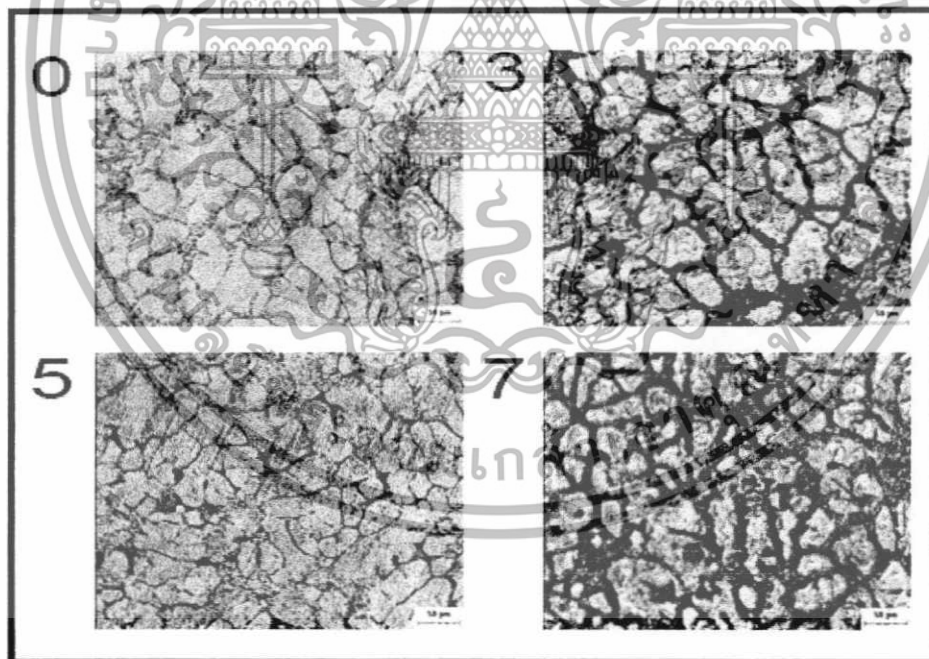


รูปที่ 3.15 โครงสร้างโลหะบัดกรีส่วนผสม 96.5Sn/3Ag/0.5Cu ในช่วงเวลาการบ่ม 0, 3, 5 และ 7 วัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และส่งอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

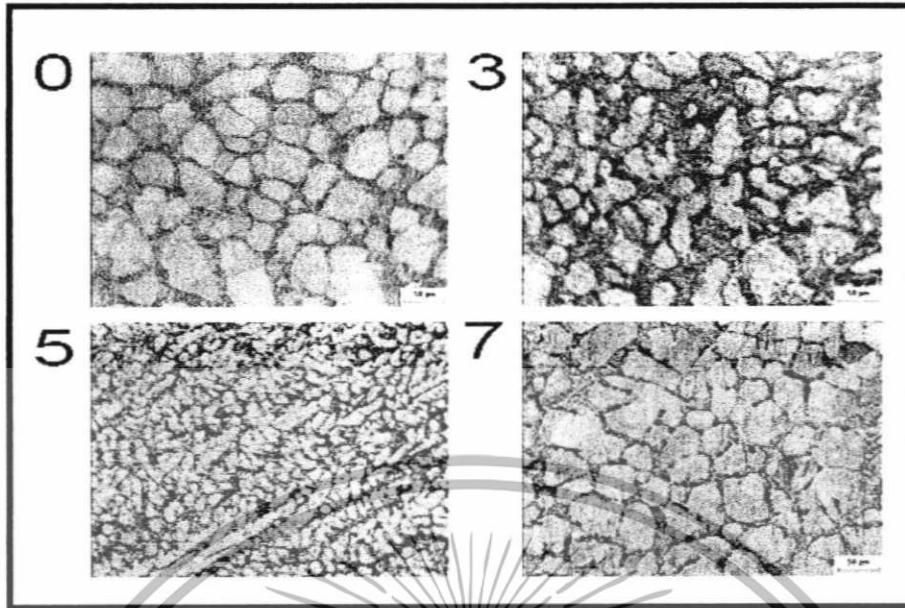


รูปที่ 3.16 โครงสร้างโลหะบัดกรีส่วนผสม 95.8Sn/3.5Ag/0.7Cu ในช่วงเวลาการบ่ม 0, 3, 5 และ 7 วัน

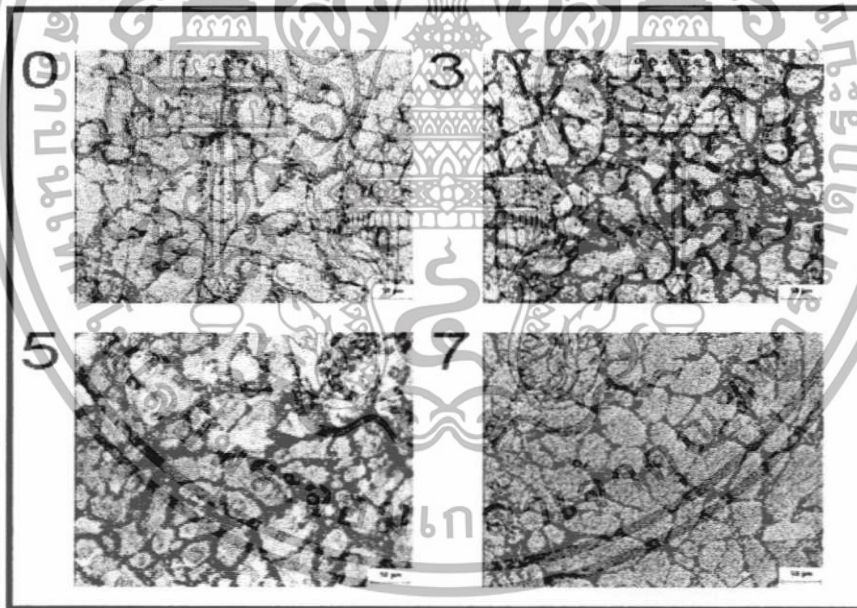


รูปที่ 3.17 โครงสร้างโลหะบัดกรีส่วนผสม 98.3Sn/1Ag/0.7Cu ในช่วงเวลาการบ่ม 0, 3, 5 และ 7 วัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

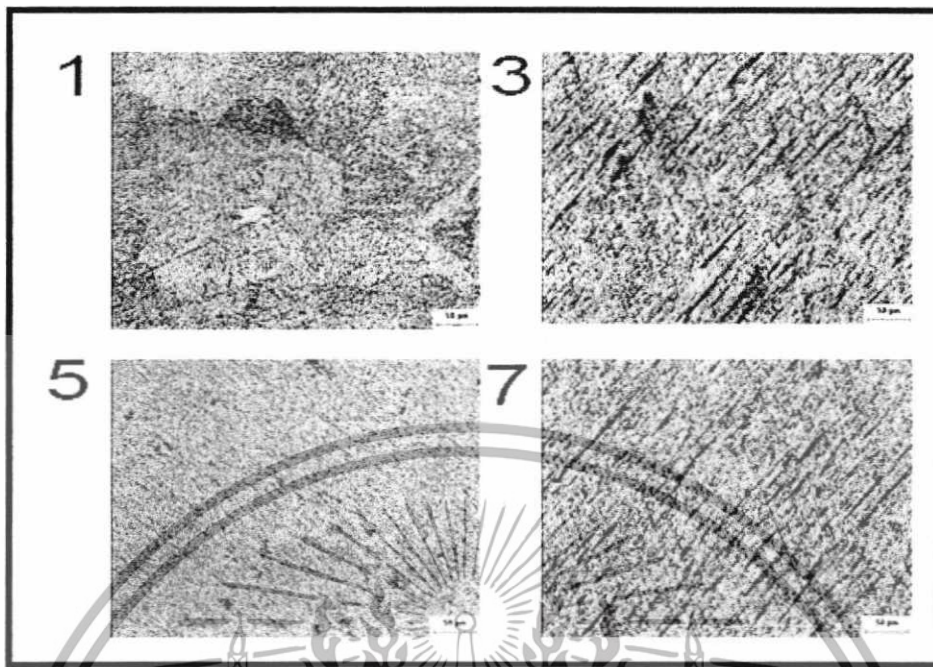


รูปที่ 3.18 โครงสร้างโลหะบัดกรีส่วนผสม 99.3Sn/0.7Cu ในช่วงเวลาการบ่ม 0, 3, 5 และ 7 วัน



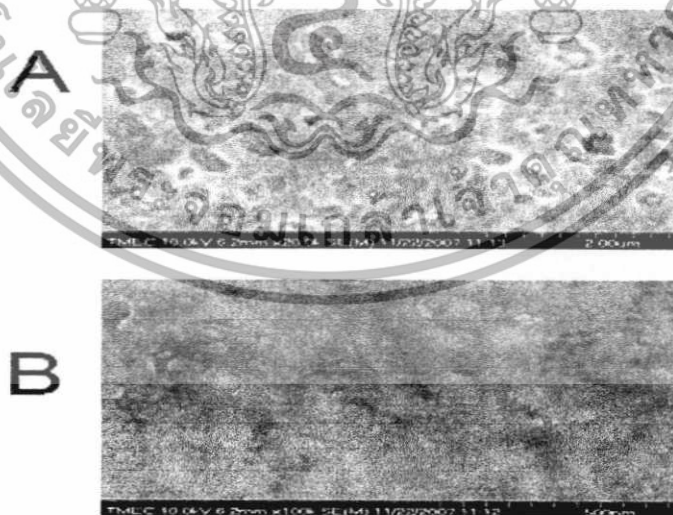
รูปที่ 3.19 โครงสร้างโลหะบัดกรีส่วนผสม 99Sn/0.3Ag/0.7Cu ในช่วงเวลาการบ่ม 0, 3, 5 และ 7 วัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



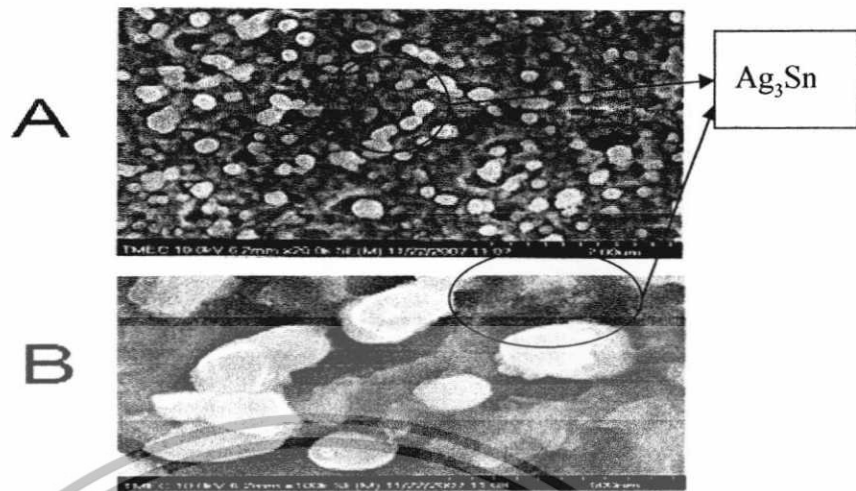
รูปที่ 3.20 โครงสร้างโลหะบัดกรีส่วนผสม 63Sn/37Pb ในช่วงเวลาการบ่ม 0, 3, 5 และ 7 วัน

การศึกษาจุลโครงสร้างที่สถาบัน TMEC ด้วยกล้อง SEM เพื่อดูจุลโครงสร้างของโลหะบัดกรีนั้น สำหรับโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วตระกูล SAC จะแบ่งออกเป็น 2 เฟส คือ Sn-Matrix และ อนุภาค Ag<sub>3</sub>Sn โดยศึกษาที่กำลังขยาย 2 ระดับคือ 20000 เท่า ตามลำดับ



รูปที่ 3.21 จุลโครงสร้างเฟส Sn-Matrix ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วตระกูล SAC ส่วนผสม 96.5Sn/3Ag/0.5Cu โดยรูป A มีกำลังขยาย 20000 เท่า และรูป B มีกำลังขยาย 100000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ ร้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.22 จุลโครงสร้างเฟส  $Ag_3Sn$  ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วตระกูล SAC ส่วนผสม 96.5Sn/3Ag/.05Cu โดยรูป A มีกำลังขยาย 20000 เท่า และรูป B มีกำลังขยาย 100000 เท่า

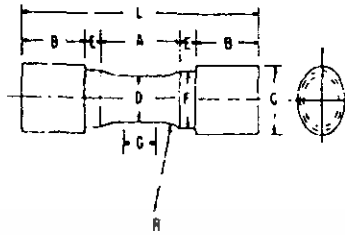
จะเห็นเฟส Sn-Matrix จากรูปที่ 3.21 ซึ่งเป็นเฟสที่มีส่วนผสมของ Sn มากที่สุด ส่วนรูปที่ 3.22 จะเห็นอนุภาคจุลโครงสร้างของ  $Ag_3Sn$  มีลักษณะสีขาว ซึ่งคุณสมบัติที่สำคัญของอนุภาคนี้ได้อธิบายไว้ในเนื้อหาข้างต้นแล้ว

### 3.5. การเตรียมโลหะบัดกรีรูปแบบมาตรฐานก่อนการทดสอบค่า Tensile strength

มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบค่า Tensile strength สำหรับโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว ทางคณะผู้จัดทำได้เลือกมาตรฐานชิ้นงานแบบ ASTM E8M-04 ซึ่งรายละเอียดต่างๆของมาตรฐานดังกล่าว ทางคณะผู้จัดทำได้ทำการอธิบายไว้โดยละเอียดแล้วในบทที่ 2 ซึ่งได้มีทั้งประวัติความเป็นมาและระบบของมาตรฐานของ ASTM ว่าได้แบ่งแยกเป็นหมวดหมู่เช่นไรบ้าง โดยรูปแบบของชิ้นงานที่ทางคณะผู้จัดทำใช้ในการวิจัย จะเป็นแบบที่ย่อขนาดมาจากของเดิม (แต่ยังคงเป็นที่ยอมรับตามข้อกำหนดของมาตรฐาน ASTM) ทั้งนี้เพื่อป้องกันการผลิตจากขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานจากจำนวนของชิ้นงานในการวิจัยที่มีจำกัด โดยชิ้นงานมีรูปแบบของ Drawing ดังรูปที่ 3.21

สำหรับการทำโลหะบัดกรี ให้ได้รูปแบบมาตรฐานนั้น ทางคณะผู้จัดทำได้มีโอกาสใช้เครื่องกลึงอัตโนมัติ CNC ของทางภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยต้องมีการศึกษาการเขียนโปรแกรมเพื่อสั่งให้เครื่องทำงาน (G-Code)

ASTM E 8M - 04



| Dimensions, mm                         |  |            |            |
|--|--|------------|------------|
| Nominal Diameter                       | Specimen 1                                   | Specimen 2 | Specimen 3 |
|  | 12.5   | 20         | 30         |
| G—Length of parallel                   | Shall be equal to or greater than diameter D |            |            |
| D—Diameter                             | 12.5 ± 0.2                                   | 20.0 ± 0.4 | 30.0 ± 0.6 |
| R—Radius of fillet, min                | 25   | 25         | 50         |
| A—Length of reduced section, min       | 32   | 38         | 60         |
| L—Overall length, min                  | 95   | 100        | 160        |
| B—Length of end section, approximate   | 25   | 25         | 45         |
| C—Diameter of end section, approximate | 20   | 30         | 48         |
| E—Length of shoulder, min              | 6  | 6          | 8          |
| F—Diameter of shoulder                 | 16.0 ± 0.4                                   | 24.0 ± 0.4 | 36.5 ± 0.4 |

รูปที่ 3.23 ขนาดชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM

3.6. การทดสอบค่า Tensile strength

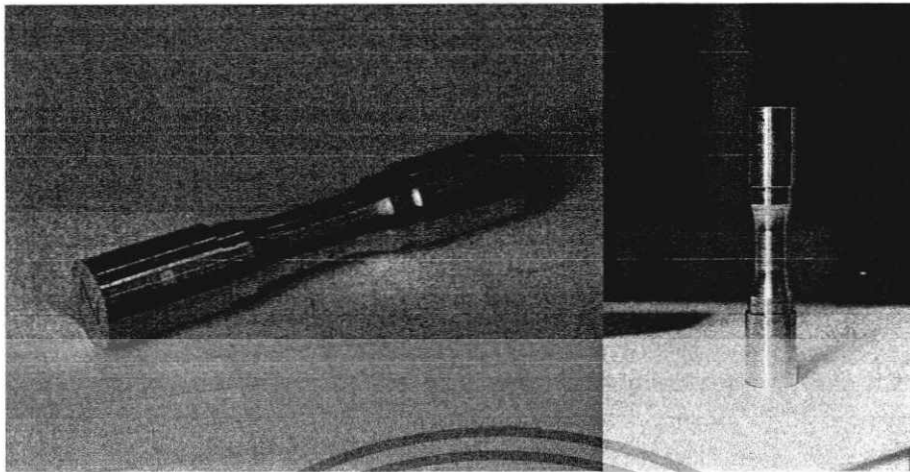
หลังจากทำการเตรียมโลหะขึ้นรูปตามมาตรฐานการขึ้นรูปตาม ASTM แล้ว ค่อยไปเป็นการทดสอบค่าแรงดึง (Tensile strength) โดยข้อมูลตัวหนึ่งที่สำคัญสำหรับทดสอบค่า Tensile strength ตัวหนึ่งคือค่า Speed of test โดยสามารถเทียบได้จาก ความยาวของ Reduced section โดยตามที่ระบุไว้ในมาตรฐาน ASTM จะมีค่าระหว่าง 0.05-0.5 m/m ต่อความยาวของ Reduced section ขึ้นงาน

สำหรับชิ้นงานที่ทางคณะผู้จัดทำได้เลือกไว้ จะได้ค่า Speed of test ระหว่าง 1.6-16 mm/min. โดยทางคณะผู้จัดทำได้เลือกค่า Speed of test สำหรับการวิจัยนี้เท่ากับ 10 mm/min.

เครื่อง Tensile strength ที่ทางคณะผู้จัดทำได้ใช้ในการวิจัยนี้เป็นเครื่องของทางภาควิชาเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ค่า Tensile strength ที่ได้จากเครื่องจะเป็นในรูปแบบกราฟของค่าความเค้น และค่าความเครียด โดยที่แกน x และ y คือค่าความเค้น และค่าความเครียด ตามลำดับ ซึ่งกราฟดังกล่าวสามารถบอกค่าสูงสุดของค่าความเค้นและค่าความเครียด

ขั้นตอนการเตรียมชิ้นทดสอบ

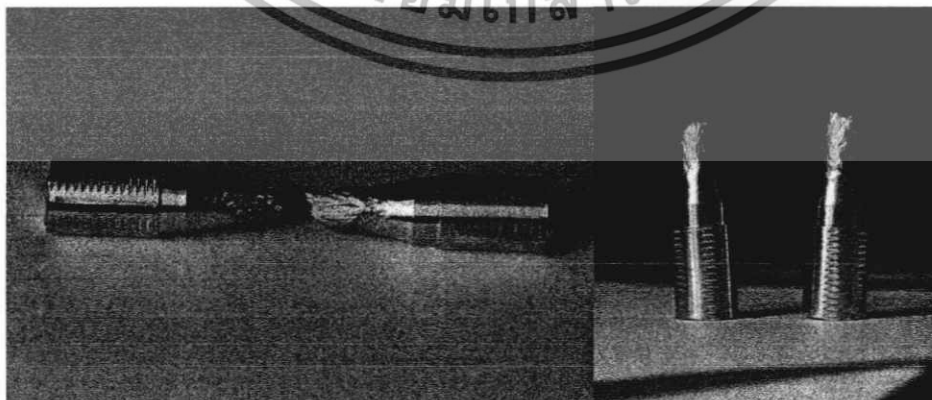
นำชิ้นทดสอบที่ผ่านการกลึงจากเครื่องกลึง CNC ที่ได้ขนาดตามขนาดมาตรฐาน (ASTM) มาทำการขึ้น โดยใช้ความเร็วในการขึ้น (Speed of test) เท่ากับ 10 mm/min จากนั้นบันทึกผลการทดสอบการขึ้น



รูปที่ 3.24 ชิ้นทดสอบที่ได้ขนาดตามมาตรฐาน (ASTM)



รูปที่ 3.25 เครื่องทดสอบแรงดึง



รูปที่ 3.26 ชิ้นงานที่ขาดเนื่องจากการดึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผล

#### 5.1 สรุปผล

จากโลหะบัดกรีทั้งหมด 6 ส่วนผสม ส่วนผสมละ 12 ชิ้น ทางคณะผู้จัดทำจะได้รับโลหะบัดกรีมาทั้งหมด 72 ชิ้น ต่อมาทำการบ่มด้วยเวลาและความชื้นที่กำหนด (อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 85%) แล้วนำไปหาค่าความแข็ง ต่อมาทำการการศึกษาจุลโครงสร้างที่สถาบัน TMEC ด้วยกล้อง SEM และ EDX และในขั้นตอนสุดท้ายของโครงการจะเป็นการหาค่า Tensile strength

ค่า Tensile strength และความแข็งที่ได้จากการทดลองนั้น ถ้ามองอย่างภาพรวมจะเห็นว่า การไม่ทำการบ่มเลย จะให้ค่าคุณสมบัติทางกลทั้งสองที่ดีกว่าเรานำโลหะบัดกรีไม่ทำการบ่ม ถึงแม้ว่าค่าความแข็งของโลหะบัดกรีตระกูล SAC ที่ทำการบ่มเป็นเวลา 5 วันจะให้ค่าความแข็งที่สูงกว่าการไม่ทำการบ่มโลหะบัดกรีตระกูล SAC เลย แต่จะเห็นจากผลของตัวเลขว่าไม่ได้มีความแตกต่างกันมากถึงขั้นที่แยกความแตกต่างกันได้อย่างชัดเจน

