

การศึกษาพฤติกรรมการคืบและโครงสร้างจุลภาค  
ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-Cu-Sb  
A STUDY ON CREEP BEHAVIOR AND MICROSTRUCTURE  
OF Sn-Cu-Sb LEAD-FREE SOLDERS

นางสาวปยุตดา วาจาสิทธิ์  
MS. PUNYADA WAJASAT  
นางสาวสุวลักษณ์ นกัธรรม  
MS. SUWALAK NAKTHAM

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2556

การศึกษาพฤติกรรมการคืบและโครงสร้างจุลภาค  
ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-Cu-Sb  
A STUDY ON CREEP BEHAVIOR AND MICROSTRUCTURE  
OF Sn-Cu-Sb LEAD-FREE SOLDERS

นางสาวปยุตดา วาจาस्थ्य  
MS.PUNYADA WAJASAT  
นางสาวสุวลักษณ์ นักรธรรม  
MS.SUWALAK NAKTHAM

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2556

A STUDY ON CREEP BEHAVIOR AND MICROSTRUCTURE  
OF Sn-Cu-Sb LEAD-FREE SOLDERS

MS.PUNYADA WAJASAT

MS.SUWALAK NAKTHAM

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
BECHELOR OF ENGINEERING IN INDUSTRIAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2013



หัวข้อปริญญานิพนธ์	การศึกษาพฤติกรรมการคืบและโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วในกลุ่ม Sn-Cu-Sb A STUDY ON CREEP BEHAVIOR AND MICROSTRUCTURE OF Sn-Cu-Sb LEAD-FREE SOLDERS
นักศึกษา	นางสาวปณญดา วาจาสัตย์ นางสาวสุวลักษณ์ นักรธรรม
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา	2556
อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์	รศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ

### บทคัดย่อ

โครงการปริญญานิพนธ์ฉบับนี้แสดงการศึกษาพฤติกรรมการคืบและโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-Cu-Sb ที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งการทดสอบการคืบโดยใช้แรงกดลงบนชิ้นงานจะทำให้ทราบถึงพฤติกรรมการคืบได้โดยดูจากค่า Stress exponent ที่เกิดจากการพล็อตกราฟหาความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln(t)$  เทียบกับ  $\ln(Hv)$  ซึ่งผลจากการศึกษาพบว่าค่า Stress exponent ของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วกลุ่มนี้มีค่ามากกว่า 6 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเกิดพฤติกรรมการคืบแบบดิสโลเคชัน (Dislocation Creep) นอกจากนี้โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่มีขนาดเกรนใหญ่กว่าก็จะมีค่า Stress exponent ที่สูงกว่า

Thesis Title	A study on creep behavior and microstructure of Sn-Cu-Sb lead-free solders
Student	Ms. Punyada Wajasat Ms. Suwalak Naktham
Degree	Bachelor of Engineering in Industrial Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Academic year	2013
Thesis advisor	Assoc. Prof. Dr. Kannachai Kanlayasiri

### ABSTRACT

This project presented a study on creep behavior and microstructure of Sn-Cu-Sb lead-free solders at room temperature. Indentation creep test was performed to investigate the creep behavior. The stress exponent of creep model was determined from the plot between  $\ln(HV)$  and  $\ln(t)$ . Results showed that the stress exponents of the solders are higher than 6 indicating dislocation creep behavior. In addition, the solders with a larger grain size provided a higher stress exponent value.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์เรื่องการศึกษาพฤติกรรมการคืบและโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-Cu-Sb ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี กลุ่มผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบุคคลทุกคนที่มีส่วนเกี่ยวข้องส่งผลให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

รศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์ กลุ่มผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงสำหรับการให้โอกาสในการศึกษาปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ รวมทั้งได้กรุณาเสียสละเวลาให้คำแนะนำ ข้อคิดเห็นต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการทำโครงการ อีกทั้งยังช่วยตรวจสอบและแก้ไขปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นระหว่างการดำเนินงานอีกด้วย คุณกัมภีร์ สุขพิมาย กลุ่มผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง สำหรับการให้ความสะดวกและความช่วยเหลือทุกๆด้านในห้องปฏิบัติการ

พี่ๆนักศึกษาศึกษาปริญญาโท สาขาวิชาอุตสาหกรรม กลุ่มผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงสำหรับการให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะต่างๆเมื่อมีปัญหาเกิดขึ้นขณะทำปริญญาานิพนธ์

อาจารย์ในสาขาวิชาอุตสาหกรรมทุกท่าน กลุ่มผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทความรู้ด้วยความเมตตาเสมอมา

บิดามารดาและครอบครัวที่ให้โอกาสได้รับการศึกษาเล่าเรียน ตลอดจนคอยช่วยเหลือและเป็นกำลังใจให้เสมอมา คุณค่าและประโยชน์อันเกิดจากโครงการเรื่องนี้ กลุ่มผู้วิจัยขอมอบแต่บิดามารดา รวมถึงผู้มีพระคุณทุกท่านที่มีส่วนร่วมในการช่วยเหลือปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้

นางสาวปุณณดา วาจาสิทธิ์

นางสาวสุวลักษณ์ นักรธรรม

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญ (ต่อ).....	จ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญตาราง (ต่อ).....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
สารบัญรูป (ต่อ).....	ฌ
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	
1.1 ความสำคัญของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ.....	1
1.4 ประโยชน์ของโครงการ.....	2
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง</b>	
2.1 ทฤษฎีการคืบ.....	3
2.2 Indentation Hardness.....	5
2.2.1 Brinell Hardness Test.....	5
2.2.2 Rockwell Hardness Test.....	7
2.2.3 Vickers Hardness Test.....	9
2.3 การวิเคราะห์พฤติกรรมการคืบโดยวิธี Indentation creep.....	11
2.3.1 วิธีของ Sargent – Ashby.....	11
2.3.2 วิธีของ Juhasz.....	11
2.3.3 วิธีของ Mulhearn-Tabor.....	11
2.4 กลไกความเสียหายเนื่องจากความคืบ.....	12
2.4.1 ความคืบแบบ Nabarro – Herring.....	12
2.4.2 ความคืบแบบ Coble.....	13
2.4.3 การไถลของขอบเกรน (Grain boundary sliding).....	14
2.4.4 ความคืบเนื่องจากดิสโลเคชัน (Dislocation creep).....	14
2.5 การตรวจสอบโครงสร้างระดับจุลภาค.....	15
2.5.1 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง.....	16

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
<b>บทที่ 3</b> วิธีดำเนินงานวิจัย	
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	18
3.2 ขั้นตอนในการเตรียมชิ้นงานทดสอบ.....	19
3.2.1 การขีดระนาบผิวชิ้นงานทดสอบ.....	21
3.2.1.1 การขีดผิวหยาบ.....	21
3.2.1.2 การขีดผิวมัน.....	22
3.2.1.3 การกัดกรด.....	23
3.3 การตรวจสอบพฤติกรรมการคืบและโครงสร้างจุลภาค.....	23
3.3.1 การตรวจสอบพฤติกรรมการคืบด้วยเครื่องทดสอบ Vickers Micro Hardness.....	23
3.3.2 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคเบื้องต้นด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง.....	23
<b>บทที่ 4</b> การวิเคราะห์ผลการทดลอง	
4.1 การวิเคราะห์ผลทางกล.....	24
4.1.1 การทดสอบความแข็ง (Hardness test).....	24
4.2 การวิเคราะห์ผลทางโครงสร้างจุลภาค.....	53
4.2.1 การตรวจสอบโครงสร้างโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสง.....	53
<b>บทที่ 5</b> สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	55
5.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางการศึกษาในอนาคต.....	55
<b>บรรณานุกรม.....</b>	<b>56</b>

## สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 2.1	กลไกความเสียหายเนื่องจากความคืบทั้ง 4 แบบ.....	12
ตารางที่ 3.1	ส่วนผสมของโลหะบัดกรีแต่ละชนิดที่นำมาใช้ในการวิจัย.....	17
ตารางที่ 4.1	ผลการทดลองของชิ้นงานที่ 1 97Sn-3Cu.....	24
ตารางที่ 4.2	ผลการทดลองของชิ้นงานที่ 1 97Sn-3Cu (ต่อ).....	25
ตารางที่ 4.3	การแปลงค่า Hv และค่า t ให้อยู่ในรูป ln (Hv) และ ln (t).....	25
ตารางที่ 4.4	ค่า Stress exponent ของชิ้นงาน 97Sn-3Cu.....	27
ตารางที่ 4.5	ผลการทดลองของชิ้นงานที่ 2 98.5Sn-1.5Cu.....	27
ตารางที่ 4.6	กลไกความเสียหายเนื่องจากความคืบทั้ง 4 แบบ.....	28
ตารางที่ 4.7	ส่วนผสมของโลหะบัดกรีแต่ละชนิดที่นำมาใช้ในการวิจัย.....	28
ตารางที่ 4.8	ผลการทดลองของชิ้นงานที่ 1 97Sn-3Cu.....	29
ตารางที่ 4.9	ผลการทดลองของชิ้นงานที่ 1 97Sn-3Cu (ต่อ).....	30
ตารางที่ 4.10	การแปลงค่า Hv และค่า t ให้อยู่ในรูป ln (Hv) และ ln (t).....	32
ตารางที่ 4.11	ค่า Stress exponent ของชิ้นงาน 97Sn-3Cu.....	32
ตารางที่ 4.12	ผลการทดลองของชิ้นงานที่ 4 89Sn-3Cu-8Sb.....	32
ตารางที่ 4.13	ผลการทดลองของชิ้นงานที่ 4 89Sn-3Cu-8Sb (ต่อ).....	33
ตารางที่ 4.14	การแปลงค่า Hv และค่า t ให้อยู่ในรูป ln (Hv) และ ln (t).....	33
ตารางที่ 4.15	ค่า Stress exponent ของชิ้นงาน 89Sn-3Cu-8Sb.....	34
ตารางที่ 4.16	ผลการทดลองของชิ้นงานที่ 5 92Sn-8Sb.....	35
ตารางที่ 4.17	การแปลงค่า Hv และค่า t ให้อยู่ในรูป ln (Hv) และ ln (t).....	36
ตารางที่ 4.18	ค่า Stress exponent ของชิ้นงาน 92Sn-8Sb.....	37
ตารางที่ 4.19	ผลการทดลองของชิ้นงานที่ 6 90.5Sn-1.5Cu-8Sb.....	37
ตารางที่ 4.20	ผลการทดลองของชิ้นงานที่ 6 90.5Sn-1.5Cu-8Sb (ต่อ).....	38
ตารางที่ 4.21	การแปลงค่า Hv และค่า t ให้อยู่ในรูป ln (Hv) และ ln (t).....	-38
ตารางที่ 4.22	ค่า Stress exponent ของชิ้นงาน 90.5Sn-1.5Cu-8Sb.....	39
ตารางที่ 4.23	ผลการทดลองของชิ้นงานที่ 7 97.33Sn-2.67Sb.....	40
ตารางที่ 4.24	การแปลงค่า Hv และค่า t ให้อยู่ในรูป ln (Hv) และ ln (t).....	41
ตารางที่ 4.25	ค่า Stress exponent ของชิ้นงาน 97.33Sn-2.67Sb.....	42
ตารางที่ 4.26	ผลการทดลองของชิ้นงานที่ 8 94.5Sn-1.5Cu-4Sb.....	42
ตารางที่ 4.27	ผลการทดลองของชิ้นงานที่ 8 94.5Sn-1.5Cu-4Sb (ต่อ).....	43
ตารางที่ 4.28	การแปลงค่า Hv และค่า t ให้อยู่ในรูป ln (Hv) และ ln (t).....	43
ตารางที่ 4.29	ค่า Stress exponent ของชิ้นงาน 94.5Sn-1.5Cu-4Sb.....	44
ตารางที่ 4.30	ผลการทดลองของชิ้นงานที่ 9 93Sn-3Cu-4Sb.....	45
ตารางที่ 4.31	การแปลงค่า Hv และค่า t ให้อยู่ในรูป ln (Hv) และ ln (t).....	46
ตารางที่ 4.32	ค่า Stress exponent ของชิ้นงาน 93Sn-3Cu-4Sb.....	47
ตารางที่ 4.33	ผลการทดลองของชิ้นงานที่ 10 92.5Sn-1.5Cu-6Sb.....	47

## สารบัญตาราง (ต่อ)

		หน้า
ตารางที่ 4.34	ผลการทดลองของชิ้นงานที่ 10 92.5Sn-1.5Cu-6Sb (ต่อ).....	48
ตารางที่ 4.35	การแปลงค่า Hv และค่า t ให้อยู่ในรูป ln (Hv) และ ln (t).....	48
ตารางที่ 4.36	ค่า Stress exponent ของชิ้นงาน 92.5Sn-1.5Cu-6Sb.....	49
ตารางที่ 4.37	ผลการทดลองของชิ้นงานที่ 11 95.75Sn-2.25Cu-2Sb.....	50
ตารางที่ 4.38	การแปลงค่า Hv และค่า t ให้อยู่ในรูป ln (Hv) และ ln (t).....	51
ตารางที่ 4.39	ค่า Stress exponent ของชิ้นงาน 95.75Sn-2.25Cu-2Sb.....	52
ตารางที่ 4.40	ผลการทดสอบชิ้นงานโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วกลุ่ม Sn-Cu-Sb ทั้ง 11 ชิ้น.....	52

## สารบัญรูป

		หน้า
รูปที่ 2.1	ลักษณะของ creep curve ของโลหะ.....	3
รูปที่ 2.2	ระดับของ Stress ที่มีต่อ Creep curve เมื่ออุณหภูมิคงที่.....	5
รูปที่ 2.3	หลักการกดของการทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์.....	6
รูปที่ 2.4	หลักการกดของการทดสอบความแข็งแบบรอกเวลล์.....	8
รูปที่ 2.5	หลักการกดของการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์.....	10
รูปที่ 2.6	การเกิดความคืบแบบ Nabarro–Herring.....	13
รูปที่ 2.7	การเกิดความคืบแบบ Coble.....	13
รูปที่ 2.8	การเกิดความคืบแบบการไหลของขอบเกรน.....	14
รูปที่ 2.9	การเคลื่อนของดิสโลเคชันและการป็นของดิสโลเคชัน.....	15
รูปที่ 2.10	ลักษณะการตกกระทบและแสงสะท้อนของแสงบนผิวชิ้นงานถูกกัดด้วยสารละลาย.....	16
รูปที่ 2.11	การทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบแสง.....	16
รูปที่ 3.1	ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	18
รูปที่ 3.2	ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วเพื่อศึกษาพฤติกรรมการคืบ.....	19
รูปที่ 3.3	ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วเพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาค.....	20
รูปที่ 3.4	การขัดด้วยกระดาษทราย.....	21
รูปที่ 3.5	เครื่องขัดผิวชิ้นงานแบบละเอียด.....	22
รูปที่ 3.6	ชิ้นงานที่ทำการกัดกรด.....	22
รูปที่ 3.7	เครื่องทดสอบแบบ Vickers Micro Hardness.....	23
รูปที่ 3.8	กล้องจุลทรรศน์แบบแสง.....	23
รูปที่ 4.1	กราฟแสดงผลการทดลองของชิ้นงานที่มีส่วนผสม 97Sn-3Cu.....	26
รูปที่ 4.2	กราฟแสดงผลการทดลองของชิ้นงานที่มีส่วนผสม 98.5Sn-1.5Cu.....	29
รูปที่ 4.3	กราฟแสดงผลการทดลองของชิ้นงานที่มีส่วนผสม 100Sn.....	31
รูปที่ 4.4	กราฟแสดงผลการทดลองของชิ้นงานที่มีส่วนผสม 89Sn-3Cu-8Sb.....	34
รูปที่ 4.5	กราฟแสดงผลการทดลองของชิ้นงานที่มีส่วนผสม 92Sn-8Sb.....	36
รูปที่ 4.6	กราฟแสดงผลการทดลองของชิ้นงานที่มีส่วนผสม 90.5Sn-1.5Cu-8Sb.....	39
รูปที่ 4.7	กราฟแสดงผลการทดลองของชิ้นงานที่มีส่วนผสม 97.33Sn-2.67Sb.....	41
รูปที่ 4.8	กราฟแสดงผลการทดลองของชิ้นงานที่มีส่วนผสม 94.5Sn-1.5Cu-4Sb.....	44
รูปที่ 4.9	กราฟแสดงผลการทดลองของชิ้นงานที่มีส่วนผสม 93Sn-3Cu-4Sb.....	46
รูปที่ 4.10	กราฟแสดงผลการทดลองของชิ้นงานที่มีส่วนผสม 92.5Sn-1.5Cu-6Sb.....	49
รูปที่ 4.11	กราฟแสดงผลการทดลองของชิ้นงานที่มีส่วนผสม 95.75Sn-2.25Cu-2Sb.....	51
รูปที่ 4.12	โครงสร้างจุลภาคในโลหะบัดกรีชนิด 92Sn-8Sb จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 5 เท่า.....	53
รูปที่ 4.13	โครงสร้างจุลภาคในโลหะบัดกรีชนิด 97Sn-3Cu จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 5 เท่า.....	53
รูปที่ 4.14	โครงสร้างจุลภาคในโลหะบัดกรีชนิด 100Sn จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 5 เท่า.....	54
รูปที่ 4.15	โครงสร้างจุลภาคในโลหะบัดกรีชนิด 89Sn-3Cu-8Sb จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 5 เท่า.....	54

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในอดีตพบว่าสารตะกั่วถูกนำมาใช้กันอย่างกว้างขวางในงานอุตสาหกรรมและโลหะบัดกรีส่วนใหญ่ก็ทำมาจากโลหะที่มีส่วนผสมของดีบุกและตะกั่ว (Sn-Pb) เนื่องจากธาตุทั้งสองชนิดนี้มีคุณสมบัติที่ดีหลายประการคือ ราคาถูก มีจุดหลอมเหลวต่ำ มีความแข็งแรงค่อนข้างสูงและสามารถทนต่อการกัดกร่อนได้ดี แต่ในปัจจุบันได้มีการรณรงค์ให้ลดปริมาณการใช้สารตะกั่วในโลหะบัดกรี เนื่องจากพบว่าตะกั่วเป็นสารที่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพร่างกายของมนุษย์และสิ่งแวดล้อมมากขึ้นทุกปี นอกจากนี้การปนเปื้อนสารตะกั่วในสิ่งแวดล้อมก็มีแนวโน้มว่าจะมีความรุนแรงมากขึ้นเรื่อยๆ ดังนั้นในปัจจุบันจึงได้มีการพัฒนาโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วขึ้นมาเพื่อลดปริมาณในการใช้สารตะกั่ว โดยให้นำสารประกอบโลหะชนิดอื่นมาใช้ทดแทนตะกั่ว ซึ่งสารประกอบโลหะที่นำมาทดแทนนั้นจะต้องมีคุณสมบัติต่างๆเทียบเท่าหรือใกล้เคียงกับโลหะบัดกรีชนิดที่มีตะกั่วผสมแบบเดิม โดยมีทั้งที่เป็นสารประกอบระหว่างโลหะ 2 ชนิด เช่น Sn-Ag Sn-Cu Sn-Zn Sn-Bi และ Sn-In หรือเป็นสารประกอบระหว่างโลหะ 3 ชนิดเช่น Sn-Ag-Cu Sn-Ag-Bi และ Sn-Zn-Bi ซึ่งโลหะบัดกรีที่มีส่วนผสมต่างชนิดกันก็จะมีคุณสมบัติและลักษณะเด่นที่แตกต่างกันไป โดยทั่วไปแล้วโลหะบัดกรีจะมีจุดหลอมเหลวอยู่ในช่วงประมาณ 80 - 300 องศาเซลเซียส ดังนั้นการใช้งานที่อุณหภูมิห้องจึงถือว่าเป็นการใช้งานที่อุณหภูมิสูงเมื่อเทียบกับจุดหลอมเหลว นอกจากนี้อาจจะทำให้มีโอกาสเกิดความเสียหายอันเนื่องมาจากพฤติกรรมการคืบได้ และเมื่อนำโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วไปใช้งานที่อุณหภูมิห้องซึ่งมีค่าสูงกว่า 0.5 เท่าของจุดหลอมเหลวของโลหะ (0.5 Tm) ก็จะทำให้เกิดการคืบของโลหะบัดกรีขึ้น

ในปริญญาานิพนธ์นี้จึงได้มีการศึกษาพฤติกรรมการคืบด้วยวิธี Indentation creep ที่อุณหภูมิห้องและศึกษาโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่มีส่วนผสมของ Sn-Cu-Sb ในสัดส่วนที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งทั้งหมดนี้เป็นโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วชนิดใหม่ที่เพิ่งถูกพัฒนาขึ้นมา

### 1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาพฤติกรรมการคืบของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วในกลุ่ม Sn-Cu-Sb
2. เพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วในกลุ่ม Sn-Cu-Sb

### 1.3 ขอบเขตของปริญญาานิพนธ์

1. ศึกษาพฤติกรรมการคืบและโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วในกลุ่ม Sn-Cu-Sb ที่อุณหภูมิห้อง
2. ศึกษาพฤติกรรมการคืบโดยวิธี Indentation creep

