



สมบัติการคืบของโลหะสังกะสีผสม ZA-27 ที่หล่อขึ้นรูปโดยวิธีการหล่ออัดสเลอรรี่  
Creep Property of ZA-27 Zinc Alloy Prepared by Slurry Squeeze Casting

ชินรัตน์ ปานผัน  
Chinnarut Panpun

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา  
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the  
Degree of Master of Engineering in Materials Engineering  
Prince of Songkla University

2562

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



(3)

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ.....

(ดร.สมใจ จันทร์อุดม)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ลงชื่อ.....

(นายชินรัตน์ ปานผัน)

นักศึกษา

(4)

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ  
ไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.....  
(นายชินรัตน์ ปานผัน)  
นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์	สมบัติการคืบของโลหะสังกะสีผสม ZA-27 ที่หล่อขึ้นรูปโดยวิธีการหล่ออัดสเลอร์รี
ผู้เขียน	นายชินรัตน์ ปานผัน
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุ
ปีการศึกษา	2561

### บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาการคืบของโลหะสังกะสีผสม ZA-27 ที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการหล่ออัดแบบดั้งเดิม (Conventional Squeeze Casting, CSC) และการหล่ออัดสเลอร์รีของโลหะกึ่งของแข็งแบบ GISS ในการวิจัยได้เตรียมตัวอย่างชิ้นงานหล่อเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มที่หล่ออัดขึ้นรูปแบบดั้งเดิม (CSC) กลุ่มที่หล่ออัดสเลอร์รีโดยใช้เวลาในการปล่อยฟองแก๊ส 5 วินาที (GSC5s) และกลุ่มที่หล่ออัดสเลอร์รีโดยใช้เวลาในการปล่อยฟองแก๊ส 15 วินาที (GSC15s) ก่อนการทดสอบสมบัติเชิงกล ตัวอย่างชิ้นงานทั้งสามกลุ่มจะถูกนำไปผ่านกระบวนการทางความร้อนโดยการอบละลาย (Homogenization) ที่อุณหภูมิ  $320^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และการบ่มเทียม (Artificial Ageing) ที่อุณหภูมิ  $100^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 1 ชั่วโมง การทดสอบสมบัติเชิงกลประกอบด้วย การทดสอบสมบัติการต้านทานแรงดึงและสมบัติการคืบที่อุณหภูมิ 25, 100 และ  $140^{\circ}\text{C}$  ผลการวิจัยพบว่าโลหะสังกะสีผสม ZA-27 กลุ่ม CSC มีความต้านทานต่อความเค้นดึงได้สูงกว่ากลุ่ม GSC5s และกลุ่ม GSC15s แต่มีเหนียวต่ำกว่า เนื่องจากชิ้นงานกลุ่ม CSC ประกอบด้วยโครงสร้างจุลภาคของเฟส Al-rich  $\alpha$  เป็นแบบเดนไดรต์ ซึ่งทนต่อการดึงได้สูงกว่าชิ้นงานกลุ่ม GSC5s และกลุ่ม GSC15s ซึ่งมีโครงสร้างจุลภาคของเฟส Al-rich  $\alpha$  เป็นแบบก้อนกลม ผลการทดสอบการคืบพบว่าชิ้นงานกลุ่ม CSC มีความต้านทานการคืบที่อุณหภูมิ 25, 100 และ  $140^{\circ}\text{C}$  ได้สูงกว่าชิ้นงานกลุ่ม GSC5s และ GSC15s การคืบของชิ้นงานทั้งสามกลุ่มในช่วงเค้น 80-140 MPa พบว่ามีค่ายกกำลังของความเค้น (Stress Exponent,  $n$ ) ประมาณ 3.4-5.1 ซึ่งการคืบอาจจะถูกควบคุมด้วยกลไกการไถลและการปีนของดิสโลเคชัน (Dislocation Glide-Climb Mechanism) ส่วนในช่วงความเค้นต่ำ 20-80 MPa ที่อุณหภูมิ  $140^{\circ}\text{C}$  การคืบอาจจะถูกควบคุมด้วยกลไกการแพร่ (Diffusional Creep) ซึ่งมีค่า  $n \cong 1-2$  และยังพบว่า ในช่วงความเค้น 80-140 MPa และช่วงอุณหภูมิ 25- $140^{\circ}\text{C}$  พลังงานกระตุ้นสำหรับการคืบ  $Q_c$  ของชิ้นงานกลุ่ม CSC, GSC5s และ GSC15s มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 33.7, 28.4 และ 18.2 kJ/mol ตามลำดับ

<b>Thesis Title</b>	Creep Property of ZA-27 Zinc Alloy Prepared by Slurry Squeeze Casting
<b>Author</b>	Mr. Chinnarut Panpun
<b>Major Program</b>	Materials Engineering
<b>Academic Year</b>	2018

### ABSTRACT

The purpose of this research was to study creep property of ZA-27 zinc alloy prepared by conventional squeeze casting (CSC) and slurry squeeze casting in which the semi-solid molten alloy was made by the GISS technique. In the study, three groups of specimens were prepared, including the conventional squeeze casting (CSC), the slurry squeeze casting using the GISS time for 5 seconds (GSC5s) and the slurry squeeze casting using the GISS time for 15 second (GSC15s). Before mechanical tests the specimens were heat treated by homogenization at 320°C for 3 hours and artificial ageing at 100°C for 1 hour. The mechanical tests consisted of tensile tests and creep tests at temperatures of 25, 100 and 140°C. The results showed that the CSC had higher tensile strength than the GSC5s and GSC15s, however it had lower ductility than the other two. Because the CSC was composed of dendritic structures of Al-rich  $\alpha$  phase which was more resistant to tensile stress than the GSC5s and GSC15s which were globular structure. The results of creep tests showed that at 25, 100 and 140°C the CSC had higher creep resistant than the GSC5s and GSC15s. The stress exponent,  $n$  of the three groups of specimens tested in the stress range of 80-140 MPa was about 3.4-5.1. The value of  $n$  indicated that creep might be controlled by the dislocation glide-climb mechanism. However, in the low stress range of 20-80 MPa, at 140°C creep might be controlled by the diffusional creep mechanism, where  $n$  was about 1-2. In addition, it was found that in the stress range of 80-140 MPa and the temperature range of 25-140°C, the averaged activation energy for creep,  $Q_c$  of CSC, GSC5s and GSC15s were 33.7, 28.4 and 18.2 KJ/mol, respectively.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เรื่องการศึกษาสมบัติการคืบของโลหะสังกะสีผสม ZA-27 ที่หล่อขึ้นรูปโดยวิธีการหล่ออัดสเลอร์รี่ เสร็จสมบูรณ์ไปได้ด้วยดีต้องขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธวัชชัย ปลุกผล และ ดร.สมใจ จันทร์อุดม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ให้โอกาสในการเข้ามาศึกษาและทำวิจัย ตลอดจนคำแนะนำ ข้อเสนอแนะ การตรวจสอบแก้ไข และการติดต่อสอบถามความก้าวหน้าของงานวิจัย

ขอขอบคุณ ดร.สุชาติ จันทรมณีย์ และ ดร.ไพโรจน์ สังข์ไพฑูรย์ ที่กรุณาสละเวลามาร่วมเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้การสนับสนุนเครื่องมือที่ใช้ในการทำงานวิจัย ตลอดจนคณาจารย์และเจ้าหน้าที่ของภาควิชาฯ ทุกคนที่ได้ให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์และให้ความร่วมมือต่างๆได้เป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณ บิดามารดา และขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ทุกคน ในภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่คอยให้คำปรึกษาและความช่วยเหลือ ในระหว่างการทำวิทยานิพนธ์นี้มาด้วยดีตลอดไป

ชินรัตน์ ปานผัน

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(5)
กิตติกรรมประกาศ	(7)
สารบัญ	(8)
สารบัญตาราง	(11)
สารบัญรูป	(12)
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.5 งบประมาณในการวิจัย	2
1.6 สถานที่ทำการวิจัย	2
2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 ทฤษฎี	3
2.1.1 โลหะสังกะสีผสม	3
2.1.2 ข้อมูลเกี่ยวกับสังกะสีผสมหล่อ	3
2.1.3 กระบวนการผลิตโลหะกึ่งของแข็ง	6
2.1.4 กรรมวิธีการหล่อขึ้นรูปแบบรีโอแคสติง	6
2.1.5 เทคนิคการหล่อแบบ GISS	7
2.1.6 กระบวนการหล่ออัด	7
2.1.7 กระบวนการทางความร้อน	8
2.1.8 การคืบ	9
2.1.9 เส้นโค้งการคืบ	10
2.1.10 กลไกการคืบของโลหะบริสุทธิ์และโลหะผสมชนิด M	13
2.1.11 การคืบแบบเหน็ด	15
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	16
3. วิธีการดำเนินการวิจัย	20
3.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย	20
3.1.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำวิจัย	20
3.2 กระบวนการหล่อขึ้นรูป	20
3.2.1 กระบวนการหล่อขึ้นรูปขึ้นงานโดยวิธีการหล่ออัดแบบดั้งเดิม	21
3.2.2 กระบวนการหล่อขึ้นรูปขึ้นงานโดยการหล่ออัดแบบ GISS	21



## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3 การเตรียมชิ้นงานการทดสอบ	22
3.4 การทดสอบแรงดึง	24
3.4.1 การทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิห้อง	25
3.4.2 การทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิสูง	25
3.5 ขั้นตอนการทดสอบการคืบ	27
3.6 การเตรียมชิ้นงานเพื่อใช้ในการทำกระบวนการทางความร้อน	28
3.7 กระบวนการทางความร้อน	28
3.7.1 ขั้นตอนการทำ Homogenization	28
3.7.2 ขั้นตอนการทำ Stabilization	28
3.8 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานสำหรับการตรวจโครงสร้างจุลภาค	29
3.9 ขั้นตอนการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (OM)	30
3.10 ขั้นตอนการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาครอยแตกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด SEM	30
3.10.1 ตรวจวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคผิวของรอยแตก	30
3.10.2 ตรวจวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคภาคตัดขวางรอยแตก	30
<b>4. ผลและการอภิปรายผล</b>	<b>31</b>
4.1 ผลการทดสอบสมบัติแรงดึง	31
4.1.1 ผลการทดสอบความแข็งแรงดึงที่อุณหภูมิ 25°C	32
4.1.2 ผลการทดสอบความแข็งแรงดึงที่อุณหภูมิ 100°C	32
4.1.3 ผลการทดสอบความแข็งแรงดึงที่อุณหภูมิ 140°C	33
4.2 ผลการทดสอบการคืบ	40
4.2.1 ผลการทดสอบการคืบที่อุณหภูมิ 25°C	40
4.2.2 ผลการทดสอบการคืบที่อุณหภูมิ 100°C	46
4.2.3 ผลการทดสอบการคืบที่อุณหภูมิ 140°C	51
4.3 ค่ายกกำลังของความเค้น	56
4.3.1 ค่ายกกำลังของความเค้นจากการทดสอบการคืบที่อุณหภูมิ 25°C	56
4.3.2 ค่ายกกำลังของความเค้นจากการทดสอบการคืบที่อุณหภูมิ 100°C	57
4.3.3 ค่ายกกำลังของความเค้นจากการทดสอบการคืบที่อุณหภูมิ 140°C	57
4.4 พลังงานกระตุ้นสำหรับการคืบ	58
4.4.1 พลังงานกระตุ้นสำหรับการคืบที่ความเค้น 80 MPa	59
4.4.2 พลังงานกระตุ้นสำหรับการคืบที่ความเค้น 100 MPa	59
4.4.3 พลังงานกระตุ้นสำหรับการคืบที่ความเค้น 120 MPa	60
4.4.4 พลังงานกระตุ้นสำหรับการคืบที่ความเค้น 140 MPa	61

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.5 การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของ ZA-27 ที่ผ่านการหล่อขึ้นรูปโดยวิธีการหล่ออัด	63
4.6 ลักษณะผิวของรอยแตกหักจากการคืบ	65
4.7 โครงสร้างจุลภาคของบริเวณใกล้รอยแตกหักของชิ้นงานหลังการทดสอบการคืบ	68
5. สรุปผลการทดลอง	74
บรรณานุกรม	76
ภาคผนวก ก ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จากการทดสอบแรงดึง	80
ภาคผนวก ข ผลงานที่เผยแพร่ในการประชุมทางวิชาการ	85
ประวัติผู้เขียน	92

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ตารางเปรียบเทียบโลหะสังกะสีในแต่ละเบอร์	4
2.2 ตารางแสดงสมบัติเชิงกลของโลหะสังกะสีผสมหล่อ	5
2.3 แสดงความสัมพันธ์ของค่ายกกำลังความเค้นกับกลไกการคืบ	15
3.1 แสดงค่ามิติของชิ้นงานทดสอบ ZA-27	24
4.1 ข้อมูลการคืบของชิ้นงานกลุ่ม CSC ทดสอบที่อุณหภูมิ 25°C ในช่วงความเค้น 80-140 MPa	42
4.2 ข้อมูลการคืบของชิ้นงานกลุ่ม GSC5s ทดสอบที่อุณหภูมิ 25°C ในช่วงความเค้น 80-140 MPa	44
4.3 ข้อมูลการคืบของชิ้นงานกลุ่ม GSC15s ทดสอบที่อุณหภูมิ 25°C ในช่วงความเค้น 80-140 MPa	45
4.4 ข้อมูลการคืบของชิ้นงานกลุ่ม CSC ทดสอบที่อุณหภูมิ 100°C ในช่วงความเค้น 80-140 MPa	47
4.5 ข้อมูลการคืบของชิ้นงานกลุ่ม GSC5s ทดสอบที่อุณหภูมิ 100°C ในช่วงความเค้น 80-140 MPa	49
4.6 ข้อมูลการคืบของชิ้นงานกลุ่ม GSC15s ทดสอบที่อุณหภูมิ 100°C ในช่วงความเค้น 80-140 MPa	50
4.7 ข้อมูลการคืบของชิ้นงานกลุ่ม CSC ทดสอบที่อุณหภูมิ 140°C ในช่วงความเค้นระหว่าง 20-140 MPa	52
4.8 ข้อมูลการคืบของชิ้นงานกลุ่ม GSC5s ทดสอบที่อุณหภูมิ 140°C ในช่วงความเค้นระหว่าง 20-140 MPa	54
4.9 ข้อมูลการคืบของชิ้นงานกลุ่ม GSC15s ทดสอบที่อุณหภูมิ 140°C ในช่วงความเค้นระหว่าง 20-140 MPa	55