ดังนั้นทางคณะผู้จัดทำจึงขอสรุปจากการทดลองโครงการนี้ว่า ที่เงื่อนไขการทดลองอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 85% ไม่จำเป็นที่จะต้องทำการบ่มโลหะบัดกรีส่วนผสมดังกล่าว เนื่องจากทำให้ค่าคุณสมบัติทางกลในเรื่องของค่า Tensile strength และความแข็งมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย จึงไม่จำเป็นต้องเสียเวลารวมถึงพลังงานในการบ่มโลหะดังกล่าวซึ่งเป็นการสิ้นเปลือง

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

#### 4.1. ผลค่าความแข็งของโลหะบัดกรี

จากการทดสอบค่าความแข็งของโลหะบัดกรี ได้ผลดังนี้

##### 4.1.1. โลหะบัดกรีที่ไม่ผ่านการบ่ม

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบค่าความแข็งของโลหะบัดกรีที่ไม่ผ่านการบ่ม (ในหน่วย HV)

| ส่วนผสม               | ชั้นที่ / ครั้งที่ | 1    | 2    | 3    | เฉลี่ย      |
|-----------------------|--------------------|------|------|------|-------------|
| 1) 63Sn-37Pb          | 1                  | 11.7 | 11.4 | 11.6 | 11.6        |
|                       | 2                  | 11.4 | 11.2 | 11.5 | 11.4        |
|                       | 3                  | 11.0 | 11.3 | 11.6 | 11.3        |
| <b>เฉลี่ย</b>         |                    |      |      |      | <b>11.4</b> |
| 2) 99Sn-0.3Ag-0.7Cu   | 1                  | 10.8 | 10.6 | 10.8 | 10.7        |
|                       | 2                  | 10.7 | 11.1 | 10.9 | 10.9        |
|                       | 3                  | 10.5 | 10.3 | 11.3 | 10.7        |
| <b>เฉลี่ย</b>         |                    |      |      |      | <b>10.8</b> |
| 3) 98.3Sn-1.0Ag-0.7Cu | 1                  | 11.8 | 11.9 | 11.3 | 11.7        |
|                       | 2                  | 11.2 | 11.6 | 10.9 | 11.2        |
|                       | 3                  | 11.5 | 11.2 | 11.7 | 11.5        |
| <b>เฉลี่ย</b>         |                    |      |      |      | <b>11.5</b> |
| 4) 96.5Sn-3.0Ag-0.5Cu | 1                  | 13.5 | 14.6 | 14.0 | 14.0        |
|                       | 2                  | 14.5 | 13.4 | 13.6 | 13.8        |
|                       | 3                  | 14.2 | 14.5 | 13.4 | 14.0        |
| <b>เฉลี่ย</b>         |                    |      |      |      | <b>14.0</b> |
| 5) 95.8Sn-3.5Ag-0.7Cu | 1                  | 16.3 | 15.0 | 16.0 | 15.8        |
|                       | 2                  | 15.5 | 15.6 | 15.8 | 15.6        |
|                       | 3                  | 15.2 | 15.0 | 15.7 | 15.3        |
| <b>เฉลี่ย</b>         |                    |      |      |      | <b>15.6</b> |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบค่าความแข็งของโลหะบัดกรีที่ไม่ผ่านการบ่ม (ในหน่วย HV) (ต่อ)

| ส่วนผสม         | ชั้นที่ \ ครั้งที่ | 1    | 2    | 3    | เฉลี่ย |
|-----------------|--------------------|------|------|------|--------|
| 6) 99.3Sn-0.7Cu | 1                  | 11.6 | 11.9 | 12.0 | 11.8   |
|                 | 2                  | 11.8 | 11.3 | 11.3 | 11.5   |
|                 | 3                  | 10.9 | 11.8 | 11.5 | 11.4   |
| เฉลี่ย          |                    |      |      |      | 11.6   |

4.1.2. โลหะบัดกรีที่ผ่านการบ่ม 3 วัน

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบค่าความแข็งของโลหะบัดกรีที่ผ่านการบ่ม 3 วัน (ในหน่วย HV)

| ส่วนผสม               | ชั้นที่ \ ครั้งที่ | 1    | 2    | 3    | เฉลี่ย |
|-----------------------|--------------------|------|------|------|--------|
| 1) 63Sn-37Pb          | 1                  | 10.0 | 10.0 | 10.0 | 10.0   |
|                       | 2                  | 10.6 | 10.5 | 11.2 | 10.8   |
|                       | 3                  | 11.2 | 10.5 | 10.4 | 10.7   |
| เฉลี่ย                |                    |      |      |      | 10.5   |
| 2) 99Sn-0.3Ag-0.7Cu   | 1                  | 10.9 | 10.7 | 8.8  | 10.1   |
|                       | 2                  | 8.4  | 10.6 | 10.3 | 9.8    |
|                       | 3                  | 9.5  | 10.4 | 10.6 | 10.2   |
| เฉลี่ย                |                    |      |      |      | 10.0   |
| 3) 98.3Sn-1.0Ag-0.7Cu | 1                  | 11.0 | 9.7  | 10.2 | 10.3   |
|                       | 2                  | 10.6 | 9.8  | 10.3 | 10.2   |
|                       | 3                  | 10.2 | 10.7 | 10.2 | 10.4   |
| เฉลี่ย                |                    |      |      |      | 10.3   |
| 4) 96.5Sn-3.0Ag-0.5Cu | 1                  | 13.6 | 12.9 | 13.2 | 13.2   |
|                       | 2                  | 13.6 | 13.5 | 13.1 | 13.4   |
|                       | 3                  | 13.5 | 13.1 | 13.5 | 13.4   |
| เฉลี่ย                |                    |      |      |      | 13.3   |
| 5) 95.8Sn-3.5Ag-0.7Cu | 1                  | 14.8 | 15.2 | 15.1 | 15.0   |
|                       | 2                  | 15.0 | 15.5 | 15.2 | 15.2   |
|                       | 3                  | 14.4 | 15.7 | 16.2 | 15.4   |
| เฉลี่ย                |                    |      |      |      | 15.2   |
| 6) 99.3Sn-0.7Cu       | 1                  | 11.0 | 11.1 | 11.4 | 11.2   |
|                       | 2                  | 11.3 | 10.5 | 11.5 | 11.1   |
|                       | 3                  | 11.4 | 10.1 | 11.3 | 10.9   |
| เฉลี่ย                |                    |      |      |      | 11.1   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3. โลหะบัดกรีที่ผ่านการบ่ม 5 วัน

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบค่าความแข็งของโลหะบัดกรีที่ผ่านการบ่ม 5 วัน (ในหน่วย HV)

| ส่วนผสม               | ชั้นที่ \ ครั้งที่ | 1    | 2    | 3    | เฉลี่ย |
|-----------------------|--------------------|------|------|------|--------|
| 1) 63Sn-37Pb          | 1                  | 9.7  | 10.1 | 9.8  | 9.9    |
|                       | 2                  | 10.8 | 9.7  | 10.0 | 10.2   |
|                       | 3                  | 10.0 | 10.3 | 9.9  | 10.1   |
| เฉลี่ย                |                    |      |      |      | 10.0   |
| 2) 99Sn-0.3Ag-0.7Cu   | 1                  | 11.4 | 11.3 | 12.0 | 11.6   |
|                       | 2                  | 11.9 | 11.6 | 11.3 | 11.6   |
|                       | 3                  | 11.0 | 10.3 | 11.1 | 10.8   |
| เฉลี่ย                |                    |      |      |      | 11.3   |
| 3) 98.3Sn-1.0Ag-0.7Cu | 1                  | 11.0 | 11.0 | 11.3 | 11.1   |
|                       | 2                  | 12.0 | 11.5 | 10.7 | 11.4   |
|                       | 3                  | 11.4 | 11.3 | 11.5 | 11.4   |
| เฉลี่ย                |                    |      |      |      | 11.3   |
| 4) 96.5Sn-3.0Ag-0.5Cu | 1                  | 14.7 | 14.9 | 13.8 | 14.5   |
|                       | 2                  | 14.9 | 13.7 | 14.2 | 14.3   |
|                       | 3                  | 14.4 | 13.1 | 13.9 | 13.8   |
| เฉลี่ย                |                    |      |      |      | 14.2   |
| 5) 95.8Sn-3.5Ag-0.7Cu | 1                  | 16.3 | 15.2 | 15.6 | 15.7   |
|                       | 2                  | 15.9 | 14.7 | 15.2 | 15.3   |
|                       | 3                  | 16.5 | 15.6 | 15.8 | 16.0   |
| เฉลี่ย                |                    |      |      |      | 15.6   |
| 6) 99.3Sn-0.7Cu       | 1                  | 10.4 | 11.3 | 10.7 | 10.8   |
|                       | 2                  | 10.8 | 10.3 | 10.7 | 10.6   |
|                       | 3                  | 10.7 | 11.2 | 11.0 | 11.0   |
| เฉลี่ย                |                    |      |      |      | 10.8   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.4. โลหะบัดกรีที่ผ่านการบ่ม 7 วัน

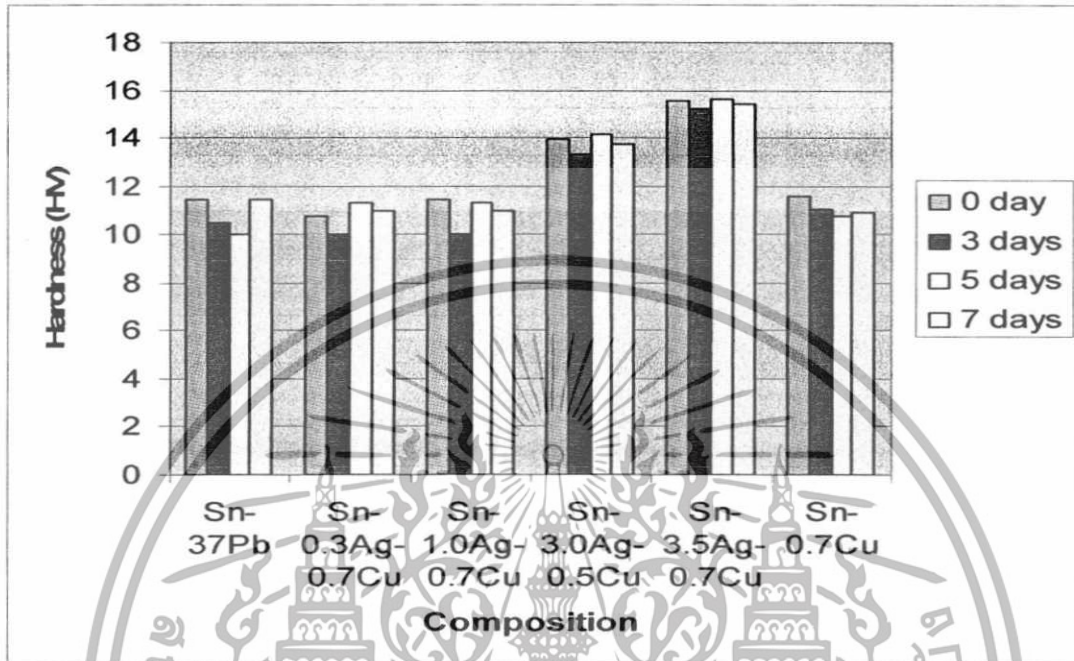
ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบค่าความแข็งของโลหะบัดกรีที่ผ่านการบ่ม 7 วัน (ในหน่วย HV)

| ส่วนผสม               | ชั้นที่ | 1    | 2    | 3    | เฉลี่ย |
|-----------------------|---------|------|------|------|--------|
| 1) 63Sn-37Pb          | 1       | 11.6 | 11.0 | 12.2 | 11.6   |
|                       | 2       | 11.8 | 10.5 | 12.5 | 11.6   |
|                       | 3       | 11.4 | 11.5 | 10.7 | 11.2   |
| เฉลี่ย                |         |      |      |      | 11.5   |
| 2) 99Sn-0.3Ag-0.7Cu   | 1       | 10.9 | 10.9 | 11.8 | 11.2   |
|                       | 2       | 10.8 | 10.3 | 10.4 | 10.5   |
|                       | 3       | 10.8 | 11.3 | 11.2 | 11.1   |
| เฉลี่ย                |         |      |      |      | 10.9   |
| 3) 98.3Sn-1.0Ag-0.7Cu | 1       | 12.1 | 11.2 | 11.3 | 11.5   |
|                       | 2       | 11.2 | 10.0 | 11.0 | 10.7   |
|                       | 3       | 10.8 | 10.4 | 10.9 | 10.7   |
| เฉลี่ย                |         |      |      |      | 11.0   |
| 4) 96.5Sn-3.0Ag-0.5Cu | 1       | 15.7 | 12.1 | 13.9 | 13.9   |
|                       | 2       | 13.1 | 12.5 | 13.8 | 13.1   |
|                       | 3       | 14.5 | 14.2 | 13.7 | 14.1   |
| เฉลี่ย                |         |      |      |      | 13.7   |
| 5) 95.8Sn-3.5Ag-0.7Cu | 1       | 13.8 | 15.8 | 16.5 | 15.4   |
|                       | 2       | 15.9 | 15.2 | 15.6 | 15.6   |
|                       | 3       | 16.8 | 14.8 | 14.2 | 15.3   |
| เฉลี่ย                |         |      |      |      | 15.4   |
| 6) 99.3Sn-0.7Cu       | 1       | 11.9 | 10.9 | 10.7 | 11.2   |
|                       | 2       | 10.4 | 11.2 | 10.3 | 10.6   |
|                       | 3       | 10.8 | 11.6 | 10.1 | 10.8   |
| เฉลี่ย                |         |      |      |      | 10.9   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.5 สรุปผลจากการทดสอบความแข็ง

จากผลค่าความแข็งที่ได้ สามารถนำมาเขียนเป็นกราฟได้ดังนี้



รูปที่ 4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งเทียบกับลวดบัดกรีแต่ละส่วนผสม ที่ผ่านการบ่มในเวลาต่างกัน

จากผลที่ได้หลังจากการทดสอบค่าความแข็ง จะเห็นได้ว่า โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วตระกูล SAC (โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่มี ดีบุก, เงิน และ ทองแดง) จะมีแนวโน้มค่าความแข็งที่ได้เหมือนกัน กล่าวคือ การบ่มที่ให้ค่าความแข็งสูงที่สุดในส่วนผสมหนึ่งๆ คือบ่ม ที่เวลา 5 วัน รองลงมาคือ 0 วัน, 7 วัน และให้ค่าความแข็ง ค่าที่ต่ำที่สุดคือที่เวลา 3 วัน ตามลำดับ โดยอาจจะสามารถอธิบายตามวารสารทางวิชาการได้ว่า เมื่อโลหะบัดกรีตระกูล SAC ได้รับความร้อนจากการบ่มในระยะเวลาหนึ่ง (ในกรณี 3 วัน) จะทำให้ เฟสของ Sn-Matrix มีขนาดที่ใหญ่ขึ้น รวมถึงกระตุ้นให้อนุภาค  $Ag_3Sn$  มีลักษณะหยาบ มีผลทำให้ค่าความแข็งลดลง แต่เมื่อทำการบ่มในระยะเวลาที่มากขึ้น (กรณี 5 วัน) จะเกิดการแพร่ของอนุภาค  $Ag_3Sn$  เข้าไปใน เฟสของ Sn-Matrix มีผลทำให้ค่าความแข็งสูงขึ้น และเมื่อทำการบ่มในระยะเวลาที่มากขึ้นอีก (กรณี 7 วัน) พลังงานความร้อนจะไปกระตุ้นอนุภาค  $Ag_3Sn$  ให้มีลักษณะที่ใหญ่และหยาบมากขึ้น มีผลให้ค่าของความแข็งลดลงมาอีกครั้ง

โดยถ้าดูในภาพรวมของแต่ละส่วนผสมแล้ว จะพบว่าปริมาณเงิน จะเป็นตัวแปรที่สำคัญสำหรับค่าความแข็ง ซึ่งจะพบว่า โลหะบัดกรีตระกูล SAC ที่มีปริมาณเงินสูง จะทำให้มีค่าความแข็งที่สูงตามไปด้วย ยืนยันด้วย ANOVA

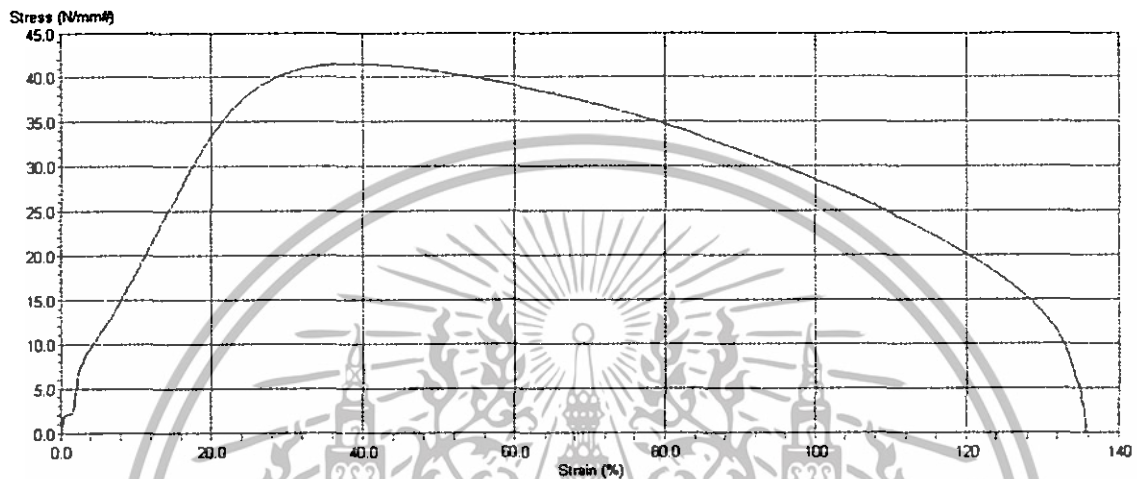
โลหะบัดกรีอีก 2 ชนิดที่ทางคณะผู้จัดทำได้มาจากโรงงาน ได้แก่ Sn-37Pb และ Sn-0.7Cu ในส่วนของ Sn-37Pb นั้น จะพบว่าการที่ไม่ทำการบ่มจะให้ค่าความแข็งที่สูงกว่าการทำการบ่มที่ 3 และ 5 วัน แต่ค่าความแข็งจะเพิ่มขึ้นอีกครั้งที่การบ่ม 7 วัน สำหรับโลหะบัดกรีส่วนผสม Sn-0.7Cu จะพบว่า ในช่วงเวลาในการทำการบ่มทั้ง 7 วันนั้น การไม่ทำการบ่มเลยจะให้ค่าความแข็ง ที่สูงที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2. ผลค่า Tensile strength ของโลหะบัดกรี

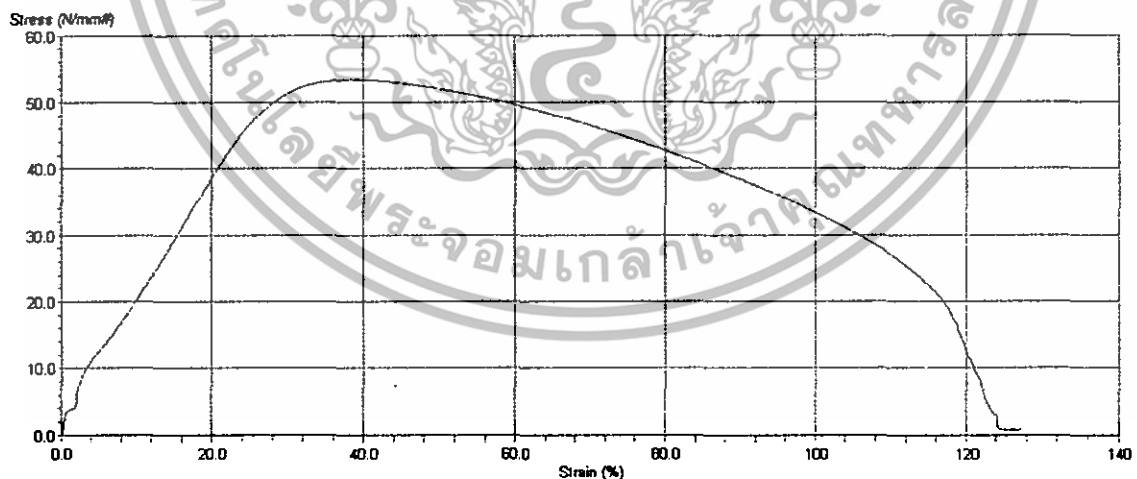
หลังจากทำการทดสอบค่า Tensile strength ของโลหะบัดกรีแล้ว ทางคณะผู้จัดทำสามารถสรุปผลได้ทั้งหมด 3 ค่า ได้แก่ Force peak, Strain peak และ Stress peak ซึ่งผลเป็นดังนี้

### 4.2.1. โลหะบัดกรีที่ไม่ผ่านการบ่ม



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Stress กับ Strain ของส่วนผสม 96.5Sn-3Ag-0.5Cu