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

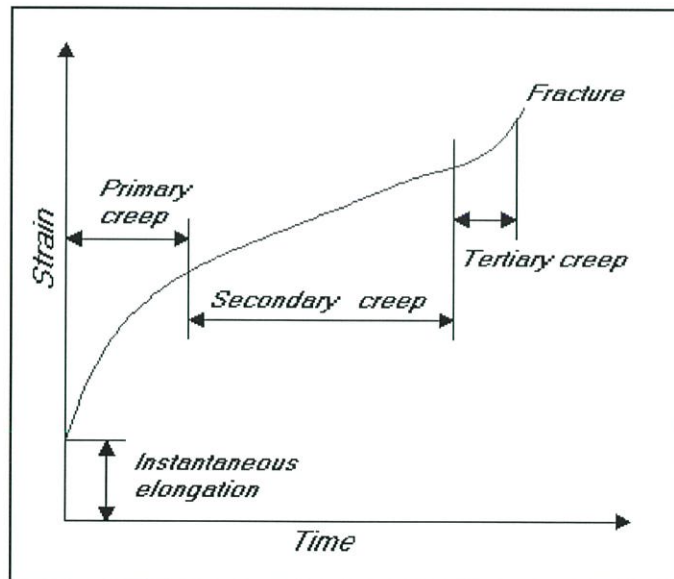
1. ทราบพฤติกรรมการคืบของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วในกลุ่ม Sn-Cu-Sb
2. ทราบความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วในกลุ่ม Sn-Cu-Sb และพฤติกรรมการคืบ

## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ทฤษฎีการคืบ

โดยทั่วไปแล้วโลหะจะเกิดครีพ เมื่ออุณหภูมิสูงเกินกว่า 50% ของอุณหภูมิหลอมเหลวของโลหะชนิดนั้นๆ โดยประมาณ ( $> 0.5 T_m$  โดยที่  $T_m$  คือ Absolute melting temperature) ดังนั้นโลหะที่มีจุดหลอมเหลวต่ำจะมีโอกาสเกิดครีพมากกว่าโลหะที่มีจุดหลอมเหลวสูง ยกตัวอย่างเช่น โลหะตะกั่วมีจุดหลอมเหลวอยู่ที่  $245\text{ }^{\circ}\text{C}$  ดังนั้น จะเห็นได้ว่าโลหะตะกั่วมีโอกาสที่จะเกิดครีพได้ง่ายที่อุณหภูมิห้อง หากพิจารณา Creep curve ดังแสดงในรูปที่ 2.1 จะสังเกตเห็นว่าเส้นกราฟสามารถแบ่งออกเป็น 3 ช่วงด้วยกัน คือ Primary creep, Secondary creep และ Tertiary creep [6]



รูปที่ 2.1 ลักษณะของ Creep curve ของโลหะ

ในช่วงปฐมภูมิหรือ Primary creep (Transient creep) โลหะจะมีอัตราการเกิด Creep หรือ Creep rate ที่ค่อยๆลดลงในช่วงเวลาต่างๆ เมื่อเข้าสู่ช่วงทุติยภูมิ Secondary creep คือช่วงที่ค่า Creep rate คงที่หรืออาจเรียกว่าเป็น Steady-state creep สุดท้ายเมื่อเข้าสู่ช่วงตติยภูมิ Tertiary creep ในช่วงนี้ Creep rate จะมีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนเกิดรอยแตกขึ้น ซึ่งพบว่าในช่วงทุติยภูมิจะมีค่า Creep rate ต่ำที่สุด (slope ต่ำที่สุด) เมื่อเปรียบเทียบกับ Creep rate ทั้ง 3 ช่วง ซึ่งค่าความชันนี้เราเรียกว่า อัตราการเปลี่ยนแปลงความคืบ หรือ Creep rate ( $\dot{\epsilon}$ ) [1] ดังสมการที่ 2.1

$$\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt} \quad (\text{สมการ 2.1})$$

อัตราการเปลี่ยนแปลงความเค้นหรือ Creep rate ในช่วงทุติยภูมินี้จะขึ้นอยู่กับตัวแปร 2 ตัว คือ ความเค้นและอุณหภูมิ [2] ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ ดังสมการที่ 2.2

$$\dot{\epsilon} = A \sigma^n \exp(-Q/RT) \quad (\text{สมการ 2.2})$$

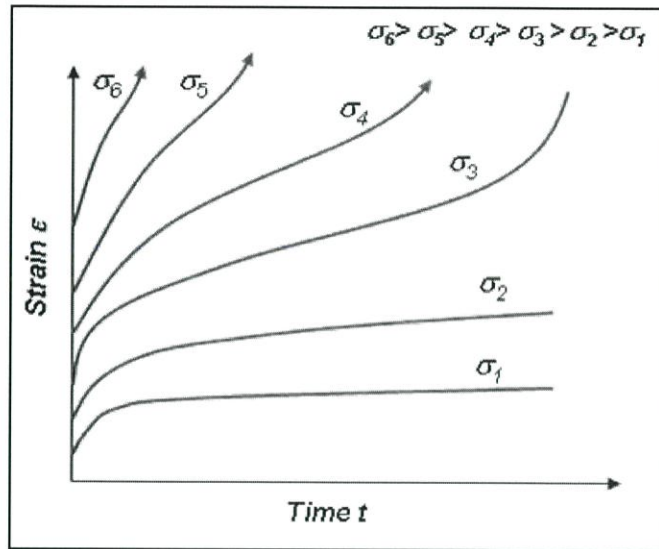
โดยที่ A และ n คือค่าคงที่, Q คือ พลังงานแอคติเวชัน (Activation energy) สำหรับการเกิด Creep ในโลหะ, R คือ ค่าคงที่ของก๊าซ (Universal gas constant = 8.31 J/mol K)

จากสมการที่ 2.2 จะเห็นได้ว่าหากเพิ่มความเค้นหรืออุณหภูมิจะมีผลทำให้ Creep rate เพิ่มขึ้นและค่า Stress exponent (n) สามารถหาได้จากการทำสมการที่ 2.2 ให้อยู่ในรูปของ Natural logarithm ดังแสดงในสมการที่ 2.3 หลังจากนั้นทำการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln \dot{\epsilon}$  และ  $\ln \sigma$  [1] โดยสมการที่ได้จะเป็นเส้นตรงและมีค่าความชันของกราฟเท่ากับค่า n ดังนี้

$$\ln \dot{\epsilon} = \ln A + n \ln \sigma - \frac{Q}{RT} \quad (\text{สมการ 2.3})$$

เมื่อเข้าสู่ช่วงสุดท้ายของการเกิดครีพหรือ Tertiary creep จะเป็นช่วงโลหะเข้าสู่การแตกหัก ชิ้นงานจะมีการยืดตัวสูงขึ้นทำให้ค่า Creep rate เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและยังเกิดการคอดลง (Necking) ของพื้นที่หน้าตัดชิ้นงานซึ่งเป็นผลทำให้ความสามารถในการรับแรงกระทำน้อยลงตามลำดับ ซึ่งจะนำไปสู่การเกิดช่องว่างเล็กๆ (Microvoid formation) ภายในชิ้นงานโลหะและนำไปสู่การแตกหักในที่สุด นอกจากปัจจัยดังกล่าวที่ทำให้เกิดครีพอย่างรวดเร็วแล้ว การเกิดครีพในช่วงตติยภูมินี้ยังได้รับผลกระทบมาจากการเปลี่ยนแปลงทางโลหะวิทยาเนื่องจากอุณหภูมิได้อีกด้วย

ตามที่ได้กล่าวมาแล้วว่า ความเค้นและอุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่ออัตราการเกิดครีพและหากเราพิจารณารูปร่างของกราฟการเกิดครีพหรือ Creep curve จะพบว่า หากกำหนดให้อุณหภูมิในการทดสอบคงที่ การเพิ่มระดับของความเค้นจะทำให้ Creep curves เลื่อนสูงขึ้นและขยับไปทางซ้ายมือดังแสดงในรูปที่ 2 และในทำนองเดียวกันหากการทดสอบการเกิดครีพนั้นกระทำที่อุณหภูมิต่างๆกัน เมื่อค่าของความเค้นคงที่จะพบว่าอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะทำให้มีค่า Creep rate เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน



รูปที่ 2.2 ระดับของ Stress ที่มีต่อ Creep curve เมื่ออุณหภูมิคงที่

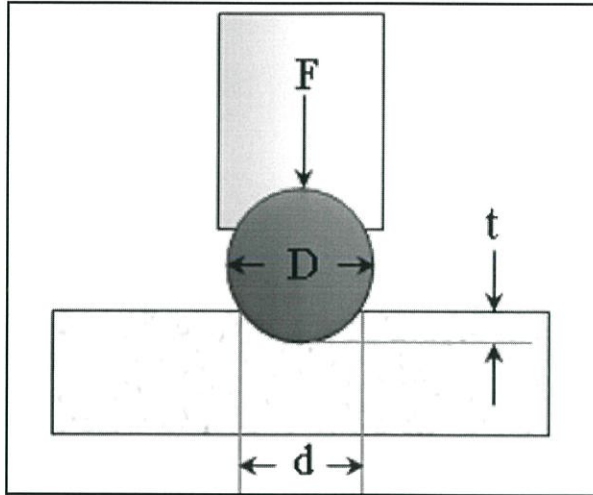
## 2.2 Indentation hardness

Hardness หรือ ความแข็งเป็นปริมาณทางฟิสิกส์ที่แสดงถึงความสามารถในการคงรูปของวัสดุต่างๆ เมื่อมีแรงภายนอกหรือโหลดมากกระทำกับวัตถุนั้นๆ ความแข็งเป็นปริมาณสัมพันธ์ที่มีความแตกต่างจากปริมาณทางฟิสิกส์อื่นๆ เช่น ระยะทาง เวลา ปริมาตร หรือกระแสไฟฟ้า ตรงที่ไม่มีจำนวนหรือมาตรฐานที่แน่นอน แต่จะขึ้นอยู่กับลักษณะเฉพาะทางกายภาพอย่างอื่น เช่น Tensile strength, Yield strength, ชีตจำกัดความยืดหยุ่น ความต้านทานการเกิดรอย เป็นต้น ความแข็งของวัสดุจึงกลายเป็นปัจจัยสำคัญในการควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ การคำนวณน้ำหนัก ความดัน หรือ อุณหภูมิ ดังนั้นค่าความแข็งของวัสดุเป็นสมบัติทางกลของสารที่มีความสำคัญต่อการควบคุมคุณภาพของวัตถุดิบ กระบวนการผลิต ไปจนถึงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ รอยกดบนชิ้นงานที่ได้จากเครื่องทดสอบความแข็งนั้นจะเป็นตัวบ่งบอกความแข็งแรง ความยืดหยุ่น ลักษณะโครงสร้างหรือองค์ประกอบของวัตถุดิบหรือผลิตภัณฑ์ได้เป็นอย่างดี

โดยหลักแล้ว Indentation hardness จะนำไปใช้ในทางด้านวิศวกรรมและโลหะหรือหาความต้านทานในการเกิดรอยของวัสดุ ซึ่งจะทำให้การวัดโดยใช้หัวกดที่มีรูปร่างและขนาดต่างๆกดลงบนวัสดุ และคำนวณทิศทางของผลการกดที่เกิดขึ้น Indentation hardness มีวิธีการที่ใช้ในการวัดความแข็งอย่างหลากหลาย แต่โดยทั่วไปแล้วได้แก่ Brinell hardness test, Rockwell hardness test, Vickers hardness test และ Knoop hardness [8]

### 2.2.1 Brinell hardness test

การทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์ อาศัยการกดของหัวกดทรงกลมที่ผลิตจากเหล็กกล้าชุบแข็งหรือทังสเตนคาร์ไบด์ ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $D$  ลงบนพื้นผิวชิ้นงานทดสอบด้วยแรงกด  $F$  ดังรูป โดยคงค่าแรงกดเป็นระยะเวลา 10 ถึง 15 วินาที สำหรับวัสดุประเภทเหล็กหรือเหล็กกล้า และคงค่าแรงเป็นระยะเวลา 30 วินาทีสำหรับโลหะอ่อน เช่น อะลูมิเนียม และทองเหลือง เป็นต้น ทำให้เกิดรอยกดที่มีความลึก  $t$  และมีเส้นผ่านศูนย์กลางรอยกดเฉลี่ย  $d$  ซึ่งได้จากการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางรอยกดในแนวตั้งฉากกันสองค่าแล้วหาค่าเฉลี่ย โดยเครื่องมือวัดต้องมีความละเอียด 0.01 mm ค่าความแข็งคำนวณได้จากแรงกดหารด้วยพื้นที่รอยกด นั่นคือ



รูปที่ 2.3 หลักการกดของการทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์

$$H_B = \frac{0.102F}{0.5\pi D [D - \sqrt{D^2 - d^2}]} \quad (\text{สมการ 2.4})$$

โดยที่  $H_B$  คือค่าความแข็งแบบ Brinell หน่วยเป็น  $\text{kgf/mm}^2$

$P$  คือแรงกด หน่วยเป็น  $\text{kgf}$

$D$  คือเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกบอลเหล็กกล้า หน่วยเป็น  $\text{mm}$

และ  $d$  คือเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกด หน่วยเป็น  $\text{mm}$

แต่ในทางปฏิบัตินั้นไม่จำเป็นต้องคำนวณค่าความแข็งจากสูตรคำนวณ เพราะสามารถนำความยาวเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางรอยกด ( $d$ ) และขนาดแรงกดที่ใช้เทียบกับตารางค่าความแข็งที่ได้คำนวณไว้แล้วได้โดยตรง และโดยทั่วไปลูกบอลที่ใช้มีลักษณะเป็นหัวกลมมีขนาด 10 มิลลิเมตร และสามารถใช้แรงกดได้ตั้งแต่ 500 kg สูงสุดถึง 3,000 kg ซึ่งหน่วยความแข็งของการทดสอบแบบบริเนลล์คือ BHN หรือ HB

ข้อดีของการทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์

1. การวัดค่าความแข็งแบบบริเนลล์จะให้รอยกดที่กว้างและลึก เพราะหัวกลมมีขนาดใหญ่ ดังนั้นความหยาบของพื้นผิวชิ้นงานทดสอบและความไม่สม่ำเสมอของโครงสร้างทางจุลภาคจึงมีผลน้อยต่อค่าการทดสอบ หรือกล่าวได้ว่าให้ค่าความแข็งเฉลี่ยของวัสดุที่ทดสอบ

ข้อเสียของการทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์

1. ค่าความแข็งได้มาจากการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางรอยกด ฉะนั้นอาจเกิดความผิดพลาดจากการอ่านค่าของผู้ทำการทดสอบได้ นอกจากนี้รอยกดมีขนาดใหญ่ จึงไม่สามารถทำการทดสอบกับชิ้นงานขนาดเล็กหรือชิ้นงานที่บางมากๆได้

ข้อจำกัดของการทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์

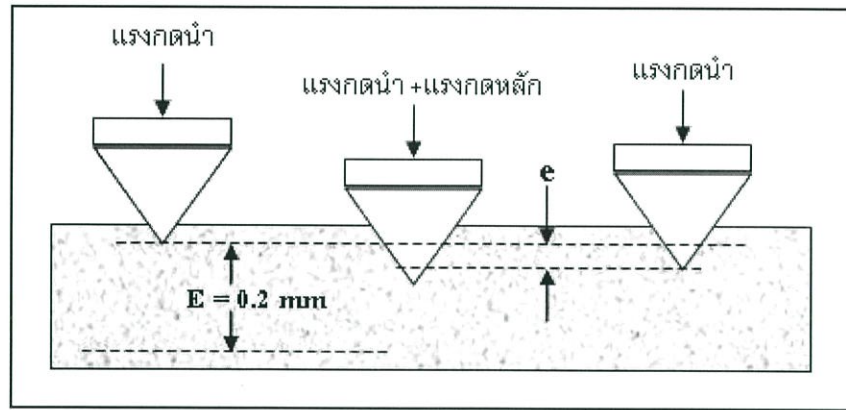
1. การทดสอบแบบบริเนลล์ไม่ควรใช้วัดความแข็งเกิน 450 HB เพราะค่าความแข็งที่สูงกว่านี้อาจจะทำให้เกิดการเสียรูปของหัวกด ทำให้รอยกดใหญ่กว่าความเป็นจริงหรือความแข็งที่วัดได้น้อยกว่าความเป็นจริง
2. ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของรอยกดหรือระยะห่างของจุดศูนย์กลางรอยกดจากขอบของชิ้นงานควรมีค่าไม่น้อยกว่าสองเท่าของความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยรอยกด (2d)
3. ความหนาของชิ้นงานทดสอบควรมีค่ามากกว่าสิบเท่าของความลึกรอยกด (10t) หรืออาจพิจารณาจากแรงกดให้เหมาะสมโดยไม่ทำให้เกิดการเสียรูปทางด้านหลังของชิ้นงาน
4. ความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยรอยกด (d) ควรมีค่าอยู่ในช่วง 0.2D – 0.7D หรือประมาณ 2 – 7 mm สำหรับลูกบอลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 mm เพราะหากรอยกดเล็กเกินไปจะทำให้ขอบของรอยกดไม่คมชัด ส่งผลให้วัดความยาวได้ยากและเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดจากการอ่านค่าความยาวจะมาก ในทางกลับกัน หากรอยกดมีขนาดใหญ่เกินไปจะทำให้เกิดการกดตัวของเนื้อชิ้นงานด้านข้างมาก

ข้อควรระวังสำหรับการวัดของการทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์

1. ผิวของชิ้นงานทดสอบต้องเรียบ เพื่อให้ได้ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกดที่แน่นอนและที่ผิวของชิ้นงานทดสอบต้องไม่มี Oxide scale หรือสิ่งแปลกปลอม นอกจากนี้การเตรียมผิวต้องระวังอย่างมาก โดยหลีกเลี่ยงกรรมวิธีร้อน (Heating) และกรรมวิธีเย็น (Cold working)
2. ต้องระวังตำแหน่งการทดสอบโดยให้ระยะหัวกดอยู่ห่างจากขอบแต่ละด้านของชิ้นงานอย่างน้อย 3 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกบอล ระยะห่างของแต่ละรอยกดห่างกันอย่างน้อย 3 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกบอลและชิ้นงานต้องมีความหนาอย่างน้อย 8 เท่าของความลึกของการกด
3. ควรวัดเส้นผ่านศูนย์กลางรอยกด 2 ครั้งในแนวตั้งฉากกันแล้วหาค่าเฉลี่ยเพื่อนำไปคำนวณหาความแข็งต่อไป

## 2.2.2 Rockwell hardness test

เป็นการวัดค่าความแข็งของวัสดุโดยการวัดความลึกของหัวกดซึ่งทำด้วยเพชรทรงกรวย หรือลูกบอลเหล็กกล้าที่มีขนาด 1.6-12.7 mm (1/16 – 1/2 in) และเลี้ยวอิทธิพลของผิวชิ้นงานทดสอบด้วยการใช้แรงกดนำค่าหนึ่ง (Minor load) เพื่อกำหนดจุดอ้างอิงในการวัดความลึก การวัดความแข็งแบบรอกเวลล์สามารถแบ่งออกได้หลายหน่วยการทดสอบจากการใช้แรงกดและหัวกดที่ต่างกัน แต่วิธีการทดสอบที่นิยมใช้ทดสอบกับโลหะมี 3 วิธี คือ รอกเวลล์ซี (Rockwell – C) , รอกเวลล์บี (Rockwell – B) และรอกเวลล์เอ (Rockwell – A) การทดสอบความแข็งแบบรอกเวลล์ซีใช้หัวกดเพชรทรงกรวย มีมุมปลาย 120° ในการทดสอบเริ่มต้นจะให้แรงกดนำ (Minor load) 10 kgf กดลงบนผิวชิ้นงานทดสอบ จากนั้นเพิ่มแรงกดหลัก (Major load) อีก 140 kgf ค่าความแข็งจะถูกอ่านเมื่อนำแรงกดหลักออก ซึ่งเนื้อชิ้นงานที่ถูกกดจะคืนตัวกลับในปริมาณหนึ่ง และคงเหลือเพียงแรงกดนำ ซึ่งปลายหัวกดจะอยู่ ณ ตำแหน่งที่เกิดจากการยุบตัวอย่างถาวรของชิ้นงานทดสอบ ดังแสดงในรูป 2.4



รูปที่ 2.4 หลักการกดของการทดสอบความแข็งแบบรอกเวลล์

ในการคิดเป็นค่าความแข็งนั้น ถ้าให้ E คือค่าคงที่ซึ่งถูกแบ่งออกเป็น 100 ส่วน ส่วนละ 0.002 mm และ e คือ ความลึกที่เกิดจากการเสียรูปอย่างถาวรจากการกด ก็จะสามารถคำนวณค่าความแข็งได้ดังนี้

$$\text{ความแข็งรอกเวลล์ซี} = 100 - \frac{e}{0.002} \text{ HRC} \quad (\text{สมการ 2.5})$$

ฉะนั้นวัสดุที่ถูกกดเข้าไปลึกมากกว่า 0.2 mm หรือวัสดุอ่อน จะไม่สามารถทำการทดสอบความแข็งแบบรอกเวลล์ซีได้ ในกรณีนี้ควรใช้การทดสอบความแข็งแบบรอกเวลล์บีหรือเอแทน

การทดสอบความแข็งแบบรอกเวลล์บีมีขั้นตอนเหมือนกับการทดสอบความแข็งแบบรอกเวลล์ซีแต่ใช้หัวกดที่ทำจากลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1/16 in หรือ 1.59 mm ใช้แรงกดหลัก 90 kgf เหมาะกับการทดสอบวัสดุอ่อน เพราะมีการยืดช่วงของ E เป็น 0.26 mm และแบ่งเป็น 130 ส่วน ส่วนละ 0.002 mm ฉะนั้นค่าความแข็งจึงคำนวณได้จาก

$$\text{ความแข็งรอกเวลล์บี} = 130 - \frac{e}{0.002} \text{ HRB} \quad (\text{สมการ 2.6})$$

ในขณะที่การทดสอบความแข็งแบบรอกเวลล์เอจะกระทำเช่นเดียวกันกับการทดสอบความแข็งแบบรอกเวลล์ซี คือใช้หัวกดเพชรทรงกรวย และกำหนดระยะ E = 0.2 mm แต่ใช้แรงกดหลัก 60 kgf เพื่อให้เหมาะสมกับการทดสอบวัสดุที่อ่อนลงในทางปฏิบัติไม่จำเป็นต้องคำนวณค่าความแข็ง เพราะจะมีเข็มชี้บอกค่าความแข็ง หรือบางเครื่องเป็นระบบอัตโนมัติ สามารถแสดงค่าความแข็งเป็นตัวเลขโดยตรง