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงกระบวนการขึ้นรูปแบบ Rheocasting	6
2.2 กระบวนการ GISS	7
2.3 กระบวนการขึ้นรูปด้วยวิธีการหล่ออัด	8
2.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและเวลา	9
2.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln \dot{\epsilon}_{SS}$ กับ $\ln \sigma$	11
2.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln \dot{\epsilon}_{SS}$ กับ $1/T$	12
2.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\log(\dot{\epsilon}_{SS})$ กับ $\log(\sigma)$ ของโลหะบริสุทธิ์และโลหะผสม	14
2.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Steady-State Creep Rate กับความเค้นที่ใช้ในการทดสอบของอะลูมิเนียมที่อุณหภูมิ 300°C	16
3.1 เครื่องอัดไฮดรอลิก	22
3.2 ชิ้นงานสังกะสีผสมที่ผ่านการอัดขึ้นรูป 100 × 100 × 15 mm <sup>3</sup>	22
3.3 การวัดขนาดชิ้นงานและเขียนกำกับชิ้นงานโลหะสังกะสีผสม ZA-27	23
3.4 ชิ้นงานตัดที่ตัดมีขนาด 17 × 100 × 15 mm <sup>3</sup>	23
3.5 แบบของชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM E8M	24
3.6 เครื่องทดสอบแรงดึงยี่ห้อ Hounsfield	26
3.7 เครื่องบันทึกข้อมูลจากการทดสอบแรงดึง	26
3.8 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิและปั๊มควบคุมเครื่องทดสอบแรงดึง	27
3.9 แผ่นชิ้นงานที่ทำการตัดแบ่งเพื่อนำไปทำกระบวนการทางความร้อน 25 × 25 mm.	28
3.10 แผ่นผังขั้นตอนกระบวนการทางความร้อน	29
3.11 ชิ้นงานที่ผ่านการทำ Cold Mount	30
4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Engineering Stress กับ Engineering Strain ที่อุณหภูมิ 25°C ของกลุ่มตัวอย่าง CSC, GSC5s และ GSC15s	32
4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Engineering Stress กับ Engineering Strain ที่อุณหภูมิ 100°C ของกลุ่มตัวอย่าง CSC, GSC5s และ GSC15s	32
4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Engineering Stress กับ Engineering Strain ที่อุณหภูมิ 140°C ของกลุ่มตัวอย่าง CSC, GSC5s และ GSC15s	33
4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับอุณหภูมิของชิ้นงานทดสอบที่ได้จากการหล่อแบบดั้งเดิม (CSC) ที่อุณหภูมิ 25, 100 และ 140°C	34
4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับอุณหภูมิของชิ้นงานทดสอบที่ได้จากการหล่อ GSC5s ที่อุณหภูมิ 25, 100 และ 140°C	35
4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับอุณหภูมิของชิ้นงานทดสอบที่ได้จากการหล่อ GSC15s ที่อุณหภูมิ 25, 100 และ 140°C	36

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7 กราฟเปรียบเทียบสมบัติความเค้นดึงสูงสุดของชิ้นงานทดสอบกลุ่ม CSC, GSC5s และ GSC15s ทดสอบที่อุณหภูมิ 25, 100 และ 140°C	37
4.8 กราฟเปรียบเทียบสมบัติความเค้นครากที่ 0.2% ของชิ้นงานทดสอบกลุ่ม CSC, GSC5s และ GSC15s ทดสอบที่อุณหภูมิ 25, 100 และ 140°C	38
4.9 กราฟเปรียบเทียบการยืดของชิ้นงานกลุ่มทดสอบ CSC, GSC5s และ GSC15s ทดสอบที่อุณหภูมิ 25, 100 และ 140°C	39
4.10 กราฟเส้นโค้งการคืบของชิ้นงานกลุ่ม CSC จากการทดสอบการคืบที่อุณหภูมิ 25°C และค่าความเค้นระหว่าง 80, 100, 120 และ 140 MPa	41
4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการคืบกับเวลาของชิ้นงานกลุ่ม CSC ทดสอบการคืบที่อุณหภูมิ 25°C ความเค้นที่ 80, 100, 120 และ 140 MPa	42
4.12 กราฟเส้นโค้งการคืบของชิ้นงานกลุ่ม GSC5s จากการทดสอบการคืบที่อุณหภูมิ 25°C และค่าความเค้นระหว่าง 80, 100, 120 และ 140 MPa	43
4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการคืบกับเวลาของชิ้นงานกลุ่ม GSC5s ทดสอบการคืบที่อุณหภูมิ 25°C ความเค้นที่ 80, 100, 120 และ 140 MPa	43
4.14 กราฟเส้นโค้งการคืบของชิ้นงานกลุ่ม GSC15s จากการทดสอบการคืบที่อุณหภูมิ 25°C และค่าความเค้นระหว่าง 80, 100, 120 และ 140 MP	44
4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการคืบกับเวลาของชิ้นงานกลุ่ม GSC15s ทดสอบการคืบที่อุณหภูมิ 25°C ความเค้นที่ 80, 100, 120 และ 140 MPa	45
4.16 กราฟเส้นโค้งการคืบของชิ้นงานกลุ่ม CSC จากการทดสอบการคืบที่อุณหภูมิ 100°C และค่าความเค้นระหว่าง 80, 100, 120 และ 140 MPa	46
4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการคืบกับเวลาของชิ้นงานกลุ่ม CSC ได้จากการทดสอบการคืบที่อุณหภูมิ 100°C ที่ความเค้น 80, 100, 120 และ 140 MPa	47
4.18 กราฟเส้นโค้งการคืบของชิ้นงานกลุ่ม GSC5s จากการทดสอบการคืบที่อุณหภูมิ 100°C ค่าความเค้น 80, 100, 120 และ 140 MPa	48
4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการคืบและเวลาของชิ้นงานกลุ่ม GSC5s จากการทดสอบที่อุณหภูมิ 100°C ที่ความเค้น 80, 100, 120 และ 140 MPa	48
4.20 กราฟเส้นโค้งการคืบของชิ้นงานกลุ่ม GSC15s จากการทดสอบการคืบที่อุณหภูมิ 100°C ที่ความเค้น 80, 100, 120 และ 140 MPa	49
4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการคืบและเวลาของชิ้นงานกลุ่ม GSC15s จากการทดสอบการคืบที่อุณหภูมิ 100°C ที่ความเค้น 80, 100, 120 และ 140 MPa	50
4.22 กราฟเส้นโค้งการคืบของชิ้นงานกลุ่ม CSC จากการทดสอบการคืบที่อุณหภูมิ 140°C, ที่ช่วงความเค้นระหว่าง 20-140 MPa	51

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการคืบและเวลาของชิ้นงาน CSC จากการศึกษาการคืบที่อุณหภูมิ 140°C ที่ช่วงความเค้นระหว่าง 20-140 MPa	51
4.24 กราฟเส้นโค้งการคืบของชิ้นงานกลุ่ม GSC5s จากการศึกษาการคืบที่อุณหภูมิ 140°C ค่าความเค้นระหว่าง 20-140 MPa	53
4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการคืบและเวลาของชิ้นงานกลุ่ม GSC5s จากการศึกษาการคืบที่อุณหภูมิ 140°C ที่ความเค้นระหว่าง 20-140 MPa	53
4.26 กราฟเส้นโค้งการคืบของชิ้นงานกลุ่ม GSC15s จากการศึกษาการคืบที่อุณหภูมิ 140°C, ที่ช่วงความเค้นระหว่าง 20-140 MPa	54
4.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการคืบและเวลาของชิ้นงานกลุ่ม GSC15s ที่ได้จากการทดสอบการคืบที่อุณหภูมิ 140°C ที่ช่วงความเค้น 20-140 MPa	55
4.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln \dot{\epsilon}_{SS}$ กับ $\ln \sigma$ ของชิ้นงานกลุ่ม CSC, GSC5s และ GSC15s ที่ความเค้นในช่วง 80-140 MPa ทดสอบที่อุณหภูมิ 25°C	56
4.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln \dot{\epsilon}_{SS}$ กับ $\ln \sigma$ ของชิ้นงานกลุ่ม CSC, GSC5s และ GSC15s ที่ความเค้นในช่วง 80-140 MPa ทดสอบที่อุณหภูมิ 100°C	57
4.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln \dot{\epsilon}_{SS}$ กับ $\ln \sigma$ ของชิ้นงานกลุ่ม CSC, GSC5s และ GSC15s ที่ความเค้นในช่วง 80-140 MPa ทดสอบที่อุณหภูมิ 140°C	58
4.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \dot{\epsilon}_{SS}$ กับ 1/T ของชิ้นงาน CSC, GSC5s และ GSC15s ทดสอบที่ความเค้น 80 MPa, ที่อุณหภูมิ 25, 100 และ 140°C	59
4.32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \dot{\epsilon}_{SS}$ กับ 1/T ของชิ้นงานกลุ่ม CSC, GSC5s และ GSC15s ทดสอบที่ความเค้น 100 MPa, ที่อุณหภูมิ 25, 100 และ 140°C	60
4.33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \dot{\epsilon}_{SS}$ กับ 1/T ของชิ้นงานกลุ่ม CSC, GSC5s และ GSC15s ทดสอบที่ความเค้น 120 MPa, ที่อุณหภูมิ 25, 100 และ 140°C	61
4.34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \dot{\epsilon}_{SS}$ กับ 1/T ของชิ้นงานกลุ่ม CSC, GSC5s และ GSC15s ทดสอบที่ความเค้น 140 MPa ที่อุณหภูมิ 25, 100 และ 140°C	62
4.35 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ OM โครงสร้างจุลภาคของ ZA-27 ภายหลังจากหล่อ (As-Cast) ที่กำลังขยาย 10 เท่า	63
4.36 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ OM โครงสร้างจุลภาคของ ZA-27 ภายหลังจากหล่อ (As-Cast) ที่กำลังขยาย 20 เท่า	64
4.37 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ OM โครงสร้างจุลภาคของ ZA-27 ที่ผ่านการทำ Stabilization ที่กำลังขยาย 10 เท่า	64
4.38 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ OM โครงสร้างจุลภาคของ ZA-27 ที่ผ่านการทำ Stabilization ที่กำลังขยาย 20 เท่า	65

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.39 ภาพถ่าย SEM ของผิวรอยแตกหัก (Fracture Surface) ของชิ้นงานหลัง ภายหลังการคืบกลุ่ม CSC	66
4.40 ภาพถ่าย SEM ของผิวรอยแตกหักภายหลังการคืบ (Fracture Surface) ของชิ้นงาน ภายหลังการคืบกลุ่ม GSC15s	67
4.41 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์ OM ภาคตัดขวางตามแนวความเค้น ภายหลังการคืบของชิ้นงานกลุ่ม CSC	69
4.42 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์ OM ภาคตัดขวางตามแนวความเค้น ภายหลังการคืบของชิ้นงานกลุ่ม GSC15s	70
4.43 ภาพถ่าย SEM โครงสร้างจุลภาคใกล้บริเวณรอยแตกหลังการคืบของชิ้นงานกลุ่ม CSC	71
4.44 ภาพถ่าย SEM โครงสร้างจุลภาคใกล้บริเวณรอยแตกหักหลังจากการคืบของชิ้นงานกลุ่ม GSC15s	72

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญและที่มาของหัวข้อวิจัย

โลหะสังกะสีผสมสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้ในงานอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีน้ำหนักเบาและมีความแข็งแรงสูงเมื่อเปรียบเทียบกับเหล็ก มีความทนทานต่อการกัดกร่อนได้ดี [1] และในช่วงหลายปีที่ผ่านมาสังกะสีโลหะผสม (Zinc Alloys) เป็นที่นิยมในหมู่ด้านอุตสาหกรรมอย่างมาก ซึ่งโลหะสังกะสีผสมมีกลุ่มตั้งต้นมาจาก ZAMAK ก่อนที่ปัจจุบันจะมีการเติมธาตุทองแดงเข้าไปจึงเปลี่ยนมาเป็น ZA มีธาตุที่ประกอบเด่นๆด้วยกัน 3 ธาตุ ได้แก่ Zn-Al-Cu ซึ่งกลุ่มของโลหะสังกะสีผสม (Zinc Alloys, ZA) มีดังนี้ ZA-8, ZA-12 และ ZA-27 เป็นต้น [1, 2] ในปัจจุบันโลหะสังกะสีผสมที่นิยมใช้กันจะใช้ในเบอร์ ZA-27 เนื่องจากเป็นกลุ่มที่มีความแข็งแรงสูงเมื่อเทียบกับตระกูลของ ZAMAK และเทคโนโลยีในการนำไปหล่อขึ้นรูปที่หลากหลาย [3, 4]

เทคโนโลยีในกระบวนการผลิตโลหะกึ่งของแข็งที่นิยมใช้กันในอุตสาหกรรมมีอยู่ 2 วิธี ได้แก่ กรรมวิธี Thixocasting และ กรรมวิธี Rheocasting ซึ่งข้อดีของการขึ้นรูปโลหะแบบกึ่งของแข็งจะทำให้โครงสร้างจุลภาคเป็นแบบก้อนกลม (Globular) และทำให้ความพรุนภายในโครงสร้างมีค่าความพรุนลดลง สมบัติทางกลดีขึ้น เป็นต้นในปัจจุบันโลหะสังกะสีผสมชนิด ZA-27 ได้มีการศึกษาการหล่อแบบกึ่งของแข็งแต่ยังไม่เป็นที่แพร่หลายมากนัก ด้วยข้อดีหลายๆประการของเทคนิคการขึ้นรูปกึ่งของแข็ง [4, 5] จึงมีแนวคิดที่จะนำมาประยุกต์ใช้กับการหล่อขึ้นรูปโลหะสังกะสีผสมชนิด ZA-27 โดยหล่อด้วยวิธีหล่ออัดแบบโลหะกึ่งของแข็งด้วยเทคนิคการหล่อแบบ Gas Induced Semi-Solid (GISS) [6] เพื่อนำมาศึกษาสมบัติการคืบของโลหะสังกะสีผสม ZA-27 โดยต้องทำการศึกษามุมองศาเชิงกลเพื่อนำมาใช้ทดสอบการคืบที่อุณหภูมิสูง เนื่องจากที่อุณหภูมิสูง โลหะมีพฤติกรรมเปลี่ยนไปหลายอย่าง เช่น เกิดการแพร่ของอะตอม การเติบโตขึ้นของเกรน และการขยายตัวของช่องว่าง เป็นต้น [7, 8] ปัจจัยดังกล่าวจะทำให้ชิ้นงานเกิดความเสียหาย จากงานค้นคว้าวิจัยของ Mahathaninwong และคณะ [9] ได้ทำการศึกษาค้นคว้าวิจัยเรื่องการคืบของ Semi-Solid Cast 7075-T6 ซึ่งนำมาเปรียบเทียบกับทดสอบสมบัติการคืบกับ Commercial 7075-T651 พบว่าชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการหล่อแบบ Gas Induced Semi-Solid (GISS) มีอัตราการคืบที่ต่ำและอายุในการคืบนานกว่าในช่วงอุณหภูมิ 200°C โดยใช้ค่าความเค้นในช่วง 120-180 MPa และ Wei และ Shen [7] ได้ทำการศึกษาคืบของโลหะสังกะสีผสม ZA27 และ ZA27-Zr มาเปรียบเทียบกับสมบัติการคืบแบบบีบอัด (Compressive Creep) เพื่อทำการหาค่าอัตราการคืบ, กลไกของการคืบ (Stress Exponent) และ พลังงานกระตุ้นในการเกิดการคืบซึ่งผลที่ได้ทำจากการทดสอบชิ้นงานกลุ่มของ ZA27-Zr จะมีค่าอัตราการคืบที่น้อยกว่า ZA-27 ในช่วงของอุณหภูมิ 20-160°C ที่มีค่าความเค้นอยู่ในช่วง 50-137.5 MPa จึงเป็นที่มาในการศึกษาเพิ่มเติมของสมบัติการคืบของโลหะสังกะสีผสม ZA-27 ที่ทำการผลิตจากกระบวนการหล่อแบบกึ่งของแข็งด้วยวิธีการ GISS โดยการศึกษาครั้งนี้จะทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 25, 100 และ 140°C โดยใช้ความเค้นในช่วง 20-140 MPa



## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาสมบัติการคืบของโลหะสังกะสีผสม ZA-27 โดยจะมีการทดสอบแบบการคืบแตกหักที่อุณหภูมิ 25, 100 และ 140°C โดยแบ่งระดับความเค้นตั้งแต่ 20-140 MPa
2. ทำการเปรียบเทียบชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบการคืบโดยวิธีการหล่ออัดแบบทั่วไป (Conventional Liquid Squeeze Casting, CSC) และ การหล่ออัดสเลอรี่ (Slurry Squeeze Casting, GSC5s และ GSC15s)
3. เพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคของโลหะสังกะสีผสม ZA-27 ทั้งก่อนและหลังการทดสอบการคืบ
4. เพื่อศึกษารอยแตกหักของโลหะสังกะสีผสม ZA-27 หลังจากผ่านการทดสอบการคืบ

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ชิ้นรูปชิ้นงานหล่ออัดของโลหะสังกะสีผสม ZA-27 โดยวิธีการหล่อขึ้นรูปแบบดั้งเดิม (Conventional Casting) และ การหล่ออัดสเลอรี่ (GISS)
2. นำชิ้นงานโลหะสังกะสีผสม ZA-27 ผ่านกระบวนการทางความร้อนเพื่อทำการศึกษาค้นคว้าโครงสร้างจุลภาค
3. ทำการทดสอบความแข็งแรงดึง (Tensile Test) ของโลหะสังกะสีผสม ZA-27 ที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนที่อุณหภูมิ 25, 100 และ 140°C
4. ทดสอบสมบัติการคืบของชิ้นงานโลหะสังกะสีผสม ZA-27 ที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนที่อุณหภูมิ 25, 100 และ 140°C โดยแบ่งระดับความเค้นในช่วง 20-140 MPa
5. ศึกษาโครงสร้างของโลหะสังกะสีผสม ZA-27 ทั้งก่อนและหลังการทดสอบการคืบ
6. ศึกษาการรอยแตกหักของโลหะสังกะสีผสม ZA-27 หลังจากผ่านการทดสอบการคืบ

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้รู้เทคนิคและกระบวนการขึ้นรูปแบบ GISS
2. ได้รู้โครงสร้างจุลภาคของโลหะสังกะสีผสม ZA-27 ที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนที่ขึ้นรูปแบบดั้งเดิมและการขึ้นรูปแบบกึ่งของแข็ง
3. ได้รู้ถึงสมบัติการคืบของโลหะสังกะสีผสมที่อุณหภูมิ 25, 100 และ 140°C

## 1.5 งบประมาณในการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้รับสนับสนุนทุนจากโครงการส่งเสริมการวิจัยในอุดมศึกษาและการพัฒนามหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ ของสำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษา (สัญญาเลขที่ ENG570592S)

## 1.6 สถานที่ทำการวิจัย

1. ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
2. อาคารวิจัยวิศวกรรมประยุกต์สีรินธร มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ทฤษฎี

##### 2.1.1 โลหะสังกะสีผสม (Zinc Alloy)

โลหะผสมที่มีสังกะสีเป็นองค์ประกอบหลักเป็นกลุ่มวัสดุที่มีน้ำหนักเบา มีความแข็งแรงและความเหนียวสูง ในปัจจุบันนิยมนำไปใช้ในงานของอุตสาหกรรมทางด้านวิศวกรรมอย่างแพร่หลายซึ่งกลุ่มของสังกะสีที่นิยมนำไปใช้ได้แก่กลุ่มของสังกะสีผสมหล่อ (Cast Zinc Alloy) กลุ่มสังกะสีผสมหล่อที่ใช้การหล่อขึ้นรูป โดยอาจใช้แบบหล่อทรายหรือหล่อฉีดเข้าแม่พิมพ์ มักเป็นโลหะผสมสังกะสีกับอะลูมิเนียม ซึ่งมีสมบัติที่ดีเหมาะสำหรับงานหล่อ ส่วนสังกะสีผสมใช้แรงขึ้นรูปส่วนใหญ่เป็นสังกะสีผสมแคดเมียม สังกะสีผสมตะกั่ว และสังกะสีผสมทองแดง ซึ่งธาตุต่างๆที่เติมผสมลงในสังกะสีจะช่วยทำให้โลหะสังกะสีผสมมีสมบัติดีขึ้น เช่น ความต้านทานการกัดกร่อน ความเหนียวและความแข็งแรงสูงขึ้น คุณสมบัติที่โดดเด่นของโลหะสังกะสีคือ การป้องกันเหล็กไม่ให้เป็นสนิม แต่คุณสมบัตินี้เพียงประการเดียวอาจจะไม่เพียงพอต่อความต้องการของภาคอุตสาหกรรมบางประเภท ดังนั้นจึงได้มีการนำโลหะอื่นมาผสมเพื่อเพิ่มคุณสมบัติ โลหะสังกะสีผสมมักนำไปใช้ในงานฉีดขึ้นรูป จึงเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า Zinc Die Casting Alloys [10-11]

สำหรับโลหะสังกะสีผสมที่ใช้ในด้านอุตสาหกรรมจะมีการแบ่งตามเกรดหรือเบอร์ของสังกะสีผสมซึ่งมีกลุ่ม ILZRO (The International Lead Zinc Research Organization) [11] ได้ทำการจำแนกกลุ่มของโลหะสังกะสีผสมที่นำมาใช้ในการหล่อขึ้นรูป ได้แก่ ZA-8, ZA-12 และ ZA-27 โดยในปัจจุบันสังกะสีผสมเกรด ZA-27 นิยมนำมาใช้ในงานหล่อเป็นอย่างมากเนื่องจากเป็นเกรดที่มีค่าความแข็งแรงสูง น้ำหนักเบาเมื่อเปรียบเทียบกับสังกะสีผสมในตระกูลเดียวกัน

##### 2.1.2 ข้อมูลเกี่ยวกับสังกะสีผสมหล่อ (Cast Zinc Alloy)

โลหะผสมที่มีสังกะสีเป็นองค์ประกอบหลัก แบ่งเป็น 2 กลุ่มคือ สังกะสีผสมหล่อ (Cast zinc alloy) และสังกะสีผสมใช้แรงขึ้นรูป (Wrought zinc alloy) กลุ่มสังกะสีผสมหล่อใช้การหล่อขึ้นรูป โดยอาจใช้แบบหล่อทรายหรือหล่อฉีดเข้าแม่พิมพ์ มักเป็นโลหะผสมสังกะสีกับอะลูมิเนียม จะช่วยเพิ่มสมบัติที่ดีต่างๆ เช่น ความต้านทานการกัดกร่อนความเหนียวและความแข็งแรงของโลหะผสมให้สูงขึ้น ซึ่งในที่นี้ได้มีการจัดจำแนกเบอร์ของโลหะสังกะสีผสมหล่อได้แก่ ZAMAK2, ZAMAK3, ZAMAK5, ZA-8, ZA-12 และ ZA-27 เป็นต้น ซึ่งโลหะสังกะสีในแต่ละเบอร์ก็จะมีส่วนผสมทางเคมีที่แตกต่างกันไป ซึ่งในกลุ่มของ ZAMAK จะมีธาตุ Al อยู่ที่ 3.5-4.3 wt. % แต่จะแตกต่างกันที่ Cu ที่ผสมกัน ในส่วนของกลุ่ม ZA จะมีธาตุที่ผสมแตกต่างกันก็คือ Al และธาตุรองลงมาคือ Cu ที่ผสมอยู่ตั้งแต่ 0.8-2.5 wt. % ตามตารางที่ 2.1 [12-13]

ตารางที่ 2.1 ตารางเปรียบเทียบโลหะสังกะสีผสมแต่ละเบอร์ [12]

Chemical composition (wt. %)	ZAMAK2	ZAMAK3	ZAMAK5	ZA-8	ZA-12	ZA-27
Aluminium (Al)	3.5-4.3	3.5-4.3	3.5-4.3	8.0-8.8	10.5-11.5	25.0-28.0
Magnesium (Mg)	0.02-0.05	0.02-0.05	0.03-0.08	0.015-0.3	0.015-0.3	0.01-0.02
Copper (Cu)	2.5-3.0	<0.25	0.75-1.25	0.8-1.3	0.5-1.2	2.0-2.5
Lead (Pb)	<0.005	<0.005	<0.005	<0.006	<0.006	<0.006
Cadmium (Cd)	<0.004	<0.004	<0.004	<0.006	<0.006	<0.006
Iron (Fe)	<0.1	<0.1	<0.1	<0.075	<0.075	<0.075
Tin (Sn)	<0.003	<0.003	<0.003	<0.003	<0.003	<0.003
Nickel (Ni)	-	-	-	-	-	-
Silicon (Si)	-	-	-	-	-	-
Zinc (Zn)	Balance	Balance	Balance	Balance	Balance	Balance

สังกะสีผสมหล่อที่นำมาใช้งานในงานด้านการหล่อขึ้นรูปทางวิศวกรรมก็คือ ZA-27 เนื่องจากเป็นโลหะสังกะสีผสมหล่อที่มีสมบัติเชิงกลที่สูงตามตารางที่ 2.2 ซึ่งจะเห็นได้ว่าโลหะสังกะสีผสมเกรด ZA-27 จะมีความแข็งแรงสูงที่สุด แต่มีค่าการยืดที่ต่ำที่สุด ตามตารางที่ 2.2 ซึ่งโลหะสังกะสีผสมหล่อเกรด ZA-27 มักจะนิยมใช้ในงานฉีดขึ้นรูปแม่พิมพ์ในการผลิตพวก ก้อนน้ำ และ ชิ้นส่วนอุตสาหกรรมยานยนต์ เป็นต้น

ตารางที่ 2.2 ตารางแสดงสมบัติเชิงกลของโลหะสังกะสีผสมหล่อ [13]

Mechanical properties	ZAMAK2	ZAMAK3	ZAMAK5	ZA-8	ZA-12	ZA-27
Ultimate Tensile Strength (MPa)	359	283	328	374	400	421
Tensile yield strength (0.2%offset) (MPa)	-	221	228	290	320	376
Compressive yield strength (MPa)	641	414	600	252	269	385
Elongation	7	10	7	6-10	4-7	1-3
Shear Strength (MPa)	317	214	262	275	296	325
Hardness Brinell	100	82	91	95-110	95-115	105-125
Young's modulus (GPa)	85.5	85.5	85.5	85.5	82.7	77.9

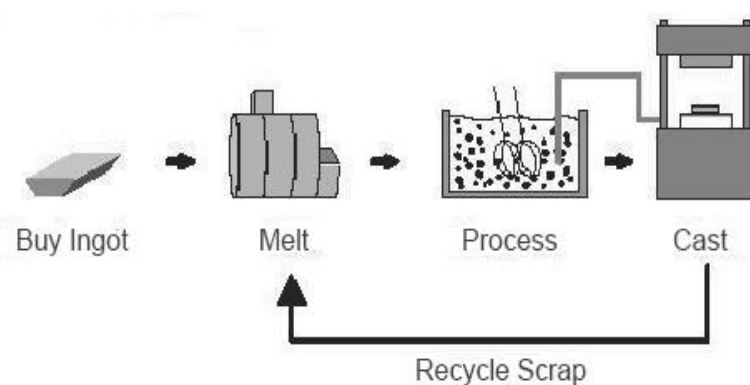
### 2.1.3 กระบวนการผลิตโลหะกึ่งของแข็ง (Semi-Solid Metal Processing)

การหล่อโลหะแบบกึ่งของแข็ง คือการขึ้นรูปโลหะโดยการหล่อในขณะที่โลหะมีการแข็งตัวเป็นบางส่วนโดยที่ส่วนที่โลหะแข็งตัวแล้วมีโครงสร้างเกรนเป็นแบบก้อนกลมไม่ใช่แบบเดรนไดรต์ โดยที่เกรนก้อนกลมที่อยู่ในน้ำโลหะนี้ทำให้โลหะกึ่งของแข็ง มีความหนืดมากกว่าน้ำโลหะหลายเท่าและ การที่โครงสร้างเกรนเป็นแบบก้อนกลมทำให้มีความหนืดน้อยกว่าโลหะในสถานะกึ่งแข็งกึ่งเหลวที่มีโครงสร้างเกรนแบบเดรนไดรต์มากและสามารถไหลได้ดีด้วยแรงกระทำที่น้อยกว่ามากและการที่โลหะกึ่งของแข็งมีความหนืดกว่าน้ำโลหะทำให้การไหลเข้าแม่พิมพ์เป็นแบบราบเรียบ [14]

ในช่วงแรก การประยุกต์ใช้โลหะกึ่งของแข็งในอุตสาหกรรมกรรมทำโดยกรรมวิธีการขึ้นรูปแบบธิกโซแคสติง (Thixocasting) แต่เนื่องด้วยข้อจำกัดต่างๆ ของกรรมวิธีธิกโซแคสติง ทำให้มีการพัฒนาใช้กรรมวิธีการขึ้นรูปแบบรีโอแคสติง (Rheocasting)

### 2.1.4 กรรมวิธีการหล่อขึ้นรูปแบบรีโอแคสติง (Rheocasting)

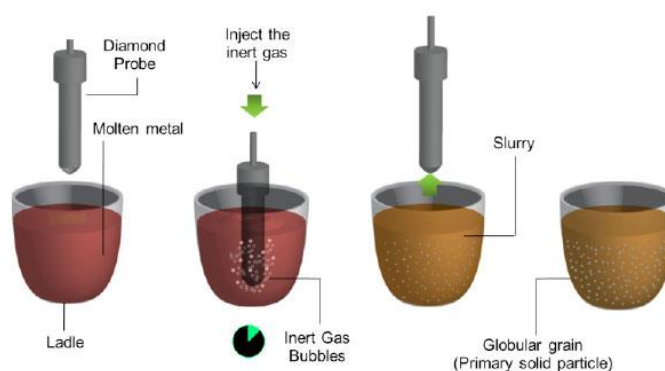
เป็นการกวนน้ำโลหะพร้อมทั้งทำให้เย็นตัวลง และทำการขึ้นรูปในขณะที่โลหะเกิดการแข็งตัวบางส่วนและเริ่มเกิดเป็นผลึก กระบวนการนี้สามารถนำชิ้นส่วนที่เป็นส่วนที่ Reject ต่างๆมาทำการหลอมและผลิตเป็นโลหะกึ่งของแข็งเพื่อใช้ใหม่ได้อีก ซึ่งช่วยลดต้นทุนในการผลิตอย่างมาก ได้มีการพัฒนาขึ้นหลายวิธีด้วยกัน เช่น กรรมวิธี New Rheocasting กระบวนการ Semi-Solid Rheocasting และกระบวนการ GISS (Gas Induced Semi-Solid) [14, 16]