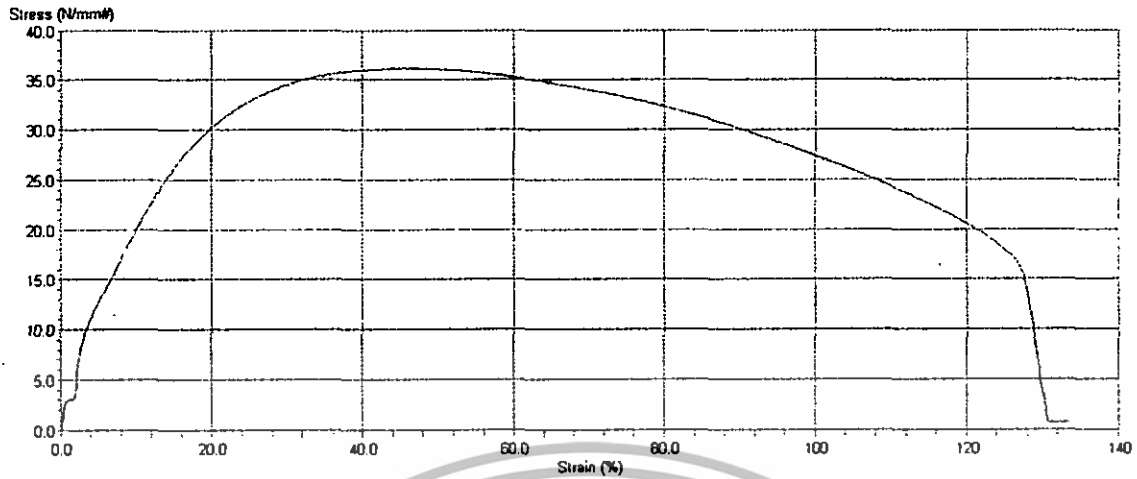
จากการทดสอบจะได้ค่า Force peak (N), Strain peak (%) และ Stress peak (N/mm<sup>2</sup>) คือ 5113.0 N, 38.6% และ 41.7 N/mm<sup>2</sup> ตามลำดับ



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Stress กับ Strain ของส่วนผสม 95.8Sn-3.5Ag-0.7Cu

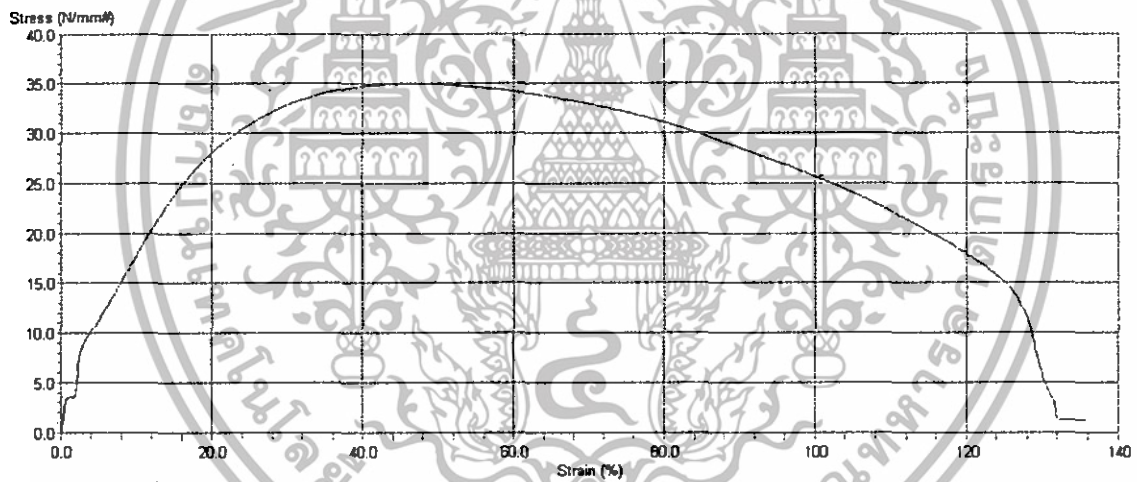
จากการทดสอบจะได้ค่า Force peak (N), Strain peak (%) และ Stress peak (N/mm<sup>2</sup>) คือ 6569.0 N, 37.8% และ 53.5 N/mm<sup>2</sup> ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



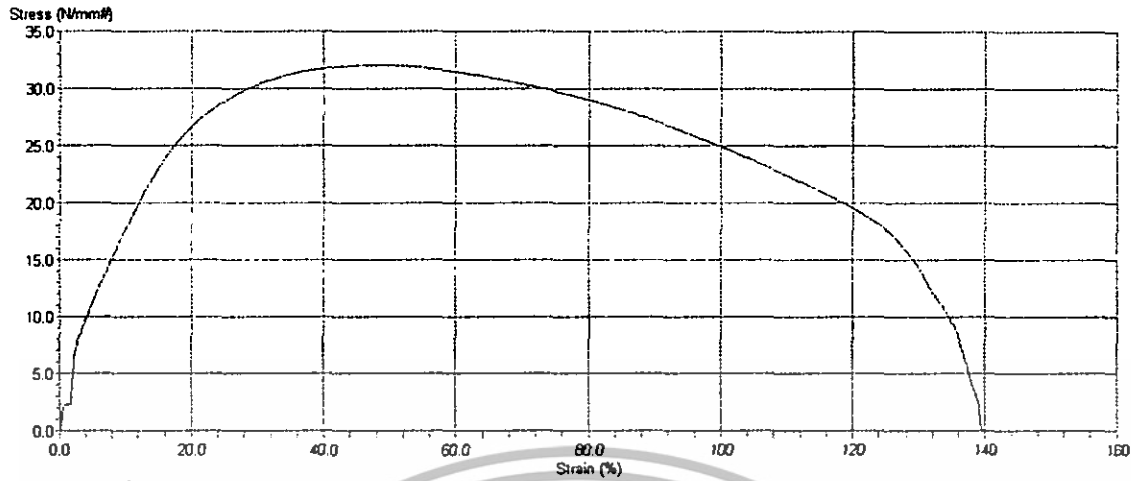
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Stress กับ Strain ของส่วนผสม 98.3Sn-1Ag-0.7Cu

จากการทดสอบจะได้ค่า Force peak (N), Strain peak (%) และ Stress peak ( $N/mm^2$ ) คือ 4462.0 N, 45.5% และ 36.4  $N/mm^2$  ตามลำดับ



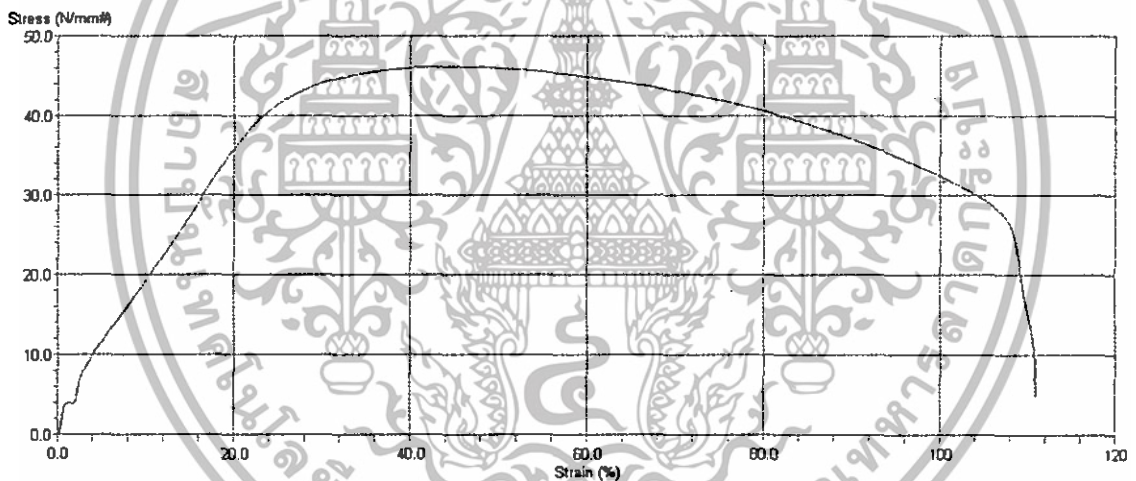
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Stress กับ Strain ของส่วนผสม 99.3Sn-0.7Cu

จากการทดสอบจะได้ค่า Force peak (N), Strain peak (%) และ Stress peak ( $N/mm^2$ ) คือ 4313.0 N, 46.2% และ 35.1  $N/mm^2$  ตามลำดับ



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Stress กับ Strain ของส่วนผสม 99Sn-0.3Ag-0.7Cu

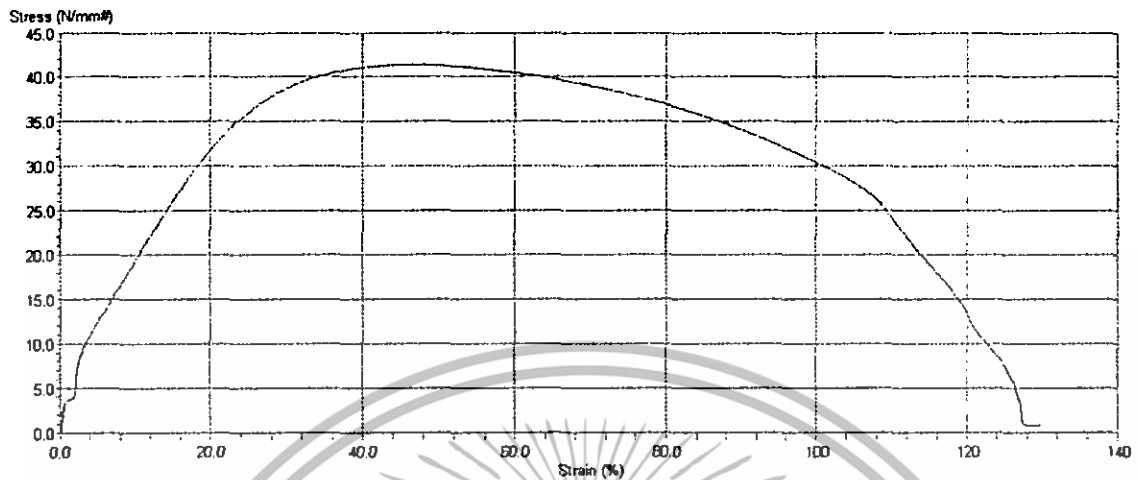
จากการทดสอบจะได้ค่า Force peak (N), Strain peak (%) และ Stress peak ( $N/mm^2$ ) คือ 3949.0 N, 51.7% และ  $32.2 N/mm^2$  ตามลำดับ



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Stress กับ Strain ของส่วนผสม 63Sn-37Pb

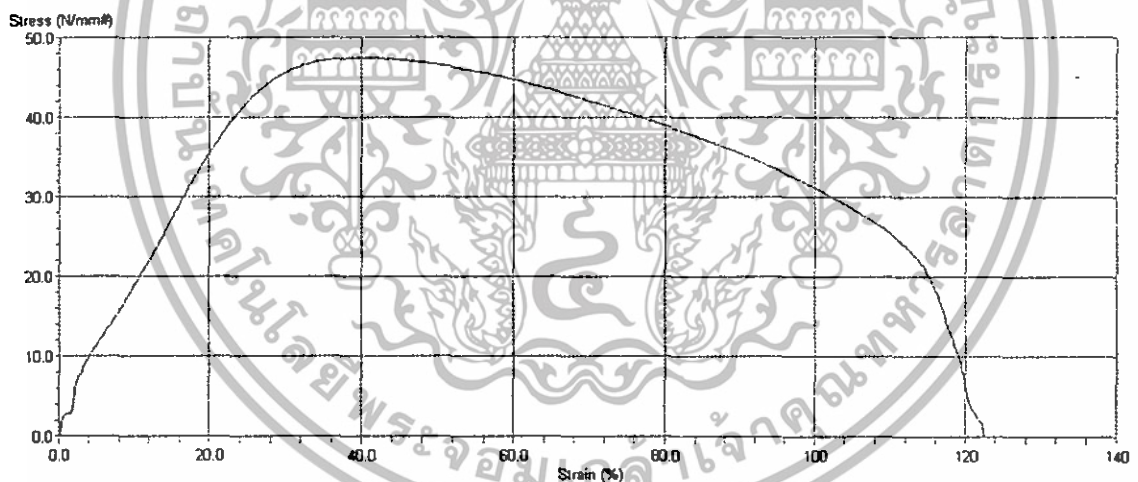
จากการทดสอบจะได้ค่า Force peak (N), Strain peak (%) และ Stress peak ( $N/mm^2$ ) คือ 5682.0 N, 44.9% และ  $46.3 N/mm^2$  ตามลำดับ

#### 4.2.2. โลหะบัดกรีที่ผ่านการบ่ม 3 วัน



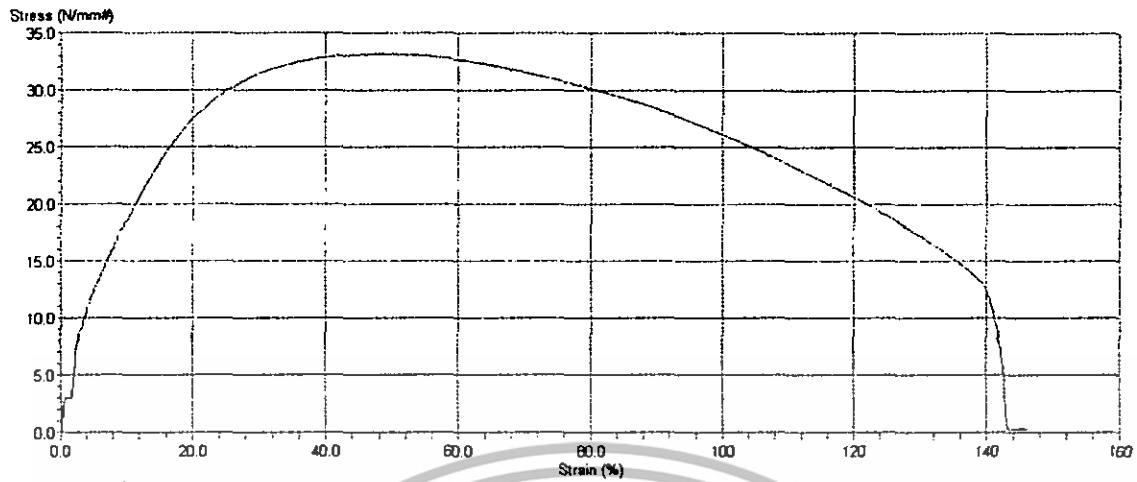
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Stress กับ Strain ของส่วนผสม 96.5Sn-3Ag-0.5Cu

จากการทดสอบจะได้ค่า Force peak (N), Strain peak (%) และ Stress peak (N/mm<sup>2</sup>) คือ 5098.0 N, 46.3% และ 41.5 N/mm<sup>2</sup> ตามลำดับ



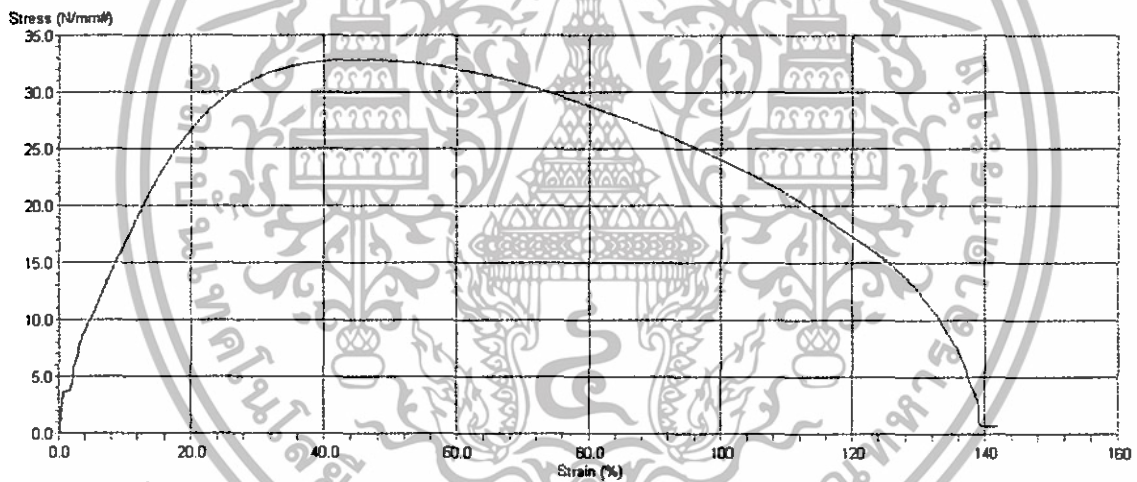
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Stress กับ Strain ของส่วนผสม 95.8Sn-3.5Ag-0.7Cu

จากการทดสอบจะได้ค่า Force peak(N), Strain peak(%) และ Stress peak(N/mm<sup>2</sup>) คือ 5836.0 N, 41.4% และ 47.6 N/mm<sup>2</sup> ตามลำดับ



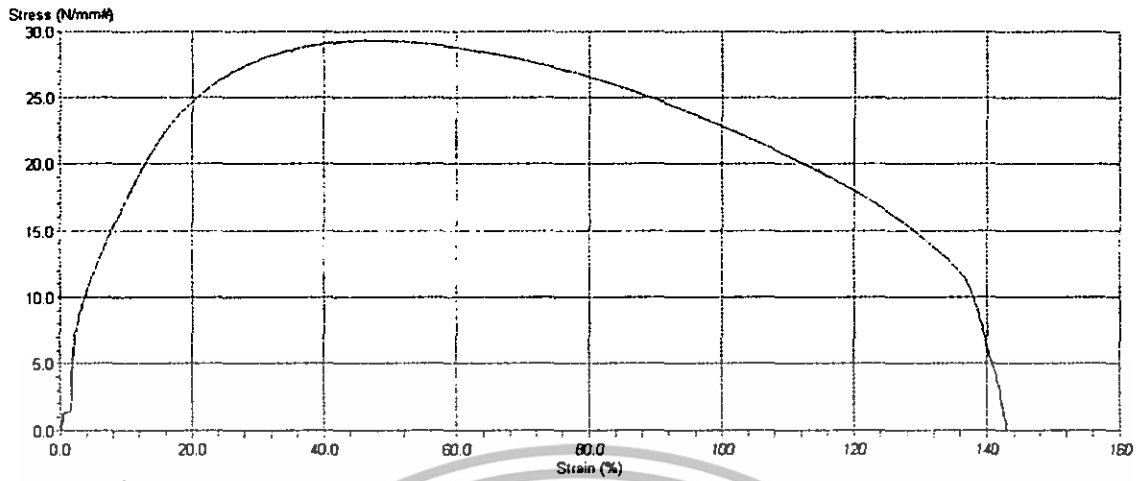
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Stress กับ Strain ของส่วนผสม 98.3Sn-1Ag-0.7Cu

จากการทดสอบจะได้ค่า Force peak (N), Strain peak (%) และ Stress peak ( $N/mm^2$ ) คือ 4085.0 N, 47.3% และ 33.3  $N/mm^2$  ตามลำดับ



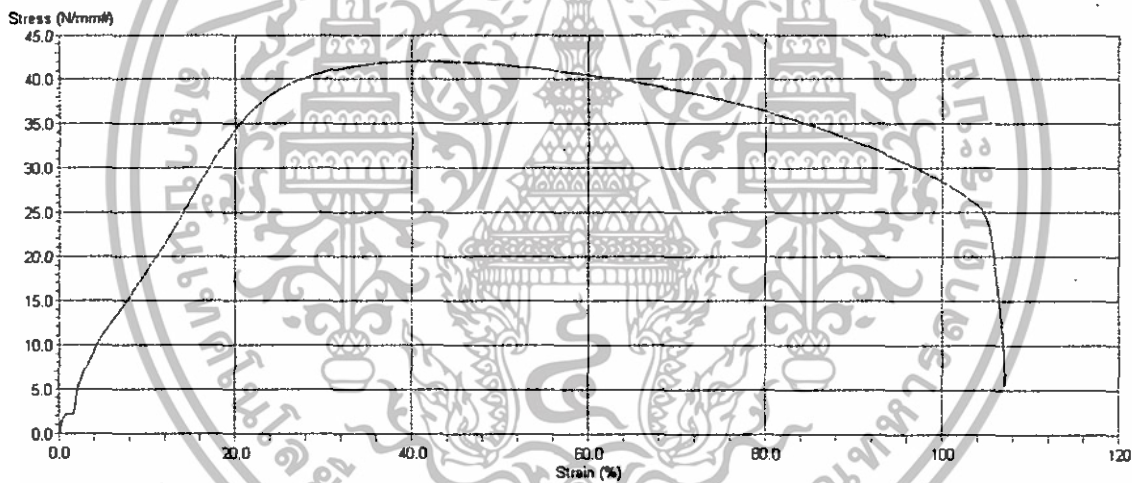
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Stress กับ Strain ของส่วนผสม 99.3Sn-0.7Cu

จากการทดสอบจะได้ค่า Force peak (N), Strain peak (%) และ Stress peak ( $N/mm^2$ ) คือ 4041.0 N, 44.5% และ 32.9  $N/mm^2$  ตามลำดับ



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Stress กับ Strain ของส่วนผสม 99Sn-0.3Ag-0.7Cu