ข้อดีของการทดสอบความแข็งแบบรอกเวลล์

1. เป็นการทดสอบค่าความแข็งที่ใช้กันอย่างแพร่หลายเนื่องจากสามารถทดสอบวัสดุได้ครอบคลุมเกือบทุกชนิด การทดสอบทำได้ง่าย รวดเร็ว มีความคลาดเคลื่อนน้อยเพราะสามารถอ่านค่าความแข็งได้โดยตรงจากเครื่องทดสอบ สามารถใช้ชิ้นงานบางลงได้เมื่อเปรียบเทียบกับ การทดสอบบริเนลล์เพราะหัวกดมีขนาดเล็กกว่า

ข้อเสียของการทดสอบความแข็งแบบรอกเวลล์

1. ต้องเตรียมผิวชิ้นงานทดสอบให้เรียบ ไม่มีรอยขีดข่วน ผิวต้องแห้งและสะอาด เพราะผิวชิ้นงานทดสอบจะมีผลต่อค่าความแข็งอย่างมากเนื่องจากรอยกตมีขนาดเล็กและไม่ลึกมาก (รอยกตมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในช่วงประมาณ 0.2 – 1 mm)

ข้อจำกัดของการทดสอบความแข็งแบบรอกเวลล์

1. ความหนาของชิ้นงานทดสอบต้องมีไม่น้อยกว่า 10 เท่าของความลึกรอยกต หรือมีมากพอที่ไม่ทำให้ผิวด้านหลังของชิ้นงานทดสอบเกิดการเสียรูปทรง

2. ระยะห่างของจุดศูนย์กลางรอยกตกับจุดศูนย์กลางรอยกตถัดไปหรือจากขอบของชิ้นงานทดสอบควรมีระยะไม่น้อยกว่า 3 mm

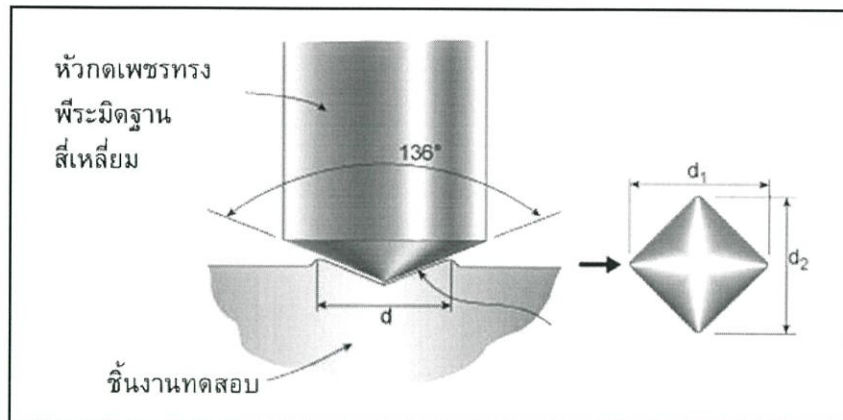
3. การทดสอบความแข็งแบบรอกเวลล์ซี เหมาะกับการทดสอบวัสดุแข็ง เช่น เหล็กกล้าชุบแข็ง ค่าความแข็งที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบแบบรอกเวลล์ซีอยู่ในช่วง 20 – 67 HRC

4. การทดสอบความแข็งแบบรอกเวลล์บี เหมาะกับการทดสอบโลหะอ่อน เช่น เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ อลูมิเนียม และทองแดง เป็นต้น ค่าความแข็งที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบแบบรอกเวลล์บีอยู่ในช่วง 35 – 100 HRB

การทดสอบความแข็งแบบรอกเวลล์เอก็มีขั้นตอนเหมือนกับการทดสอบความแข็งแบบรอกเวลล์ซี แต่จะใช้แรงกดหลักต่ำกว่า คือ 60 kgf ด้วยน้ำหนักกดที่น้อยกว่านี้เอง ทำให้รอยกตของการทดสอบกับวัสดุเดียวกันตื้นกว่าเมื่อเทียบกับรอกเวลล์ซีและจึงสามารถวัดความแข็งของวัสดุได้ในช่วงที่กว้างกว่าตั้งแต่โลหะอ่อนจนถึงเซรามิกส์ซึ่งมีความแข็งสูง แต่ข้อเสียในทางกลับกันก็คือความละเอียดในการแจกแจงระดับความแข็งจะหยาบกว่าเล็กน้อย เช่น ความแข็งในระดับ 28 และ 30 รอกเวลล์ซี อาจวัดแล้วได้ค่าไม่ต่างกันถ้าวัดด้วยรอกเวลล์เอ อย่างไรก็ตามรอกเวลล์เอสามารถใช้ทดสอบความแข็งของชิ้นงานบางที่ความหนาต่ำสุดน้อยกว่ากรณีรอกเวลล์ซีที่ขึ้นกับค่าความแข็งของวัสดุด้วย ถ้าความแข็งมาก รอยกตจะตื้นและความหนาต่ำสุดที่จะทดสอบได้ก็จะมีค่าน้อย

### 2.2.3 Vickers hardness test

เป็นการวัดค่าความแข็งที่ใช้หัวกดเพชรทรงพีรามิดมุม  $136^\circ$  ฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัส กดลงบนผิวชิ้นงานทดสอบด้วยแรงกด F ซึ่งมีขนาดตั้งแต่ 1 – 120 kgf โดยกดลงตั้งฉากกับผิวชิ้นงาน การเคลื่อนที่ของหัวกดที่กดลงบนชิ้นงานจะใช้เวลา 15 วินาที แต่จะคงค่าแรงกดไว้อีกระยะหนึ่งขึ้นกับชนิดของวัสดุ เช่น เหล็กกล้าจะคงแรงกดไว้ประมาณ 10 วินาที ในขณะที่วัสดุอ่อนจะคงแรงกดไว้นานกว่า เมื่อหัวกดถูกยกขึ้น รอยกตที่เกิดขึ้นจะถูกวัดขนาดโดยการวัดเส้นทแยงมุม  $d_1$  และ  $d_2$  ด้วยความละเอียดการวัด 0.002 mm ดังรูป ซึ่งค่าเฉลี่ยของเส้นทแยงมุม (d) จะถูกนำไปคำนวณค่าความแข็งดังนี้



รูปที่ 2.5 หลักการกดของการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์

$$\begin{aligned}
 \text{ความแข็งวิกเกอร์} &= \frac{\text{แรงกด}}{\text{พื้นที่ผิวรอยกด}} \\
 &= \frac{0.102F \times 2 \cos 22^\circ}{d^2} \\
 &= \frac{0.189F}{d^2} \qquad \qquad \qquad (\text{สมการ 2.7})
 \end{aligned}$$

เช่นเดียวกับการวัดความแข็งแบบบริเนลล์ ค่าความแข็งจะถูกคำนวณไว้แล้วที่ความยาวรอยกดและแรงกดขนาดต่างๆ ในรูปของตาราง หรืออาจมีการแสดงค่าความแข็งด้วยระบบอัตโนมัติเป็นตัวเลขจากเครื่องทดสอบโดยตรง หน่วยความแข็งคือ HV หรือ VHN

ข้อดีของการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์

1. หัวกดมีขนาดเล็กและแรงที่ใช้กดต่ำ รอยกดจึงอาจมีขนาดเล็กกว่าเกรนของโลหะ จึงสามารถวัดความแข็งได้ถึงระดับโครงสร้างจุลภาค เหมาะกับงานทดสอบที่ต้องการความละเอียดของค่าความแข็งสูง สามารถทดสอบได้ทั้งวัสดุอ่อนและวัสดุแข็ง

ข้อเสียของการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์

1. ต้องเตรียมผิวชิ้นงานให้เรียบและสะอาดมากในระดับที่สามารถส่องดูผิวเรียบภายใต้กำลังขยาย 40X ได้ ต้องไม่มีคราบน้ำมัน รอยขีดข่วน หรือฟิล์มออกไซด์ อยู่บนผิวชิ้นงานทดสอบ

ข้อจำกัดของการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์

1. ความหนาของชิ้นงานทดสอบไม่ควรน้อยกว่า 1.2 เท่าของเส้นทแยงมุมรอยกด
2. ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางรอยกดกับขอบชิ้นงานทดสอบหรือขอบของรอยกด ควรมีขนาดไม่น้อยกว่า 3 เท่าของความยาวเส้นทแยงมุมเฉลี่ยของรอยกด

## 2.3 การวิเคราะห์พฤติกรรมการคืบโดยวิธี Indentation creep

### 2.3.1 วิธีของ Sargent – Ashby [1-3]

วิธีนี้เป็นวิธีที่นิยมใช้มากที่สุด ซึ่งจะสามารถหาค่า Stress exponent ( $n$ ) ได้จากการพล็อตกราฟของค่า  $\ln(H_v)$  เทียบกับค่า  $\ln(t)$  [1-3]

โดยที่  $H_v$  คือ Vickers hardness number (วัดได้จากการทดสอบ)

$t$  คือ เวลาที่ใช้ในการทดสอบ

### 2.3.2 วิธีของ Juhasz [1-3]

วิธีนี้จะสามารถหาค่า Stress exponent ( $n$ ) ได้จากสูตรดังต่อไปนี้

$$n = \left[ \frac{\partial \ln \dot{d}}{\partial \ln H_v} \right]_d \quad (\text{สมการ 2.8})$$

โดยที่  $\dot{d}$  คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงความยาวของเส้นทแยงมุมเทียบกับเวลา

$d$  คือ ความยาวของเส้นทแยงมุม

เมื่อนำค่าของ  $\ln(H_v)$  ไปพล็อตกราฟเทียบกับค่า  $\ln(\dot{d})$  ก็จะทำให้ได้ค่าของ Stress exponent ( $n$ ) ออกมา

### 2.3.3 วิธีของ Mulhearn-Tabor

วิธีนี้จะสามารถหาค่า Stress exponent ( $n$ ) ได้จากสูตรดังต่อไปนี้

$$d = At^b + K_3 \quad (\text{สมการ 2.9})$$

โดยที่  $K_3$  คือ ค่าคงที่

$A$  คือ ค่าคงที่ที่ขึ้นกับอุณหภูมิและน้ำหนักที่นำมาใช้

$b$  คือ ตัวเลขยกกำลังที่ได้มาจากการพล็อตกราฟเทียบระหว่างค่า  $d$  กับ  $t$  (จะได้กราฟ logarithm) จากนั้นทำการ Fit curve ก็จะได้สมการเส้นตรงออกมา  $d = Kt^b$  (ได้กราฟเส้นตรงระหว่าง  $d$  กับ  $t^b$ ) ซึ่งเราจะนำค่า  $b$  ที่ได้ไปหาค่า Stress exponent ( $n$ ) ดังสูตรต่อไปนี้

$$n = \frac{1-b}{2b} \quad (\text{สมการ 2.10})$$

จากวิธีทั้ง 3 วิธีที่ใช้หาค่า Stress exponent (n) พบว่า ค่าของ n ที่ได้ในแต่ละวิธีเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับ แล้วจะให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกัน [1-3] ดังนั้นจึงเลือกวิธี Sargent - Ashby ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้มากที่สุด เนื่องจากใช้ค่าที่วัดได้โดยตรงมาทำการหาค่า Stress exponent (n) ของการเกิดครีพ จึงได้เลือกมาใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ซึ่งค่า Stress exponent (n) ที่ได้ออกมานั้นเป็นตัวแปรสำคัญที่จะบอกพฤติกรรมการเกิดครีพ ว่ามีกลไกการเกิดเป็นแบบใด

## 2.4 กลไกความเสียหายเนื่องจากความคืบ

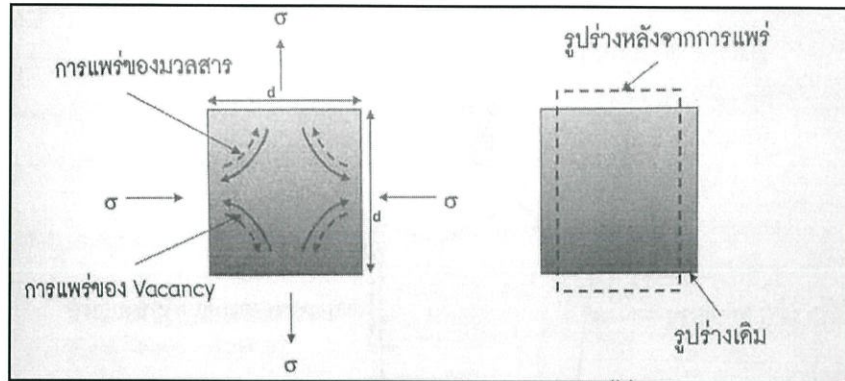
กลไกความเสียหายเนื่องจากความคืบที่สำคัญมีอยู่ 4 รูปแบบ ได้แก่ ความคืบเนื่องจากดิสโลเคชัน, ความคืบแบบ Nabarro – Herring, ความคืบแบบ Coble และการไถลตามขอบเกรน ตารางที่ 1 สรุปกลไกความเสียหายเนื่องจากความคืบทั้ง 4 แบบ [5],[7]

ตารางที่ 2.1 กลไกความเสียหายเนื่องจากความคืบทั้ง 4 แบบ

กลไก	ลักษณะ
การแพร่ (ความคืบแบบ Nabarro - Herring)	การแพร่ของช่องว่าง (Vacancy) ผ่านโครงสร้างผลึก
การแพร่ (ความคืบแบบ Coble)	การแพร่ของช่องว่าง (Vacancy) ตามขอบเกรน
การไถลของขอบเกรน (Grain-boundary sliding)	การไถลเนื่องจากการแพร่ของช่องว่าง (Vacancy) ผ่านโครงสร้างผลึกหรือตามขอบเกรน
ความคืบเนื่องจากดิสโลเคชัน (ความคืบตามกฎ Power law)	การเคลื่อนที่แบบการป็นของดิสโลเคชันผ่านสิ่งกีดขวางระดับจุลภาค

### 2.4.1 ความคืบแบบ Nabarro – Herring

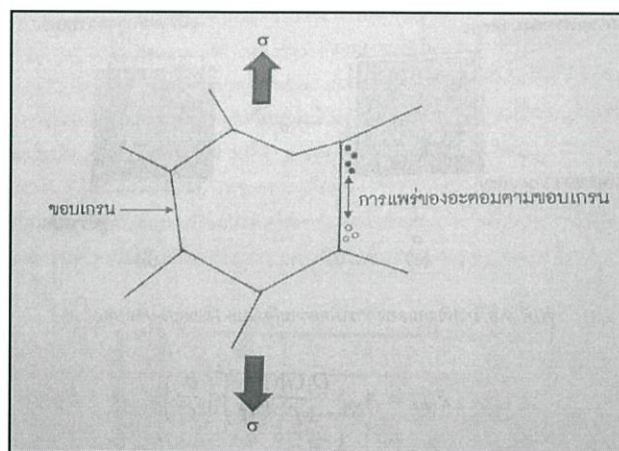
ความคืบแบบ Nabarro–Herring (Nabarro–Herring creep) คือรูปแบบหนึ่งของความคืบที่ถูกควบคุมด้วยการแพร่ หรืออาจเรียกได้ว่าเป็นความคืบเนื่องจากการแพร่ จะเกิดขึ้นเมื่ออะตอมแพร่ผ่านแลตทิซ และทำให้เกรนมีความยาวเพิ่มขึ้นตามแนวแกนของความเค้นดั่งแสดงในรูปที่ 7 ดังนั้นขนาดของความคืบแบบ Nabarro–Herring จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเป็นอย่างมากและขึ้นอยู่กับขนาดของขอบเกรนพอประมาณ แต่ขึ้นอยู่กับความเค้นเพียงเล็กน้อย กลไกประเภทนี้เกิดในสภาวะความเค้นต่ำ อุณหภูมิสูงเพิ่มมากขึ้นซึ่งโครงข่ายของผลึกที่อยู่ด้านใน หากมีการจับตัวของโครงข่ายไม่ครบเกิดช่องว่าง (Vacancy) หรือ มีสิ่งแปลกปลอมจับตัวในโครงข่าย (Substitution) ช่องว่างหรือสิ่งแปลกปลอมเหล่านี้จะกระจายตัวหรือแพร่ไปยังบริเวณขอบผลึกที่มีค่าความเค้นสูง [5]



รูปที่ 2.6 การเกิดความคืบแบบ Nabarro-Herring

#### 2.4.2 ความคืบแบบ Coble

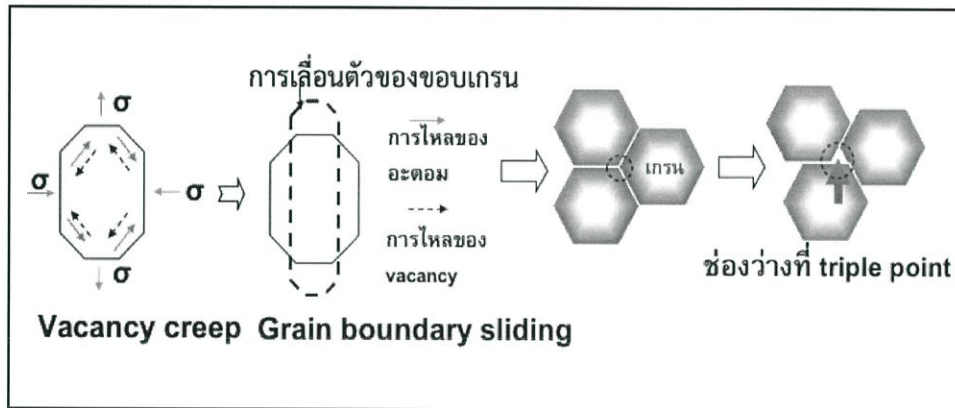
ความคืบแบบ Coble คืออีกรูปแบบหนึ่งของความคืบเนื่องจากการแพร่ ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปขึ้นในวัสดุที่มีผลึก ความคืบแบบ Coble เกิดขึ้นเมื่ออะตอมมีการแพร่ตามขอบเกรนทำให้เกิดการไหลของเนื้อวัสดุ และเป็นผลให้เกิดการเปลี่ยนรูปในเกรน โดยเกรนจะมีความยาวขึ้นตามแนวขอบเกรนดังแสดงในรูปที่ 2.8 กลไกการแพร่หรือกระจายตัวจากขอบที่มีความเค้นสูง แพร่หรือกระจายตัวไปยังขอบที่มีความเค้นต่ำอย่างช้าๆ ซึ่งกลไกประเภทนี้มักจะเกิดที่สภาวะความเค้นต่ำ อุณหภูมิสูง เกิดเฉพาะภายในขอบเขตของอะตอมแต่ละอะตอมเท่านั้น จะไม่มีการแพร่หรือกระจายตัวออกไปสะสมที่อะตอมอื่นข้างเคียง หากอะตอมเมื่อมีการแพร่หรือกระจายตัวไปแล้ว ยังคงสภาพรูปร่างเดิมเพียงแต่ขยายขนาดขึ้นหรือลดขนาดลง เรียกว่า เกิดการเปลี่ยนลักษณะแบบการยืด-หดหรือเปลี่ยนปริมาตร (Dilation) แต่ถ้ารูปร่างเปลี่ยนแปลงไปจากรูปเดิม เรียกว่า เกิดการเปลี่ยนลักษณะแบบการบิดเบี้ยว [5]



รูปที่ 2.7 การเกิดความคืบแบบ Coble

### 2.4.3 การไถลของขอบเกรน (Grain-boundary sliding)

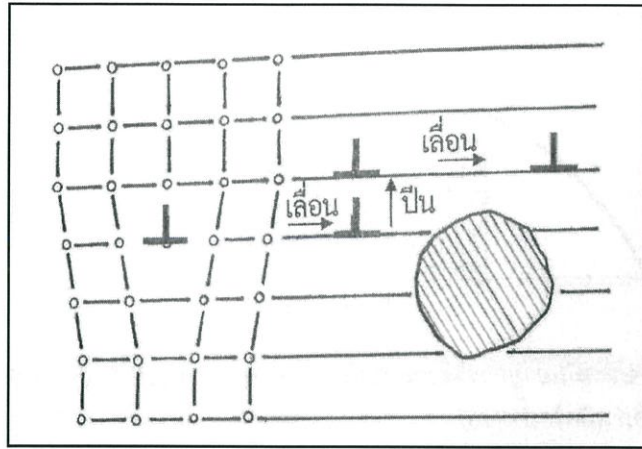
การไถลของขอบเกรน (Grain-boundary sliding) มีบทบาทสำคัญในการเกิดและการขยายตัวของรอยแตกสำหรับความคืบที่บริเวณตติยภูมิ ซึ่งเป็นจุดสำคัญที่แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างของวัสดุได้ถูกทำลายเรียบร้อยแล้ว การเลื่อนของขอบเกรนทำให้เกิดการไหลของเนื้อวัสดุหรือเกรน อัตราการเลื่อนของขอบเกรนจะขึ้นอยู่กับกระบวนการเคลื่อนที่ที่ซึ่งผิวที่ไถลเบี่ยงเบนจากระนาบที่สมบูรณ์ [5]