รูปที่ 2.1 แสดงกระบวนการขึ้นรูปแบบ Rheocasting [14]

### 2.1.5 เทคนิคการหล่อแบบ GISS (Gas Induced Semi-Solid Processing)

เป็นกระบวนการหล่อกึ่งของแข็งรูปแบบหนึ่งในกระบวนการ Rheocasting โดยจะอาศัยการฟุ้งแก๊สเฉื่อยเข้าไปในน้ำโลหะเพื่อทำให้เกิดฟองแก๊สที่เป็นแบบกึ่งของเหลวและของแข็งหรือเรียกว่า สเลอรี่ (Slurry) การที่ฟุ้งแก๊สเข้าไปในน้ำโลหะจะทำให้เกิดการคายความร้อนเฉพาะจุด จึงทำให้น้ำโลหะตรงบริเวณนั้นเกิดการแข็งตัว และฟองแก๊สจะเกิดการเคลื่อนที่ไปรบกวนการเติบโตของนิวเคลียส ทำให้มีลักษณะเป็นแบบก้อนกลม โดยการฟุ้งแก๊สนั้นจะทำได้โดยใช้แท่งกราไฟต์ซึ่งจะมีรูพรุนขนาดเล็กที่จุ่มลงไปในน้ำโลหะ [15, 16]



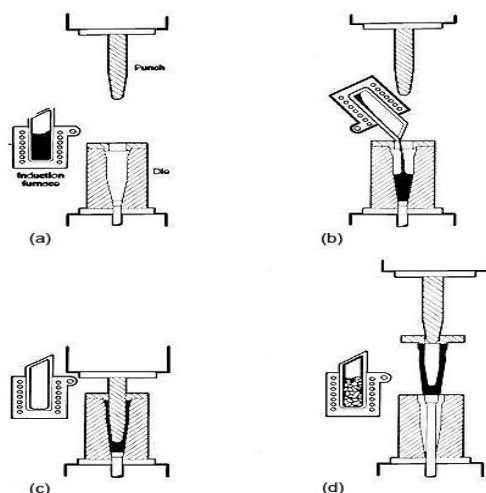
รูปที่ 2.2 กระบวนการ GISS [15]

### 2.1.6 กระบวนการหล่ออัด (Squeeze Casting)

กระบวนการหล่ออัดเป็นกระบวนการที่ต้องอาศัยการเคลื่อนที่ของลูกสูบที่ขาลงและการออกแบบให้ทางเข้าของน้ำโลหะมีขนาดใหญ่ขึ้น การที่ทำให้การเคลื่อนที่ขาลงกับการทำให้ทางเข้าของน้ำโลหะมีขนาดใหญ่ขึ้นนั้นจะทำให้การไหลของน้ำโลหะเป็นไปอย่างราบเรียบซึ่งจะช่วยลดปัญหาการเกิดโพรงอากาศหรือพวกรูพรุนภายในชิ้นงานได้และยังช่วยแก้ปัญหาการไหลแบบปั่นป่วน นอกจากนี้ทางเข้าของน้ำโลหะที่มีขนาดใหญ่ขึ้น โลหะที่กำลังเกิดการแข็งตัวภายในชิ้นงานจะได้รับแรงดันจากการอัดของเครื่องก่อนที่โลหะบริเวณทางเข้าจะแข็งตัวช่วยให้เกิดการเติมของโลหะอย่างสมบูรณ์ขณะแข็งตัวขึ้นงานหล่อซึ่งช่วยลดการเกิดโพรงหดตัวด้วย [16]

กระบวนการหล่ออัดเป็นกระบวนการหล่อโลหะภายใต้สภาพโลหะเหลว (Liquid Metal) โดยเป็นกระบวนการที่โลหะเกิดการแข็งตัวภายใต้ความกดดันโดยข้างในเบ้าหล่อหรือแม่พิมพ์จะเป็นแบบปิดตายเอาไว้วางอยู่ระหว่าง Plate ของ Hydraulic Press โดยใช้แรงดันและพื้นที่ผิวสัมผัสของส่วนที่เหล็กเกิดหลอมละลาย จึงทำให้เกิดการถ่ายโอนความร้อนทำให้เกิด Pore-Free และมีเกรนขนาดละเอียดทำให้มีผลกับสมบัติเชิงกลทำให้ใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์ กระบวนการหล่ออัด เป็นกระบวนการอัตโนมัติที่มีความง่ายในการจะผลิตชิ้นงานที่มีความใกล้เคียงสุทธิที่จะนำไปทำต่อมากที่สุด ข้อจำกัดที่มีความสำคัญของกระบวนการหล่ออัด คือ รอบเวลาในการผลิต (Cycle Time) ที่ช้า

ลง เนื่องจากการฉีดโลหะที่มีความเร็วลดลงและการแข็งตัวที่ช้ากว่า อีกทั้งโครงสร้างจุลภาคจะมีความหยาบมากกว่าเนื่องจากเวลาในการแข็งตัวของโลหะที่นานขึ้น



รูปที่ 2.3 กระบวนการขึ้นรูปด้วยวิธีการหล่ออัด (Squeeze Casting) [16]

### 2.1.7 กระบวนการทางความร้อน (Heat Treatment)

กระบวนการทางความร้อนเป็นขั้นตอนของการควบคุมให้โลหะร้อนขึ้นหรือเย็นลง เพื่อให้ชิ้นงานมีการเปลี่ยนแปลงของสมบัติทางกล โดยไม่เกิดการเปลี่ยนรูปทรงของชิ้นงานแต่อย่างใด จุดประสงค์หลักของกระบวนการทางความร้อน คือ เพิ่มความแข็งแรงให้แก่ชิ้นงาน แต่ในบางครั้งเรานำชิ้นงานไปผ่านกระบวนการทางความร้อนก็เพื่อต้องการให้การกลึงหรือการขึ้นรูปชิ้นงานทำได้ง่ายมากขึ้น หรืออาจจะต้องการเพิ่มความเหนียวและความแข็งแรงของชิ้นงาน

โดยทั่วไปแล้วกระบวนการทางความร้อนของโลหะสังกะสีผสมที่ใช้ในการเพิ่มความแข็งแรงและความเหนียวประกอบไปด้วยขั้นตอน 2 ขั้นตอนหลักๆ ดังนี้

#### 1. Homogenization

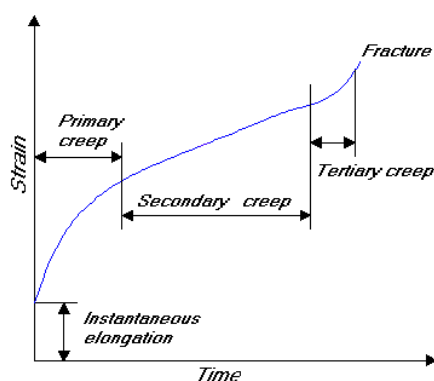
ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนของการอบละลาย ซึ่งเป็นการเพิ่มความสามารถในการละลายของเฟสต่างๆ ในโลหะผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันกับธาตุที่เป็นธาตุหลักมากขึ้น โดยอาศัยหลักที่ว่าความสามารถในการละลายของธาตุผสมเพิ่มมากขึ้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นเมื่อเวลาในการอบละลายเพียงพอที่จะทำให้ธาตุผสมละลาย และกระจายตัวในธาตุหลักอย่างทั่วถึง จากนั้นนำชิ้นงานไปผ่านการ Quenching เพื่อให้เกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็วและธาตุผสมถูกกักภายในเนื้อของธาตุหลักในสภาวะอิมตัวยิ่งยวด

## 2. Stabilization

ขั้นตอนนี้กระทำต่อเนื่องมาจากขั้นตอนการทำ Homogenization โดยมีจุดประสงค์เพื่อให้ธาตุผสมที่อยู่ในสถานะอิมตัวยิ่งยวดฟอร์มตัวเป็นเฟสใหม่โดยอาศัยหลักการของการแพร่ (Diffusion) เข้าไปภายในแลตทิซ ดังนั้นอุณหภูมิจึงเป็นตัวแปรหลักในการฟอร์มตัวเป็นเฟสใหม่

### 2.1.8 การคืบ (Creep)

การคืบ คือ เมื่อวัสดุอยู่ภายใต้แรงที่มากระทำ แม้ว่าจะต่ำกว่าพิกัดยืดหยุ่น หากทิ้งไว้นานก็อาจเกิดการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรหรือแบบพลาสติกได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ปรากฏการณ์ที่เกิดการเปลี่ยนรูปร่างตามเวลานี้เรียกว่า ความคืบ ปริมาณของความคืบที่เกิดขึ้นขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ ปริมาณของความเค้น อุณหภูมิและเวลา [17] หากเราให้สถานะที่เหมาะสมและมีเวลาเพียงพอ การคืบจะเกิดขึ้นได้จนครบ 3 ขั้นตอน จนวัสดุเกิดการแตกหัก (Fracture) ดังแสดงในกราฟรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและเวลา [17]

การคืบโดยทั่วไปของโลหะและโลหะผสมจะเกิดการคืบได้อย่างง่ายที่อุณหภูมิสูงกว่า 0.3-0.5  $T_m$  โดยที่  $T_m$  คืออุณหภูมิหลอมเหลวสัมบูรณ์ (Absolute Melting Temperature) การคืบที่เกิดขึ้นในโลหะและโลหะผสมมีความสำคัญต่อการออกแบบและนำไปใช้งานทางวิศวกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งงานที่ต้องใช้อุณหภูมิสูงๆ [17-19]

พฤติกรรมการคืบของวัสดุ ขึ้นอยู่กับตัวแปรที่สำคัญได้แก่ อุณหภูมิ ความเค้น และ ภาระน้ำหนักที่กระทำ (Creep Load) การเปลี่ยนรูปที่เกิดขึ้นทั้งหมดของวัสดุสามารถเขียนแทนได้ด้วยสมการที่ (1) ดังนี้



$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \varepsilon(\sigma, T, t) \quad (1)$$

โดยที่

$\varepsilon$  = ค่าการเปลี่ยนรูปทั้งหมดที่เกิดขึ้น (Overall Deformation)

$\varepsilon_0$  = ความเครียดทันทีทันใด (Instantaneous Strain)

$\varepsilon(\sigma, T, t)$  = ค่าความเครียดของการคืบ (Creep Strain) ซึ่งเป็นค่าที่ขึ้นกับ ความเค้น อุณหภูมิ และ เวลา

### 2.1.9 เส้นโค้งการคืบ (Creep Curve)

การคืบในโลหะหมายถึงการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก (Plastic Deformation) ที่ความเค้นหรือภาระ และอุณหภูมิคงที่ขึ้นอยู่กัเวลา ซึ่งรูปแบบทั่วไปของเส้นโค้งการคืบสามารถแสดงด้วยกราฟความเครียดกับเวลา โดยความชันคืออัตราการคืบ (Creep Rate) [17]

จากเส้นโค้งแสดงการยืดออกอย่างรวดเร็ว (Instantaneous Elastic) และความเครียดพลาสติก (Plastic Strain) เกิดขึ้นเมื่อให้ภาระโดยทั่วไปเส้นโค้งของการคืบแบ่งออกเป็น 3 ระยะได้แก่

1. **ระยะแรก (Primary Stage หรือ Transient Creep)** ซึ่งความต้านทานการคืบจะเพิ่มขึ้นกับอัตราการคืบจะค่อยๆ ลดลงเมื่อเวลาผ่านไป เส้นโค้งความเครียดของการคืบต่อเวลามีลักษณะโค้งคว่ำ ซึ่งจัดเป็นเส้นโค้งการคืบระยะแรกแบบปกติ (Normal Primary Creep)
2. **ระยะที่สอง (Secondary Creep)** หรือเรียกอีกอย่างว่าการคืบในสถานะคงที่ (Steady State Creep) เป็นระยะที่อัตราการคืบมีค่าคงที่และมีค่าที่ต่ำที่สุด เส้นโค้งของการคืบจะเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรง
3. **ระยะที่สาม (Tertiary Creep)** เป็นระยะที่อัตราการคืบจะเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ จนถึงจุดที่วัสดุเกิดการแตกหัก (Rupture) เส้นโค้งการคืบจะมีลักษณะหงายขึ้น

ระยะการคืบที่ได้รับความสนใจมากที่สุด คือระยะการคืบแบบสถานะคงที่ เพราะเป็นระยะที่มีการคืบนานที่สุด อัตราการคืบที่สถานะคงที่ ( $\dot{\varepsilon}_{SS}$ ) ที่สามารถเขียนแทนได้ด้วยสมการยกกำลัง (Power Law) ดังสมการที่ (2) [21-23]

$$\dot{\epsilon}_{SS} = B\sigma^n \quad (2)$$

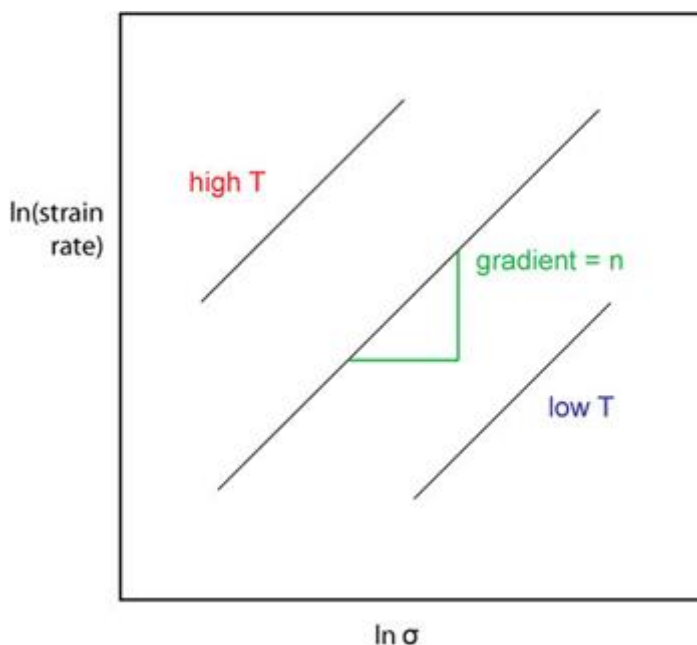
โดยที่

$B$  = พารามิเตอร์ของวัสดุที่ขึ้นกับอุณหภูมิ

$\sigma$  = ความเค้นการคืบ (Creep Stress)

$n$  = ค่ายกกำลังของความเค้น (Stress Exponent)

โดยทั่วไปโลหะบริสุทธิ์จะมีค่า  $n = 4 - 5$  การเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln \dot{\epsilon}_{SS}$  กับ  $\ln \sigma$  จะได้กราฟความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงที่มีความชัน (Slope) เท่ากับ  $n$  (Stress Exponent)



รูปที่ 2.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\ln \dot{\epsilon}_{SS}$  กับ  $\ln \sigma$  [20]