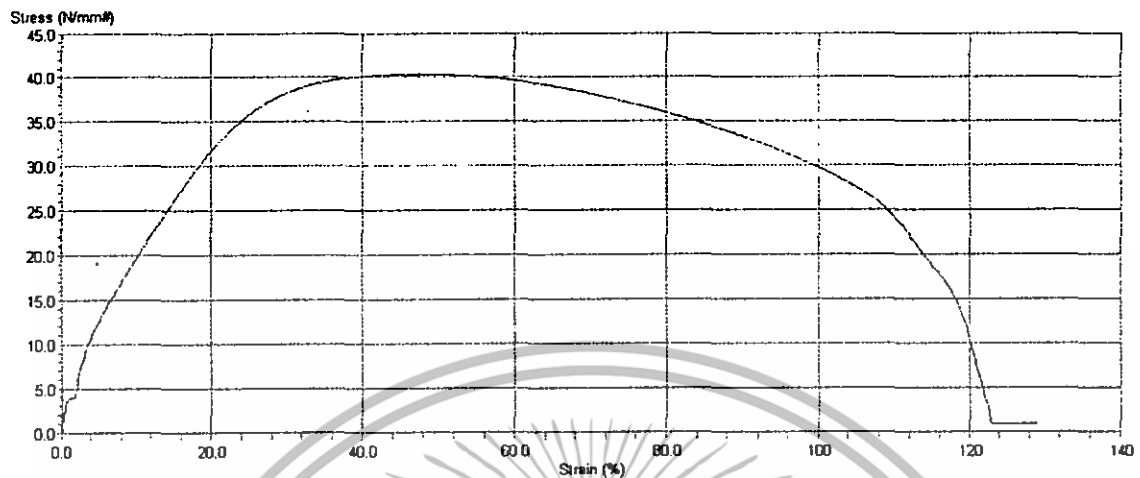
จากการทดสอบจะได้ค่า Force peak (N), Strain peak (%) และ Stress peak ( $N/mm^2$ ) คือ 3609.0 N, 45.9% และ  $29.4 N/mm^2$  ตามลำดับ



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Stress กับ Strain ของส่วนผสม 63Sn-37Pb

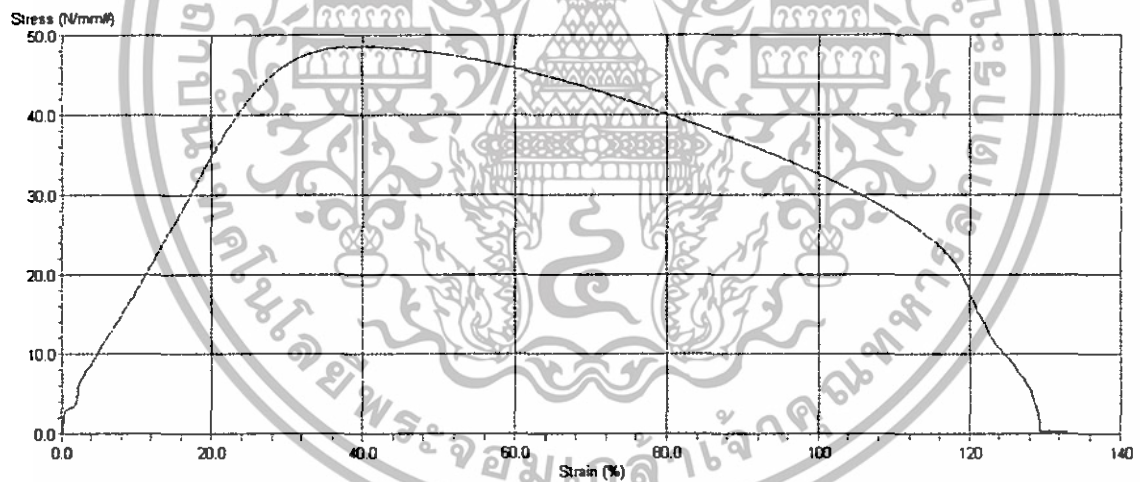
จากการทดสอบจะได้ค่า Force peak (N), Strain peak (%) และ Stress peak ( $N/mm^2$ ) คือ 5177.0 N, 40.7% และ  $42.2 N/mm^2$  ตามลำดับ

### 4.2.3. โลหะบัดกรีที่ผ่านการบ่ม 5 วัน



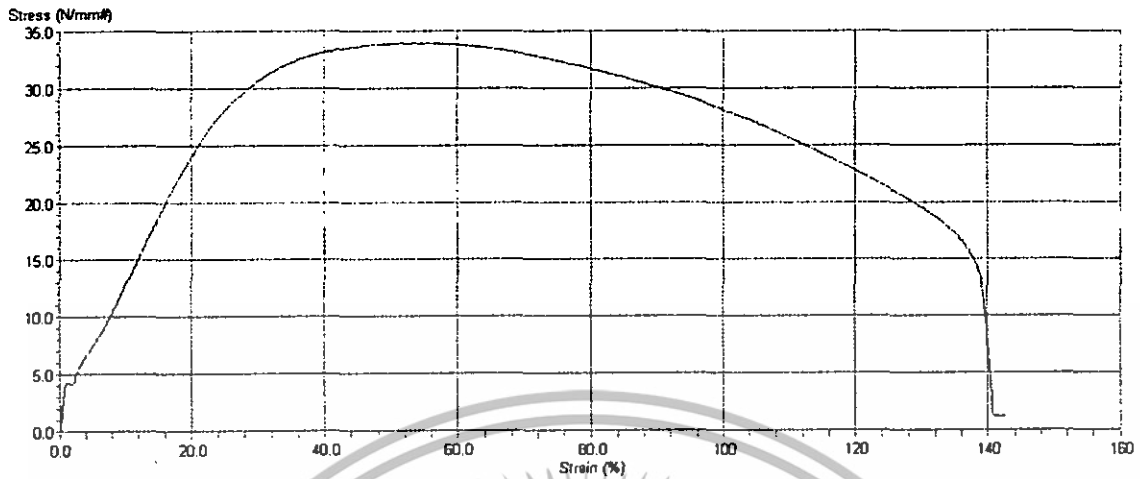
รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Stress กับ Strain ของส่วนผสม 96.5Sn-3Ag-0.5Cu

จากการทดสอบจะได้ค่า Force peak (N), Strain peak (%) และ Stress peak (N/mm<sup>2</sup>) คือ 4972.0 N, 47.3% และ 40.5 N/mm<sup>2</sup> ตามลำดับ



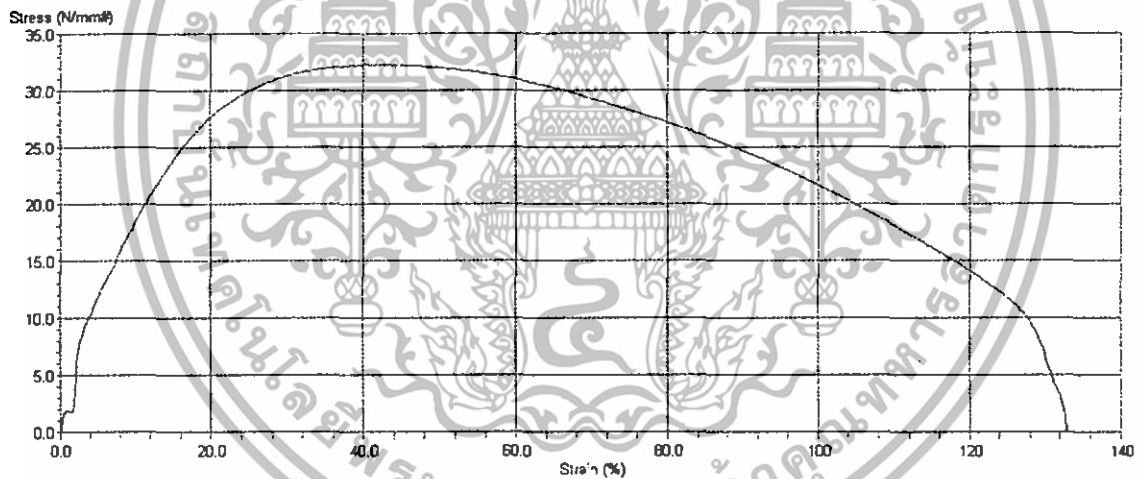
รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Stress กับ Strain ของส่วนผสม 95.8Sn-3.5Ag-0.7Cu

จากการทดสอบจะได้ค่า Force peak (N), Strain peak (%) และ Stress peak (N/mm<sup>2</sup>) คือ 5973.0 N, 39.6% และ 48.7 N/mm<sup>2</sup> ตามลำดับ



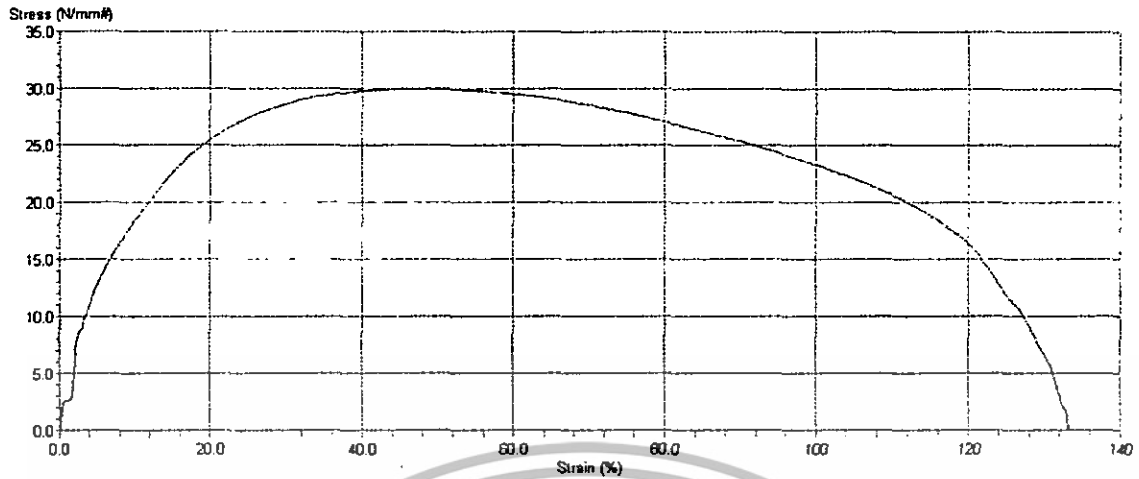
รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Stress กับ Strain ของส่วนผสม 98.3Sn-1Ag-0.7Cu

จากการทดสอบจะได้ค่า Force peak (N), Strain peak (%) และ Stress peak ( $\text{N/mm}^2$ ) คือ 4173.0 N, 51.3% และ  $34.0 \text{ N/mm}^2$  ตามลำดับ



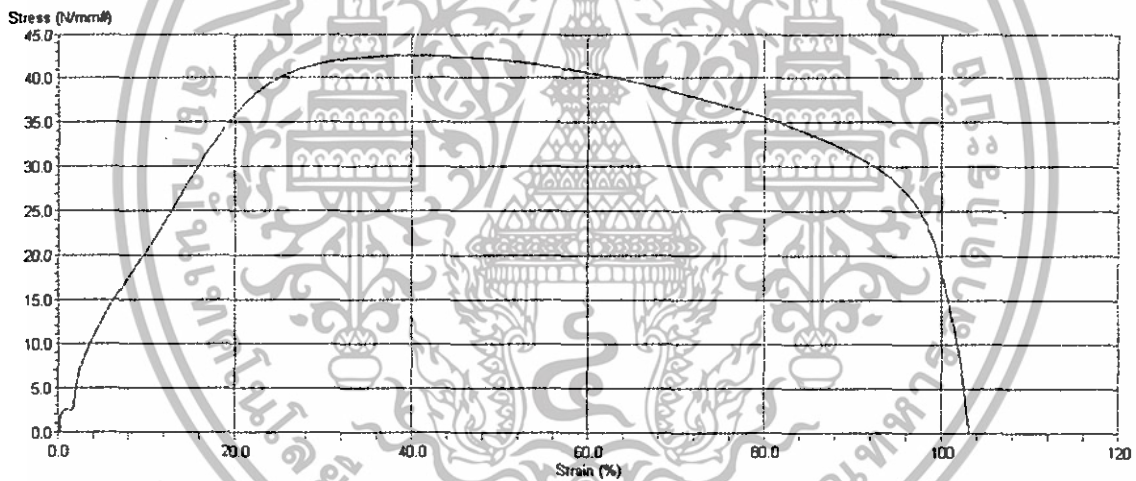
รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Stress กับ Strain ของส่วนผสม 99.3Sn-0.7Cu

จากการทดสอบจะได้ค่า Force peak (N), Strain peak (%) และ Stress peak ( $\text{N/mm}^2$ ) คือ 3980.0 N, 40.2% และ  $32.4 \text{ N/mm}^2$  ตามลำดับ



รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Stress กับ Strain ของส่วนผสม 99Sn-0.3Ag-0.7Cu

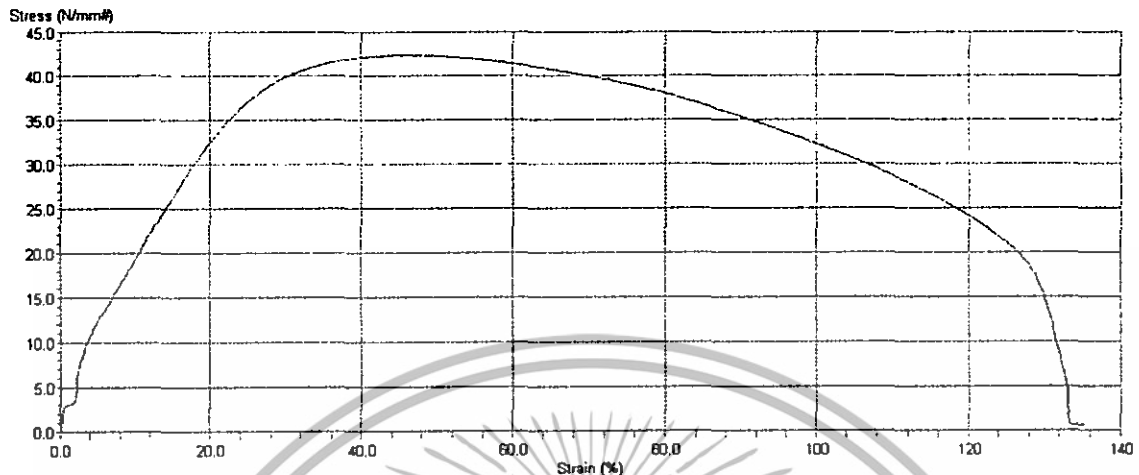
จากการทดสอบจะได้ค่า Force peak (N), Strain peak (%) และ Stress peak (N/mm<sup>2</sup>) คือ 3690.0 N, 47.1% และ 30.0 N/mm<sup>2</sup> ตามลำดับ



รูปที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Stress กับ Strain ของส่วนผสม 63Sn-37Pb

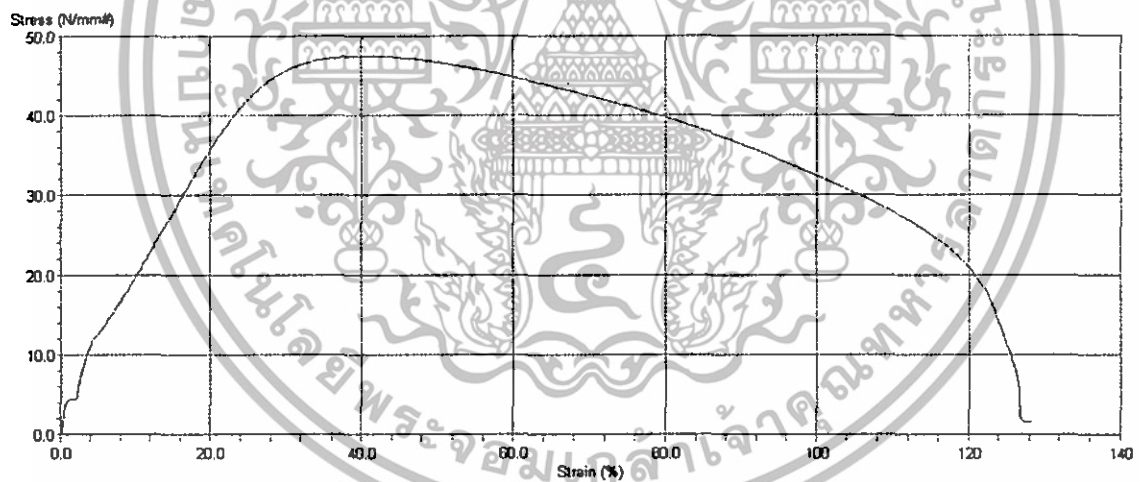
จากการทดสอบจะได้ค่า Force peak (N), Strain peak (%) และ Stress peak (N/mm<sup>2</sup>) คือ 5248.0 N, 40.5% และ 42.8 N/mm<sup>2</sup> ตามลำดับ

#### 4.2.4. โลหะบัดกรีที่ผ่านการบ่ม 7 วัน



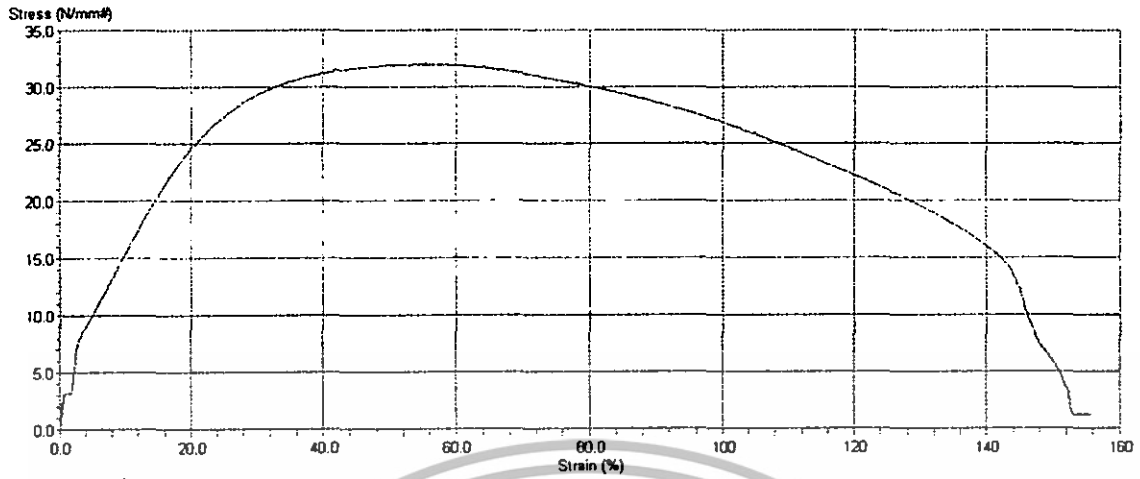
รูปที่ 4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Stress กับ Strain ของส่วนผสม 96.5Sn-3Ag-0.5Cu

จากการทดสอบจะได้ค่า Force peak (N), Strain peak (%) และ Stress peak (N/mm<sup>2</sup>) คือ 5220.0 N, 47.6% และ 42.5 N/mm<sup>2</sup> ตามลำดับ



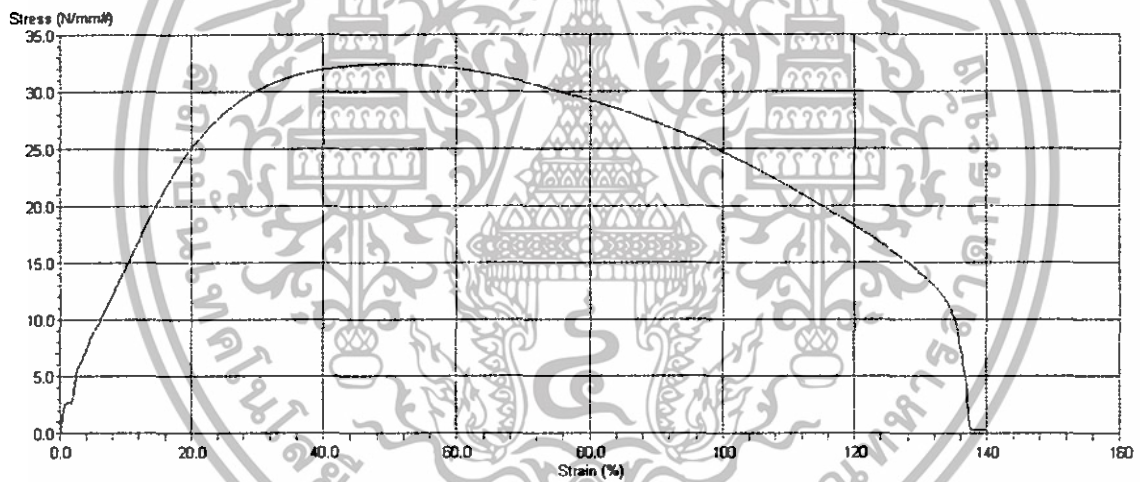
รูปที่ 4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Stress กับ Strain ของส่วนผสม 95.8Sn-3.5Ag-0.7Cu

จากการทดสอบจะได้ค่า Force peak (N), Strain peak (%) และ Stress peak (N/mm<sup>2</sup>) คือ 5842.0 N, 40.4% และ 47.6 N/mm<sup>2</sup> ตามลำดับ



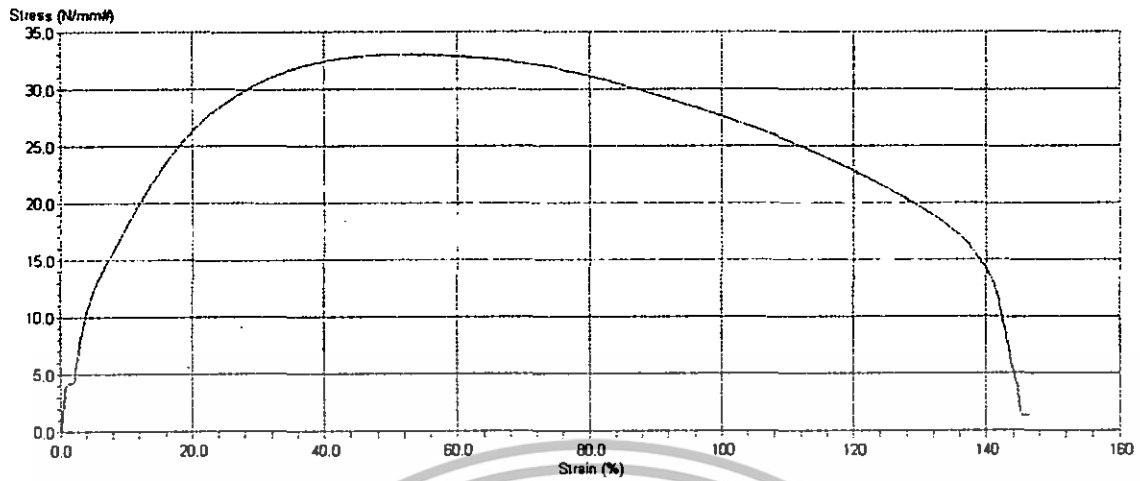
รูปที่ 4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Stress กับ Strain ของฉนวนผสม 98.3Sn-1Ag-0.7Cu