รูปที่ 2.8 การเกิดความคืบแบบการไถลของขอบเกรน

### 2.4.4 ความคืบเนื่องจากดิสโลเคชัน (Dislocation creep)

ความคืบเนื่องจากดิสโลเคชัน (Dislocation creep) เกิดจากการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันโดยมีการเลื่อนของดิสโลเคชัน (Dislocation glide) และการปีนของดิสโลเคชัน (Dislocation climb) เกิดขึ้นร่วมกัน เมื่อวัสดุรับแรงกระทำจะเกิดการการเปลี่ยนรูปถาวรขึ้นเนื่องจากการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันในระนาบสลิป (Slip plane) โดยทั่วไปวัสดุก็มี ความบกพร่องหรือตำหนิอยู่ภายในโครงสร้าง ความบกพร่องเหล่านี้จะเป็นสิ่งกีดขวางต่อการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน การปีนของดิสโลเคชันเกิดขึ้นได้เนื่องจากตำแหน่งว่าง (Vacancies) ในผลึกสามารถแพร่ไปที่ตำแหน่งของดิสโลเคชันได้ และ จะทำให้ดิสโลเคชันสามารถเคลื่อนที่ไปบนระนาบสลิปที่อยู่ติดกัน ดังนั้นจึงเกิดการเลี้ยวหลบสิ่งกีดขวางของดิสโลเคชันในผลึกและทำให้โลหะเกิดการเปลี่ยนรูปถาวร ส่วนอัตราความคืบ (Creep rate) ของโลหะจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการปีนของดิสโลเคชันเป็นสำคัญ [5]

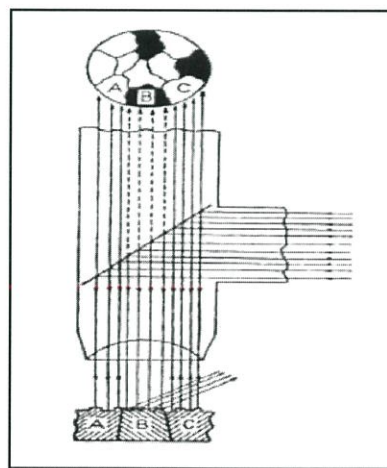


รูปที่ 2.9 การเคลื่อนของดิสโลเคชันและการป็นของดิสโลเคชัน

## 2.5 การตรวจสอบโครงสร้างระดับจุลภาค (Microstructure)

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของโลหะ จะช่วยให้เราสามารถอธิบายคุณสมบัติทางกายภาพและทางกลของโลหะ ได้ การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของโลหะจะมีประสิทธิภาพและคุณภาพขึ้นอยู่กับการเตรียมชิ้นงานทดสอบเป็นสำคัญ กล่าวคือ ชิ้นงานทดสอบจะต้องผ่านการปรับระดับของผิวหน้าและขัดผิวให้เรียบไม่มีรอยขีดข่วน มีลักษณะเป็นมัน ถ้าขั้นตอนการเตรียมงานไม่ดี ก็ไม่สามารถวิเคราะห์หรือมองภาพจากกล้องจุลทรรศน์ได้ชัดเจน

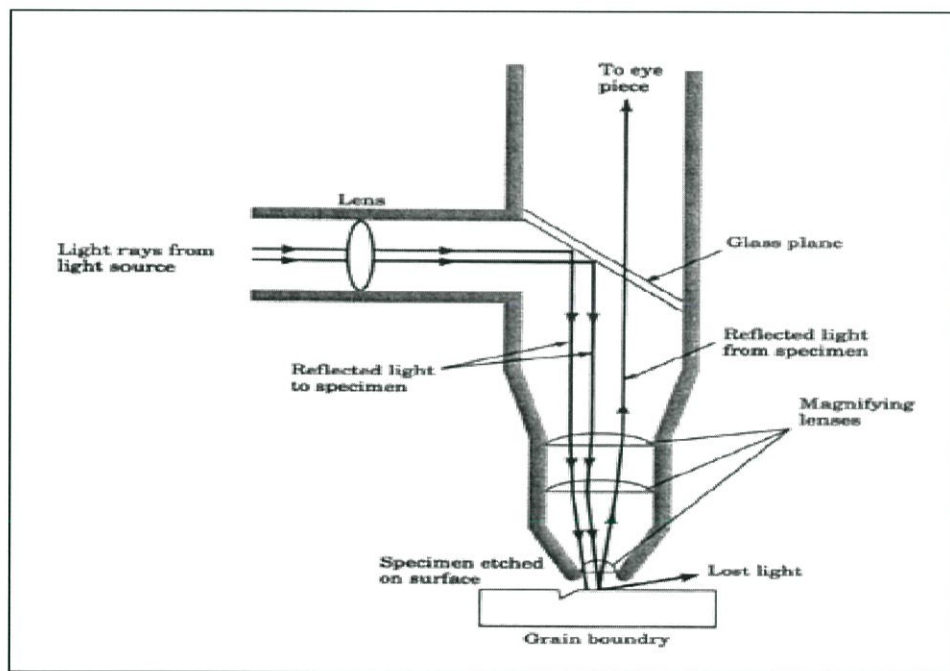
ภายหลังจากที่ชิ้นงานผ่านการขัดมันมาแล้ว เมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์จะมองเห็นภาพเป็นพื้นเรียบสว่างตลอด ผิวงาน ไม่สามารถมองเห็นโครงสร้างจุลภาคได้ จึงต้องนำชิ้นทดสอบไปทำการกัดด้วยสารเคมี เพื่อให้ผิวงานเกิดลักษณะที่แตกต่างกัน เนื่องจากชิ้นงานประกอบด้วยเฟสหลายเฟสและหลายชนิด เฟสใดที่มีความต้านทานสูงกรดสามารถกัดได้น้อย และเฟสใดมีความต้านทานตามกรดสามารถกัดได้ลึกกว่า ทำให้ผิวชิ้นงานเปลี่ยนเป็นขรุขระ เมื่อนำไปตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่ส่องลงไปบนผิวหน้าที่ขรุขระสะท้อนแสงกลับมาคนละทิศทาง ทำให้บริเวณที่แสงสะท้อนกลับมาน้อยเห็นเป็นสีดำ ส่วนบริเวณที่แสงสะท้อนกลับมาได้มากก็จะเป็นสีขาว กรณีกัดกรดด้วยระบบขาวดำดังแสดงดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.10 ลักษณะการตกกระทบและแสงสะท้อนของแสงบนผิวชิ้นงานถูกกัดด้วยสารละลาย

### 2.5.1 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical microscope, OM)

กล้องจุลทรรศน์แบบแสงเป็นกล้องที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างจุลภาค โดยใช้แสงและระบบกำเนิดแสงเป็นพื้นฐาน กล้องประเภทนี้สามารถตรวจสอบโครงสร้างได้เฉพาะที่ผิวเท่านั้นโดยการสะท้อนแสง สำหรับวัตถุทึบแสง เช่น โลหะทุกประเภท เซรามิก และพอลิเมอร์บางชนิด ความดำของภาพแตกต่างกันเกิดจากความสามารถในการสะท้อนแสงที่แตกต่างกันในบริเวณต่างๆ การตรวจสอบแบบนี้เรียกว่า เมทัลโลกราฟี (Metallography) ชิ้นงานที่ผ่านการขัดจะเรียบจนสะท้อนแสงได้เหมือนกระจก หลังจากการกัดด้วยสารเคมีและนำมาตรวจด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงจะมองเห็นโครงสร้างจุลภาค ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากเกรนมีทิศทางที่แตกต่างกัน จึงมีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยาต่างกัน แสงที่สะท้อนออกจากผิวของเกรนที่มีทิศทางการเรียงตัวของอะตอมที่แตกต่างกันหลังการกัดผิว โดยความเงาและเนื้อผิวที่เห็นในแต่ละเกรนขึ้นอยู่กับแสงที่สะท้อนของเกรนนั้นๆ หลังจากการขัดผิวที่ขอบเกรนจะเกิดร่องขนาดเล็กขึ้น เนื่องจากอะตอมที่บริเวณขอบเกรนมีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยามากกว่าบริเวณอื่นๆ จึงถูกกัดออกไปมากกว่าบริเวณอื่นภายในเกรนดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 การทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบแสง

### บทที่ 3

## วิธีการดำเนินการวิจัย

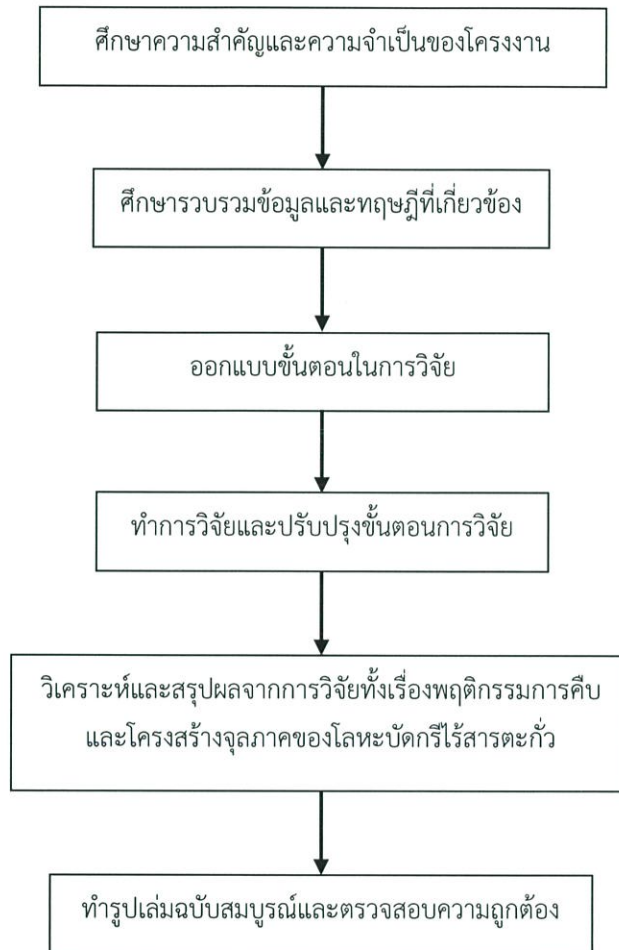
ในการทำปริญญานิพนธ์เรื่องการศึกษาพฤติกรรมการคืบของและโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-Cu-Sb จะนำชิ้นงานทดสอบที่มีส่วนผสมของ Sn-Cu-Sb ในสัดส่วนที่แตกต่างกันทั้งสิ้น 11 ชิ้น (แสดงในตารางที่ 3.1) มาทำการทดสอบโดยการกด (Indentation test) เพื่อนำค่าที่ได้ไปวิเคราะห์พฤติกรรมการคืบที่เกิดขึ้นว่าเป็นพฤติกรรมการคืบแบบใด หลังจากนั้นนำชิ้นทดสอบไปส่องกล้องจุลทรรศน์เพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมของโลหะบัดกรีแต่ละชนิดที่นำมาใช้ในการวิจัย

ชิ้นงาน	ส่วนประกอบ (%)		
	Sn	Cu	Sb
1	97	3	0
2	98.5	1.5	0
3	100	0	0
4	89	3	8
5	92	0	8
6	90.5	1.5	8
7	97.33	0	2.67
8	94.5	1.5	4
9	93	3	4
10	92.5	1.5	6
11	95.75	2.25	2

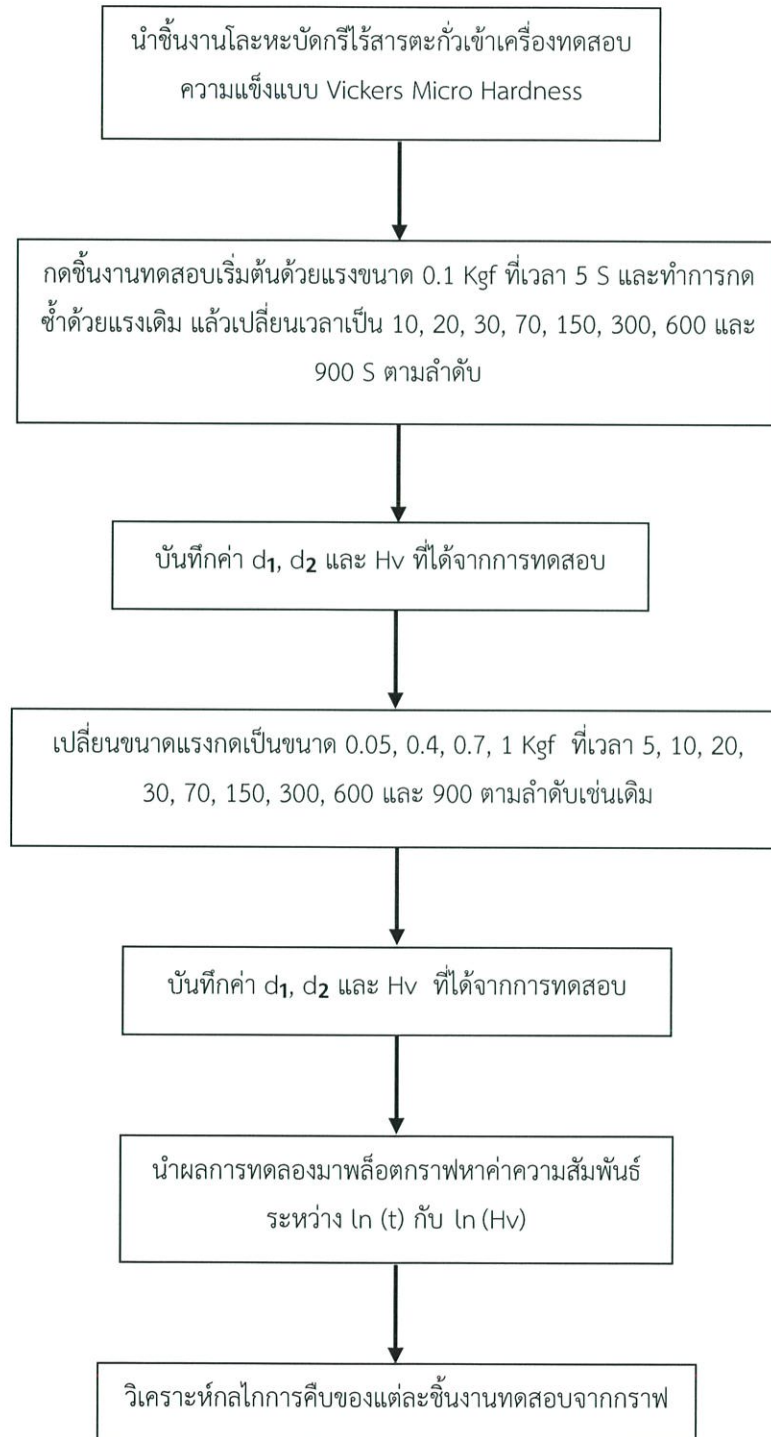
### 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

สำหรับการทำงานวิจัยเพื่อศึกษาพฤติกรรมการคืบและโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-Cu-Sb มีขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัยดังนี้

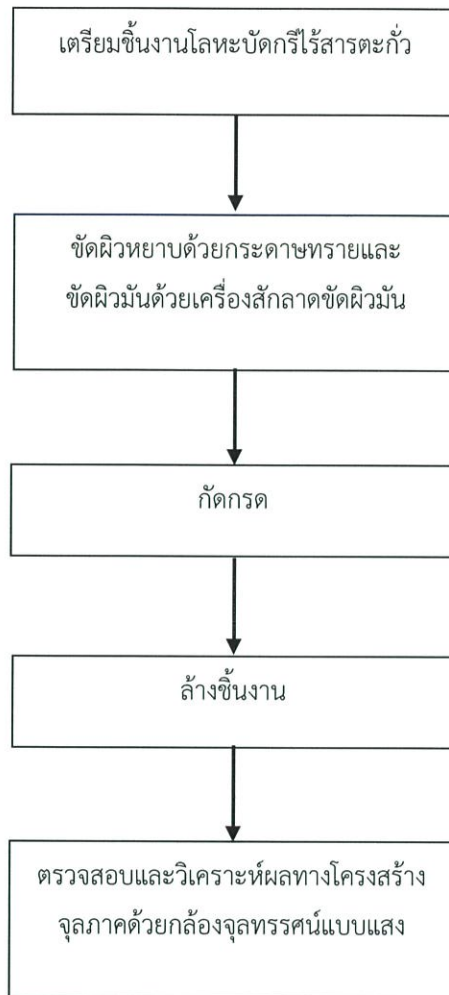


รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

### 3.2 ขั้นตอนในการเตรียมชิ้นงานทดสอบ



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วเพื่อศึกษาพฤติกรรมการคืบ

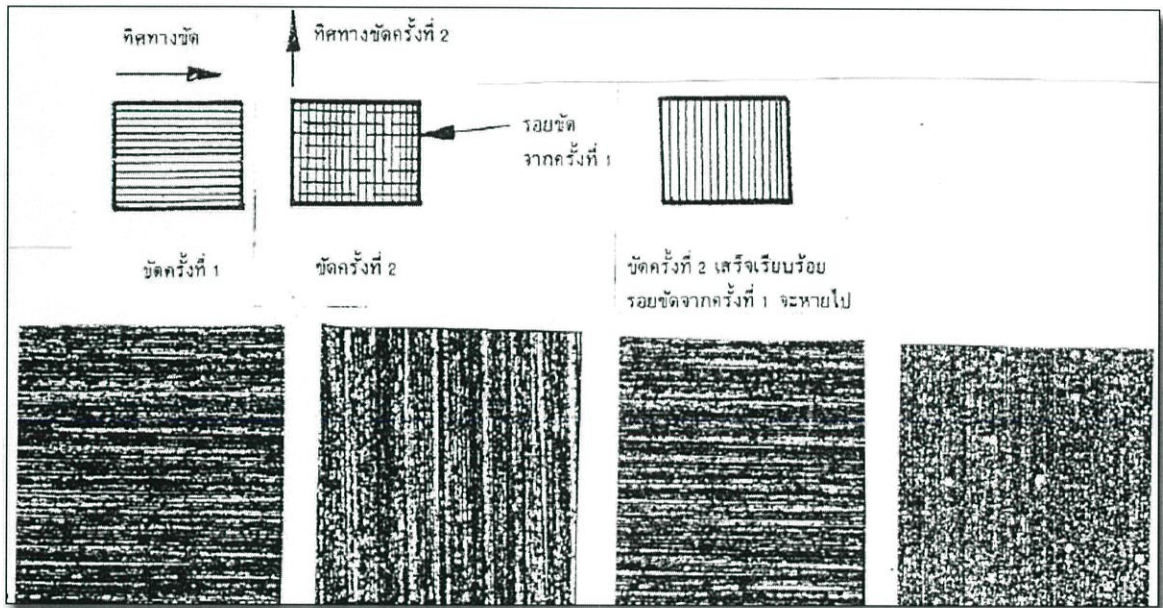


รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการเตรียมขึ้นงานโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วเพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาค

### 3.2.1 การขัดระนาบผิวชิ้นงานทดสอบ

#### 3.2.1.1 การขัดผิวหยาบ (Fine Grinding)

นำชิ้นงานมาขัดด้วยกระดาษทรายที่ทำจากผงซิลิคอนคาร์ไบด์ ตั้งแต่เบอร์ 800, 1200 และ 4000 ตามลำดับในการขัดให้นำกระดาษทรายวางลงบนพื้นผิวเรียบแล้วขัดผิวชิ้นงานที่จะตรวจสอบลงบนกระดาษทรายนั้นขณะขัดต้องใช้น้ำหล่อให้เปียกตลอดเวลาเพื่อไม่ให้โครงสร้างจุลภาคของโลหะบิดกรีเปลี่ยนไปเนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างการขัดและเพื่อเป็นการล้างสิ่งปนเปื้อนที่อาจติดอยู่กับชิ้นงาน เช่น เศษผงโลหะและผงซิลิคอนคาร์ไบด์ออกไปด้วย และเมื่อต้องการเปลี่ยนเบอร์กระดาษทรายเบอร์ถัดไป ควรทำการขัดในทิศทางที่ตั้งฉากกับรอยขีดเดิมจนเกิดลักษณะเป็นดังแสดงในรูปที่ 3.4 จากนั้นขัดต่อจนรอยขีดที่เกิดจากกระดาษทรายเบอร์ก่อนหน้าหายไป แล้วจึงเปลี่ยนเป็นเบอร์กระดาษทรายเบอร์ถัดไป ทำเช่นนี้ไปเรื่อยๆตามลำดับเบอร์ของกระดาษทราย



รูปที่ 3.4 การขัดด้วยกระดาษทราย

#### 3.2.1.2 การขัดผิวมัน (Fine Polishing)

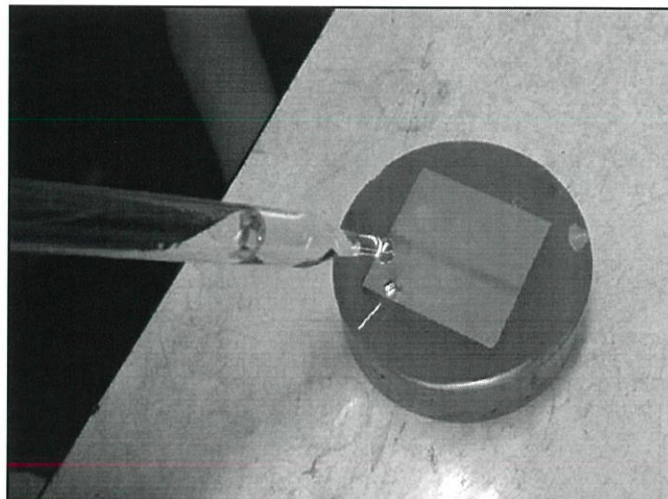
หลังจากขัดชิ้นงานด้วยกระดาษทรายเสร็จแล้ว จะนำชิ้นงานมาขัดด้วยผ้าสักหลาดแสดงไว้ดังรูปที่ 3.5 เพื่อเป็นการกำจัดรอยกระดาษทรายที่ปรากฏบนผิวของชิ้นงาน ด้วยผงอะลูมินา (Aluminum oxide) ผสมกับน้ำ ซึ่งผงอะลูมินาที่ใช้จะมีขนาด 0.30 ไมครอน เนื่องจากชิ้นงานทดสอบนั้นเป็นชิ้นงานอ่อน ซึ่งการขัดมันด้วยผงขัดจะทำให้ผิวของชิ้นงานมีความมันเงา การขัดจึงต้องใช้แรงกดน้อย เพื่อไม่ให้เกิดรอยบนชิ้นงานเนื่องจากเศษโลหะที่ฝังในผ้าสักหลาดและอาจทำให้ผ้าสักหลาดขาดได้