เมื่อทดสอบการคืบที่ค่าความเค้นต่างๆ ค่า  $n$  จะมีค่าเท่ากับ 1 ซึ่งเป็นช่วงของการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมคืบของวัสดุ จากกลไกการคืบแบบดิสโลเคชัน (Dislocation Creep,  $n = 4-5$ ) ไปสู่กลไกการคืบที่ถูกควบคุมโดยการแพร่ (Diffusional Creep,  $n=1$ ) การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของการคืบจะทำให้อัตราการคืบเปลี่ยนไปอย่างมีนัยสำคัญ ที่ความเค้นคงที่เป็นไปตามสมการของอาร์เรเนียส (Arrhenius Form) ดังสมการที่ (3) [13, 14]

$$\dot{\epsilon}_{SS} = C \exp\left(-\frac{Q_c}{RT}\right) \quad (3)$$

โดยที่

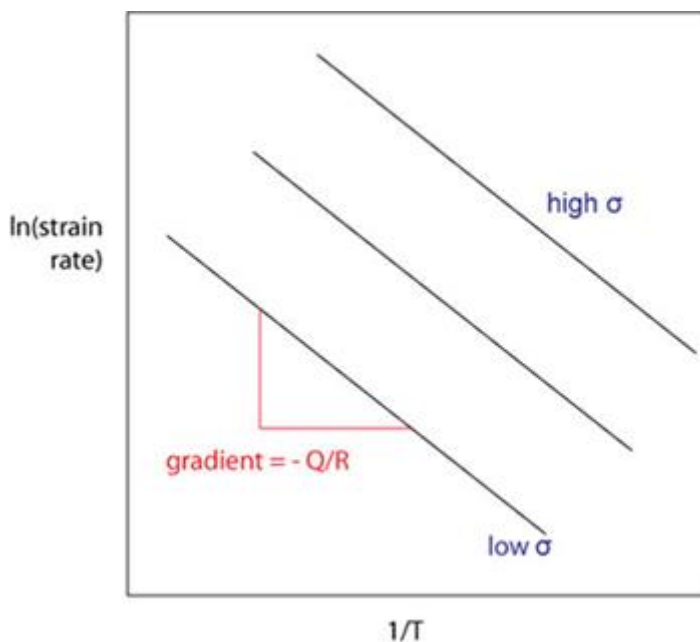
$C$  = พารามิเตอร์ของวัสดุที่ขึ้นอยู่กับความเค้น (Stress-Dependent Materials Parameter)

$R$  = ค่าคงที่ของแก๊สสากล (Gas Constant)

$Q_c$  = พลังงานกระตุ้นสำหรับการคืบ (Activation Energy for Creep)

ที่มีค่าเท่ากับพลังงานกระตุ้นสำหรับการแพร่

ดังนั้นเมื่อทำการเขียนกราฟของความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln \dot{\epsilon}_{SS}$  กับ  $1/T$  จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ  $-\frac{Q_c}{R}$  ตามรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\ln \dot{\epsilon}_{SS}$  กับ  $1/T$  [11]

จากสมการที่ (2) และ (3) สามารถเขียนสมการยกกำลังของการคืบ (Power Law Creep) ได้ดังสมการที่ (4)

$$\dot{\epsilon}_{SS} = A\sigma^n \exp\left(-\frac{Q_c}{RT}\right) \quad (4)$$

เมื่อ  $A$  คือพารามิเตอร์ของวัสดุ (Material Parameter) โดยทั่วไปสำหรับโลหะบริสุทธิ์ค่า  $n$  มีค่าประมาณ 4-5

### 2.1.10 กลไกการคืบของโลหะบริสุทธิ์และโลหะผสมชนิด M (Creep Mechanism of Pure Metal and Class M Alloy)

อัตราการคืบแบบสถานะคงที่ขึ้นอยู่กับความเค้นและอุณหภูมิ (Stress and Temperature-Dependence of Steady-State Creep Rate) นอกจากนี้แล้วอัตราการคืบแบบสถานะคงที่ก็ยังขึ้นอยู่กับขนาดเกรน (Grain Size) ของวัสดุ อัตราการคืบที่สถานะคงที่ที่สามารถแสดงได้ด้วยสมการ

$$\dot{\epsilon}_{ss} = A_o \frac{D_o G b}{kT} \left(\frac{b}{d}\right)^p \left(\frac{\sigma}{G}\right)^n \exp\left(\frac{-Q_o}{RT}\right) \quad (5)$$

เมื่อ

$A_o$  คือ พารามิเตอร์ไร้มิติของวัสดุ (Dimensionless Material Parameter)

$b$  คือ เฮอร์เกอร์เวกเตอร์ (Burgers Vector)

$d$  คือ ขนาดของเกรน (Grain Size)

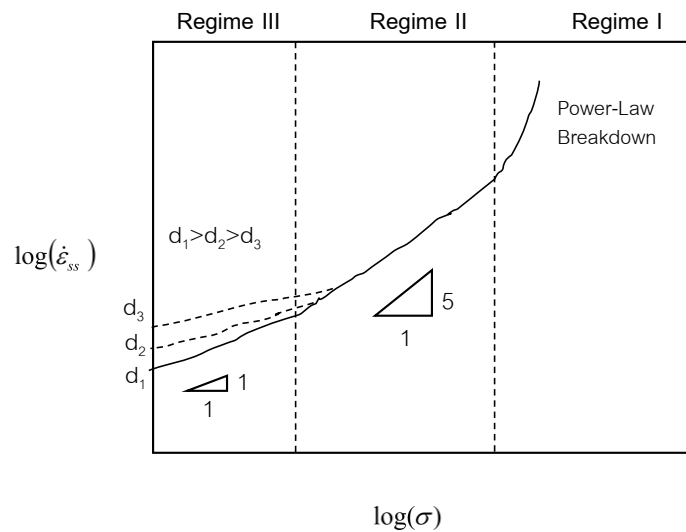
$G$  คือ โมดูลัสเฉือน (Shear Modulus)

$k$  คือ ค่าคงที่โบลซ์แมนน์ (Boltzmann Constant)

$D_o$  คือ แฟคเตอร์ความถี่ (Frequency Factor)

$n$  และ  $p$  คือ ค่าคงที่ (Constants)

พฤติกรรมการคืบของโลหะบริสุทธิ์ และโลหะผสมชนิด M สามารถแบ่งออกเป็น 3 ขอบเขต (Regime) ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log(\dot{\epsilon}_{ss})$  กับ  $\log(\sigma)$  ของโลหะบริสุทธิ์และโลหะผสม [24]

**Regime I** ขอบเขตความเค้นสูง พื้นที่นี้ไม่มีความสำคัญกับการคืบเพราะมีอัตราการเปลี่ยนรูปสูงมาก แต่เหมาะกับการขึ้นรูปร้อน พฤติกรรมการคืบไม่สามารถอธิบายได้ด้วยสมการยกกำลัง จึงเรียกระบิเวณนี้ว่า Power-Law Breakdown ซึ่งมีค่า  $n \geq 8$

**Regime II** ขอบเขตความเค้นปานกลาง คุณลักษณะโดยทั่วไป มีค่า  $n = 4-5$ ,  $p = 0$  และค่าของ  $Q = Q_0$  เมื่อ  $Q_0$  คือ Activation Energy for Lattice Self-Diffusion ในพื้นที่นี้การคืบถูกควบคุมโดยกลไกการคืนตัว (Recovery Mechanism) เช่น การปีน (Climb) และการทำลายกันเองของดิสโลเคชัน (Annihilation of Dislocations) ดิสโลเคชันแบบขอบ (Edge Dislocations) สามารถปีนเนื่องจากเกิดการแพร่ของวาแคนซี (Vacancies) อุณหภูมิสูงเป็นตัวกระตุ้นการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน การแพร่เป็นตัวควบคุมอัตราการคืบ ปรากฏการณ์นี้ทำให้ค่า  $Q = Q_0$  การเปลี่ยนรูปเป็นผลมาจากการไถล (Glide) และการปีนของดิสโลเคชันที่ถูกกระตุ้นจากความร้อนกลไกที่เข้าสู่จะเป็นตัวควบคุมการคืบ และทราบได้ที่กลไกการไถลสามารถเกิดได้ง่าย เช่น ในโลหะบริสุทธิ์ การคืบก็ จะถูกควบคุมโดยการปีนของดิสโลเคชัน (Dislocation Glide and Climb-Controlled Creep Mechanism)

**Regime III** ขอบเขตความเค้นต่ำ กลไกการคืบเกิดจากการแพร่ ซึ่งเกิดได้ 2 แบบคือ การแพร่ของวาแคนซีเกิดภายในเกรน (Nabarro-Herring Creep Mechanism) เป็นผลทำให้เกรนเกิดการยืดออกไปในทิศทางเดียวกับความเค้นที่กระทำ ในกรณีนี้  $n = 1$ ,  $p = 2$  และ  $Q = Q_0$  และการยืดออกของเกรนเป็นผลมาจากเกิดการแพร่ของวาแคนซีไปตามบริเวณขอบเกรน (Coble Creep

Mechanism) ทำให้  $n = 1, p = 2$  ทั้งสองกลไกที่กล่าวมา จะเกิดการแพร่ของวาเคนซีเกิดขึ้นจากบริเวณขอบเกรนซึ่งทำให้เกิดกลไกการคืบที่เรียกว่า Harper-Dorn Creep ซึ่งทำให้  $n = 1$  [24]

ตารางที่ 2.3 แสดงความสัมพันธ์ของค่ายกกำลังของความเค้นกับกลไกการคืบ [25]

$n$	Creep Mechanism
>8	Power-Law Breakdown
4-5	Dislocation Glide and Climb
3	Solute Drag
1	Diffusion

### 2.1.11 การคืบแบบหนืด (Viscous Glide Creep)

สำหรับการทดลองได้ทำการทดสอบสมบัติการคืบของชิ้นงานที่มีส่วนผสมของ แมกนีเซียม (Mg) จึงทำให้เกิดลักษณะของสารละลายของแข็ง (Solid Solution) เกิดขึ้น สำหรับการคืบของวัสดุที่เป็นสารละลายของแข็ง ประกอบไปด้วย 3 ช่วงด้วยกัน แต่ช่วงที่ให้ความสนใจในการศึกษาคือช่วงที่ 2 ที่มีค่ายกกำลังของความเค้น (Stress Exponent) ที่มีค่าเท่ากับ 3 ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดการเคลื่อนที่แบบหนืดของดิสโลเคชันโดยปัจจัยที่ทำให้ดิสโลเคชัน โดยปัจจัยที่ทำให้ดิสโลเคชันเคลื่อนที่แบบช้าๆ เกิดจากการมีอะตอมอื่นๆ ตัวอย่างเช่น แมกนีเซียมละลายผสมอยู่ในอลูมิเนียม ซึ่งอะตอมดังกล่าวไปขัดขวางและหน่วงการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันให้ช้าลง การคืบแบบหนืดสามารถอธิบายได้ด้วยสมการที่ (6) [26]

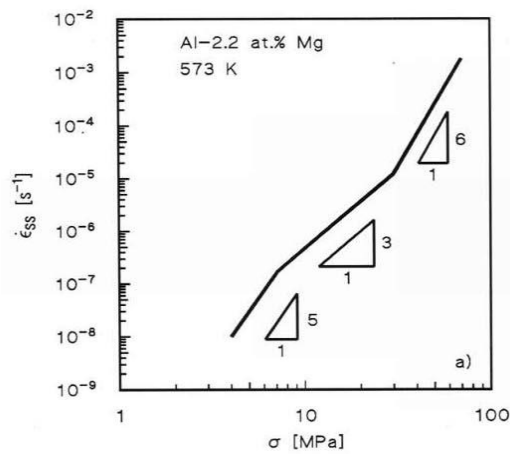
$$\dot{\epsilon} \cong \frac{0.35}{A} G \left( \frac{\sigma}{G} \right)^3 \quad (6)$$

เมื่อ

$A$  คือ ค่าพารามิเตอร์ของวัสดุ

$G$  คือ ค่าโมดูลัสของแรงเฉือน

$\sigma$  คือ ค่าความเค้น



**รูปที่ 2.8** กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Steady-State Creep Rate กับความเค้นที่ใช้ในการทดสอบของอลูมิเนียม Al 2.2 at. % Mg Alloy ที่อุณหภูมิ 300°C [27]

ช่วงที่ I เป็นช่วงที่ใช้ความเค้นในระดับปานกลาง กลไกการคืบจะถูกควบคุมโดยการปีนและการไถล โดยค่ายกกำลังของความเค้น จะมีอยู่ในช่วง  $n = 4-5$

ช่วงที่ II เป็นช่วงที่ใช้ความเค้นในระดับปานกลาง การคืบจะมีค่ายกกำลังความเค้นเท่ากับ 3 ซึ่งกลไกดังกล่าวจะเป็นกลไกที่เกิดการเคลื่อนที่ตัดผ่านอะตอมที่ละลายอยู่ในเนื้อของโลหะตั้งต้น ซึ่งในที่นี้เป็นเนื้อของอลูมิเนียม

ช่วงที่ III เป็นช่วงที่ใช้ความเค้นในระดับปานกลาง กลไกการคืบจะถูกควบคุมโดยการปีนและกลไกของการไถล โดยค่ายกกำลังของความเค้นจะมีค่าอยู่ในช่วง 4-5

## 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

D. Božić และคณะ (2011) [28] ได้ทำการศึกษาโครงสร้างจุลภาคและคุณสมบัติทางกลของโลหะสังกะสีที่ใช้เป็นส่วนของเนื้อหลัก (Matrix) โดยมีส่วนเสริมแรงที่ใช้ก็คือ  $Al_2O_3$  มีน้ำหนัก 10 %wt และมีขนาด 0.7 ไมครอน โดยในเชิงพาณิชย์โลหะสังกะสีผสมเบอร์ ZA-27 จะนำไปทำให้เป็นผงด้วยกระบวนการ Gas Atomization และนำไปผสมกับอะลูมินาแล้วอัดขึ้นรูปเป็นทรงกระบอกโลหะสังกะสีผสม ZA-27 มีส่วนผสมของอะลูมิเนียมประมาณ (25-27 wt. %) ที่ได้จากกระบวนการดั้งเดิมของการหลอมเหลวและการหล่อซึ่งจะนำไปใช้ประโยชน์ในเชิงอุตสาหกรรมยานยนต์ เนื่องจากคุณสมบัติเชิงกลดี

M. Rosso (2012) [29] ได้ทำการศึกษากระบวนการผลิต SSM ที่ได้รับการศึกษาอย่างกว้างขวาง และเป็นที่ยอมรับกันอย่างแพร่หลายในงานอุตสาหกรรมจำนวนมาก มันรวมทั้งองค์ประกอบของการหล่อและการตีขึ้นรูปที่แสดงให้เห็นข้อดีกว่ากระบวนการแบบเดิม ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 แบบดังนี้ 1. Thixoforming เป็นศัพท์ทั่วไปที่ใช้ในการอธิบายการขึ้นรูปเพื่อให้ได้เป็นแบบ Near-net shape ซึ่งเป็นกระบวนการหลอมละลายบางส่วน of โลหะผสมที่ไม่เป็นแบบ dendritic ภายในแม่พิมพ์โลหะแบบปิด ซึ่งจะเรียกกระบวนการนี้ว่า Thixocasting โดยความร้อนที่เข้าไปใน