จากการทดสอบจะได้ค่า Force peak (N), Strain peak (%) และ Stress peak ( $N/mm^2$ ) คือ 3941.0 N, 55.3% และ 32.1  $N/mm^2$  ตามลำดับ



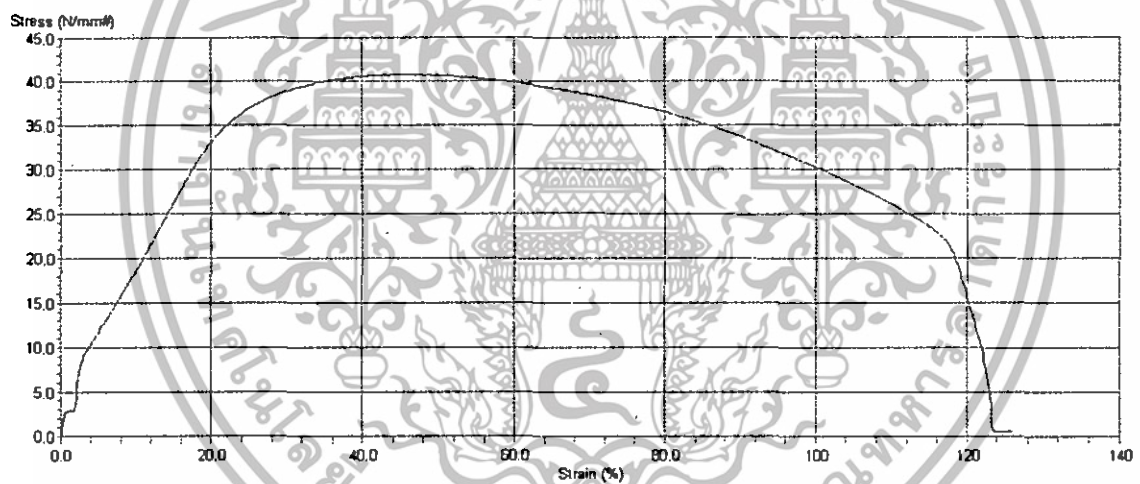
รูปที่ 4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Stress กับ Strain ของฉนวนผสม 99.3Sn-0.7Cu

จากการทดสอบจะได้ค่า Force peak (N), Strain peak (%) และ Stress peak ( $N/mm^2$ ) คือ 3991.0 N, 51.0% และ 32.5  $N/mm^2$  ตามลำดับ



รูปที่ 4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Stress กับ Strain ของส่วนผสม 99Sn-0.3Ag-0.7Cu

จากการทดสอบจะได้ค่า Force peak (N), Strain peak (%) และ Stress peak (N/mm<sup>2</sup>) คือ 4065.0 N, 53.0% และ 33.1 N/mm<sup>2</sup> ตามลำดับ



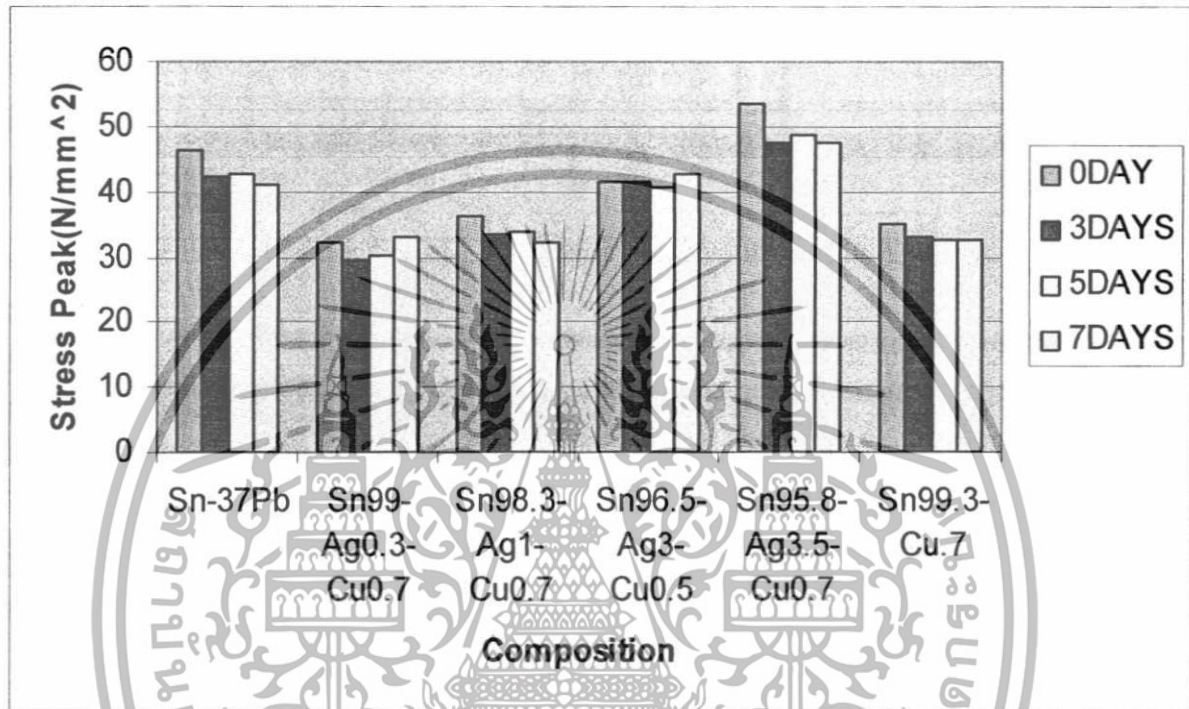
รูปที่ 4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Stress กับ Strain ของส่วนผสม 63Sn-37Pb

จากการทดสอบจะได้ค่า Force peak (N), Strain peak (%) และ Stress peak (N/mm<sup>2</sup>) คือ 5028.0 N, 44.6% และ 41.0 N/mm<sup>2</sup> ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.5 สรุปผลจากการทดสอบค่า Tensile strength

เครื่องทดสอบค่า Tensile strength สามารถให้ผลมาทั้งหมด 3 ค่า ได้แก่ ค่า Force peak, Strain peak และ Stress peak พร้อมกับกราฟความสัมพันธ์ของ Force-elongate กับ Stress-strain ซึ่งค่า Tensile strength สามารถหาได้จากกราฟ Stress-strain จากจุดที่มีค่า Stress สูงสุด โดยสามารถสรุปให้เห็นเป็นรูปแบบของกราฟได้ดังนี้



รูปที่ 4.26 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Stress peak เทียบกับลวดบัดกรีแต่ละส่วนผสม ที่ผ่านการบ่มในเวลาต่างกัน

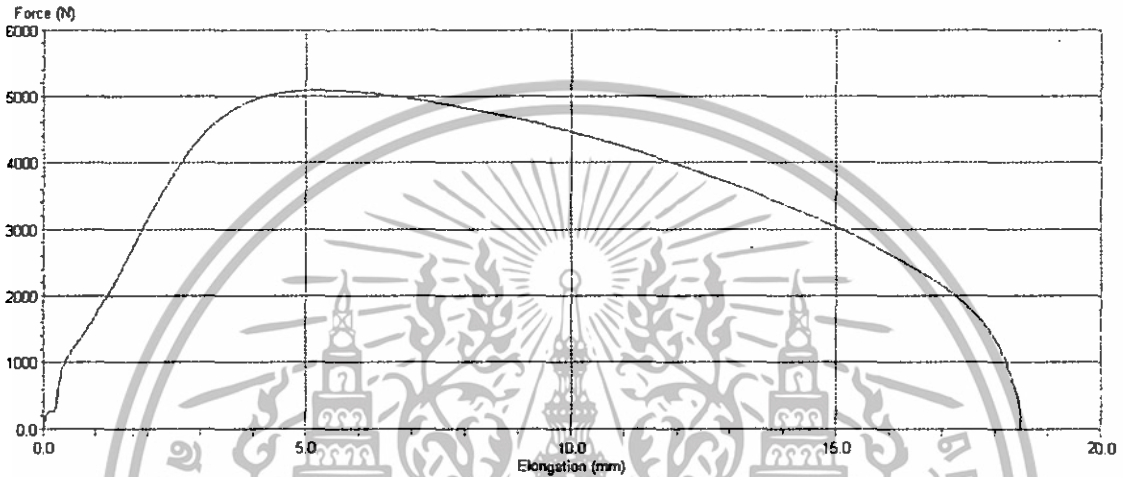
สำหรับโลหะบัดกรีตระกูล SAC ถ้าเริ่มมองจากภาพรวมเป็นที่แน่นอนว่าโลหะบัดกรีตระกูล SAC แนวโน้มนั้นจะขึ้นอยู่กับปริมาณโลหะเงิน (Ag) ที่อยู่ในส่วนประกอบ โดยภาพรวมจะเรียงจากค่า Tensile strength มากไปน้อยตามปริมาณของโลหะเงินตามลำดับ แต่ถ้ามองในเรื่องของค่า Tensile strength จากการบ่มในแต่ละวันแล้วจะพบว่าโลหะบัดกรีที่ไม่ทำการบ่มเลยจะให้ค่า Tensile strength ที่สูงที่สุดถ้าทำการเทียบกับวันอื่นๆ ในการบ่ม

สำหรับโลหะบัดกรีส่วนประกอบ Sn-37Pb กับ Sn99.3-Cu0.7 จะเห็น ได้ชัดเจนว่าการไม่ทำการบ่มจะให้ค่า Tensile strength ที่สูงกว่าอย่างชัดเจน

### 4.3. ผลค่า Elongation ของโลหะบัดกรี

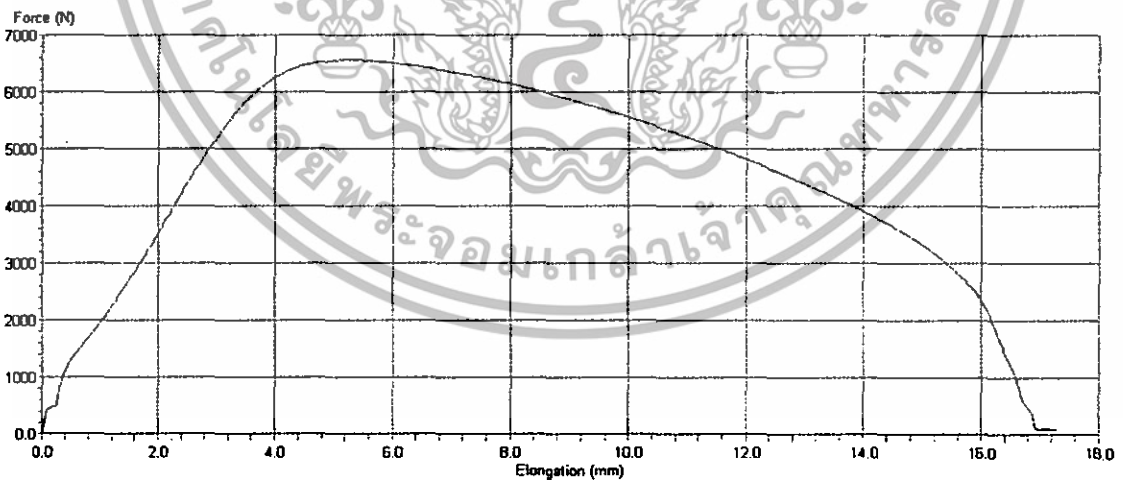
ในการทดสอบค่า Tensile strength ของโลหะบัดกรี การประมวลผลนอกจากจะเป็นกราฟระหว่าง Stress กับ Strain แล้ว เครื่องทดสอบค่า Tensile strength ยังสามารถประมวลผลเป็นกราฟระหว่างค่า Force กับ Elongation ได้เช่นกัน ซึ่งมีผลดังนี้

#### 4.3.1 โลหะบัดกรีที่ไม่ผ่านการบ่ม



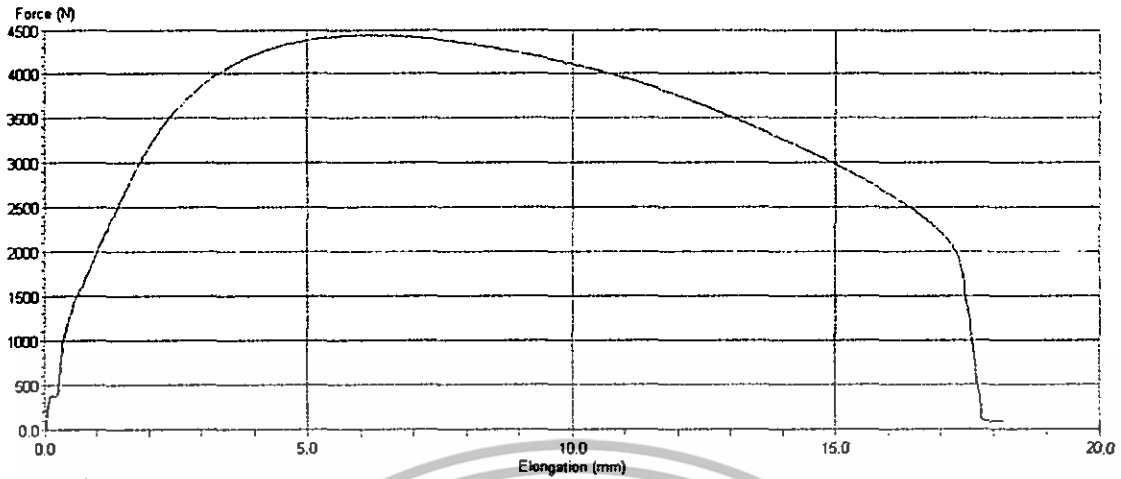
รูปที่ 4.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Force กับ Elongation ของส่วนผสม 96.5Sn-3Ag-0.5Cu

จากการทดสอบจะได้ค่า Elongation คือ 18.5 มิลลิเมตร



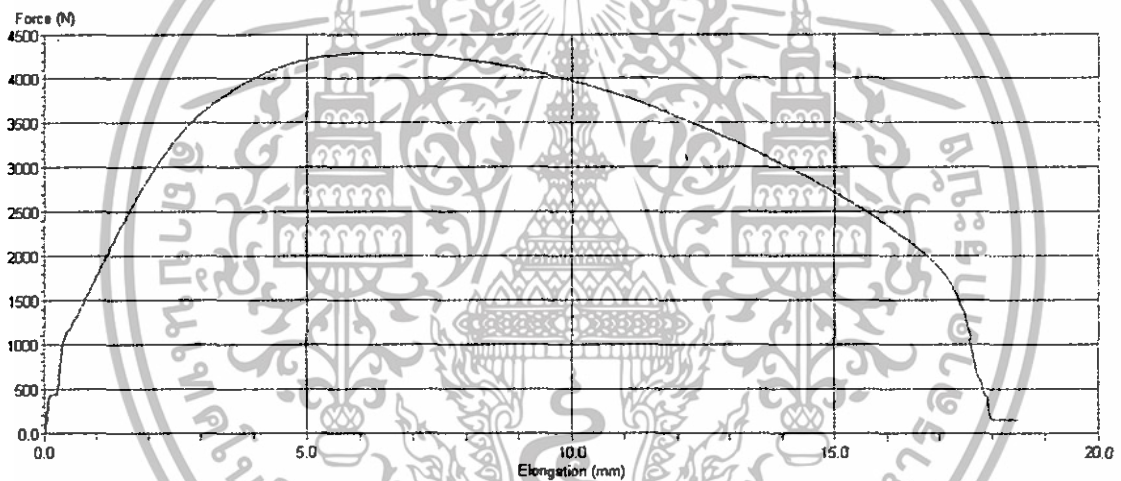
รูปที่ 4.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Force กับ Elongation ของส่วนผสม 95.8Sn-3.5Ag-0.7Cu

จากการทดสอบจะได้ค่า Elongation คือ 17 มิลลิเมตร



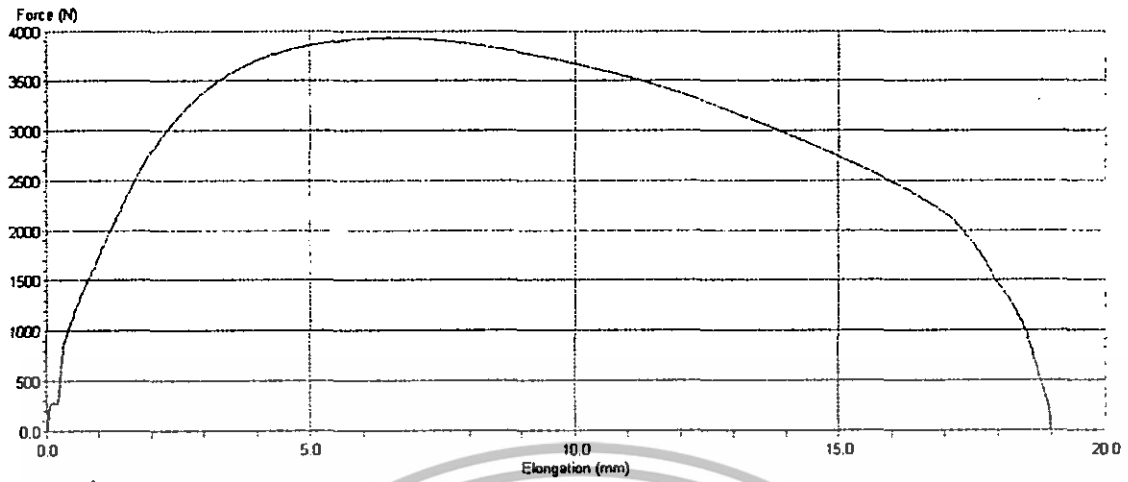
รูปที่ 4.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Force กับ Elongation ของส่วนผสม 98.3Sn-1Ag-0.7Cu

จากการทดสอบจะได้ค่า Elongation คือ 17.8 มิลลิเมตร



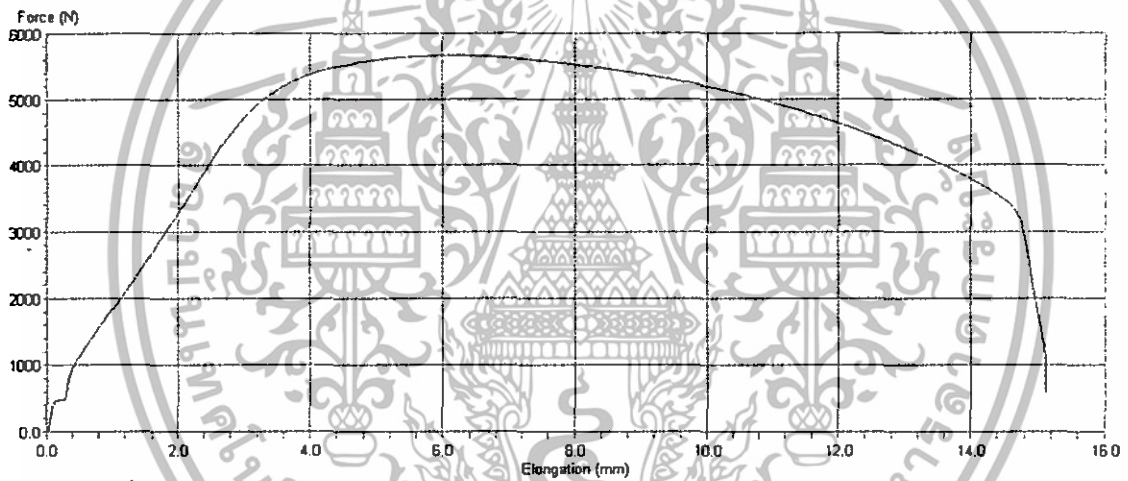
รูปที่ 4.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Force กับ Elongation ของส่วนผสม 99.3Sn-0.7Cu

จากการทดสอบจะได้ค่า Elongation คือ 18 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Force กับ Elongation ของส่วนผสม 99Sn-0.3Ag-0.7Cu

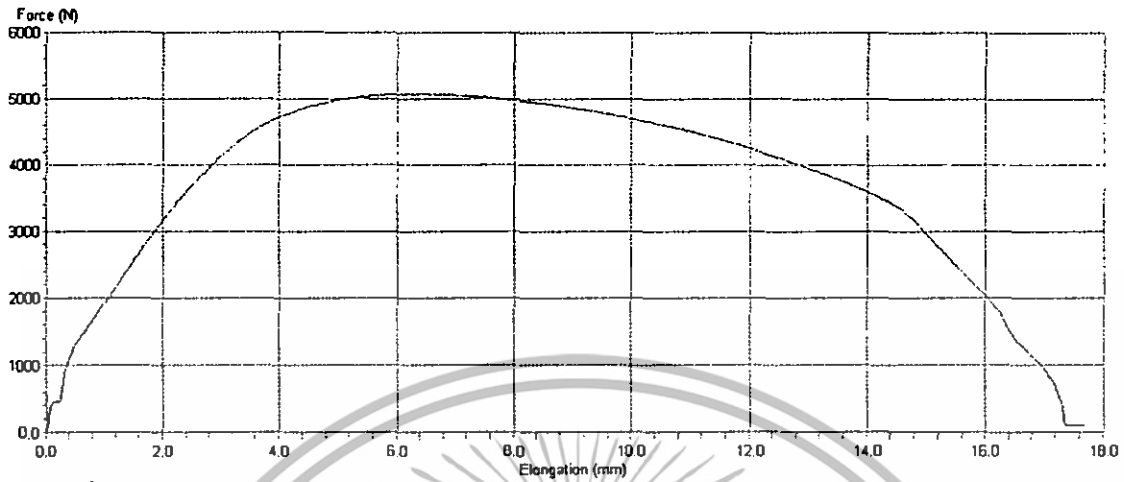
จากการทดสอบจะได้ค่า Elongation คือ 19 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Force กับ Elongation ของส่วนผสม 63Sn-37Pb