รูปที่ 3.5 เครื่องขัดผิวชิ้นงานแบบละเอียด

### 3.2.1.3 การกัดกรด (Etching)

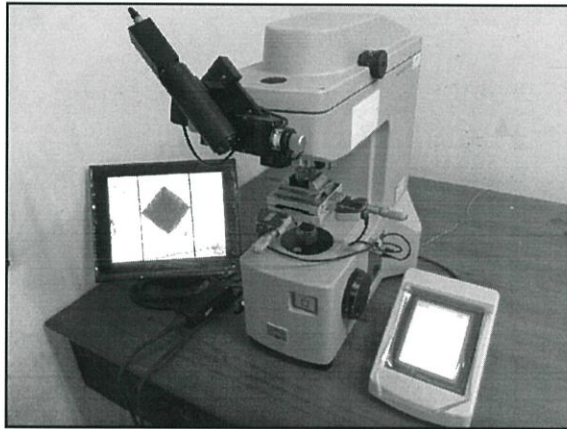
ก่อนการกัดกรดเราต้องนำชิ้นงานที่ผ่านขั้นตอนการขัดแล้วไปทำความสะอาดด้วยน้ำสะอาดและปล่อยให้แห้ง หลังจากนั้นเอาไปกัดผิวหน้าชิ้นงาน โดยชิ้นงานที่เรานำมากัดมี 4 ชิ้นประกอบด้วย 92Sn - 8Sb, 97Sn-3Cu, 100Sn และ 89Sn-3Cu-8Sb ซึ่งแต่ละชิ้นงานจะกัดด้วยสารประกอบที่แตกต่างกันดังนี้ 92Sn - 8Sb กัดด้วยสารประกอบ  $\text{HNO}_3$  (2%), Ethanol or Methanol (98%) [4], 97Sn-3Cu กัดด้วยสารประกอบ Ferric Chloride (10 grams), HCl (5-25 ml) [5], 100Sn กัดด้วยสารประกอบ HCl (2%), Ethanol or Methanol (98%) [4] และ 89Sn-3Cu-8Sb กัดด้วยสารประกอบ HCl (2-5%), Ethanol (100%) [5] โดยใช้เวลาในการกัดกรดประมาณ 1-8 วินาที ดังรูปที่ 3.6 แล้วล้างด้วยน้ำสะอาดทันทีจากนั้นเป่าให้แห้งสนิทเพื่อนำไปตรวจดูโครงสร้างจุลภาคในขั้นตอนต่อไป



รูปที่ 3.6 ชิ้นงานที่ทำการกัดกรด

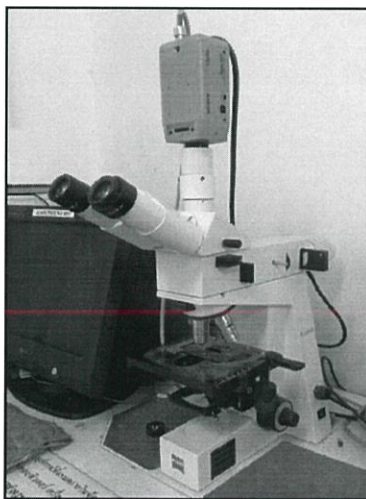
### 3.3 การตรวจสอบพฤติกรรมการคืบและโครงสร้างจุลภาค

3.3.1 การตรวจสอบพฤติกรรมการคืบด้วยเครื่องทดสอบแบบ Vickers micro hardness ยี่ห้อ Mitutoty รุ่น HM113 ซึ่งเป็นการวัดความแข็งโดยใช้หัวกดเพชรทรงพีรามิดฐานสี่เหลี่ยม (Square-Based Diamond pyramid) ที่ปลายหัวกดทำมุม 136 องศาตกลงบนชิ้นงาน ซึ่งค่าความแข็งที่ได้เครื่องจะคำนวณมาจากแรงกดที่กระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ผิว



รูปที่ 3.7 เครื่องทดสอบแบบ Vickers micro hardness

3.3.2 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคเบื้องต้นด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical microscope, OM) หลังจากผ่านขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานแล้ว ชิ้นงานจะถูกนำมาส่องที่กล้องจุลทรรศน์แบบแสงเพื่อดูลักษณะโดยรวมของผิวชิ้นงานว่ามีรอยตำหนิหรือไม่ และเพื่อศึกษาลักษณะของโครงสร้างจุลภาค การกระจายตัว รวมถึงลักษณะและขนาดเกรน เนื่องจากโครงสร้างจุลภาคเหล่านั้นส่งผลโดยตรงต่อสมบัติทางกลของโลหะผสม ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง

## บทที่ 4

### การวิเคราะห์ผลการทดลอง

#### 4.1 การวิเคราะห์ผลทางกล

##### 4.1.1 การทดสอบความแข็ง (Hardness test)

จากการทดสอบความแข็งของชิ้นงานโดยใช้เครื่องทดสอบความแข็งแบบ Vickers micro hardness ผลการทดลองจากการทดสอบความแข็งชิ้นงานที่มีส่วนผสมของ Sn, Cu, Sb ในสัดส่วนที่ต่างกัันทั้ง 11 ชิ้น ใช้แรงในการกดขนาด 0.05, 0.1, 0.3, 0.5 และ 1.0 กิโลกรัมแรง(kgf) แต่ละโหลดจะใช้เวลา 5, 10, 20, 30, 70, 150, 300, 600 และ 900 วินาที

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองของชิ้นงานที่ 1 (97Sn-3Cu)

load (Kgf)	t (s)	d1	d2	Hv	load (Kgf)	t (s)	d1	d2	Hv
0.05	5	100.15	100.76	9.13	0.1	5	157.60	157.33	9.13
	10	100.20	102.46	9.06		10	158.00	160.46	9.06
	20	102.83	107.70	8.36		20	161.93	160.10	8.36
	30	108.13	107.16	8.00		30	165.93	163.03	8.00
	70	109.13	110.66	7.66		70	167.93	169.76	7.66
	150	114.50	115.40	7.00		150	171.06	176.10	7.00
	300	117.03	117.46	6.70		300	189.33	194.03	6.70
	600	125.76	126.93	5.80		600	196.83	194.16	5.80
	900	124.26	128.30	5.80		900	201.70	205.00	5.80
0.3	5	266.80	268.6	7.73	0.5	5	339.23	339.06	8.06
	10	270.40	267.66	7.70		10	347.26	355.16	7.53
	20	277.13	272.5	7.36		20	363.00	353.46	7.23
	30	278.96	275.23	7.23		30	372.00	371.70	6.70
	70	283.60	274.23	7.10		70	392.13	386.23	6.13
	150	282.60	274.23	7.06		150	109.83	405.23	5.56
	300	297.86	292.33	6.40		300	433.43	422.20	5.06
	600	338.50	319.40	5.13		600	445.06	433.56	4.80
	900	332.10	333.70	5.03		900	453.93	439.36	4.66

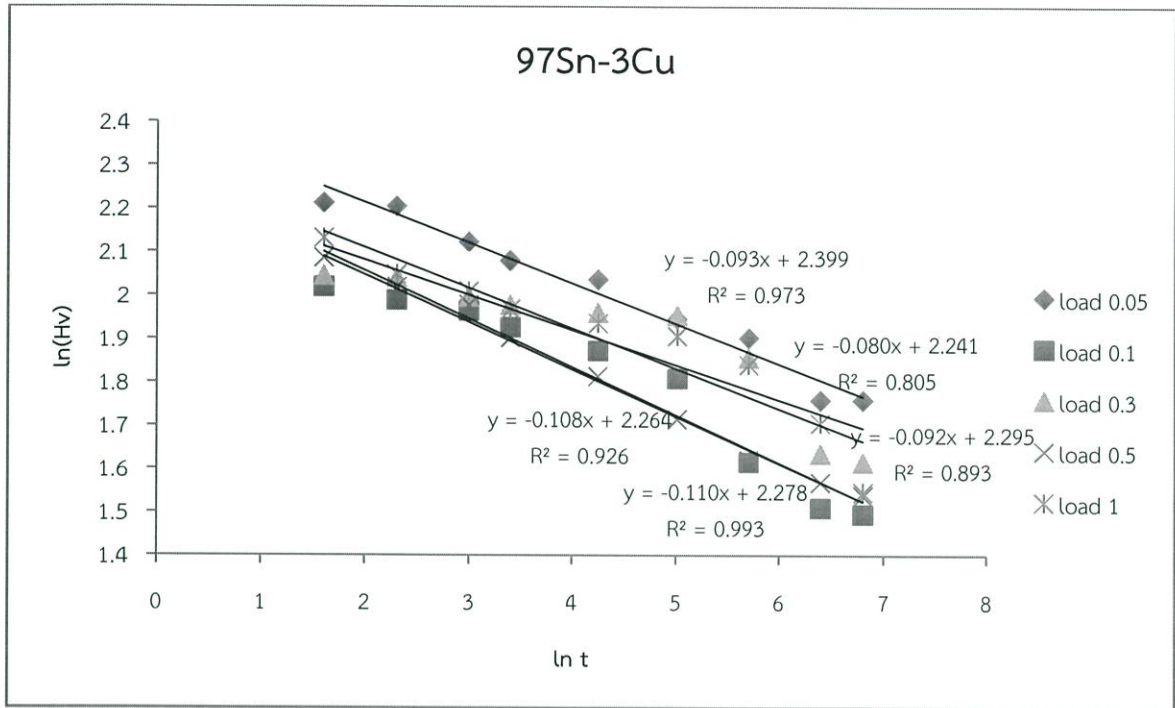
ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองของชิ้นงานที่ 1 (97Sn-3Cu) (ต่อ)

load (Kgf)	t (s)	d1	d2	Hv
1	5	469.73	470.80	8.43
	10	492.83	484.56	7.76
	20	499.60	497.50	7.46
	30	517.30	501.93	7.16
	70	528.30	509.43	6.90
	150	528.30	522.80	6.73
	300	543.56	541.60	6.30
	600	575.40	589.00	5.50
	900	629.26	627.70	4.70

ค่าความแข็ง (Hv) ในตารางจะอ่านค่าได้จากเครื่องทดสอบโดยตรง จากนั้นทำการแปลงค่า Hv และค่า t ให้อยู่ในรูป ln (Hv) และ ln (t) แล้วนำไปพล็อตกราฟเพื่อหาความสัมพันธ์ แสดงดังตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.1

ตารางที่ 4.3 การแปลงค่า Hv และค่า t ให้อยู่ในรูป ln (Hv) และ ln (t)

ln t	ln Hv				
	load 0.05	load 0.1	load 0.3	load 0.5	load 1
1.609	2.21	2.01	2.04	2.08	2.13
2.303	2.20	1.98	2.04	2.01	2.04
2.996	2.12	1.96	1.99	1.97	2.01
3.401	2.07	1.92	1.97	1.90	1.97
4.248	2.03	1.87	1.96	1.81	1.94
5.011	1.94	1.80	1.95	1.71	1.90
5.704	1.90	1.61	1.85	1.62	1.84
6.397	1.75	1.51	1.63	1.56	1.70
6.802	1.75	1.49	1.61	1.53	1.54



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงผลการทดลองของชิ้นงานที่มีส่วนผสม 97Sn-3Cu

สมการเชิงเส้นที่ได้จากรูปที่ 4.1 สามารถคำนวณได้จากโปรแกรม Microsoft office excel ซึ่งรูปแบบทั่วไปของสมการเชิงเส้นในตัวแปร x และ y คือ

$$Y = mx + b \quad (\text{สมการ 4.1})$$

เมื่อ m คือ ค่าคงตัวที่แสดงความชันหรือเกรเดียนต์ของเส้นตรง

b คือ จุดที่เส้นตรงตัดแกน y

หลังจากนั้นนำค่าคงที่ที่แสดงความชัน (m) ไปหาค่า Stress exponent (n) ดังสมการที่ 4.2 ซึ่งค่า n ที่ได้จะเป็นตัวแปรที่สามารถบอกได้ว่าชิ้นงานแต่ละชิ้นมีพฤติกรรมการคืบเป็นแบบใด

$$\text{Slope} = \frac{-1}{n} \quad (\text{สมการ 4.2})$$

จากผลการทดสอบชิ้นงานที่มีส่วนผสม 97Sn-3Cu สรุปได้ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.4 ค่า Stress exponent ของชิ้นงานที่มีส่วนผสม 97Sn-3Cu

load	สมการเส้นตรง	Slope	n (Stress exponent)
0.05	$-0.093x + 2.399$	-0.093	10.75
0.1	$-0.080x + 2.295$	-0.080	12.50
0.3	$-0.092x + 2.241$	-0.092	10.86
0.5	$-0.110x + 2.278$	-0.110	9.09
1	$-0.108x + 2.264$	-0.108	9.25

เนื่องจากค่า n ที่ได้ทั้งหมดมีค่า  $n > 6$  จึงสรุปได้ว่าชิ้นงานที่มีส่วนผสม 97Sn-3Cu เกิดการคืบเนื่องมาจากดิสโลเคชัน (Dislocation creep) [1]

ตารางที่ 4.5 ผลการทดลองของชิ้นงานที่ 2 (98.5Sn-1.5Cu)

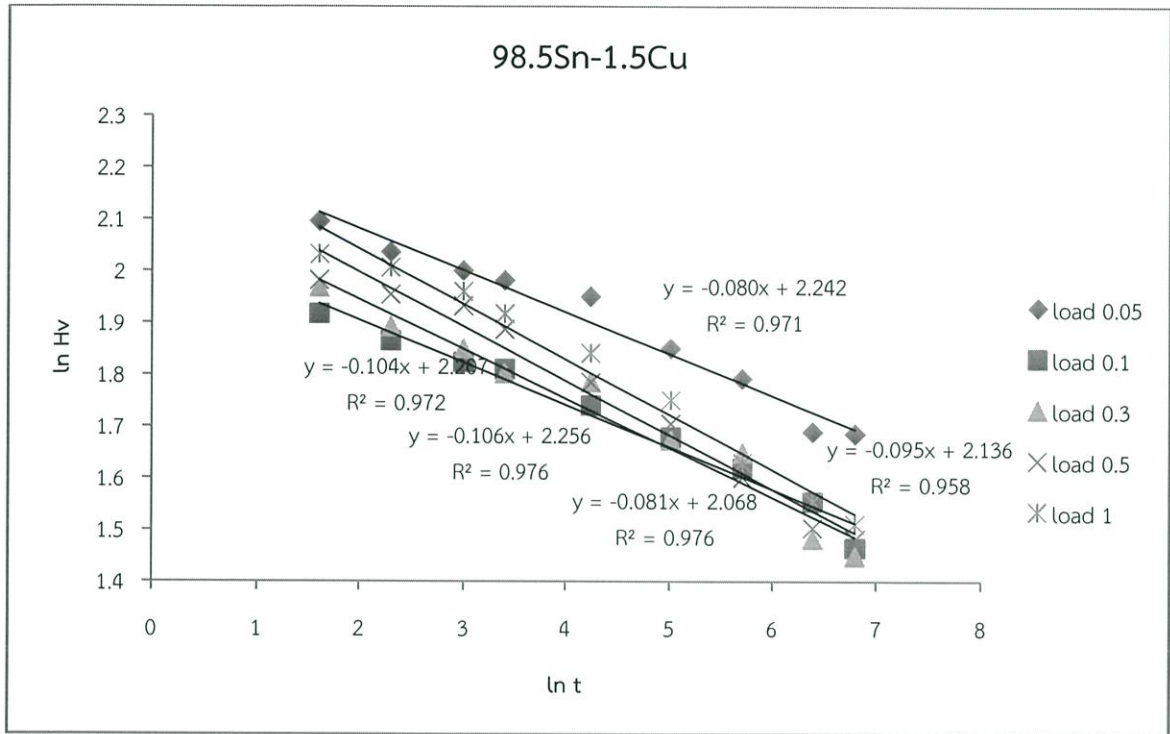
load (Kgf)	t (s)	d1	d2	Hv	load (Kgf)	t (s)	d1	d2	Hv
0.05	5	106.13	107.20	8.13	0.1	5	155.43	164.83	6.80
	10	111.66	108.36	7.66		10	170.40	168.90	6.46
	20	109.53	114.60	7.40		20	172.76	172.60	6.20
	30	113.03	112.76	7.26		30	174.13	173.1	6.16
	70	115.40	114.56	7.03		70	178.70	181.86	5.70
	150	121.30	120.40	6.36		150	188.33	183.26	5.36
	300	123.13	125.76	6.00		300	190.67	192.37	5.05
	600	133.03	127.26	5.46		600	199.16	196.90	4.73
	900	134.63	127.56	5.40		900	209.73	202.50	4.33
0.3	5	286.20	271.90	7.16	0.5	5	357.30	357.06	7.26
	10	286.20	291.30	6.63		10	363.46	360.70	7.06
	20	297.80	293.50	6.36		20	367.40	367.13	6.90
	30	309.3	296.70	6.06		30	375.03	375.56	6.60
	70	301.83	308.66	5.96		70	395.76	394.60	5.96
	150	323.56	321.16	5.33		150	410.60	410.10	5.50
	300	331.33	323.00	5.20		300	437.30	430.43	4.96
	600	356.06	355.20	4.40		600	450.70	455.13	4.50
	900	360.73	359.80	4.26		900	459.90	456.53	4.40

ตารางที่ 4.6 ผลการทดลองของชิ้นงานที่ 2 (98.5Sn-1.5Cu) (ต่อ)

load (Kgf)	t (s)	d1	d2	Hv
1	5	492.96	493.03	7.63
	10	499.76	500.90	7.43
	20	514.00	509.73	7.10
	30	523.50	520.20	6.80
	70	546.20	538.56	6.30
	150	583.03	553.73	5.76
	300	588.70	580.80	5.10
	600	633.63	617.06	4.73
	900	645.60	635.26	4.53

ตารางที่ 4.7 การแปลงค่า Hv และค่า t ให้อยู่ในรูป ln (Hv) และ ln (t)

ln t	ln Hv				
	load 0.05	load 0.1	load 0.3	load 0.5	load 1
1.609	2.09	1.91	1.96	1.98	2.03
2.303	2.03	1.86	1.89	1.95	2.00
2.996	2.01	1.82	1.85	1.93	1.96
3.401	1.98	1.81	1.80	1.88	1.91
4.248	1.95	1.74	1.78	1.78	1.84
5.011	1.85	1.67	1.67	1.70	1.75
5.704	1.79	1.61	1.64	1.60	1.62
6.397	1.69	1.55	1.48	1.50	1.55
6.802	1.68	1.46	1.44	1.48	1.51



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงผลการทดลองของชิ้นงานที่มีส่วนผสม 98.5Sn-1.5Cu

ตารางที่ 4.8 ค่า Stress exponent ของชิ้นงานที่มีส่วนผสม 98.5Sn-1.5Cu

load	สมการเส้นตรง	Slope	n (Stress exponent)
0.05	$-0.080x + 2.241$	-0.08	12.50
0.1	$-0.106x + 2.068$	-0.106	9.43
0.3	$-0.095x + 2.136$	-0.095	10.52
0.5	$-0.081x + 2.207$	-0.081	12.34
1	$-0.104x + 2.256$	-0.104	9.61

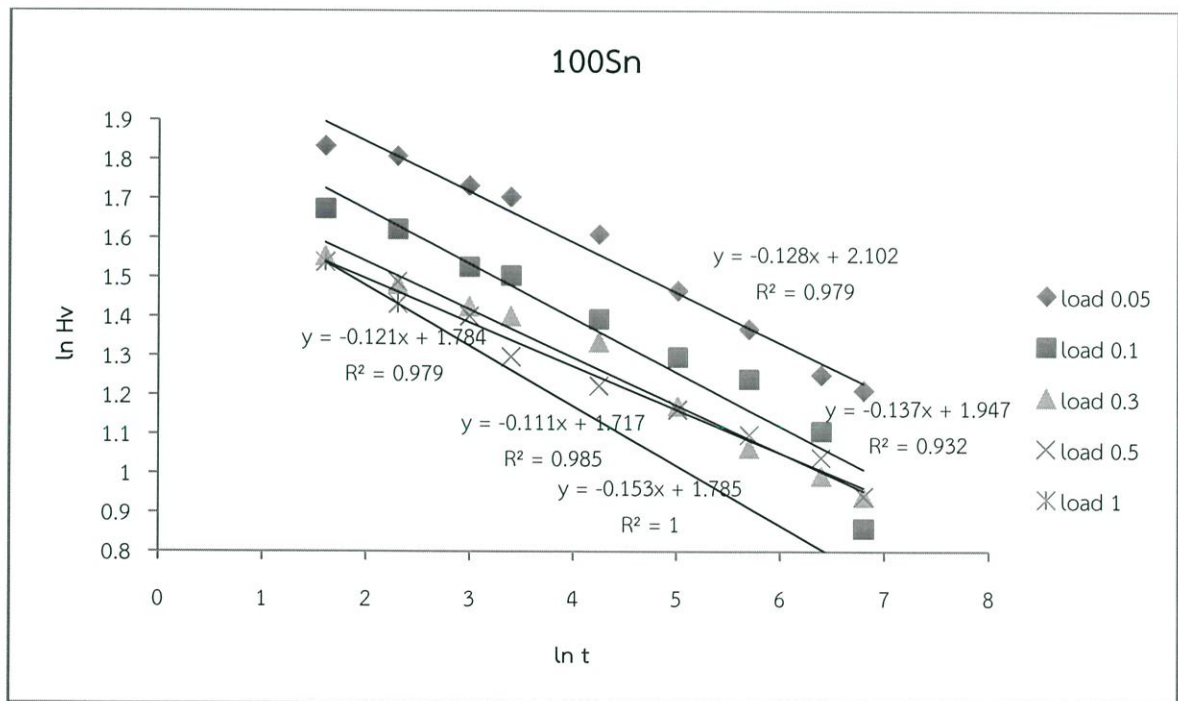
เนื่องจากค่า n ที่ได้ทั้งหมดมีค่า  $n > 6$  จึงสรุปได้ว่าชิ้นงานที่มีส่วนผสม 98.5Sn-1.5Cu เกิดการคืบเนื่องมาจาก ดิสโลเคชัน (Dislocation creep) [1]