สถานะกึ่งของแข็งเป็นขั้นตอนที่สำคัญอย่างยิ่งในกระบวนการ Thixoforming โดยเกิดจากความร้อนเหนียวนำซึ่งมีความแม่นยำและรวดเร็ว จึงมีค่าใช้จ่ายที่สูงขึ้นในขั้นตอนการทำ Thixocasting เช่น การรีไซเคิลเศษเหล็กด้วย Thixocast และความจำเป็นของผู้ผลิตภายนอกต่อแห่งเหล็ก 2. กระบวนการ Rheocasting เป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการเตรียมสเลอรี่ของโลหะ (SSM) โดยตรงจากโลหะผสมของเหลวตามด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูปด้วยวิธีการดังนี้ High Pressure Die Casting (HPDC) "Rheo" เป็นกระบวนการที่โลหะผสมเกิดการระบายความร้อนในสถานะกึ่งของแข็งแล้วหลังจากนั้นจะนำเข้าสู่กระบวนการอัดขึ้นรูป โดย Slurry จะไม่มีรูปเป็นแบบ Dendritic

R. Burapa (2009) [30] กระบวนการที่ใช้ในการผลิตโลหะกึ่งของแข็ง ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องและมีการคิดค้นวิธีการใหม่ๆ เพื่อให้มีประสิทธิภาพเพิ่ม มากขึ้นรวมถึงช่วยลดต้นทุนต่างๆ ของกระบวนการผลิตได้ ซึ่งหนึ่งในกระบวนการผลิตโลหะกึ่งของแข็งที่ช่วยลดต้นทุนดังกล่าวได้ คือ กระบวนการผลิตโลหะกึ่งของแข็งโดยการพ่นฟองแก๊สเข้าไปในน้ำ โลหะขณะแข็งตัว (Gas Induced Semi-Solid Process, GISS) กระบวนการ GISS ได้ถูกพัฒนาและนำไปใช้งานกับอะลูมิเนียมผสมเกรดต่างๆ ในระดับห้องปฏิบัติการ อย่างไรก็ตามการพัฒนากระบวนการ GISS ให้สามารถประยุกต์ใช้งานได้ในระดับอุตสาหกรรมจำเป็นต้องศึกษาตัวแปรต่างๆ ที่ส่งผลต่อกระบวนการผลิต รวมถึงผลิตภัณฑ์ที่ได้ เช่น อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในกระบวนการผลิตโลหะกึ่งของแข็งด้วยกระบวนการแบบ GISS ที่เหมาะสม ในงานวิจัยชิ้นนี้ ได้ทำการศึกษาถึงผลของอุณหภูมิน้ำโลหะก่อนจุ่มแท่งกราไฟต์ และเวลาที่ใช้ในการจุ่มแท่งกราไฟต์เพื่อพ่นฟองแก๊ส ที่มีต่อปริมาณสัดส่วนของแข็งและโครงสร้างทางจุลภาคที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปอะลูมิเนียมผสมเกรด A356 ผลจากการวิจัยแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ได้แก่อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการจุ่มแท่งกราไฟต์ พบว่าอุณหภูมิของน้ำโลหะก่อนจุ่มแท่งกราไฟต์ที่ต่ำลงและใช้เวลาในการจุ่มของแท่งกราไฟต์เพื่อพ่นฟองแก๊สที่นานขึ้นส่งผลให้เกิดสัดส่วนของแข็งเพิ่มขึ้น และมีลักษณะเป็นแบบก้อนกลมเพิ่มมากขึ้นอีกด้วยงานวิจัยชิ้นนี้จะเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้เพื่อสร้างเครื่องผลิตโลหะกึ่งของแข็งแบบอัตโนมัติต่อไป

Y.H. Zhu (1997) [31] แท่งอินกอตโลหะผสมมีส่วนผสมดังนี้ 76 wt% Zn, 22wt% Al และ 2wt% Cu ที่เตรียมมาจากวัสดุที่มีความบริสุทธิ์ของ 99.99%Zn, 99.99%Al และ 99.99%Cu นำมาหลอมรวมกันภายในเบ้าแกรไฟต์โดยที่แท่งอินกอตจะทำการ Solution Treated ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 วัน และปล่อยให้เย็นตัวภายในเตาที่อุณหภูมิห้อง แท่งอินกอตที่ผ่านกระบวนการ Solution treated และปล่อยให้เย็นภายในเตา จะถูกมาทำการ Machine ให้เป็นชิ้นงานในการทดสอบ 2 กลุ่มดังนี้ กลุ่มที่ 1 ทำการทดสอบการคืบ (Creep test) กลุ่มที่ 2 ทำการทดสอบ Tensile จากงานวิจัยได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงเฟสของ Zn-Al alloy ที่ผ่านการทำการคืบโดยจะใช้กล้อง SEM และเทคนิคการทำ XRD มาศึกษาการสลายตัวของเฟส Metastable ( $\eta'$ ) และขั้นตอนของการเปลี่ยนอีก 4 เฟส ( $\alpha + \epsilon \rightarrow T' + \eta$ ) ซึ่งจะพบในการเกิดการคืบ นอกจากนี้จากการสังเกตพบว่าโครงสร้างจุลภาคที่เป็นโครงสร้างแบบ lamellar มีบางส่วนที่เป็นแบบโครงสร้าง Spherodized ในส่วนที่เกิดการแตก

R. Roberti (2008) [32] โลหะผสมทางวิศวกรรมส่วนใหญ่มักจะนำไปใช้ในงานที่มีอุณหภูมิสูง ซึ่งได้มีการศึกษาเฉพาะในระยะเวลาการคืบระยะที่สองหรือระยะที่อัตราการคืบมีค่าคงที่ในขณะที่การเปลี่ยนรูปในสถานะคงที่ของการคืบระยะที่สองจะเป็นตัวที่ใช้ในการคาดการณ์อย่างง่ายที่สุดของ



พฤติกรรมในระยะยาว วิธีการนี้ไม่สามารถใช้ได้กับโลหะสังกะสีผสม เนื่องจากการคืบในระยะแรกมีส่วนเพียงเล็กน้อยต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างน้อยมาก จึงได้ทำการศึกษาการคืบในระยะแรกจากบทความเอกสารในปัจจุบันจากหัวข้อ Zamak5 Die Casting alloy ได้ทำการศึกษาและได้ค้นพบตรวจสอบว่าการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของการคืบระหว่างระยะแรก (Primary Creep) กับ การคืบระยะที่สอง (Secondary Creep) ซึ่งเป็นผลกระทบของเวลาในการทำ aging ของการคืบ โดยความเครียดโดยรวมในระยะแรกจะแสดงให้เห็นถึงการได้รับผลกระทบหรืออิทธิพลจากการทำ Aging ชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบมีขนาดความหนา 3 mm.และมีความกว้าง 20 mm. โดยโลหะสังกะสีผสมที่ใช้เป็นเกรด Zamak5 มีส่วนผสมทางเคมีดังนี้ 4.1% Al, 1.0% Cu and 0.045% Mg การทดสอบการคืบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และใช้ภาระน้ำหนัก 20 หรือ 30 MPa จากนั้นประมาณ 5 และ 15 วัน หรือประมาณ 120 และ 360 ชั่วโมง ในการทดสอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสก็ให้เลือกอุณหภูมินี้เพื่อให้สอดคล้องกับอุณหภูมิสูงสุดในด้านทางอุตสาหกรรมของโลหะสังกะสีผสม Zamak5

W. Xiao-wei (2003) [33] ทำการวิจัยคุณสมบัติของโลหะสังกะสีผสม ZA27 โดยทำการทดสอบการคืบที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิสูง ซึ่งโลหะสังกะสีผสม ZA27 ที่ได้นำมาทำการทดสอบนั้นก็จะเป็นแบบธรรมดา (ZA-27) และ แบบที่เติมธาตุ 0.2% Zr ลงไปใน ZA-27 (ZA27-Zr) ซึ่งในการทดสอบจะทำการศึกษาผลของ Zr ที่มีผลต่อพฤติกรรมการคืบแบบอัดของโลหะสังกะสีผสม ZA27 ที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการหล่อ อุณหภูมิที่ใช้ทดสอบก็จะมีค่าที่อยู่ในช่วง 20-160 องศาเซลเซียส และจะทำการเปลี่ยนแปลงค่าความเค้นที่ใช้ในช่วง 50-137.5 MPa โดยที่ผลของการทดสอบค่าอัตราการคืบ (Creep rate) ของ ZA27-Zr มีค่าที่ต่ำกว่า ZA27 ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส แต่จะมีค่าสูงที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส ซึ่งจะได้ค่า Stress exponent (n) ของ ZA27-Zr จะมีค่าอยู่ที่ 3.63 ส่วน ZA27 มีค่าอยู่ที่ 3.46 และพลังงานกระตุ้นของZA27-Zr จะมีค่า 87.32 kJ/mol และ ZA27 มีค่าที่ 81.09 kJ/mol อัตราการคืบแบบกดจะถูกควบคุมด้วยการแพร่ของแลทธิขของสังกะสีและกลไกการป็นของดิสโลเคชัน

L. Zi-quan (2005) [34] ได้ทำการศึกษาลักษณะเฉพาะของโครงสร้างที่ผ่านการทำการอบของโลหะสังกะสีผสม ZA-27 และ วัสดุผสม SiCp/ZA-27 (ZMCp) ซึ่งโลหะสังกะสีผสม ZA-27 ที่นำมาใช้เป็นโลหะเมทริกซ์มีส่วนผสมทางเคมีดังนี้ (% โดยน้ำหนัก): Al 26-28, Cu 1.8-2.2, Mg 1.05-1.15 เป็นต้น และมีส่วนเสริมแรงที่ใช้เป็นเซรามิกก็คือ SiC ที่มีขนาดอนุภาค 18 ไมครอนและมีปริมาณสัดส่วน 10% ของ SiCp/ZA-27 โดยตัวอย่างชิ้นงานที่นำมาทดสอบจะทำการผ่านกระบวนการทางความร้อนโดยการทำให้ Solutionized ที่อุณหภูมิ 360 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และนำไปจุ่มในน้ำเย็น หลังจากนั้นจึงนำไปทำ Aged ที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5, 15 และ 20 ชั่วโมงตามลำดับ โดยตัวอย่างที่ผ่านการทำให้ Solutionized และ การจุ่มจะถูกเก็บไว้ที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส ก่อนนำไปทำการอบเทียม แล้วจึงนำมาตรวจสอบโครงสร้างด้วย SEM, EDS และ TEM เพื่อศึกษาดูโครงสร้างผลึกและขนาดของเกรนย่อยภายในเกรนโครงสร้างใน ZMCp

Y. Liu (2013) [35] ได้ทำการศึกษาผลที่เกิดจากกระบวนการทางความร้อนต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของโลหะสังกะสีผสม ZA27 โดยจะทำการทดลองกับตัวอย่างชิ้นงานที่ผ่านการทำให้ Solid Solution Treated ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 300-365 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมงและ

ทำการจุ่มภายในน้ำและจึงนำไปทำการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 90-250 องศาเซลเซียส เป็นเวลาดั้งแต่ 1-24 ชั่วโมง โดยจะทำการศึกษาด้วยเครื่อง XRD, SEM และทำการทดสอบสมบัติทางกลของโลหะสังกะสีผสม ZA-27

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินการวิจัย

#### 3.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

วัสดุที่ใช้ในการวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 3 กลุ่มดังนี้ 1. กลุ่มของสังกะสีผสมที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการหล่ออัดแบบดั้งเดิม 2. กลุ่มของสังกะสีผสมที่ขึ้นรูปด้วยวิธี GISS5s และ 3. กลุ่มของสังกะสีผสมที่ขึ้นรูปด้วยวิธี GISS15s

##### 3.1.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำวิจัย

1. โลหะสังกะสีผสม ZA-27
2. เตาหลอมไฟฟ้า (Induction Furnace)
3. เบ้าสำหรับหลอมสังกะสีผสม
4. เครื่องอัดไฮดรอลิก (Hydraulic Press Machine)
5. เครื่องผลิตโลหะกึ่งของแข็ง (Gas Induced Semi-Solid Machine)
6. แม่พิมพ์ภายในเครื่องอัดไฮดรอลิกขนาด 100 x 100 mm.
7. เตาอุณหภูมิสำหรับกระบวนการทางความร้อน
8. เครื่องขัดชิ้นงาน
9. กรดกัดชิ้นงาน 2% Nitrol
10. มัลติมิเตอร์

#### 3.2 กระบวนการหล่อขึ้นรูป

วัสดุทั้ง 2 กลุ่มที่ได้ทำการทดลองวิจัยครั้งนี้ มีการขึ้นรูปที่แตกต่างกันดังนี้

### 3.2.1 กระบวนการหล่อขึ้นรูปชิ้นงานโดยวิธีการหล่ออัดแบบดั้งเดิม (Conventional Squeeze Casting, CSC)

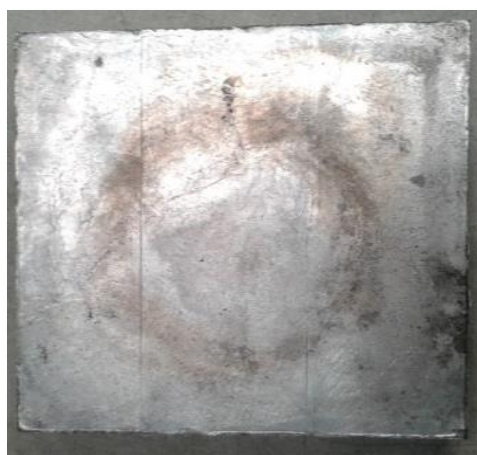
นำสังกะสีผสมเบอร์ ZA-27 ที่ตัดมาจากแท่งอินกอตใส่ลงในเบ้าหลอมสังกะสี และนำไปหลอมในเตาหลอมไฟฟ้าที่อุณหภูมิ  $600^{\circ}\text{C}$  เป็นระยะเวลา 5-6 ชั่วโมง จากนั้นติดตั้งแม่พิมพ์รูปทรงสี่เหลี่ยมขนาด  $100 \times 100$  มิลลิเมตรเข้ากับเครื่องอัดไฮดรอลิกดังรูปที่ 3.1 ตามด้วยการอุ่นแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิประมาณ  $270^{\circ}\text{C}$  หลังจากแท่งสังกะสีผสมในเตาหลอมไฟฟ้าหลอมละลายจึงตักน้ำโลหะประมาณ 750 กรัมออกจากเบ้าหลอมและใช้เทอร์โมคัลเปิลวัดอุณหภูมิของน้ำโลหะรอจนอุณหภูมิของน้ำโลหะลดลงมาเหลือ  $565^{\circ}\text{C}$  จากนั้นเทน้ำโลหะลงในแม่พิมพ์ และทำการอัดขึ้นรูปชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูปจะเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมขนาด  $100 \times 100 \times 15 \text{ mm}^3$  ดังรูปที่ 3.2