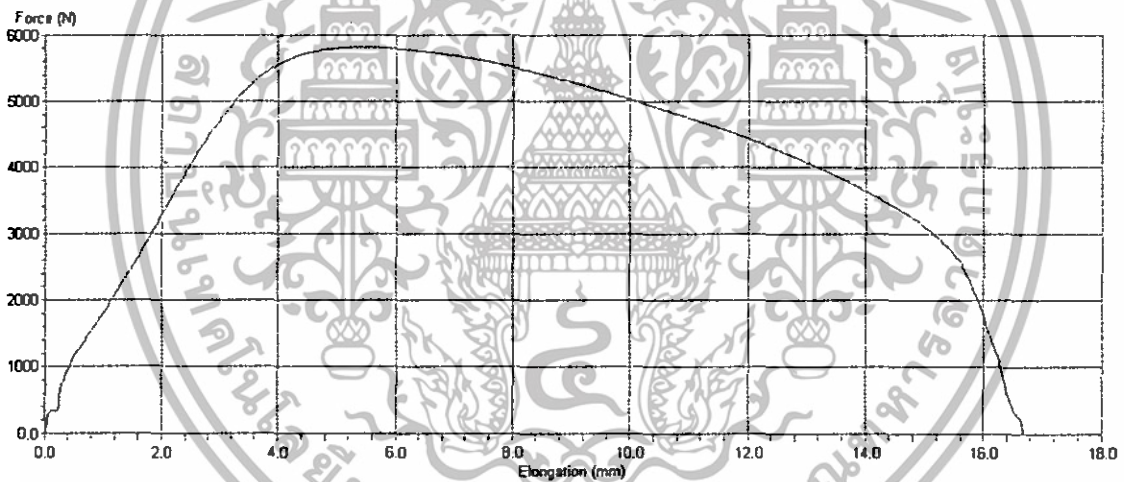
จากการทดสอบจะได้ค่า Elongation คือ 17.2 มิลลิเมตร

### 4.3.2 โลหะบัดกรีที่ผ่านการบ่ม 3 วัน



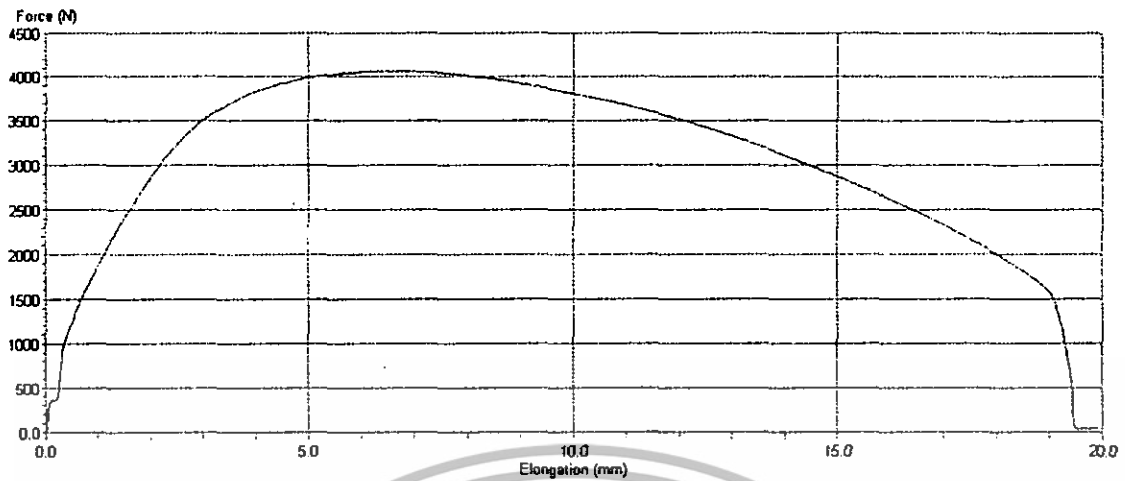
รูปที่ 4.33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Force กับ Elongation ของส่วนผสม 96.5Sn-3Ag-0.5Cu

จากการทดสอบจะได้ค่า Elongation คือ 17.4 มิลลิเมตร



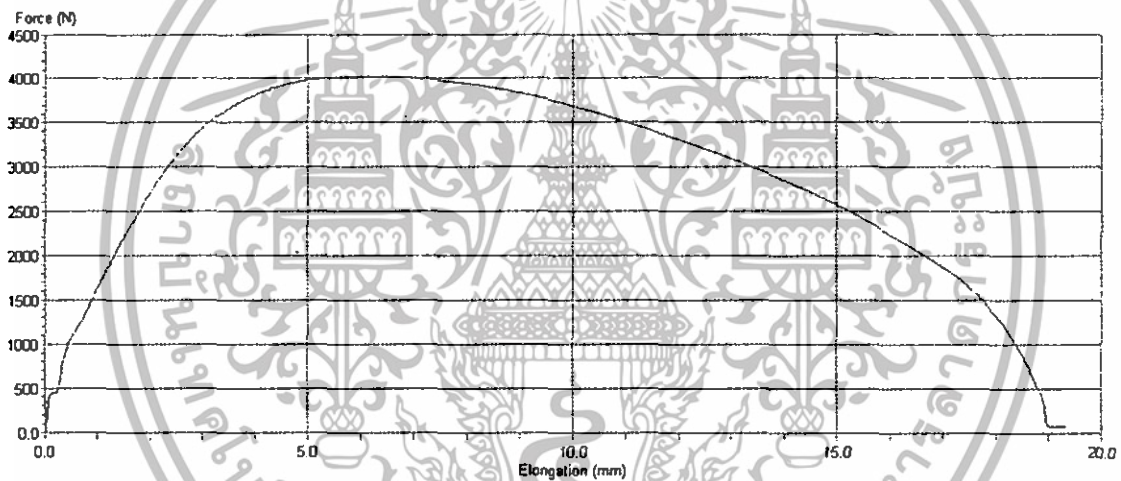
รูปที่ 4.34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Force กับ Elongation ของส่วนผสม 95.8Sn-3.5Ag-0.7Cu

จากการทดสอบจะได้ค่า Elongation คือ 16.65 มิลลิเมตร



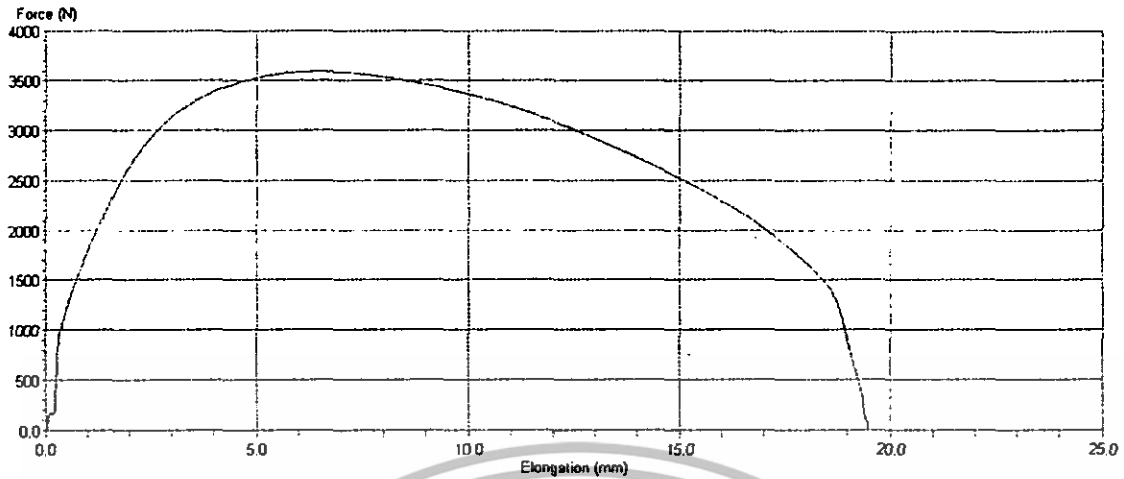
รูปที่ 4.35 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Force กับ Elongation ของส่วนผสม 98.3Sn-1Ag-0.7Cu

จากการทดสอบจะได้ค่า Elongation คือ 19.5 มิลลิเมตร



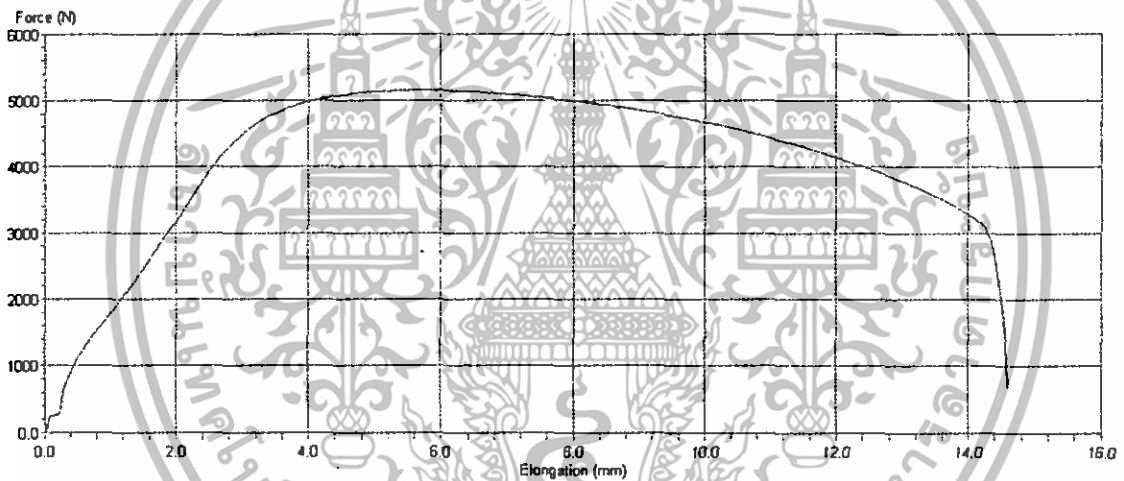
รูปที่ 4.36 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Force กับ Elongation ของส่วนผสม 99.3Sn-0.7Cu

จากการทดสอบจะได้ค่า Elongation คือ 19 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.37 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Force กับ Elongation ของส่วนผสม 99Sn-0.3Ag-0.7Cu

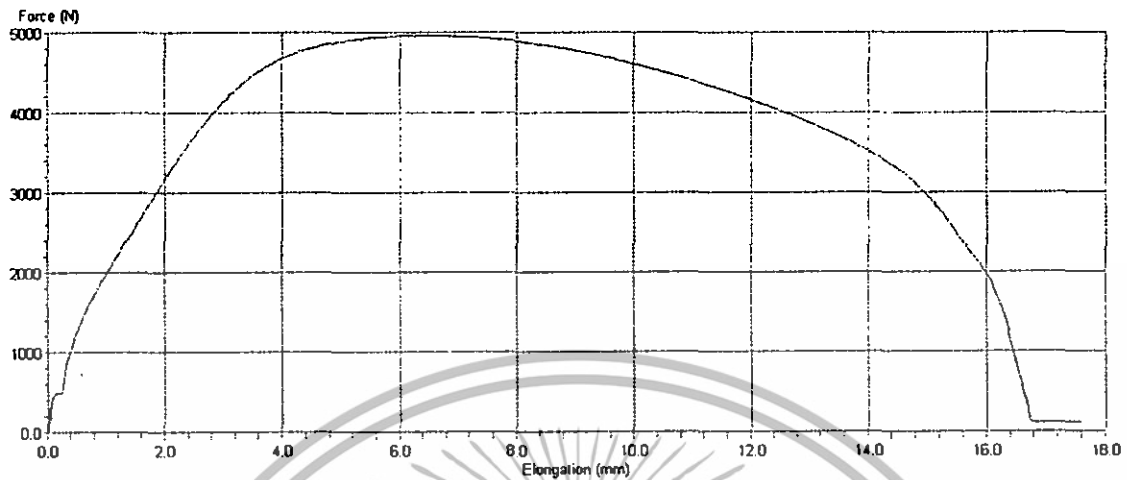
จากการทดสอบจะได้ค่า Elongation คือ 19 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.38 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Force กับ Elongation ของส่วนผสม 63Sn-37Pb

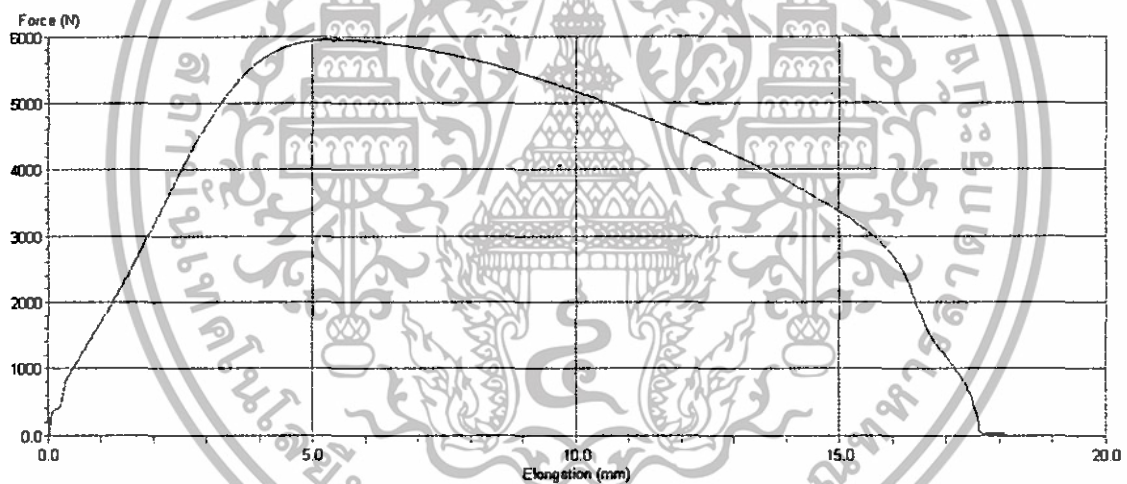
จากการทดสอบจะได้ค่า Elongation คือ 14.6 มิลลิเมตร

### 4.3.3. โลหะบัดกรีที่ผ่านการบ่ม 5 วัน



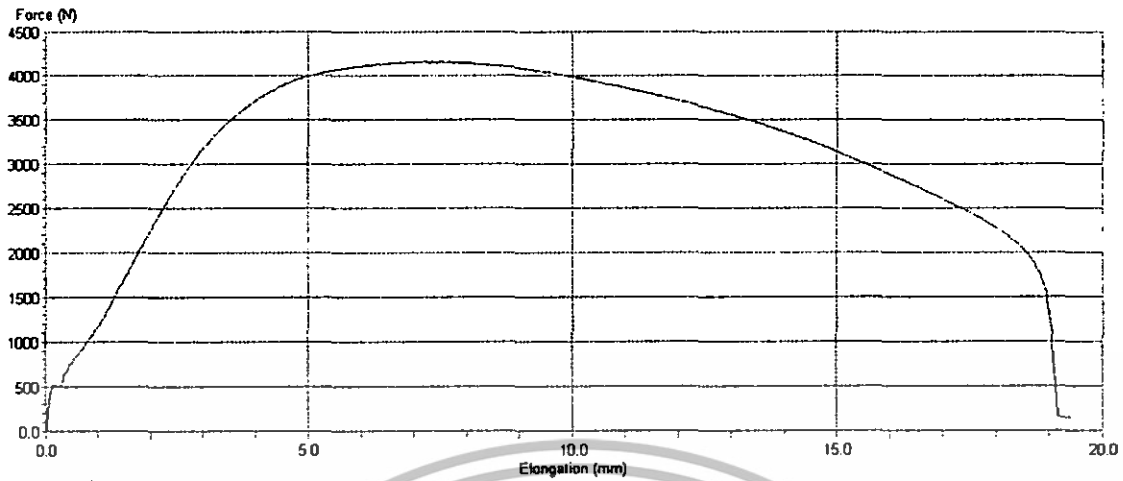
รูปที่ 4.39 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Force กับ Elongation ของส่วนผสม 96.5Sn-3Ag-0.5Cu

จากการทดสอบจะได้ค่า Elongation คือ 16.8 มิลลิเมตร



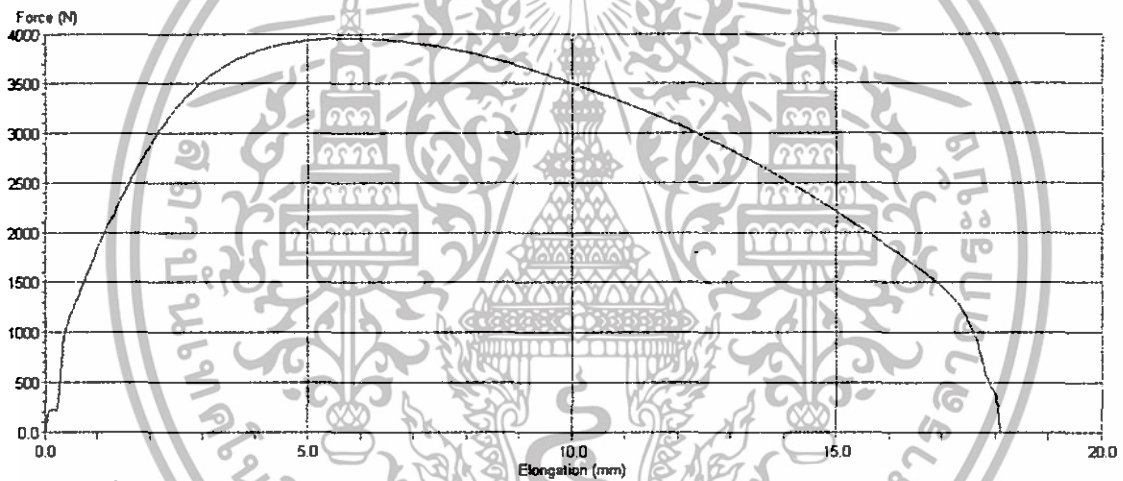
รูปที่ 4.40 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Force กับ Elongation ของส่วนผสม 95.8Sn-3.5Ag-0.7Cu

จากการทดสอบจะได้ค่า Elongation คือ 17.7 มิลลิเมตร



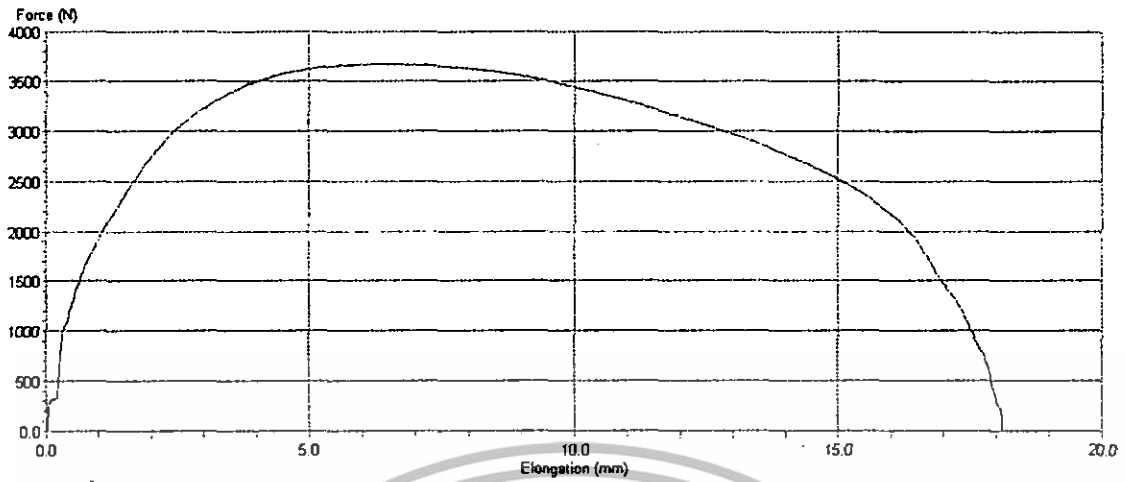
รูปที่ 4.41 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Force กับ Elongation ของส่วนผสม 98.3Sn-1Ag-0.7Cu

จากการทดสอบจะได้ค่า Elongation คือ 19.2 มิลลิเมตร



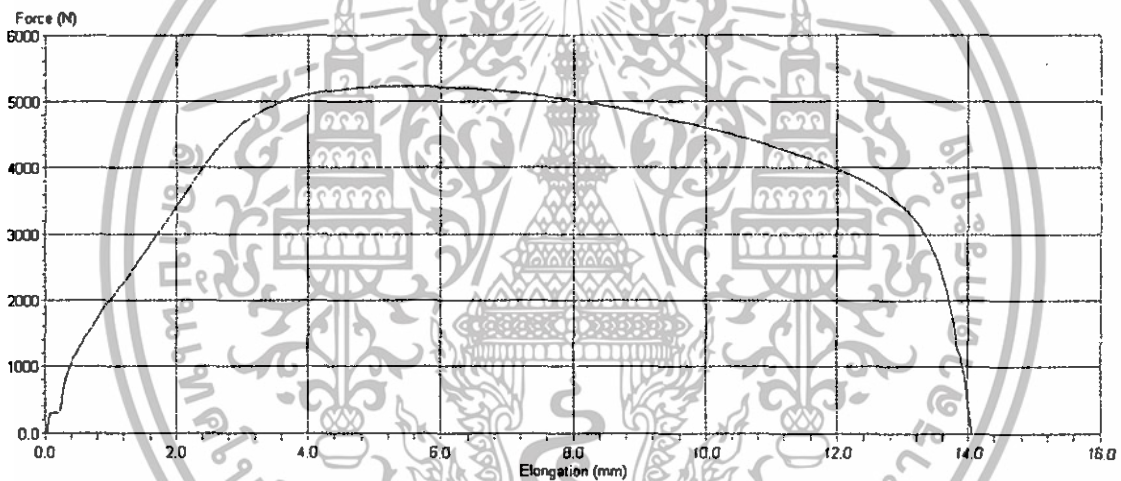
รูปที่ 4.42 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Force กับ Elongation ของส่วนผสม 99.3Sn-0.7Cu