ตารางที่ 4.9 ผลการทดลองของชิ้นงานที่ 3 (100Sn)

load (Kgf)	t (s)	d1	d2	Hv	load (Kgf)	t (s)	d1	d2	Hv
0.05	5	126.20	116.76	6.26	0.1	5	188.80	183.83	5.33
	10	125.13	135.43	6.10		10	191.33	191.10	5.06
	20	133.03	122.70	5.66		20	204.03	197.80	4.60
	30	133.36	126.76	5.50		30	204.26	203.20	4.50
	70	139.80	132.23	5.00		70	220.63	210.43	4.03
	150	150.00	144.23	4.33		150	224.33	225.90	3.66
	300	153.33	153.23	3.93		300	228.96	233.70	3.46
	600	165.83	157.10	3.50		600	248.96	246.13	3.03
	900	169.13	162.20	3.36		900	269.03	255.33	2.36
0.3	5	346.6	340.33	4.73	0.5	5	444.46	448.00	4.66
	10	353.36	358.20	4.40		10	461.86	453.83	4.43
	20	365.46	365.13	4.16		20	478.23	477.33	4.06
	30	376.36	361.60	4.06		30	499.76	335.10	3.66
	70	386.70	379.33	3.80		70	537.53	507.20	3.40
	150	396.43	414.33	3.23		150	546.13	528.73	3.20
	300	438.30	438.73	2.90		300	573.70	545.70	3.00
	600	448.03	456.30	2.70		600	578.30	566.60	2.83
	900	468.83	455.83	2.56		900	604.03	599.23	2.56
1	5	652.16	608.36	4.66					
	10	644.46	680.06	4.13					
	20								
	30								
	70								
	150								
	300								
	600								
	900								

ตารางที่ 4.10 การแปลงค่า Hv และค่า t ให้อยู่ในรูป ln (Hv) และ ln (t)

ln t	ln Hv				
	load 0.05	load 0.1	load 0.3	load 0.5	load 1
1.609	1.83	1.67	1.55	1.53	1.53
2.303	1.80	1.62	1.48	1.48	1.43
2.996	1.73	1.52	1.42	1.40	
3.401	1.71	1.50	1.40	1.29	
4.248	1.61	1.39	1.33	1.22	
5.011	1.46	1.29	1.17	1.16	
5.704	1.36	1.24	1.06	1.09	
6.397	1.25	1.11	0.99	1.04	
6.802	1.21	0.85	0.94	0.94	



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงผลการทดลองของชิ้นงานที่มีส่วนผสม 100Sn

ตารางที่ 4.11 ค่า Stress exponent ของชิ้นงานที่มีส่วนผสม 100Sn

load	สมการเส้นตรง	Slope	n (Stress exponent)
0.05	-0.128x + 2.102	-0.128	7.81
0.1	-0.137x + 1.947	-0.137	7.29
0.3	-0.121x + 1.784	-0.121	8.26
0.5	-0.111x + 1.717	-0.111	9.01
1	-0.133x + 1.785	-0.133	7.51

เนื่องจากค่า n ที่ได้ทั้งหมดมีค่า  $n > 6$  จึงสรุปได้ว่าชิ้นงานที่มีส่วนผสม 100Sn เกิดการคืบเนื่องมาจาก ดิสโลเคชัน (Dislocation creep) [1]

ตารางที่ 4.12 ผลการทดลองของชิ้นงานที่ 4 (89Sn-3Cu-8Sb)

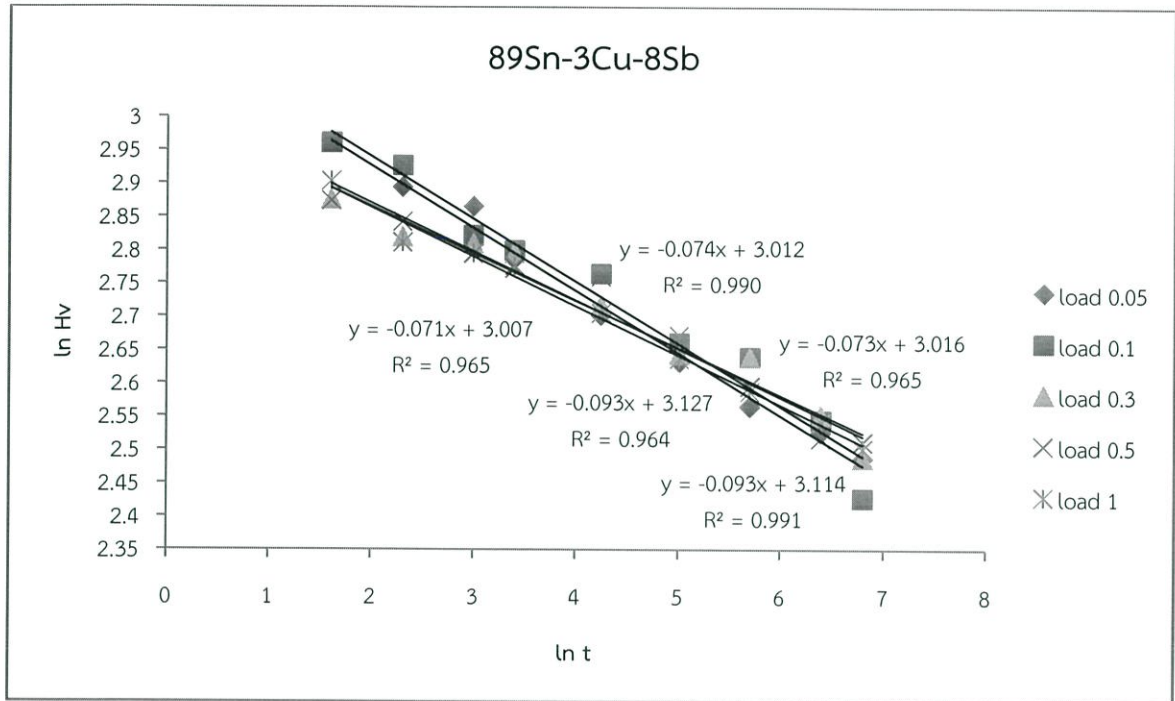
load (Kgf)	t (s)	d1	d2	Hv	load (Kgf)	t (s)	d1	d2	Hv
0.05	5	70.88	67.53	6.26	0.1	5	97.16	98.96	5.33
	10	73.36	69.82	6.10		10	101.50	97.90	5.06
	20	72.47	72.98	5.66		20	106.33	103.86	4.60
	30	77.30	74.01	5.50		30	111.73	100.66	4.50
	70	79.82	78.06	5.00		70	105.83	110.73	4.03
	150	84.36	78.90	4.33		150	116.63	110.96	3.66
	300	83.53	87.98	3.93		300	115.06	115.10	3.46
	600	85.59	86.01	3.50		600	120.23	121.23	3.03
	900	88.48	88.24	3.36		900	125.33	130.60	2.36
0.3	5	179.86	174.23	4.73	0.5	5	232.60	225.50	4.66
	10	188.06	182.36	4.40		10	236.36	228.70	4.43
	20	182.86	182.70	4.16		20	245.83	232.10	4.06
	30	187.93	180.70	4.06		30	243.93	237.33	3.66
	70	193.80	189.90	3.80		70	247.56	245.66	3.40
	150	200.10	198.36	3.23		150	255.80	251.66	3.20
	300	198.36	198.83	2.90		300	267.23	259.16	3.00
	600	212.40	203.76	2.70		600	277.23	270.50	2.83
	900	216.86	214.53	2.56		900	276.23	277.03	2.56

ตารางที่ 4.13 ผลการทดลองของชิ้นงานที่ 4 (89Sn-3Cu-8Sb) (ต่อ)

load (Kgf)	t (s)	d1	d2	Hv
1	5	318.56	319.33	7.63
	10	333.96	334.40	7.43
	20	338.76	334.86	7.10
	30	335.56	343.63	6.80
	70	361.43	342.63	6.30
	150	364.36	365.13	5.76
	300	370.30	376.36	5.10
	600	379.80	385.10	4.73
	900	390.10	389.36	4.53

ตารางที่ 4.14 การแปลงค่า Hv และค่า t ให้อยู่ในรูป ln (Hv) และ ln (t)

ln t	ln Hv				
	load 0.05	load 0.1	load 0.3	load 0.5	load 1
1.609	2.96	2.96	2.87	2.87	2.90
2.303	2.89	2.92	2.81	2.84	2.81
2.996	2.86	2.82	2.80	2.79	2.79
3.401	2.78	2.79	2.79	2.77	2.77
4.248	2.70	2.76	2.71	2.76	2.70
5.011	2.63	2.66	2.64	2.67	2.63
5.704	2.56	2.63	2.63	2.59	2.58
6.397	2.52	2.54	2.55	2.51	2.54
6.802	2.48	2.42	2.48	2.51	2.50



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงผลการทดลองของชิ้นงานที่มีส่วนผสม 89Sn-3Cu-8Sb

ตารางที่ 4.15 ค่า Stress exponent ของชิ้นงานที่มีส่วนผสม 89Sn-3Cu-8Sb

load	สมการเส้นตรง	Slope	n (Stress exponent)
0.05	$-0.093x + 3.1276$	-0.093	10.75
0.1	$-0.074x + 3.0125$	-0.074	13.51
0.3	$-0.073x + 3.0164$	-0.073	13.69
0.5	$-0.093x + 3.1141$	-0.093	10.75
1	$-0.071x + 3.004$	-0.071	14.08

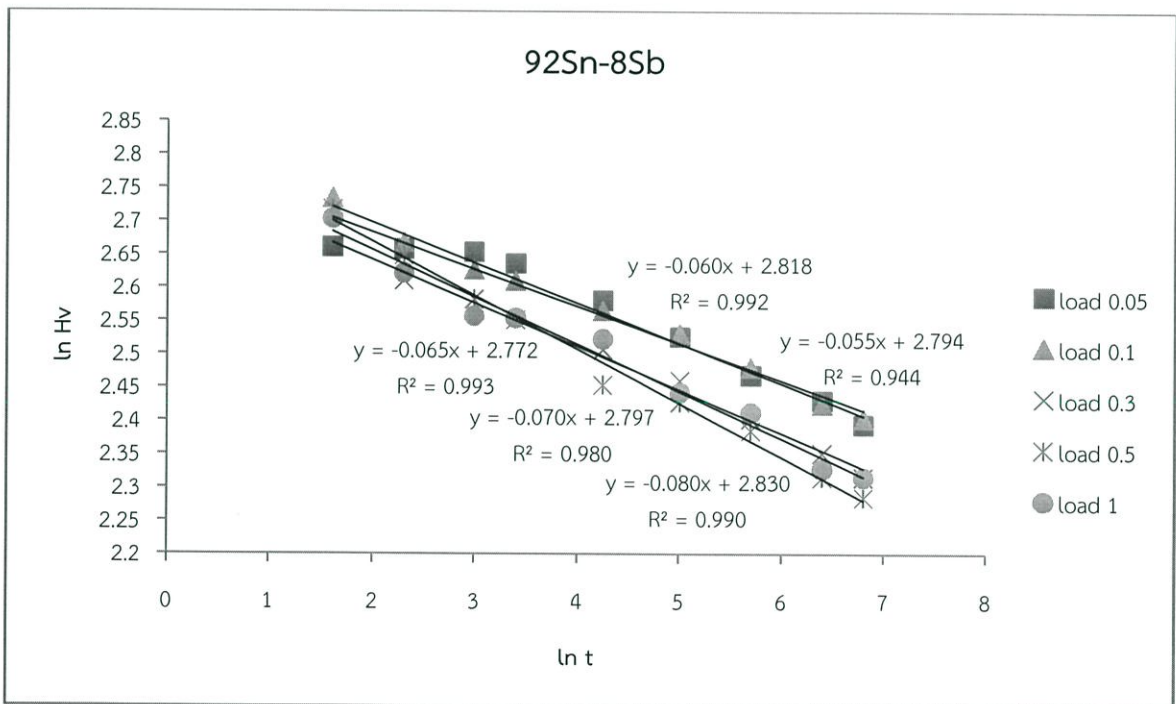
เนื่องจากค่า n ที่ได้ทั้งหมดมีค่า  $n > 6$  จึงสรุปได้ว่าชิ้นงานที่มีส่วนผสม 89Sn-3Cu-8Sb เกิดการคืบเนื่องมาจากดิสโลเคชัน (Dislocation creep) [1]

ตารางที่ 4.16 ผลการทดลองของชิ้นงานที่ 5 (92Sn-8Sb)

load (Kgf)	t (s)	d1	d2	Hv	load (Kgf)	t (s)	d1	d2	Hv
0.05	5	78.7	79.84	14.30	0.1	5	110.06	109.50	15.40
	10	80.49	82.58	14.26		10	110.30	116.93	14.40
	20	81.00	80.59	14.20		20	118.20	113.36	13.89
	30	81.23	82.59	13.96		30	118.50	114.86	13.60
	70	83.68	83.92	13.20		70	119.70	119.06	13.00
	150	83.50	88.89	12.50		150	123.60	119.50	12.56
	300	87.95	89.32	11.80		300	124.30	124.66	11.93
	600	90.80	90.86	11.36		600	127.90	128.13	11.30
	900	90.88	93.15	10.96		900	127.33	131.23	11.06
0.3	5	195.43	198.83	14.33	0.5	5	244.36	251.20	15.13
	10	201.46	203.43	13.60		10	254.86	257.50	14.13
	20	202.06	207.90	13.23		20	262.13	267.36	13.23
	30	207.36	210.60	12.83		30	258.66	279.03	12.83
	70	214.66	211.86	12.26		70	271.80	293.70	11.63
	150	210.33	226.53	11.70		150	273.13	299.03	11.33
	300	213.96	235.00	11.06		300	285.26	299.63	10.86
	600	222.00	238.60	10.50		600	296.40	308.66	10.12
	900	231.20	237.20	10.13		900	314.46	299.53	9.83
1	5	354.63	351.76	14.93					
	10	364.40	370.26	13.76					
	20	381.70	376.26	12.90					
	30	369.03	384.80	12.86					
	70	376.03	396.20	12.46					
	150	423.26	413.53	11.50					
	300	400.30	414.50	11.16					
	600	434.80	414.50	10.26					
	900	430.20	423.70	10.13					

ตารางที่ 4.17 การแปลงค่า Hv และค่า t ให้อยู่ในรูป ln (Hv) และ ln (t)

ln t	ln Hv				
	load 0.05	load 0.1	load 0.3	load 0.5	load 1
1.609	2.66	2.73	2.66	2.71	2.70
2.303	2.65	2.66	2.61	2.64	2.62
2.996	2.65	2.62	2.58	2.58	2.55
3.401	2.63	2.61	2.55	2.55	2.55
4.248	2.58	2.56	2.50	2.45	2.52
5.011	2.52	2.53	2.45	2.42	2.44
5.704	2.46	2.47	2.40	2.38	2.41
6.397	2.43	2.42	2.35	2.31	2.32
6.802	2.39	2.40	2.31	2.28	2.31



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงผลการทดลองของชิ้นงานที่มีส่วนผสม 92Sn-8Sb

ตารางที่ 4.18 ค่า Stress exponent ของชิ้นงานที่มีส่วนผสม 92Sn-8Sb

load	สมการเส้นตรง	Slope	n (Stress exponent)
0.05	-0.055x + 2.7943	-0.05	18.18
0.1	-0.060x + 2.8187	-0.06	16.66
0.3	-0.065x + 2.772	-0.06	15.38
0.5	-0.080x + 2.8304	-0.08	12.50
1	-0.070x + 2.7978	-0.07	14.28

เนื่องจากค่า n ที่ได้ทั้งหมดมีค่า  $n > 6$  จึงสรุปได้ว่าชิ้นงานที่มีส่วนผสม 92Sn-8Sb เกิดการคืบเนื่องมาจาก ดิสโลเคชัน (Dislocation creep) [1]

ตารางที่ 4.19 ผลการทดลองของชิ้นงานที่ 6 (90.5Sn-1.5Cu-8Sb)

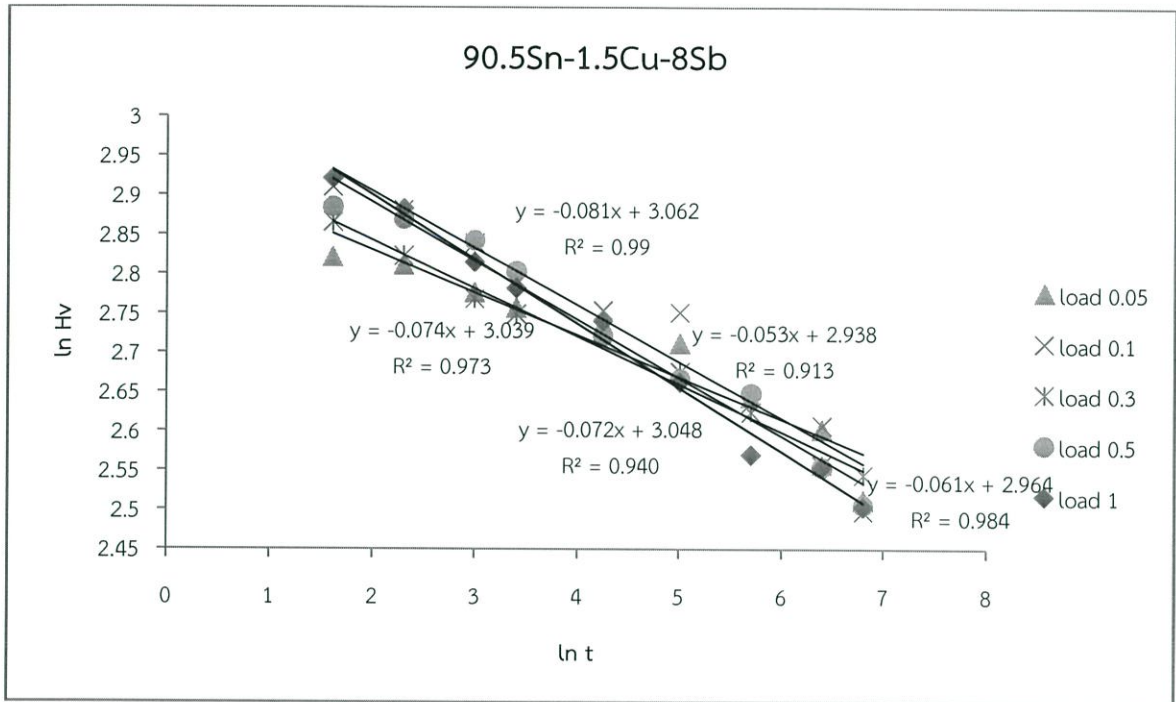
load (Kgf)	t (s)	d1	d2	Hv	load (Kgf)	t (s)	d1	d2	Hv
0.05	5	74.35	73.26	16.80	0.1	5	100.20	99.20	18.36
	10	74.26	73.51	16.63		10	100.66	103.16	17.83
	20	75.91	75.60	16.06		20	107.40	100.76	17.10
	30	76.45	76.81	15.76		30	107.33	105.90	16.30
	70	74.47	77.24	15.43		70	110.23	107.30	15.70
	150	79.17	77.70	15.06		150	111.73	104.13	15.66
	300	80.83	87.64	14.06		300	117.23	113.06	13.96
	600	83.07	82.10	13.56		600	117.83	115.93	13.56
	900	86.92	86.49	12.33		900	124.46	122.13	12.16
0.3	5	180.10	175.56	17.56	0.5	5	227.00	228.16	17.90
	10	183.26	180.26	16.83		10	228.60	229.56	17.63
	20	186.36	187.33	15.93		20	235.33	229.66	17.16
	30	190.60	186.40	15.63		30	238.55	235.70	16.50
	70	191.56	189.43	15.33		70	247.30	246.96	15.20
	150	195.16	196.46	14.53		150	253.70	253.46	14.40
	300	201.93	199.40	13.80		300	255.56	256.33	14.13
	600	209.76	205.66	12.90		600	273.53	262.93	12.86
	900	209.60	208.60	12.73		900	272.93	278.53	12.26

ตารางที่ 4.20 ผลการทดลองของชิ้นงานที่ 6 (90.5Sn-1.5Cu-8Sb) (ต่อ)

load (Kgf)	t (s)	d1	d2	Hv
1	5	314.93	315.40	18.56
	10	319.05	325.40	17.86
	20	335.60	331.06	16.70
	30	341.60	325.40	16.16
	70	350.03	341.66	15.50
	150	357.63	326.43	14.35
	300	378.16	375.20	13.06
	600	381.03	377.36	12.86
	900	391.76	387.76	12.23

ตารางที่ 4.21 การแปลงค่า Hv และค่า t ให้อยู่ในรูป ln (Hv) และ ln (t)

ln t	ln Hv				
	load 0.05	load 0.1	load 0.3	load 0.5	load 1
1.609	2.82	2.91	2.86	2.88	2.92
2.303	2.81	2.88	2.82	2.86	2.88
2.996	2.77	2.83	2.76	2.84	2.81
3.401	2.75	2.79	2.74	2.80	2.78
4.248	2.73	2.75	2.72	2.72	2.74
5.011	2.71	2.75	2.67	2.66	2.66
5.704	2.64	2.63	2.62	2.64	2.57
6.397	2.60	2.60	2.55	2.55	2.55
6.802	2.51	2.49	2.54	2.50	2.50



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงผลการทดลองของชิ้นงานที่มีส่วนผสม 90.5Sn-1.5Cu-8Sb