### 3.2.2 กระบวนการหล่อขึ้นรูปชิ้นงานโดยวิธีการหล่ออัดแบบ GISS (Slurry Squeeze Casting, GSC)

นำสังกะสีผสมเบอร์ ZA-27 ที่ตัดมาจากแท่งอินกอตใส่ลงในเบ้าสังกะสีและนำไปหลอมในเตาไฟฟ้าที่อุณหภูมิ  $600^{\circ}\text{C}$  เป็นระยะเวลา 5-6 ชั่วโมง จากนั้นติดตั้งแม่พิมพ์รูปทรงสี่เหลี่ยมขนาด  $100 \times 100$  มิลลิเมตร เข้ากับเครื่องอัดไฮดรอลิก ตามด้วยการอุ่นแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิ  $270^{\circ}\text{C}$  หลังจากแท่งสังกะสีผสมในเตาหลอมไฟฟ้าหลอมละลายจึงตักน้ำโลหะประมาณ 750 กรัมออกจากเบ้าหลอมและใช้เทอร์โมคัลเปิลวัดอุณหภูมิของน้ำโลหะรอจนอุณหภูมิของน้ำโลหะลดลงมาเหลือ  $500^{\circ}\text{C}$  จากนั้นจึงย้ายเบ้าหลอมมาจุ่มแท่ง กราไฟต์อย่างรวดเร็วพร้อมกับการพ่นฟองแก๊สเข้าไปในน้ำโลหะด้วยการไหล 4 ลิตร/นาที โดยจะจุ่มแท่งกราฟิต์เพื่อพ่นฟองแก๊สเป็นเวลา 5 และ 15 วินาทีและพักน้ำโลหะไว้ 30 วินาที จากนั้นเทน้ำโลหะลงในแม่พิมพ์แล้วอัดขึ้นงานในแม่พิมพ์ จากนั้นปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ สุดท้ายนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ ชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูปจะเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมขนาด  $100 \times 100 \times 15 \text{ mm}^3$



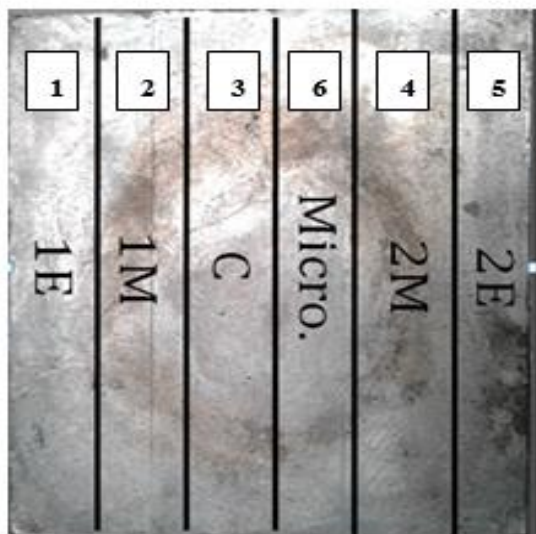
รูป 3.1 เครื่องอัดไฮดรอลิก (Hydraulic Press Machine)



รูปที่ 3.2 ชิ้นงานสังกะสีผสมที่ผ่านการอัดขึ้นรูปขนาด  $100 \times 100 \times 15 \text{ mm}^3$

### 3.3 การเตรียมชิ้นงานการทดสอบ

นำชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปด้วยวิธีการหล่ออัดแบ่งเป็น 3 กลุ่มดังนี้ 1. กลุ่มที่หล่ออัดแบบดั้งเดิม (CSC) 2. กลุ่มที่หล่ออัดแบบ GISS5s (GSC5s) 3. กลุ่มที่หล่ออัดแบบ GISS15s (GSC15s) มาทำการวัดขนาดชิ้นงานยาว 17 มิลลิเมตร จำนวน 5 ชิ้น ส่วนชิ้นสุดท้ายวัดขนาดชิ้นงานยาว 15 มิลลิเมตรจะได้ชิ้นงานทั้งหมด 6 ชิ้น หลังจากนั้นทำการเขียนกำกับชิ้นงานตามรูปที่ 3.3

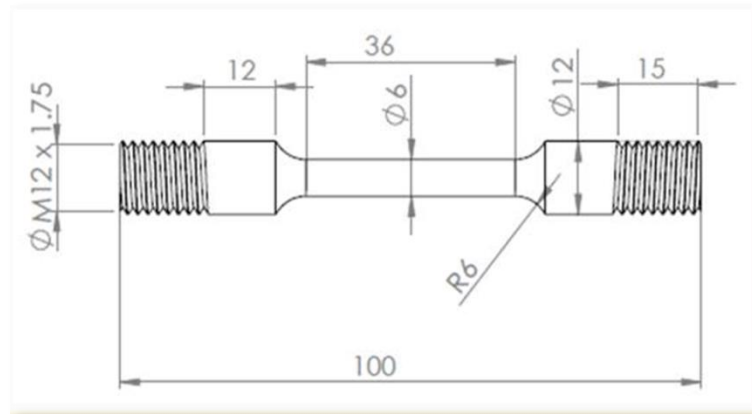


รูปที่ 3.3 การวัดขนาดชิ้นงานและเขียนกำกับชิ้นงานโลหะสังกะสีผสม ZA-27

หลังจากนั้นนำชิ้นงานที่วัดขนาดและเขียนกำกับเสร็จนำมาตัดเป็นชิ้นเล็กๆ ด้วยเครื่องตัดแบบใบเลื่อยวน โดยตอนตัดชิ้นงานต้องคอยหยอดน้ำมันเพื่อไม่ให้ใบเลื่อยเกิดการพังหรือขาดออก เนื่องจากตอนตัดชิ้นงานจะเกิดความร้อนระหว่างใบเลื่อยกับตัวของชิ้นงาน จึงต้องคอยหยอดน้ำมันตลอดและเพื่อช่วยรักษาอายุการใช้งานใบเลื่อย เมื่อตัดชิ้นงานครบ 1 แผ่นจะได้ชิ้นงานออกมา 5 ชิ้น และอีก 1 ชิ้น สำหรับนำไปตรวจโครงสร้างจุลภาค ดังรูปที่ 3.4 หลังจากตัดชิ้นงานได้ตามขนาดที่ต้องการก็จะนำไปส่งกลึงเป็นชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E8M ดังรูปที่ 3.5 มีค่ามิติของชิ้นงานตามตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.4 ชิ้นงานที่ตัดมีขนาด  $17 \times 100 \times 15 \text{ mm}^3$



รูปที่ 3.5 แบบของชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM E8M

ตารางที่ 3.1 แสดงค่ามิติของชิ้นงานทดสอบ ZA-27 จากรูปที่ 3.5

Gage length	30 mm.
Diameter	6 mm.
Radius of fillet	6 mm.
Length	36 mm.

### 3.4 การทดสอบแรงดึง (Tensile Test)

แบ่งการทดสอบแรงดึงออกเป็น 2 แบบ คือ การทดสอบที่อุณหภูมิห้อง และการทดสอบที่อุณหภูมิสูง เพื่อหาค่า Yield Strength เพื่อไปใช้ในการคำนวณหา Load ที่ใช้ในการทดสอบการคืบ

### 3.4.1 การทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิห้อง

1. เตรียมชิ้นงานสำหรับการทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM E8M
2. ติดตั้งชิ้นงานทดสอบแรงดึงในอุปกรณ์จับยึดการติดตั้งชิ้นงานเข้ากับส่วนยึดควรติดตั้งชิ้นงานเข้ากับปากจับไว้แบบพอดีเพื่อให้ความเค้นที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงานระหว่างจับนั้นเกิดขึ้นน้อยที่สุด
3. โดยการจับยึดชิ้นงานไม่ควรทำให้แน่นหรือหลวมเกินไป โดยถ้าแน่นเกินไปอาจทำให้ชิ้นงานเกิดความเสียหายก่อนเวลาอันควรในขณะที่ทำการทดสอบแรงดึงหรือถ้าหลวมเกินไปอาจทำให้ชิ้นงานหลุดออกจากปากจับขณะทดสอบ
4. ระบุชิ้นงานและอัตราความเร็ว โดยป้อนข้อมูลชิ้นงานคือ ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง ความยาวเกจและค่าอัตราเร็วในการดึงซึ่งมีค่าดังนี้ Speed = 1.8 mm/min
5. ทำการทดสอบแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบดังรูปที่ 3.6
6. ทำการบันทึกผลไว้ในคอมพิวเตอร์ตามรูปที่ 3.7

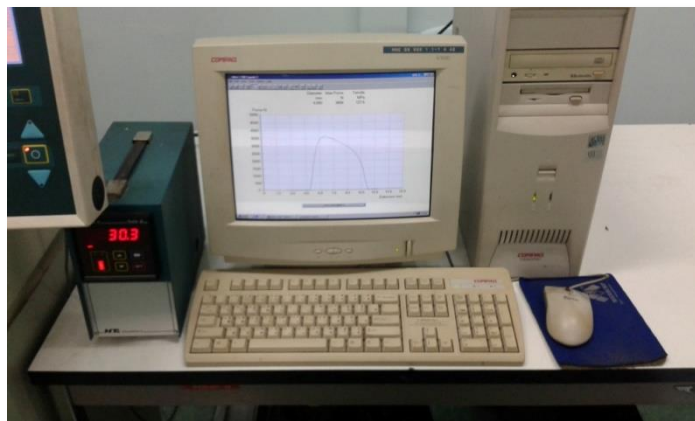
### 3.4.2 การทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิสูง

1. เตรียมชิ้นงานสำหรับการทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM E8M
2. ติดตั้งชิ้นงานทดสอบแรงดึงในอุปกรณ์จับยึดการติดตั้งชิ้นงานเข้ากับส่วนยึดควรติดตั้งชิ้นงานเข้ากับปากจับตัวบนก่อนเพื่อให้ความเค้นที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงานระหว่างจับยึดนั้นน้อยที่สุดแล้วเคลื่อนอุปกรณ์จับยึดตัวบนลงมาให้ได้ระยะพอดีกับปากจับตัวล่างหลังจากนั้นติดตั้งตัววัดอุณหภูมิโดยใช้ Thermo couple วัดอุณหภูมิของชิ้นงานแสดงดังรูปที่ 3.8
3. การจับชิ้นงานไม่ควรจับให้แน่นหรือหลวมเกินไป โดยถ้าแน่นไปอาจทำให้ชิ้นงานเกิดความเสียหายก่อนเวลาอันควรในขณะที่ทำการทดสอบแรงดึงถ้าหลวมไปอาจทำให้ชิ้นงานหลุดออกจากปากจับขณะทำการทดสอบ
4. ระบุขนาดชิ้นงานและอัตราความเร็ว โดยข้อมูลของชิ้นงานคือ ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง ความยาวเกจและค่าอัตราเร็วในการดึง 1.8 mm/min เซตอุณหภูมิตามที่ต้องการทดลองที่ 100°C และ 140°C ตามลำดับ
5. รอจนถึงอุณหภูมิที่เซตไว้ปล่อยพักไว้ 15 นาที แล้วจึงทำการทดสอบแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบ
6. ทำการทดสอบและบันทึกผลไว้ในคอมพิวเตอร์ตามรูปที่ 3.7





รูปที่ 3.6 เครื่องทดสอบแรงดึงยี่ห้อ Hounsfield



รูปที่ 3.7 เครื่องบันทึกข้อมูลจากการทดสอบแรงดึง



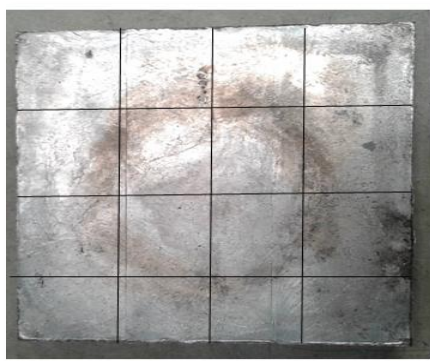
รูปที่ 3.8 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิและปุ่มควบคุมเครื่องการทดสอบแรงดึง

### 3.5 ขั้นตอนการทดสอบการคืบ (Creep Rupture Test)

1. ทำการคำนวณค่า Stress ที่ใช้ในการทดลอง หลังจากนั้นนำค่า Stress มาแปลงให้เป็นค่าน้ำหนักหรือ load ที่ต้องใช้ในการถ่วง และค่าอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบโดยใช้อุณหภูมิที่ 25, 100 และ 140 องศาเซลเซียส
2. ทำการติดตั้งและประกอบเครื่องที่ทำการทดสอบ Creep Rupture โดยทำการประกอบเครื่องที่ใช้ในการทดสอบ Creep ก่อนทำการประกอบหัวจับด้านบนและด้านล่าง ตัวล่างต้องประกอบยึดให้แน่นและปรับด้านบนให้อิสระเพื่อที่ง่ายในการประกอบยึดชิ้นงาน
3. เมื่อเสร็จจากการประกอบเครื่อง Creep ทำการต่อ Computer เข้ากับเครื่องทดสอบ Creep โดยต่อสายเครื่อง Creep เข้า Hard disk หรือตัวเก็บข้อมูลแยกไว้และประกอบตัวจ่ายความต่างศักย์เข้ากับเครื่อง Creep และติดตั้งตัว LVDT นี้ใช้วัดระยะยืดของชิ้นงานโดยอ่านจากค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า
4. ทำการทดสอบโดยการนำชิ้นงานที่ต้องการทดสอบใส่เข้าไปในเครื่อง Creep และยึดชิ้นงานให้แน่น
5. ติดตั้ง Thermo couple เพื่อวัดอุณหภูมิชิ้นงาน วัดอุณหภูมิภายในเตา และวัดที่อุณหภูมิห้อง
6. นำฉนวนความร้อนมาอุดเตา เพื่อป้องกันอากาศภายนอกเข้าภายในเตา ซึ่งอาจทำให้อุณหภูมิภายในเตาไม่คงที่ เมื่ออุณหภูมิให้ทำการเปิดเครื่อง
7. เข้า Program Lab View 2012 และเริ่มบันทึกเก็บค่าอุณหภูมิ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าจาก LVDT
8. เมื่อทำการทดสอบเสร็จนำค่าที่ได้มาเข้า Program Gen plot เพื่อหาค่า Rupture Strain, Rupture Time และ Steady-State Creep rate

### 3.6 การเตรียมชิ้นงานเพื่อใช้ในการทำกระบวนการทางความร้อน

นำชิ้นงานแผ่นสังกะสีผสมเบอร์ ZA-27 ที่ผ่านการขึ้นรูปแบบหล่ออัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด  $100 \times 100 \times 15 \text{ mm}^3$  นำออกมา 1 แผ่นในแต่ละกลุ่มได้แก่ CSC, GSC5s และ GSC15s ทำการตัดแบ่งให้มีขนาด  $25 \times 25 \text{ mm}$ . จะได้ชิ้นงานทั้งหมด 16 ชิ้นดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 แผ่นชิ้นงานที่ทำการตัดแบ่งเพื่อนำไปทำกระบวนการทางความร้อนขนาด  $25 \times 25 \text{ mm}$ .