จากการทดสอบจะได้ค่า Elongation คือ 18.1 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.43 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Force กับ Elongation ของส่วนผสม 99Sn-0.3Ag-0.7Cu

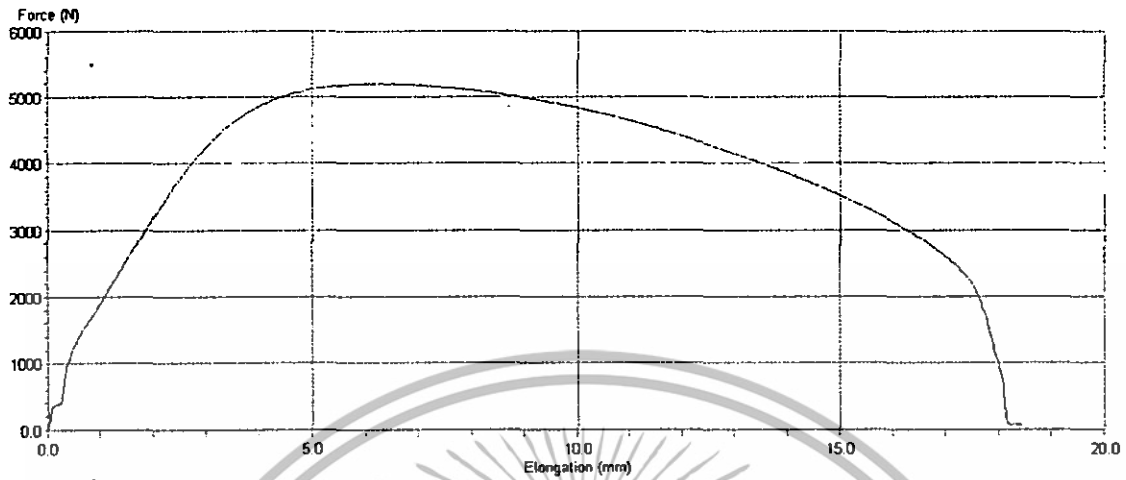
จากการทดสอบจะได้ค่า Elongation คือ 18.1 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.44 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Force กับ Elongation ของส่วนผสม 63Sn-37Pb

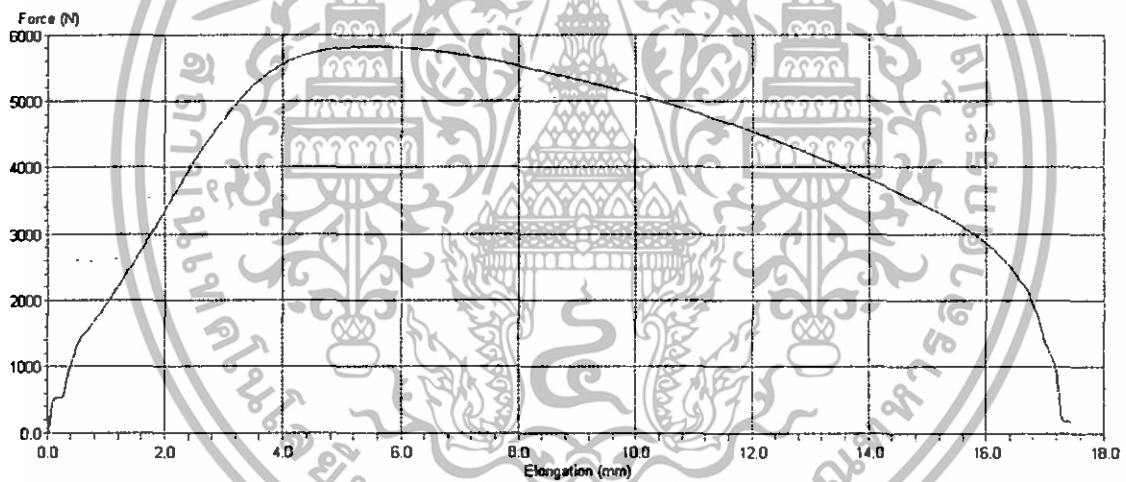
จากการทดสอบจะได้ค่า Elongation คือ 14 มิลลิเมตร

#### 4.3.4. โลหะบัดกรีที่ผ่านการบ่ม 7 วัน



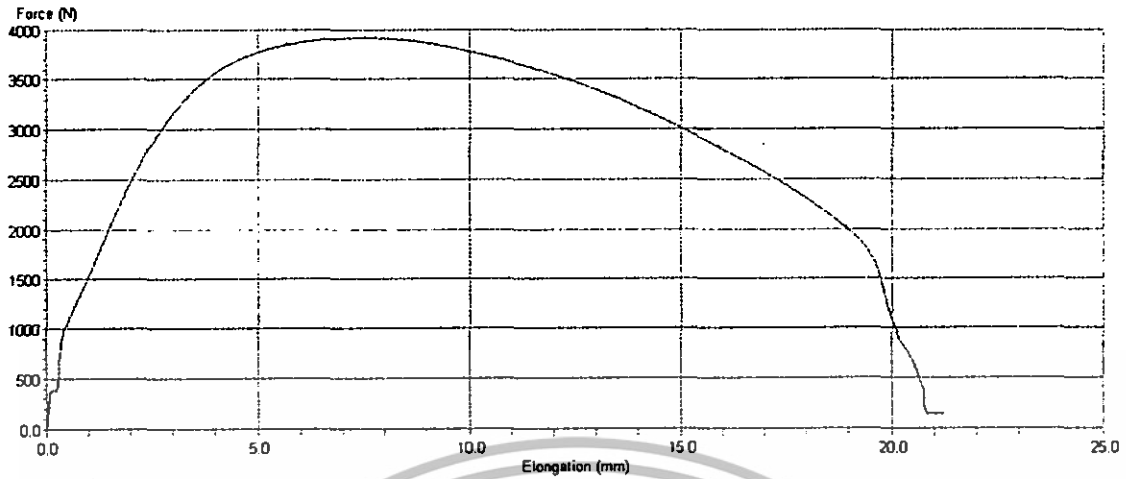
รูปที่ 4.45 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Force กับ Elongation ของส่วนผสม 96.5Sn-3Ag-0.5Cu

จากการทดสอบจะได้ค่า Elongation คือ 18.2 มิลลิเมตร



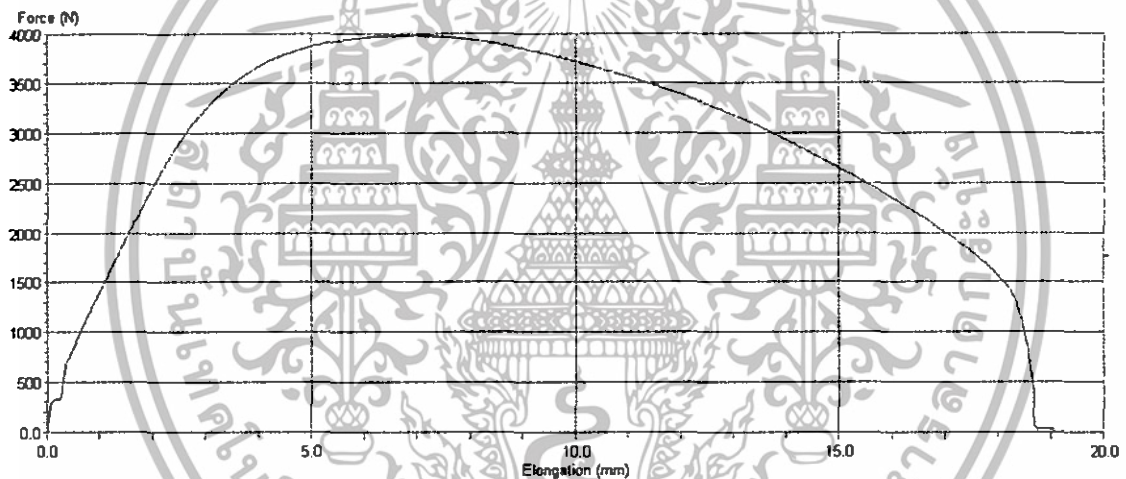
รูปที่ 4.46 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Force กับ Elongation ของส่วนผสม 95.8Sn-3.5Ag-0.7Cu

จากการทดสอบจะได้ค่า Elongation คือ 17.2 มิลลิเมตร



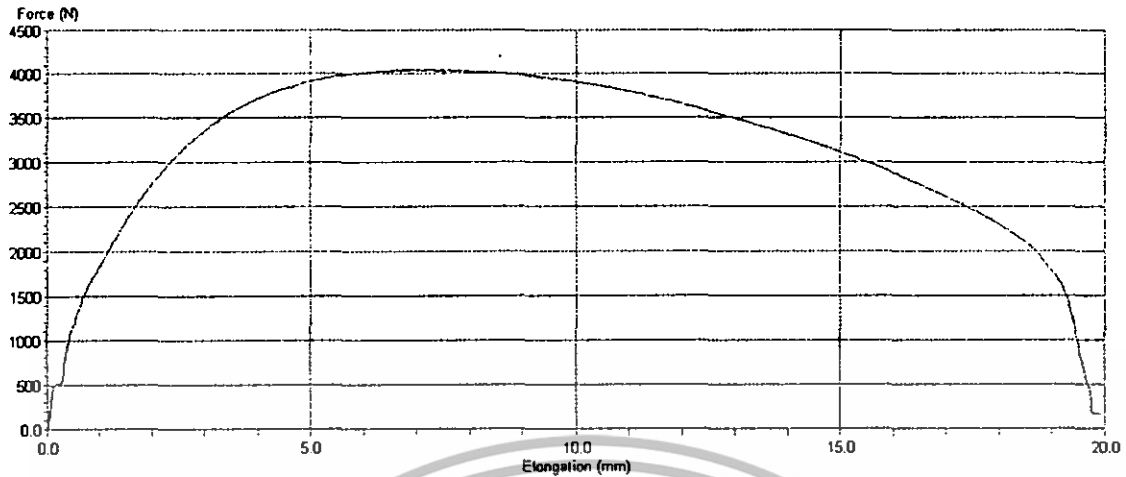
รูปที่ 4.47 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Force กับ Elongation ของส่วนผสม 98.3Sn-1Ag-0.7Cu

จากการทดสอบจะได้ค่า Elongation คือ 20.4 มิลลิเมตร



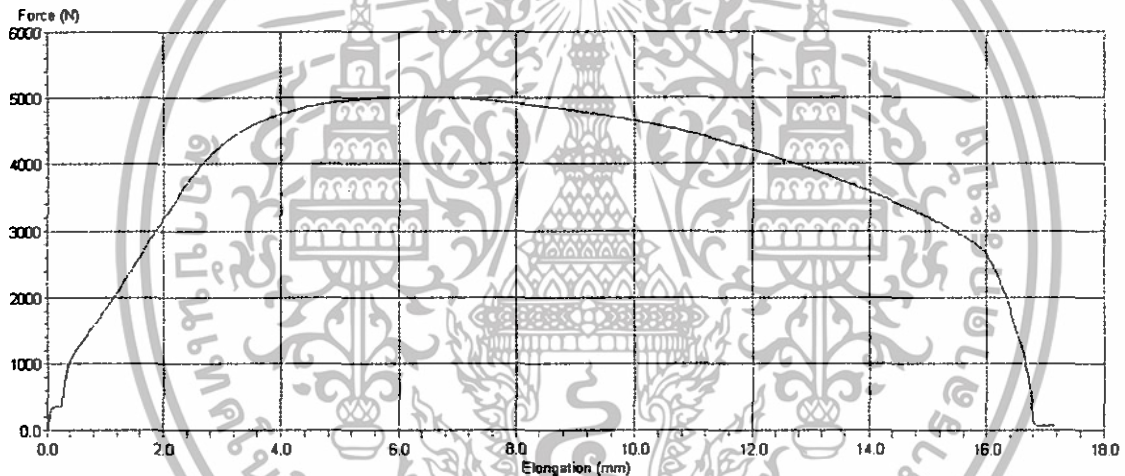
รูปที่ 4.48 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Force กับ Elongation ของส่วนผสม 99.3Sn-0.7Cu

จากการทดสอบจะได้ค่า Elongation คือ 18.8 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.49 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Force กับ Elongation ของส่วนผสม 99Sn-0.3Ag-0.7Cu

จากการทดสอบจะได้ค่า Elongation คือ 19.8 มิลลิเมตร

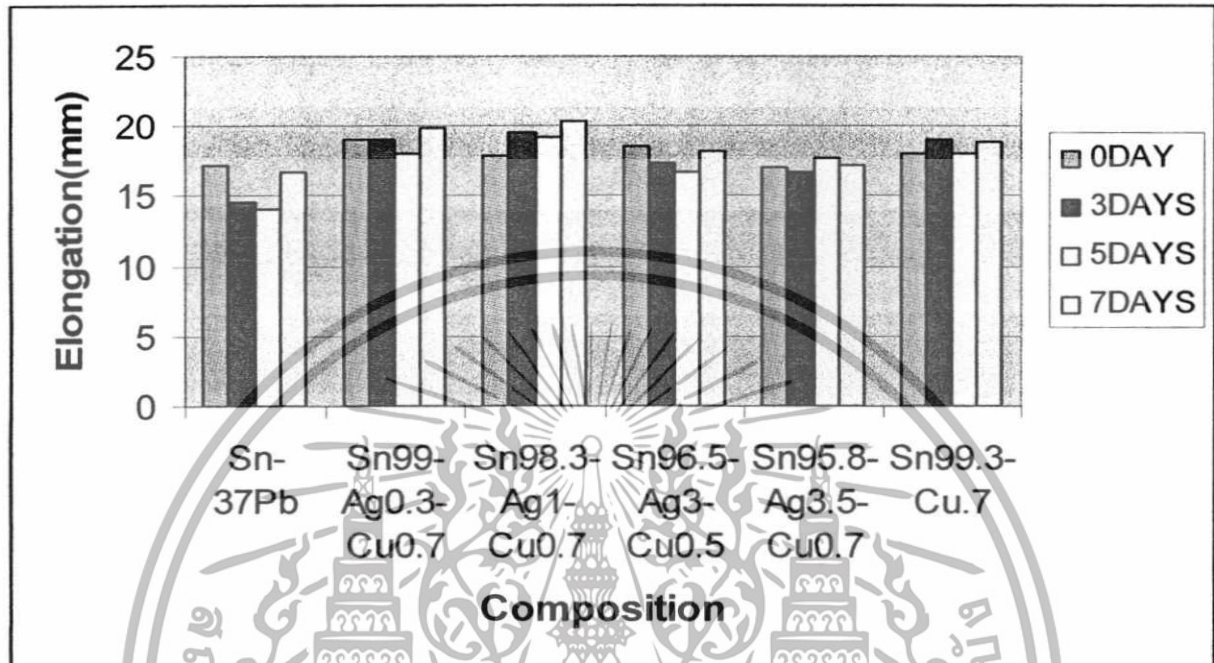


รูปที่ 4.50 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Force กับ Elongation ของส่วนผสม 63Sn-37Pb

จากการทดสอบจะได้ค่า Elongation คือ 16.8 มิลลิเมตร

#### 4.3.5 สรุปผลจากการทดสอบค่า Elongation

จากการเก็บผลค่า Elongation ข้างต้น สามารถนำมาเขียนสรุปเป็นกราฟได้ดังนี้



รูปที่ 4.51 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Elongation เทียบกับเวลาบัดกรีแต่ละส่วนผสม ที่ผ่านการบ่มเป็นเวลาต่างกัน

ผลที่ได้จากค่า Elongation จะเห็นว่าภาพรวมของทุกส่วนผสมนั้นมีค่าใกล้เคียงกัน แต่ถ้ามองเปรียบเทียบจำนวนวันที่ทำการบ่มนั้นจะพบว่าส่วนมากแล้ว โลหะบัดกรีที่ทำการบ่มเป็นเวลา 7 วัน จะมีแนวโน้มที่ให้ค่า Elongation ที่สูงที่สุด ถ้าเทียบกับการบ่ม 0, 3 และ 5 วัน แต่ถ้ามองในด้านของส่วนประกอบของโลหะบัดกรีแล้ว จะพบว่า ในกรณีของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วตระกูล SAC นั้น สรุปจากแนวโน้มผลการทดลองคือ การที่มีปริมาณส่วนผสมเงินที่ต่ำนั้น จะทำให้มีค่า Elongation ที่สูงกว่าโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วตระกูล SAC ที่มีปริมาณเงินเป็นส่วนประกอบสูง

ส่วนโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วส่วนผสม 99.3Sn-0.7Cu จากการทำการเปรียบเทียบค่า Elongation ของโลหะบัดกรีที่ทำการบ่มตามจำนวนวันที่กำหนดแล้ว จะได้ว่า Elongation ที่ใกล้เคียงกัน ส่วนโลหะบัดกรีส่วนผสม Sn-37Pb จะพบว่าการที่ไม่ทำการบ่มกับทำการบ่มเป็นเวลา 7 วันจะให้ค่า Elongation ที่สูงใกล้เคียงกัน และมีค่าสูงกว่ากรณีที่ทำการบ่ม 3 กับ 5 วัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

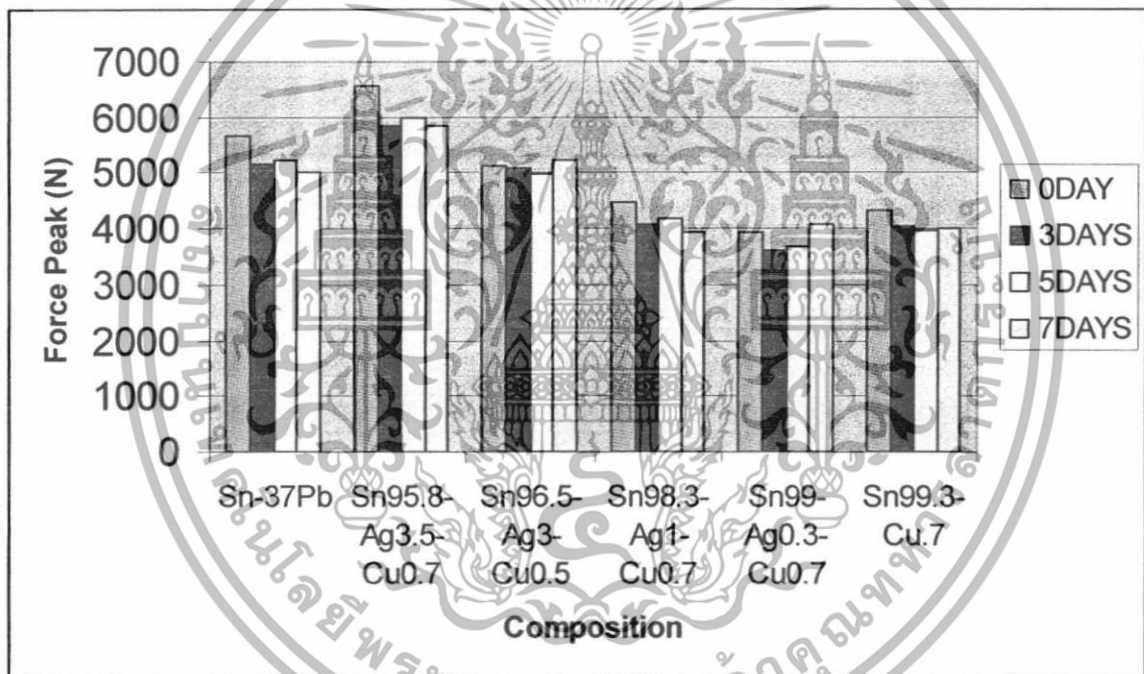
## เอกสารอ้างอิง

- รศ.แมน อมรสิทธิ์ และ ผศ.ดร.สมชัย อัครทิวา, 2546. วัสดุวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : บริษัท สำนักพิมพ์ท็อป จำกัด.
- นริศ ศรีเมฆ และคณะ, 2540. โลหะวิทยา. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : บริษัท สกายบุ๊กส์ จำกัด
- เสกศักดิ์ อัสวะวิสิทธิ์ชัย, 2550. การทดสอบแรงดึง. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์จุฬาฯ
- คณัฏ กิจชัยนุกูล, 2547. เรื่อนำร่องของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : ห้างหุ้นส่วนจำกัด โรงพิมพ์ชวนพิมพ์
- Qiang, X., Luu, N. and William, D.A., 2003. Aging and Creep Behavior of Sn3.9Ag0.6Cu Solder Alloy. Journal of alloy and compound : University of Wyoming
- National Institute of Standards and Technology, 2002. Test Procedures for Developing Solder Data. WASHINGTON : U.S. GOVERNMENT PRINTING OFFICE
- Erinc, M., Scheurs, P.J.G. and Geers, M.G.D., Microstructure and Fracture Modes in Sn-Ag-Cu Solder Alloy. Journal of alloy : Eindhoven University of Technology,
- [www.dss.go.th/dssweb/st-articles/files/pep\\_2\\_2545\\_tensil\\_test.pdf](http://www.dss.go.th/dssweb/st-articles/files/pep_2_2545_tensil_test.pdf)
- [www.isit.or.th/techinfoview.asp?lnk=/object/1000000000/HardnessTest.htm](http://www.isit.or.th/techinfoview.asp?lnk=/object/1000000000/HardnessTest.htm)
- [www.lecturer.eng.chula.ac.th](http://www.lecturer.eng.chula.ac.th)
- [www.geocities.com/jitrayut/rhumidity.html](http://www.geocities.com/jitrayut/rhumidity.html)