ตารางที่ 4.22 ค่า Stress exponent ของชิ้นงานที่มีส่วนผสม 90.5Sn-1.5Cu-8Sb

load	สมการเส้นตรง	Slope	n (Stress exponent)
0.05	$-0.053x + 2.938$	-0.053	18.86
0.1	$-0.072x + 3.048$	-0.072	13.88
0.3	$-0.061x + 2.964$	-0.061	16.39
0.5	$-0.074x + 3.039$	-0.074	13.51
1	$-0.081x + 3.062$	-0.081	12.34

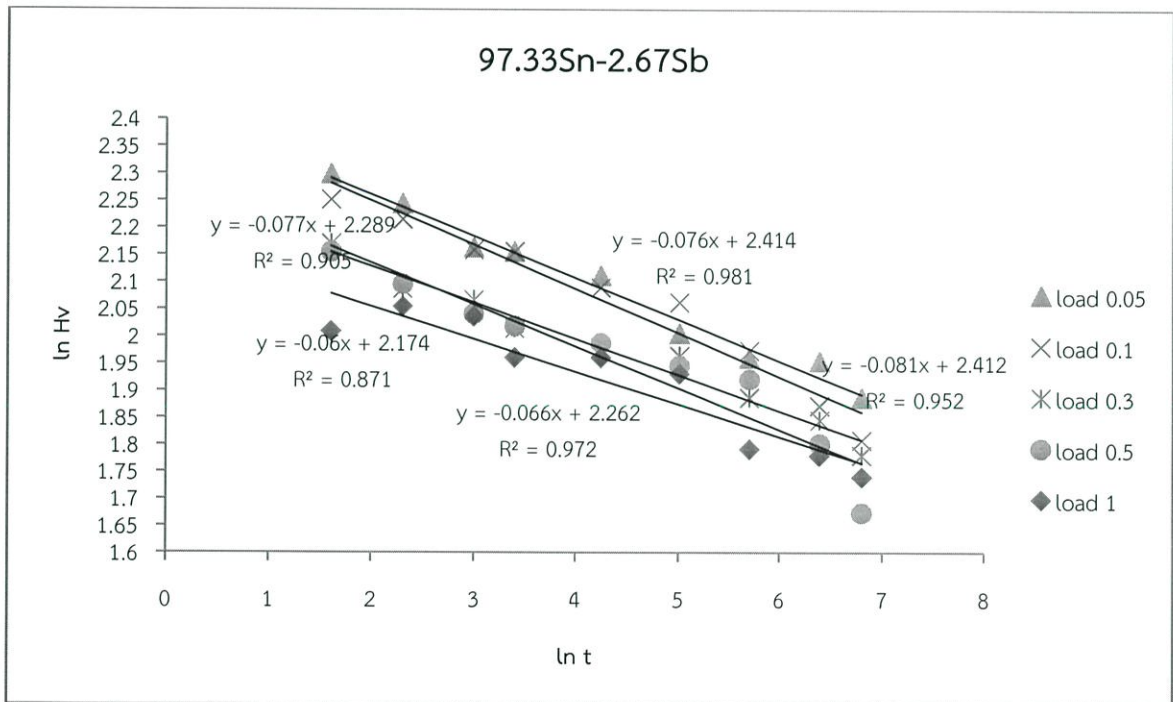
เนื่องจากค่า n ที่ได้ทั้งหมดมีค่า  $n > 6$  จึงสรุปได้ว่าชิ้นงานที่มีส่วนผสม 90.5Sn-1.5Cu-8Sb เกิดการคืบเนื่องมาจากดิสโลเคชัน (Dislocation creep) [1]

ตารางที่ 4.23 ผลการทดลองของชิ้นงานที่ 7 (97.33Sn-2.67Sb)

load (Kgf)	t (s)	d1	d2	Hv	load (Kgf)	t (s)	d1	d2	Hv
0.05	5	95.96	97.73	9.96	0.1	5	143.40	136.16	9.50
	10	99.96	98.23	9.43		10	150.90	134.06	9.16
	20	105.63	100.86	8.70		20	150.00	142.20	8.66
	30	103.30	109.66	8.63		30	148.63	144.00	8.63
	70	105.36	106.40	8.26		70	158.63	145.83	8.06
	150	114.50	108.80	7.43		150	159.56	147.16	7.86
	300	114.96	114.10	7.10		300	165.56	156.10	7.20
	600	114.23	114.46	7.06		600	170.26	167.96	6.50
	900	118.00	118.80	6.60		900	175.80	172.86	6.10
0.3	5	252.53	251.9	8.76	0.5	5	327.23	328.43	8.63
	10	291.56	264.06	8.06		10	330.43	343.73	8.13
	20	272.36	261.20	7.90		20	338.96	340.60	7.70
	30	270.60	269.53	7.50		30	353.43	349.06	7.53
	70	274.80	280.86	7.23		70	364.73	349.03	7.30
	150	278.03	279.70	7.13		150	362.46	365.16	7.00
	300	296.00	283.80	6.60		300	368.53	369.26	6.83
	600	298.86	295.80	6.33		600	342.10	390.20	6.06
	900	303.36	307.23	5.93		900	407.86	425.60	5.33
1	5	483.12	468.13	8.16					
	10	489.50	483.53	7.80					
	20	492.53	328.13	7.66					
	30	522.43	501.30	7.10					
	70	511.26	503.50	7.10					
	150	524.60	511.50	6.90					
	300	563.43	547.13	6.00					
	600	564.50	553.46	5.93					
	900	569.70	569.13	5.70					

ตารางที่ 4.24 การแปลงค่า Hv และค่า t ให้อยู่ในรูป ln (Hv) และ ln (t)

ln t	ln Hv				
	load 0.05	load 0.1	load 0.3	load 0.5	load 1
1.609	2.29	2.25	2.17	2.15	2.01
2.303	2.24	2.21	2.08	2.09	2.05
2.996	2.16	2.15	2.06	2.04	2.03
3.401	2.15	2.15	2.01	2.01	1.96
4.248	2.11	2.08	1.97	1.98	1.96
5.011	2.01	2.06	1.96	1.94	1.93
5.704	1.96	1.97	1.88	1.92	1.79
6.397	1.95	1.87	1.84	1.80	1.78
6.802	1.88	1.80	1.78	1.67	1.74



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงผลการทดลองของชิ้นงานที่มีส่วนผสม 97.33Sn-2.67Sb

ตารางที่ 4.25 ค่า Stress exponent ของชิ้นงานที่มีส่วนผสม 97.33Sn-2.67Sb

load	สมการเส้นตรง	Slope	n (Stress exponent)
0.05	-0.076x + 2.4142	-0.076	13.15
0.1	-0.077x + 2.2892	-0.077	12.98
0.3	-0.081x + 2.4120	-0.081	12.34
0.5	-0.066x + 2.2624	-0.066	15.15
1	-0.060x + 2.1746	-0.060	16.66

เนื่องจากค่า n ที่ได้ทั้งหมดมีค่า  $n > 6$  จึงสรุปได้ว่าชิ้นงานที่มีส่วนผสม 97.33Sn-2.67Sb เกิดการคืบเนื่องมาจากดิสโลเคชัน (Dislocation creep) [1]

ตารางที่ 4.26 ผลการทดลองของชิ้นงานที่ 8 (94.5Sn-1.5Cu-4Sb)

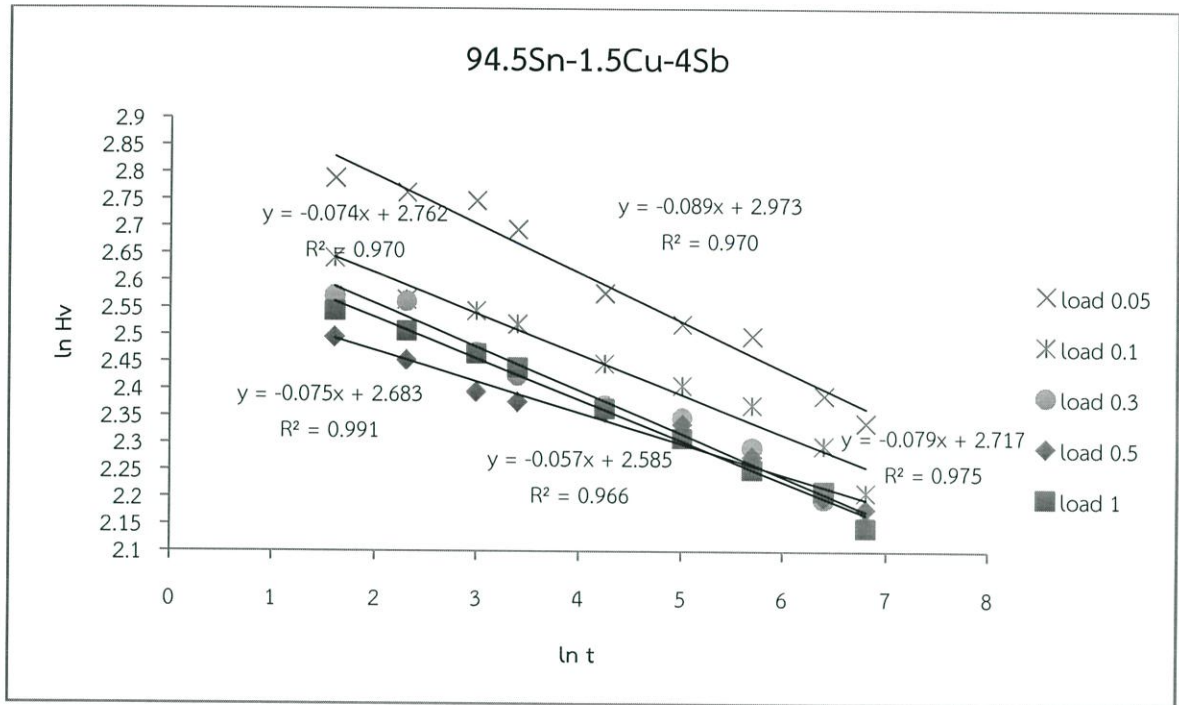
load (Kgf)	t (s)	d1	d2	Hv	load (Kgf)	t (s)	d1	d2	Hv
0.05	5	76.46	74.23	16.62	0.1	5	116.13	113.93	14.03
	10	77.06	75.96	15.83		10	121.30	117.46	13.00
	20	77.63	76.56	15.60		20	123.43	118.06	12.73
	30	79.66	78.76	14.80		30	123.50	120.63	12.43
	70	82.43	85.53	13.16		70	126.93	126.46	11.56
	150	86.73	86.00	12.43		150	128.63	129.60	11.10
	300	89.33	87.10	12.16		300	130.86	132.06	10.70
	600	26.03	88.40	10.90		600	136.90	136.23	9.93
	900	96.26	93.00	10.36		900	144.06	141.63	9.10
0.3	5	206.10	205.30	13.10	0.5	5	274.33	279.03	12.13
	10	214.20	210.26	12.96		10	267.96	279.66	11.63
	20	217.90	216.70	11.80		20	294.50	294.63	10.96
	30	222.46	221.66	11.30		30	292.80	294.63	10.76
	70	226.90	223.76	10.70		70	293.03	298.90	10.56
	150	226.70	234.20	10.46		150	299.40	298.86	10.33
	300	236.22	237.56	9.90		300	307.93	308.40	9.73
	600	253.86	241.33	9.00		600	323.76	317.83	9.03
	900	258.20	245.23	8.56		900	328.80	323.13	8.83

ตารางที่ 4.27 ผลการทดลองของชิ้นงานที่ 8 (94.5Sn-1.5Cu-4Sb) (ต่อ)

load (Kgf)	t (s)	d1	d2	Hv
1	5	383.40	781.56	12.73
	10	393.06	385.06	12.26
	20	394.33	400.00	11.76
	30	264.70	405.06	11.46
	70	415.00	419.50	10.63
	150	422.40	437.16	10.06
	300	432.26	446.60	9.50
	600	452.93	449.03	9.13
	900	468.87	464.50	8.53

ตารางที่ 4.28 การแปลงค่า Hv และค่า t ให้อยู่ในรูป ln (Hv) และ ln (t)

ln t	ln Hv				
	load 0.05	load 0.1	load 0.3	load 0.5	load 1
1.609	2.78	2.64	2.57	2.49	2.54
2.303	2.79	2.56	2.56	2.45	2.50
2.996	2.74	2.54	2.47	2.39	2.46
3.401	2.69	2.52	2.42	2.37	2.43
4.248	2.57	2.44	2.37	2.35	2.36
5.011	2.52	2.40	2.34	2.33	2.30
5.704	2.49	2.37	2.29	2.27	2.25
6.397	2.38	2.29	2.19	2.21	2.21
6.802	2.33	2.20	2.14	2.17	2.14



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงผลการทดลองของชิ้นงานที่มีส่วนผสม 94.5Sn-1.5Cu-4Sb

ตารางที่ 4.29 ค่า Stress exponent ของชิ้นงานที่มีส่วนผสม 94.5Sn-1.5Cu-4Sb

load	สมการเส้นตรง	Slope	n (Stress exponent)
0.05	$-0.089x + 2.9734$	-0.089	11.23
0.1	$-0.074x + 2.7628$	-0.074	13.51
0.3	$-0.075x + 2.6837$	-0.075	13.33
0.5	$-0.057x + 2.5856$	-0.057	17.54
1	$-0.079x + 2.7174$	-0.079	12.65

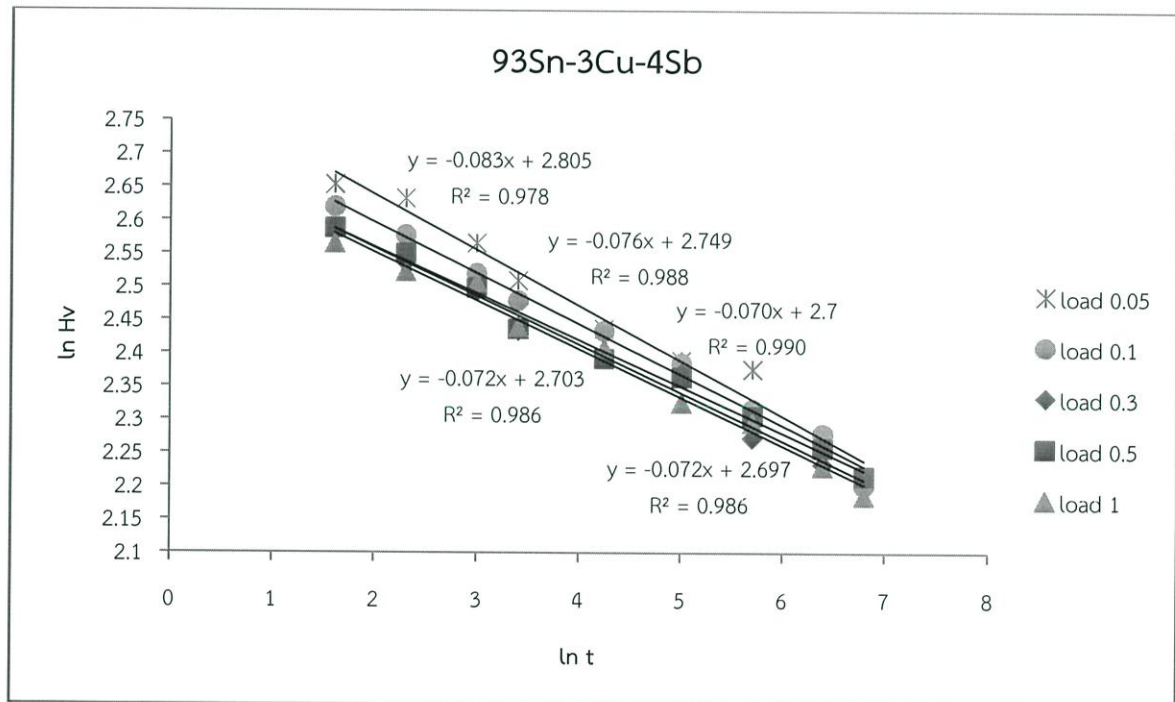
เนื่องจากค่า n ที่ได้ทั้งหมดมีค่า  $n > 6$  จึงสรุปได้ว่าชิ้นงานที่มีส่วนผสม 94.5Sn-1.5Cu-4Sb เกิดการคืบเนื่องมาจากดิสโลเคชัน (Dislocation creep) [1]

ตารางที่ 4.30 ผลการทดลองของชิ้นงานที่ 9 (93Sn-3Cu-4Sb)

load (Kgf)	t (s)	d1	d2	Hv	load (Kgf)	t (s)	d1	d2	Hv
0.05	5	78.39	82.82	14.20	0.1	5	116.33	115.70	13.73
	10	80.70	82.00	13.90		10	118.66	118.83	13.16
	20	80.04	84.79	13.00		20	120.56	123.53	12.43
	30	88.27	85.33	12.30		30	123.33	125.73	11.93
	70	90.84	89.34	11.43		70	127.66	127.43	11.40
	150	31.97	92.62	10.90		150	129.43	131.96	10.86
	300	93.20	94.04	10.56		300	135.03	135.20	10.13
	600	98.38	97.16	9.70		600	136.00	139.33	9.76
	900	101.86	99.86	9.10		900	143.90	143.06	9.03
0.3	5	140.50	207.2	13.30	0.5	5	266.60	261.80	13.30
	10	206.16	213.43	12.63		10	270.20	267.93	12.80
	20	214.23	215.13	12.10		20	269.16	283.00	12.16
	30	215.43	226.46	11.40		30	290.83	279.36	11.43
	70	220.33	229.49	11.03		70	295.13	287.26	10.93
	150	228.43	227.53	10.70		150	296.30	294.16	10.63
	300	240.63	239.03	9.70		300	304.93	303.63	10.03
	600	248.20	243.26	9.33		600	309.53	313.43	9.56
	900	250.13	244.10	9.13		900	315.50	320.43	9.16
1	5	381.00	379.96	13.00					
	10	390.33	382.40	12.46					
	20	388.43	389.30	12.26					
	30	404.00	400.16	11.46					
	70	410.10	406.40	11.10					
	150	428.86	422.00	10.23					
	300	428.90	435.73	9.93					
	600	447.50	448.70	9.30					
	900	455.70	457.36	8.90					

ตารางที่ 4.31 การแปลงค่า Hv และค่า t ให้อยู่ในรูป ln (Hv) และ ln (t)

ln t	ln Hv				
	load 0.05	load 0.1	load 0.3	load 0.5	load 1
1.609	2.65	2.61	2.58	2.58	2.56
2.303	2.63	2.57	2.53	2.54	2.52
2.996	2.56	2.52	2.49	2.49	2.50
3.401	2.50	2.47	2.43	2.43	2.43
4.248	2.43	2.43	2.40	2.39	2.40
5.011	2.38	2.38	2.37	2.36	2.32
5.704	2.37	2.31	2.27	2.30	2.29
6.397	2.27	2.27	2.23	2.25	2.23
6.802	2.20	2.20	2.21	2.21	2.18



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงผลการทดลองของชิ้นงานที่มีส่วนผสม 93Sn-3Cu-4Sb

ตารางที่ 4.32 ค่า Stress exponent ของชิ้นงานที่มีส่วนผสม 93Sn-3Cu-4Sb

load	สมการเส้นตรง	Slope	n (Stress exponent)
0.05	-0.083x + 2.8051	-0.083	12.04
0.1	-0.076x + 2.7494	-0.076	13.15
0.3	-0.070x + 2.7000	-0.070	14.28
0.5	-0.072x + 2.7036	-0.072	13.88
1	-0.072x + 2.6976	-0.072	13.88

เนื่องจากค่า n ที่ได้ทั้งหมดมีค่า  $n > 6$  จึงสรุปได้ว่าชิ้นงานที่มีส่วนผสม 93Sn-3Cu-4Sb เกิดการคืบเนื่องมาจากดิสโลเคชัน (Dislocation creep) [1]

ตารางที่ 4.33 ผลการทดลองของชิ้นงานที่ 10 (92.5Sn-1.5Cu-6Sb)

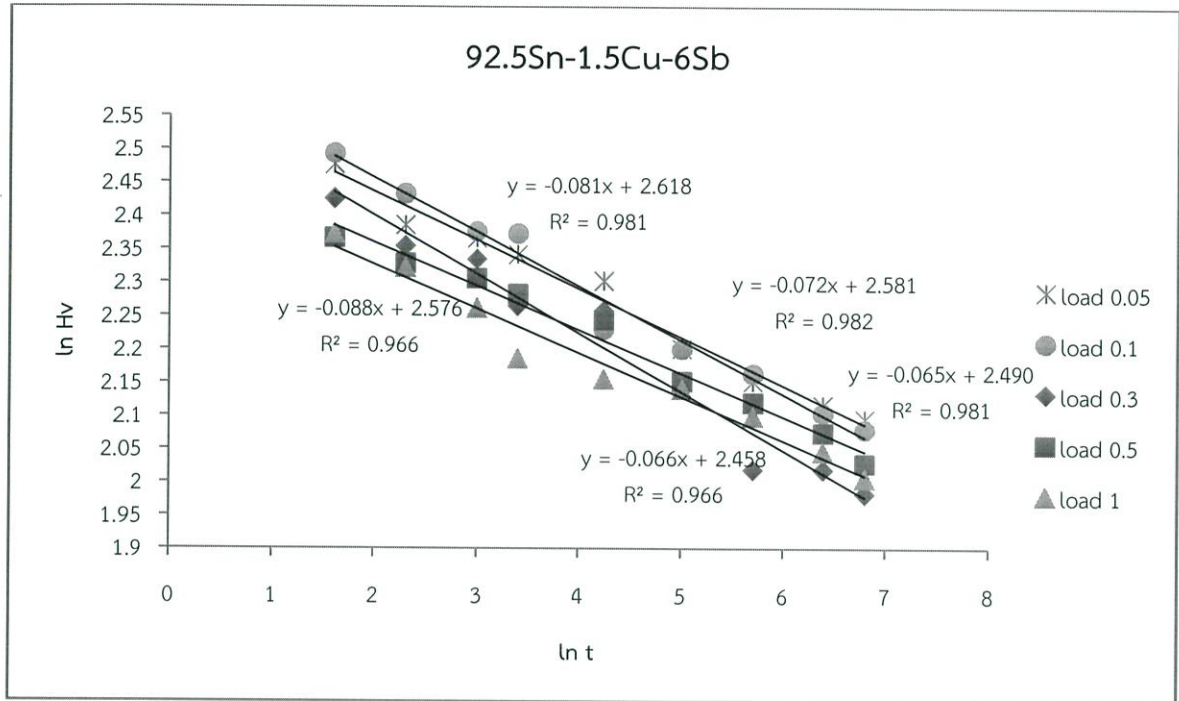
load (Kgf)	t (s)	d1	d2	Hv	load (Kgf)	t (s)	d1	d2	Hv
0.05	5	85.87	90.67	11.90	0.1	5	122.03	123.36	12.10
	10	90.65	94.04	10.86		10	129.40	125.03	11.43
	20	92.09	94.53	10.66		20	131.26	130.56	10.76
	30	94.42	94.97	10.40		30	131.80	131.06	10.73
	70	95.88	98.94	10.00		70	140.60	140.96	9.30
	150	99.66	102.93	9.03		150	149.50	136.96	9.03
	300	102.36	101.34	8.60		300	152.56	139.63	8.70
	600	106.33	105.50	8.30		600	151.93	146.80	8.20
	900	108.10	105.20	8.13		900	158.40	153.13	8.00
0.3	5	223.49	220.43	11.30	0.5	5	290.30	299.60	10.66
	10	231.06	228.63	10.53		10	302.83	298.66	10.26
	20	235.96	229.76	10.33		20	304.93	303.43	10.03
	30	244.76	235.90	9.63		30	304.86	309.36	9.80
	70	243.63	241.13	9.56		70	312.56	314.53	9.43
	150	262.26	248.23	8.53		150	326.16	330.26	8.60
	300	265.13	266.33	7.53		300	335.16	332.76	8.33
	600	274.53	268.23	7.53		600	343.03	340.26	7.96
	900	277.60	277.03	7.26		900	352.16	346.10	7.60

ตารางที่ 4.34 ผลการทดลองของชิ้นงานที่ 10 (92.5Sn-1.5Cu-6Sb) (ต่อ)

load (Kgf)	t (s)	d1	d2	Hv
1	5	422.83	409.26	10.73
	10	425.33	421.46	10.30
	20	431.60	447.76	9.60
	30	456.06	457.46	8.90
	70	463.40	465.00	8.63
	150	469.23	467.70	8.50
	300	475.43	483.00	8.16
	600	488.30	490.10	7.73
	900	500.96	497.16	7.43

ตารางที่ 4.35 การแปลงค่า Hv และค่า t ให้อยู่ในรูป ln (Hv) และ ln (t)

ln t	ln Hv				
	load 0.05	load 0.1	load 0.3	load 0.5	load 1
1.609	2.47	2.49	2.42	2.36	2.37
2.303	2.38	2.43	2.35	2.32	2.32
2.996	2.36	2.37	2.33	2.30	2.26
3.401	2.34	2.37	2.26	2.28	2.18
4.248	2.30	2.23	2.25	2.24	2.15
5.011	2.20	2.20	2.14	2.15	2.14
5.704	2.15	2.16	2.01	2.11	2.09
6.397	2.11	2.10	2.01	2.07	2.04
6.802	2.09	2.07	1.98	2.02	2.01



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงผลการทดลองของชิ้นงานที่มีส่วนผสม 92.5Sn-1.5Cu-6Sb

ตารางที่ 4.36 ค่า Stress exponent ของชิ้นงานที่มีส่วนผสม 92.5Sn-1.5Cu-6Sb

load	สมการเส้นตรง	Slope	n (Stress exponent)
0.05	$-0.081x + 2.6188$	-0.081	12.34
0.1	$-0.072x + 2.5812$	-0.072	13.88
0.3	$-0.088x + 2.5769$	-0.088	11.36
0.5	$-0.066x + 2.4589$	-0.066	15.15
1	$-0.065x + 2.4904$	-0.065	15.38

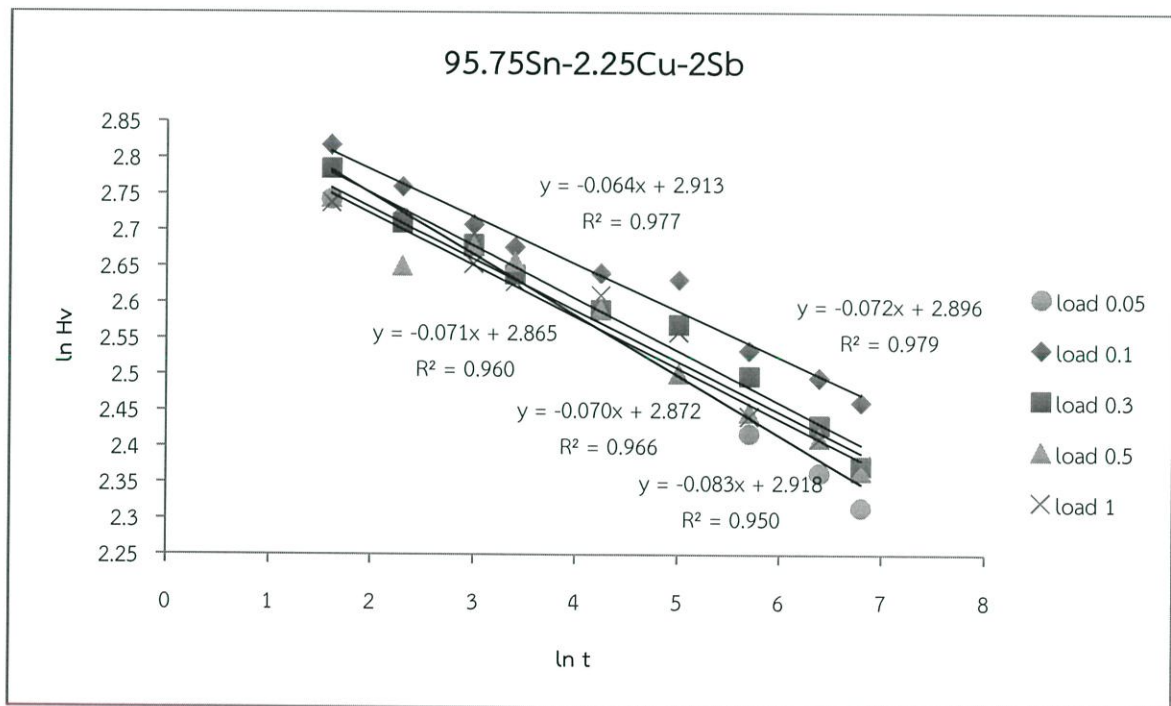
เนื่องจากค่า n ที่ได้ทั้งหมดมีค่า  $n > 6$  จึงสรุปได้ว่าชิ้นงานที่มีส่วนผสม 93Sn-3Cu-4Sb เกิดการคืบเนื่องมาจากดิสโลเคชัน (Dislocation creep) [1]

ตารางที่ 4.37 ผลการทดลองของชิ้นงานที่ 11 (95.75Sn-2.25Cu-2Sb)

load (Kgf)	t (s)	d1	d2	Hv	load (Kgf)	t (s)	d1	d2	Hv
0.05	5	74.72	79.61	14.20	0.1	5	108.40	102.20	13.73
	10	76.58	76.41	13.90		10	112.26	104.43	13.16
	20	79.55	80.13	13.00		20	112.93	109.16	12.43
	30	81.58	80.86	12.30		30	113.23	112.83	11.93
	70	84.10	82.52	11.43		70	118.86	110.96	11.40
	150	83.13	85.46	10.90		150	120.26	115.83	10.86
	300	90.78	90.96	10.56		300	121.90	121.06	10.13
	600	95.82	92.98	9.70		600	125.73	121.73	9.76
	900	97.69	93.40	9.10		900	125.96	125.83	9.03
0.3	5	188.60	182.10	13.30	0.5	5	239.63	247.96	13.30
	10	192.03	192.76	12.63		10	250.53	249.30	12.80
	20	195.90	193.66	12.10		20	255.80	249.03	12.16
	30	199.33	200.26	11.40		30	252.86	256.76	11.43
	70	207.80	200.36	11.03		70	266.33	261.56	10.93
	150	213.06	199.86	10.70		150	271.30	279.20	10.63
	300	218.26	213.06	9.70		300	284.20	281.73	10.03
	600	221.10	221.20	9.33		600	286.40	289.73	9.56
	900	224.36	231.53	9.13		900	291.90	297.63	9.16
1	5	346.43	346.00	13.00					
	10	350.53	352.13	12.46					
	20	361.73	361.56	12.26					
	30	360.40	368.53	11.46					
	70	371.70	367.33	11.10					
	150	379.40	378.46	10.23					
	300	392.36	401.43	9.93					
	600	404.53	412.66	9.30					
	900	417.26	413.36	8.90					

ตารางที่ 4.38 การแปลงค่า Hv และค่า t ให้อยู่ในรูป ln (Hv) และ ln (t)

ln t	ln Hv				
	load 0.05	load 0.1	load 0.3	load 0.5	load 1
1.609	2.74	2.81	2.78	2.74	2.73
2.303	2.71	2.76	2.71	2.65	2.71
2.996	2.67	2.70	2.68	2.67	2.65
3.401	2.64	2.67	2.63	2.65	2.62
4.248	2.59	2.64	2.5	2.59	2.61
5.011	2.56	2.63	2.56	2.50	2.55
5.704	2.41	2.53	2.49	2.44	2.44
6.397	2.36	2.49	2.43	2.41	2.41
6.802	2.31	2.46	2.37	2.36	2.37



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงผลการทดลองของชิ้นงานที่มีส่วนผสม 95.75Sn-2.25Cu-2Sb

ตารางที่ 4.39 ค่า Stress exponent ของชิ้นงานที่มีส่วนผสม 95.75Sn-2.25Cu-2Sb

load	สมการเส้นตรง	Slope	n (Stress exponent)
0.05	$-0.083x + 2.9180$	-0.083	12.04
0.1	$-0.064x + 2.9133$	-0.064	15.62
0.3	$-0.072x + 2.8964$	-0.072	13.88
0.5	$-0.071x + 2.8655$	-0.071	14.08
1	$-0.070x + 2.8724$	-0.070	14.28

เนื่องจากค่า n ที่ได้ทั้งหมดมีค่า  $n > 6$  จึงสรุปได้ว่าชิ้นงานที่มีส่วนผสม 93Sn-3Cu-4Sb เกิดการคืบเนื่องมาจากดิสโลเคชัน (Dislocation creep) [1]

ผลการทดสอบชิ้นงานโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วกลุ่ม Sn-Cu-Sb ทั้ง 11 ชิ้น มีค่าเฉลี่ย Stress exponent (n) ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.40 ผลการทดสอบชิ้นงานโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วกลุ่ม Sn-Cu-Sb ทั้ง 11 ชิ้น

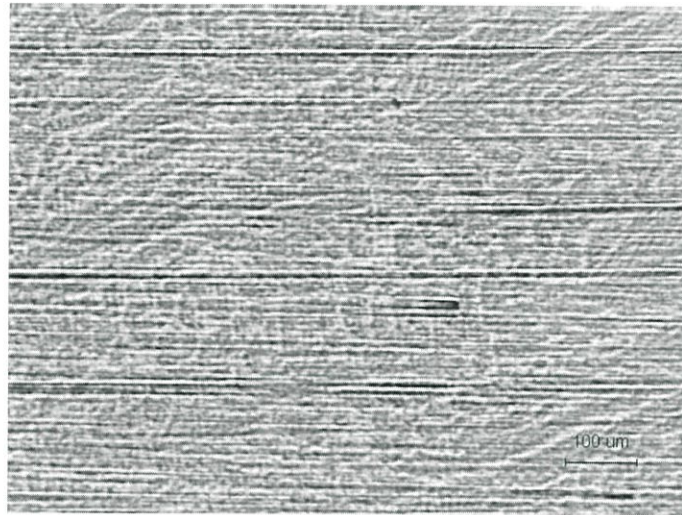
ชิ้นงาน	ส่วนประกอบ (%)			ค่าเฉลี่ย Stress exponent (n)
	Sn	Cu	Sb	
1	97	3	0	10.49
2	98.5	1.5	0	10.88
3	100	0	0	7.97
4	89	3	8	11.89
5	92	0	8	15.40
6	90.5	1.5	8	15.01
7	97.33	0	2.67	21.01
8	94.5	1.5	4	20.42
9	93	3	4	20.07
10	92.5	1.5	6	20.51
11	95.75	2.25	2	20.89

สรุปได้ว่า ชิ้นงานทั้ง 11 ชิ้น มีค่า  $n > 6$  ทั้งหมดและเกิดการคืบเนื่องมาจากดิสโลเคชัน (Dislocation creep)

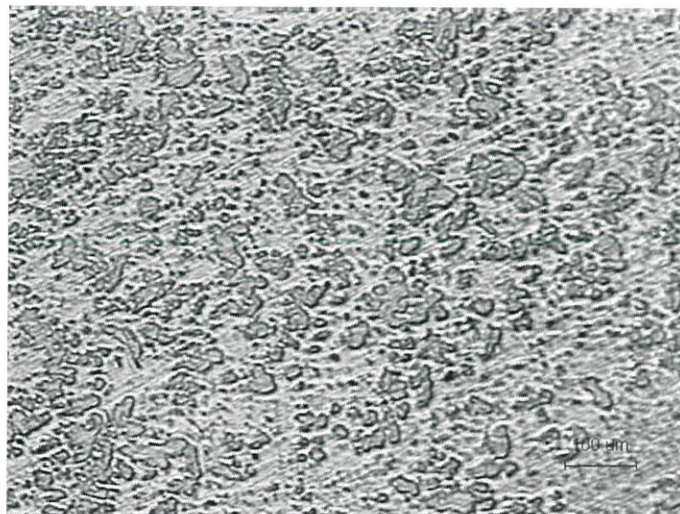
## 4.2 การวิเคราะห์ผลทางโครงสร้างจุลภาค

### 4.2.1 การตรวจสอบโครงสร้างโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical microscope, OM)

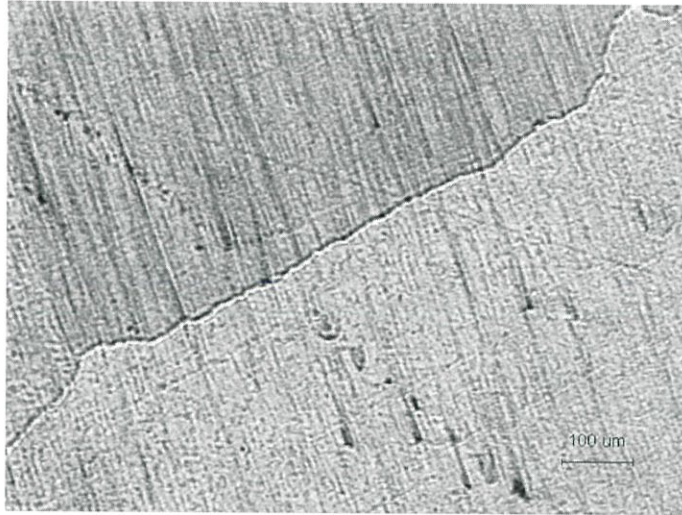
ผลการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสงของตัวอย่างโลหะบัดกรีได้ผลดังนี้คือ



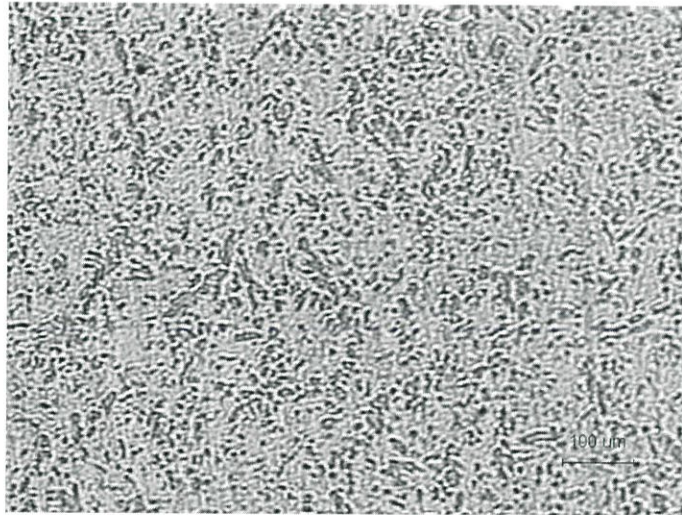
รูปที่ 4.12 โครงสร้างจุลภาคในโลหะบัดกรีชนิด 92Sn-8Sb จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 5 เท่า



รูปที่ 4.13 โครงสร้างจุลภาคในโลหะบัดกรีชนิด 97Sn-3Cu จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 5 เท่า



รูปที่ 4.14 โครงสร้างจุลภาคในโลหะบัดกรีชนิด 100Sn จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 5 เท่า



รูปที่ 4.15 โครงสร้างจุลภาคในโลหะบัดกรีชนิด 89Sn-3Cu-8Sb จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 5 เท่า

จากผลการทดลองโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-Cu-Sb สามารถสรุปได้ว่า หากขึ้นทดสอบ มีลักษณะเกรนที่ละเอียดมากจะมีอัตราการคืบสูงกว่าลักษณะเกรนที่หยาบ เนื่องจากเกรนที่หยาบจะต่อต้านการเกิดการคืบได้ดีกว่า

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาพฤติกรรมการคืบและโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-Cu-Sb สามารถได้ข้อสรุปดังนี้

1. จากการศึกษาพฤติกรรมการคืบของ โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-Cu-Sb ทั้งหมด 11 ชิ้นทดสอบ จะเห็นได้ว่าค่า  $n$  หรือค่า Stress exponent ที่ได้มีค่ามากกว่า 6 ทั้งหมด ซึ่งหากค่า  $n$  มีค่ามากกว่า 6 จะเกิดพฤติกรรมการคืบเนื่องมาจากดิสโลเคชัน (Dislocation creep) จะเห็นได้ว่าค่า  $n$  ในชิ้นทดสอบหลายๆจะมีค่า  $n$  ที่มากขึ้นกว่าชิ้นทดสอบแรกๆ โดยสาเหตุที่ค่า  $n$  มากขึ้น ประการหนึ่งอาจเกิดมาจากการเติมธาตุ Sn, Cu, Sb ลงไป ซึ่งอาจส่งผลให้มีการตกตะกอนของธาตุขึ้น ซึ่งจะนำไปกีดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน จึงส่งผลให้ค่า  $n$  มีค่าสูงขึ้นดังผลของการทดลองที่ได้

2. จากการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-Cu-Sb สามารถสรุปได้ว่า หากชิ้นทดสอบมีลักษณะเกรนที่ละเอียดมากจะมีอัตราการคืบสูงกว่าลักษณะเกรนที่หยาบ เนื่องจากเกรนที่หยาบจะต่อต้านการเกิดการคืบได้ดีกว่า

#### 5.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางการศึกษาในอนาคต

ในอนาคตควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับคุณสมบัติทางกลและทางกายภาพอื่นๆ รวมถึงคุณสมบัติของธาตุผสมที่มีผลต่อพฤติกรรมการคืบ เนื่องจากเป็นโลหะบัดกรีที่มีการพัฒนาขึ้นมาใหม่ จึงจำเป็นที่จะต้องมามีข้อมูลทุกๆด้านประกอบกัน เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือให้กับโลหะบัดกรีชนิดนี้ที่ถูกพัฒนาขึ้นมาใหม่

## บรรณานุกรม

- [1]. William D. Callister, Jr., Generalized creep behavior, Materials Science and Engineering An Introduction, 199-202 (2005)
- [2]. R.Mahmudi, A.R. Geranmayeh, S.R. Mahmoodi, A. Khalatbari, Room-temperature indentation creep of lead-free Sn-Bi solder alloys, J Mater Sci: Mater Electron. 18, 1072 (2007)
- [3]. A.R. Geranmayeh, R. Mahmudi, Power law indentation creep of Sn-5% Sb solder alloy, Journal of material science. 40, 3362 (2005)
- [4]. สารต้องห้ามตามระเบียบ RoHS, 4 มีนาคม 2549, ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. สิงหาคม 2556.  
<[http://www.thairohs.org/index.php?option=com\\_content&task=view&id=65&Itemid=98#RoHS\\_Substances](http://www.thairohs.org/index.php?option=com_content&task=view&id=65&Itemid=98#RoHS_Substances)>
- [5]. เสกศักดิ์ อัสวะวิสิทธิ์ชัย, การวิเคราะห์ความเสียหายทางโลหะการ. พิมพ์ครั้งที่ 1 .กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2554
- [6]. สุวันชัย พงษ์สุกิจวัฒน์และคณะ, วัสดุศาสตร์และวิศวกรรมวัสดุพื้นฐาน. พิมพ์ครั้งที่ 4 .กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์  
ท้อป จากัด, 2548.
- [7]. ความไม่สมบูรณ์ในของแข็ง, 31 พฤศจิกายน 2551, ผศ.ดร.สุภาสินี ลิ้มปานานภาพ. มกราคม 2557  
<<http://www.physics.kku.ac.th/315205/sites/default/files/chapter04.pdf>>
- [8]. การทดสอบความคืบ (Creep Testing), 19 ธันวาคม 2554, อ.ดร. ฐานันท์ อุคตผล. พฤศจิกายน 2556  
<[http://eng.sut.ac.th/metal/images/stories/Lab\\_5Creep\\_th.pdf](http://eng.sut.ac.th/metal/images/stories/Lab_5Creep_th.pdf)>