## ภาคผนวก

การทดสอบค่า Tensile strength นอกจากจะให้ค่า Stress peak (Tensile strength) ที่ได้กล่าวสรุปไว้ในข้างต้นแล้ว เครื่องทดสอบยังสามารถให้ค่าอีกสองค่าคือ ค่า Force peak และ Strain peak ซึ่งในผลแต่ละชนิด สามารถสรุปได้ดังนี้

### 1. Force peak

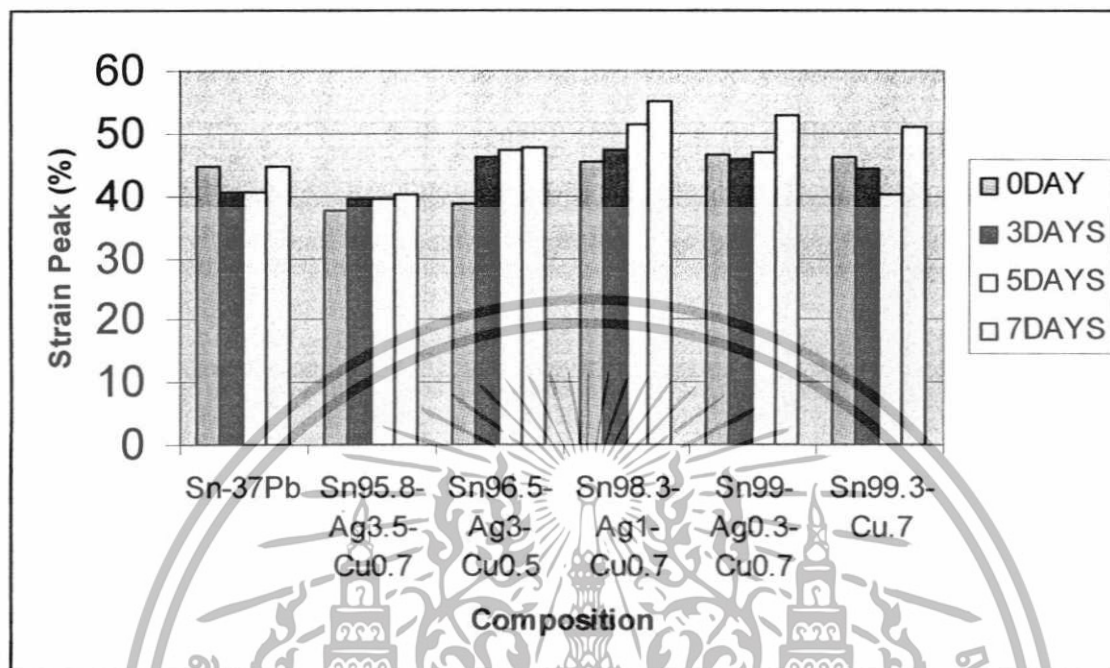


รูปที่ ผ1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Force peak เทียบกับโลหะบัดกรีแต่ละส่วนผสม ที่ผ่านการบ่มในเวลาที่ต่างกัน

จะเห็นได้ว่าปริมาณส่วนผสมของโลหะบัดกรียังมีอิทธิพลอย่างมากในภาพรวมของโลหะบัดกรีตระกูล SAC ซึ่งมีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับค่าความแข็งแรงกล่าวคือถ้ามองกันในภาพรวมแล้วปริมาณของ โลหะเงิน (Ag) ที่มีอยู่ในโลหะบัดกรี จะให้ค่า Force peak ที่สูงกว่าโลหะบัดกรีที่มีปริมาณของโลหะเงินที่ลดลงตามลำดับ ต่อมาถ้าพิจารณาถึงระยะเวลาในการบ่มนั้นจะพบว่าโลหะบัดกรีตระกูล SAC การที่ไม่ทำการบ่มเลยจะให้ค่า Force peak ที่สูงสุด ซึ่งรวมถึงส่วนผสม Sn 99.3/0.7Cu กับ Sn/37Pb เช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. Strain peak



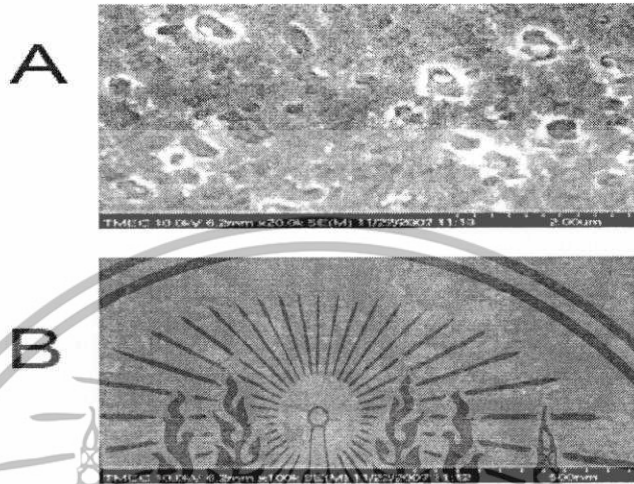
รูปที่ ๒2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Strain peak เทียบกับโลหะบัดกรีแต่ละส่วนผสม ที่ผ่านการบ่มในเวลาที่แตกต่างกัน

สำหรับค่า Strain peak ดึงมองในภาพรวมแล้วจะเห็น ได้ชัดเจนว่า การบ่มที่ระยะเวลา 7 วัน จะให้ค่า Strain peak มากที่สุดของทุกส่วนผสมของโลหะบัดกรี โดยที่ในตระกูล SAC จะเห็นว้ยิ่งเวลาในการบ่มมาก ก็จะทำให้ค่า ของ Strain peak มีค่าที่สูงตาม ไปด้วย สำหรับ โลหะบัดกรีส่วนผสม Sn 99.3/0.7Cu กับ Sn/37Pb ทั้ง 2 ส่วนผสมนี้ จะให้ แนวโน้มค่า Strain peak ที่คล้ายกันกล่าวคือ เวลาบ่มที่ให้ค่า Strain peak มากสุดคือ 7 วัน และเวลาบ่มที่ให้ค่า Strain peak น้อยสุดคือ 5 วัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3. ผลการทดสอบจากเครื่อง EDX ที่สถาบัน TMEC

จากการศึกษาจุลโครงสร้างที่สถาบัน TMEC นอกจากจะทำการทดสอบโลหะบัดกรีด้วยเครื่อง SEM เพื่อศึกษาโครงสร้างแล้ว ยังทำการศึกษาปริมาณร้อยละของธาตุจากเครื่อง EDX โดยเทียบความแตกต่างปริมาณของธาตุจากเฟสที่แตกต่างกันโดยให้ผลดังนี้



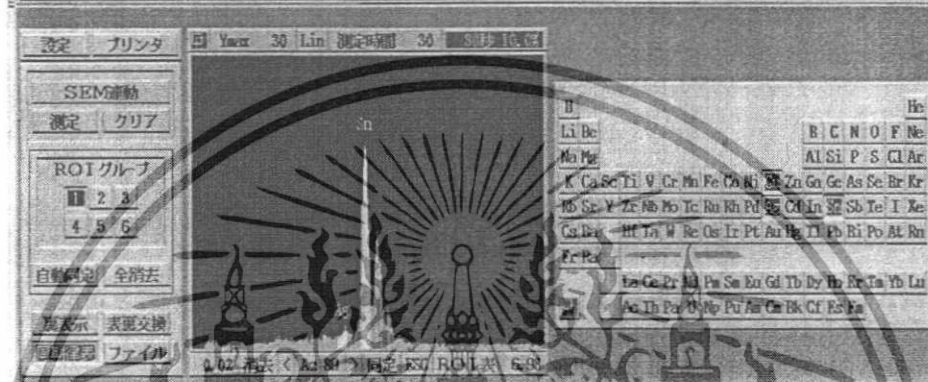
รูป ผ3 จุลโครงสร้างเฟส Sn-Matrix ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วตระกูล SAC ส่วนผสม 96.5Sn/3Ag/0.5Cu โดยรูป A มีกำลังขยาย 20000 เท่า และรูป B มีกำลังขยาย 100000 เท่า



รูป ผ4 ผลจากเครื่อง EDX บอกถึงปริมาณส่วนผสมเฟส Sn-Matrix ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วตระกูล SAC ส่วนผสม 96.5Sn/3Ag/0.5Cu

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



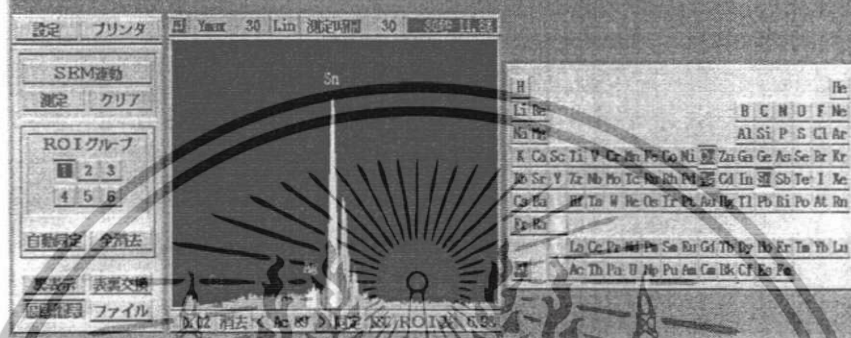
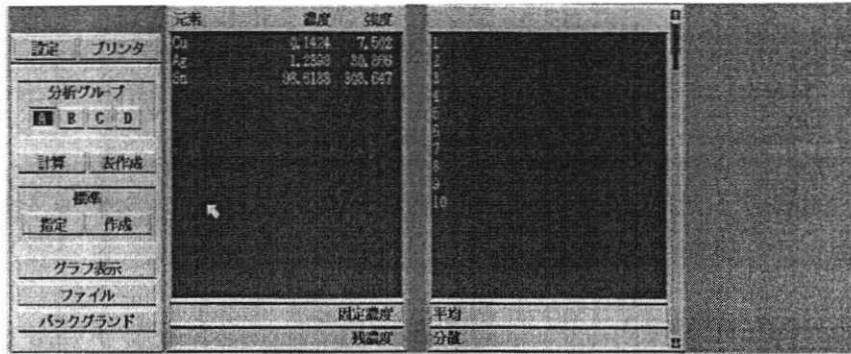


รูป ผ7 ผลจากเครื่อง EDX บอกถึงปริมาณส่วนผสมเฟส Sn-Matrix ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วตระกูล SAC ส่วนผสม 95.8Sn/3.5Ag/0.7Cu



รูป ผ8 ผลจากเครื่อง EDX บอกถึงปริมาณส่วนผสมเฟส Ag<sub>3</sub>Sn ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วตระกูล SAC ส่วนผสม 95.8Sn/3.5Ag/0.7Cu

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

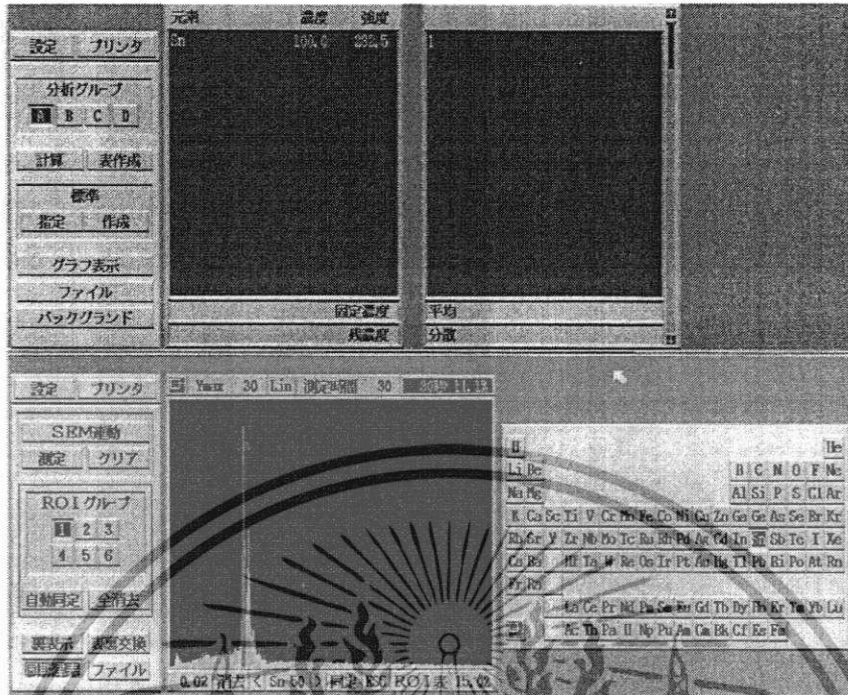


รูป ๗9 ผลจากเครื่อง EDX บอกถึงปริมาณส่วนผสมเฟส Sn-Matrix ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วตระกูล SAC ส่วนผสม 98.3Sn/1Ag/0.7Cu



รูป ๗1๐ ผลจากเครื่อง EDX บอกถึงปริมาณส่วนผสมเฟส Ag<sub>3</sub>Sn ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วตระกูล SAC ส่วนผสม 98.3Sn/1Ag/0.7Cu

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



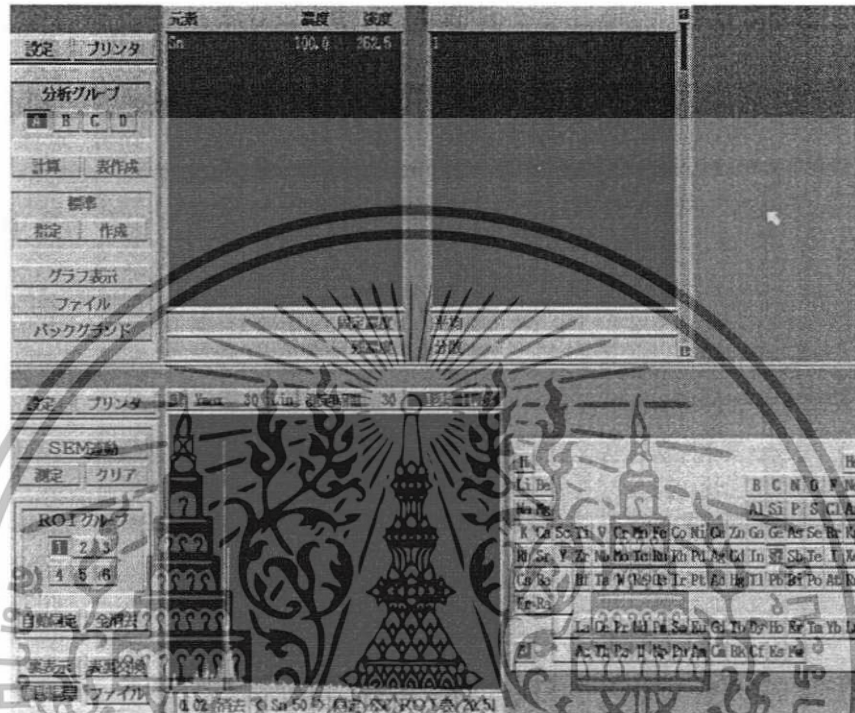
รูป ผ11 ผลจากเครื่อง EDX บอกถึงปริมาณส่วนผสม ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วส่วนผสม 99.3Sn/0.7Cu



รูป ผ12 ผลจากเครื่อง EDX บอกถึงปริมาณส่วนผสม ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วส่วนผสม 99Ag/0.3Ag/0.7Cu

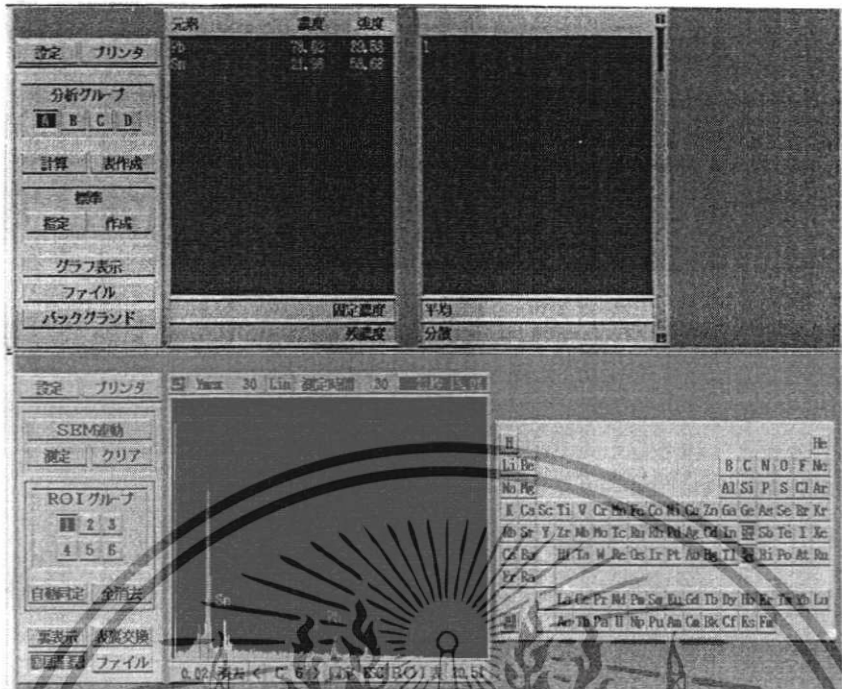
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นได้ว่าผลปริมาณร้อยละส่วนผสมโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วส่วนผสม 99Ag/0.3Ag/0.7Cu กับ 99.3Sn/0.7Cu ของเครื่อง EDX เป็นร้อยละของธาตุ Sn 100% สาเหตุอาจเกิดจากการหล่อโลหะบัดกรีในคอนตัน ด้วยปริมาณของธาตุ Ag กับ Cu มีปริมาณน้อยมากเมื่อเทียบกับโลหะบัดกรีส่วนผสมอื่นๆ อาจเกิดการระเหยของธาตุ 2 ชนิดนี้ในกระบวนการหล่อ ทำให้โลหะบัดกรีเป็นส่วนผสมของ Sn ทั้งหมด



รูปที่ 13 ผลจากเครื่อง EDX บอกถึงปริมาณส่วนผสมเฟส Sn-Matrix ของโลหะบัดกรี ส่วนผสม 63Sn/37Pb

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



พ14 ผลจากเครื่อง EDX บอกถึงปริมาณส่วนผสมเฟส Sn-Pb ของโลหะบัดกรี ส่วนผสม 63Sn/37Pb

4. G-code ในการตั้งขงงานมาตรฐานในการทดสอบ Tensile strength

G28 U0. W0. T00;  
 G00 T0404;  
 G50 S1000 M08;  
 G96 S800 M04;  
 Z0.2;  
 X28. ;  
 X25. ;  
 G01 Z-100. F0.3 ;  
 G00 U2.0 W2.0 ;  
 Z2. ;  
 X23. ;  
 G01 Z-100. F0.3 ;  
 G00 U2.0 W2.0 ;  
 Z2. ;  
 X21. ;  
 G01 Z-100. F0.3 ;  
 G00 U2.0 W2.0 ;

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Z2. ;  
 X19. ;  
 G01 Z-100. F0.3 ;  
 G00 U2.0 W2.0 ;  
 Z2. ;  
 X17. ;  
 G01 Z-100. F0.3 ;  
 G00 U2.0 W2.0 ;  
 Z2. ;  
 X16.1. ;  
 G01 Z-100. F0.3 ;  
 G00 U2.0 W2.0 ;  
 Z2. ;  
 G28 U0 W0 T00 M05 ;  
 M01 ;  
 G28 U0 W0 T00 M05 ;  
 M01 ;  
 G28 U0 W0 T00 ;  
 G0 T1010 ;  
 G50 M08 ;  
 G97 S700 M04 ;  
 Z-32.38 ;  
 X16.5 ;  
 G75 R1. ;  
 G75 X15.1 Z-58.62 P500 Q2000 F0.05 ;  
 G28 U0 W0 T00 M05 ;  
 M01 ;  
 G28 U0 W0 T00 ;  
 G0 T1010 ;  
 G50 M08 ;  
 G97 S700 M04 ;  
 Z-34.11 ;  
 X15.5 ;  
 G75 R1. ;  
 G75 X14.1 Z-56.89 P500 Q2000 F0.05 ;  
 G28 U0 W0 T00 M05 ;

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

M01 ;  
G28 U0 W0 T00 ;  
G0 T1010 ;  
G50 M08 ;  
G97 S700 M04 ;  
Z-36.66 ;  
X14.5 ;  
G75 R1. ;  
G75 X13.1 Z-54.34 P500 Q2000 F0.05 ;  
G28 U0 W0 T00 M05 ;  
M01 ;  
G28 U0 W0 T00 ;  
G0 T1010 ;  
G50 M08 ;  
G97 S700 M04 ;  
Z-40.19 ;  
X13.5 ;  
G75 R1. ;  
G75 X12.6 Z-50.81 P500 Q2000 F0.05 ;  
G28 U0 W0 T00 M05 ;  
M01 ;  
G28 U0 W0 T00 ;  
G0 T1010 ;  
G50 S1000 M08 ;  
G96 S800 M04 ;  
Z2. ;  
X16. ;  
G01 Z-31. ;  
G02 X12.5 Z-40.91 R25. ;  
G01 Z-50.81 ;  
G02 X16. Z-60. R25. ;  
G01 Z-97 ;  
G0 X26. Z2. ;  
G28 U0 W0 T00 M05 ;  
M30 ;

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้