### 3.7 กระบวนการทางความร้อน (Heat Treatment)

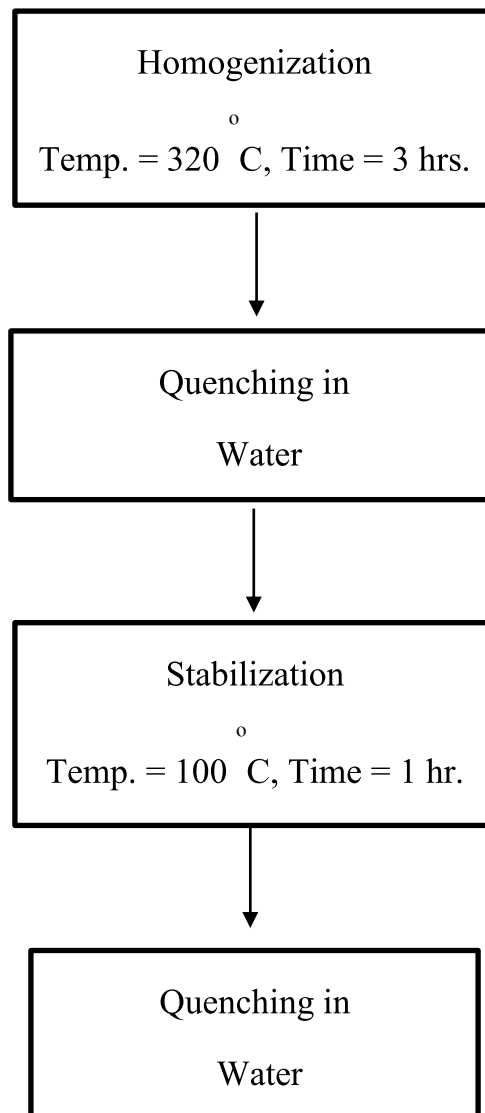
ชิ้นงานสำหรับทำกระบวนการทางความร้อนมีขนาด  $25 \times 25 \times 15 \text{ mm}^3$  แบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ CSC, GSC5s และ GSC15s ทำการเขียนกำกับที่ชิ้นงานไว้ก่อนที่จะนำไปทำกระบวนการทางความร้อน กระบวนการทางความร้อนที่ทำแบ่งออกเป็นอีก 3 กลุ่ม ได้แก่ As-Cast, Homogenized และ Stabilized โดยมีขั้นตอนการทำดังนี้

#### 3.7.1 ขั้นตอนการทำ Homogenization

การทำ Homogenization ของสังกะสีผสม ZA-27 เป็นการทำให้มีสภาพเป็นเนื้อเดียวกันที่สม่ำเสมอเท่ากัน โดยทำการอบตัวอย่างชิ้นงานที่อุณหภูมิ  $320^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และจุ่มในน้ำ (Quenching)

#### 3.7.2 ขั้นตอนการทำ Stabilization

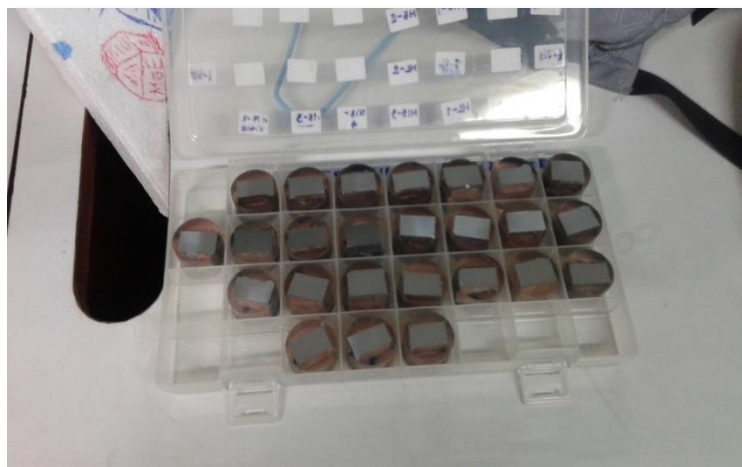
การทำ Stabilization ของสังกะสีผสม ZA-27 เพื่อให้ธาตุผสมที่อยู่ในสถานะอิมพัลเป็นเฟสที่เสถียรและคงที่โดยอาศัยหลักการของการแพร่ (Diffusion) โดยทำการอบชิ้นงานที่อุณหภูมิ  $100^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และจุ่มน้ำ



รูปที่ 3.10 แผนผังขั้นตอนกระบวนการทางความร้อน

### 3.8 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานสำหรับการตรวจโครงสร้างจุลภาค

นำชิ้นงานทั้งหมดที่ผ่านจากกระบวนการทางความร้อนมาทำการหล่อชิ้นงานด้วยวิธี การหล่อแบบเย็น (Cold mount) เพื่อเป็นการรักษาสภาพเฟสของชิ้นงาน เนื่องจากกระบวนการหล่อชิ้นงานแบบเย็น สามารถทำที่อุณหภูมิห้องได้และจะมีความร้อนเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย แต่จะไม่ถึงหรือเกินอุณหภูมิที่ทำให้เฟสเกิดการหลอมละลายอีกครั้ง ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 ชิ้นงานที่ผ่านการทำ Cold Mount

### 3.9 ขั้นตอนการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (OM)

นำชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปชิ้นงานแบบเย็นและนำชิ้นงานทั้งหมดไปขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 180p, 320p, 600p, 800p และ 1200p เมื่อขัดด้วยกระดาษทรายเสร็จแล้วนำมาขัดด้วยผ้าสักหลาดโดยใช้ผงอะลูมินาขนาด 5 และ 1 ไมครอนตามลำดับ เป่าชิ้นงานให้แห้งแล้วนำไปส่องดูโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้อง OM แล้วถ่ายรูปโครงสร้างที่กำลังขยาย 10x และ 25x ตามลำดับ

### 3.10 ขั้นตอนการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของรอยแตกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

ภายหลังการทดสอบการคืบ ชิ้นงานจะถูกนำไปตรวจสอบผิวของรอยแตกและโครงสร้างจุลภาค (Cross-Section) บริเวณใกล้รอยแตกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

#### 3.10.1 ตรวจวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคผิวของรอยแตก (Fracture Surface)

ทำการตัดตัวอย่างรอยขาด โดยวัดจากปลายของรอยขาดยาวประมาณ 1 เซนติเมตร นำไปตรวจดูโครงสร้างผิวของรอยขาดด้วยกล้อง SEM

#### 3.10.2 ตรวจวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคภาคตัดขวางของรอยแตก (Cross-section of Fracture Surface)

นำตัวอย่างรอยแตกไปตัดผ่าตามแนวขนานกับแรงดึง เตรียมตัวอย่างตามขั้นตอนการขัดด้วยกระดาษทรายและผ้าสักหลาด จากนั้นจึงนำไปตรวจวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้อง SEM

## บทที่ 4

### ผลและการอภิปรายผล

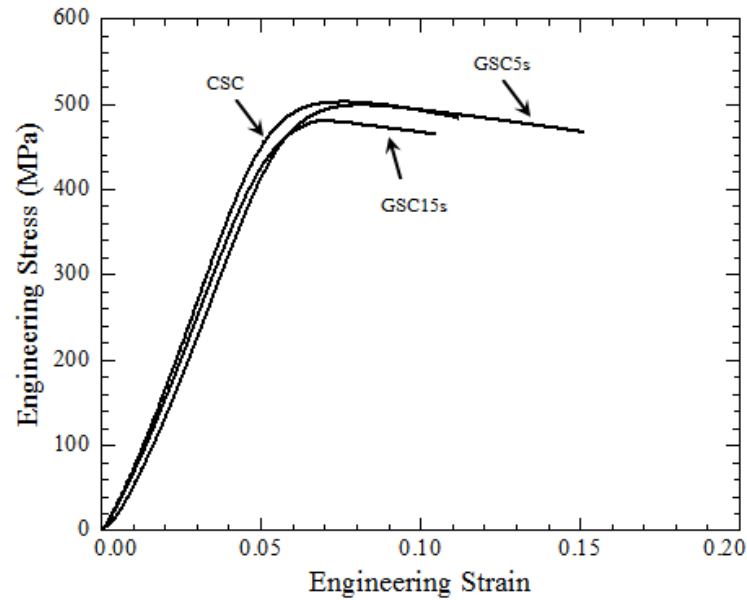
ผลและการอภิปรายผลการศึกษาสมบัติการคืบของโลหะสังกะสีผสม ZA-27 ที่หล่อขึ้นรูปด้วยวิธีการหล่ออัดสเลอร์แบบ GISS ซึ่งจะแบ่งชิ้นงานออกเป็น 3 กลุ่มที่ได้นำมาทดสอบได้แก่ กลุ่มที่หล่อขึ้นรูปด้วยวิธีดั้งเดิม (CSC), กลุ่มที่หล่อขึ้นรูปด้วยกระบวนการGISS เป็นเวลา 5 วินาที (GSC5s) และ กลุ่มที่หล่อขึ้นรูปด้วยกระบวนการGISS เป็นเวลา 15 วินาที (GSC15s) โดยทำการศึกษาสมบัติแรงดึงและการทดสอบสมบัติการคืบและการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคทั้งก่อนและหลังการทดสอบการคืบ การตรวจลักษณะผิวของรอยแตกและโครงสร้างจุลภาคภาคตัดขวางบริเวณรอยแตกภายหลังการคืบ

#### 4.1 ผลการทดสอบสมบัติแรงดึง (Tensile Test)

การทดสอบสมบัติแรงดึงของโลหะสังกะสีผสม ZA-27 ที่หล่อแบบการหล่อแบบดั้งเดิมและการหล่อแบบ GISS และก่อนจะนำมาทำการทดสอบแรงดึง ได้นำไปผ่านกระบวนการทางความร้อนทั้ง Homogenization และ Stabilization เพื่อให้เฟสของโลหะสังกะสีผสมเกิดการเสถียร โดยจะทำการทดสอบด้วยกันทั้งหมด 3 อุณหภูมิ ได้แก่ 25, 100 และ 140 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นการทดสอบสังกะสีผสม ZA-27 ที่มีด้วยกัน 3 กลุ่ม ได้แก่ CSC, GSC5s และ GSC15s โดยใช้ค่าความเร็วในการดึงการทดสอบคงที่ 1.8 mm/min หรือ Strain rate คงที่เท่ากับ  $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  แล้วนำมาพล็อตเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด (Stress-Strain Curve)

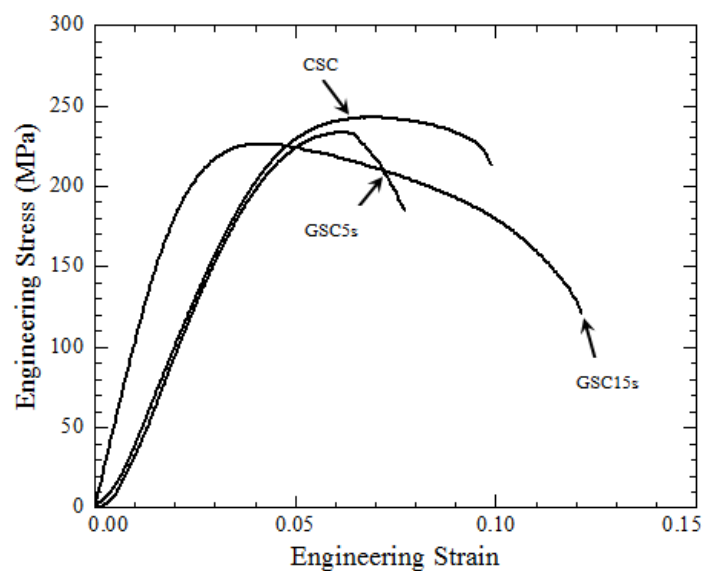
ผลการทดสอบแรงดึงของโลหะสังกะสีผสม ZA-27 ดังแสดงในรูปที่ 4.1-4.3 กราฟแสดงความแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดทางวิศวกรรม (Engineering Stress-Strain) ที่ทดสอบที่อุณหภูมิ 25, 100 และ 140 องศาเซลเซียสตามลำดับ ผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าตัวอย่างชิ้นงานทดสอบกลุ่ม CSC มีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength,  $\sigma_{UTS}$ ) มากกว่าของตัวอย่างชิ้นงาน GSC5s และ GSC15s ที่อุณหภูมิการทดสอบเดียวกัน และเมื่ออุณหภูมิทดสอบสูงขึ้นจะทำให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดลดลง

#### 4.1.1 ผลการทดสอบความแข็งแรงดึงที่อุณหภูมิ 25°C



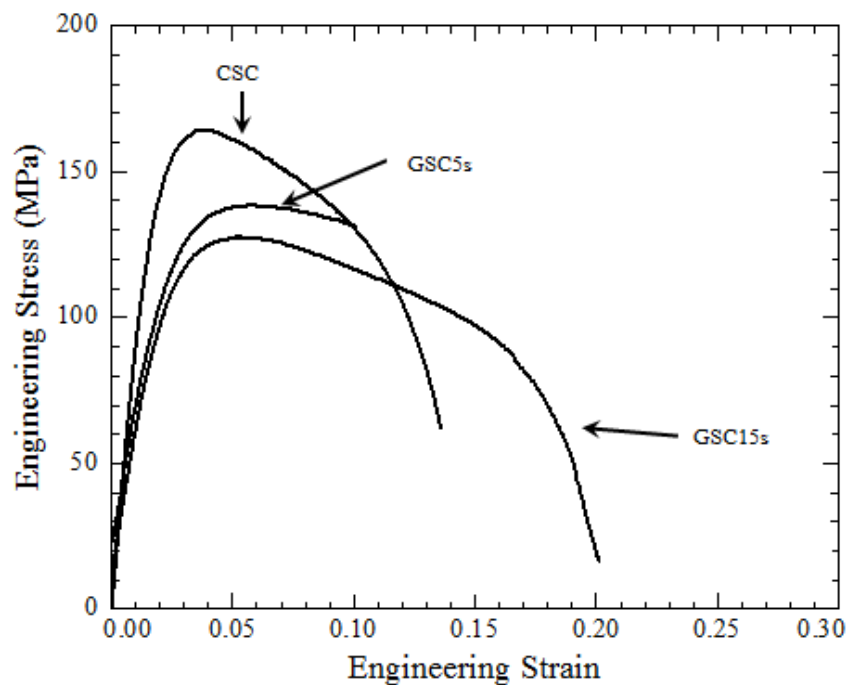
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Engineering Stress และ Engineering Strain ที่อุณหภูมิ 25°C ของกลุ่มตัวอย่าง CSC, GSC5s และ GSC15s

#### 4.1.2 ผลการทดสอบความแข็งแรงดึงที่อุณหภูมิ 100°C



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Engineering Stress และ Engineering Strain ที่อุณหภูมิ 100°C ของกลุ่มตัวอย่าง CSC, GSC5s และ GSC15s

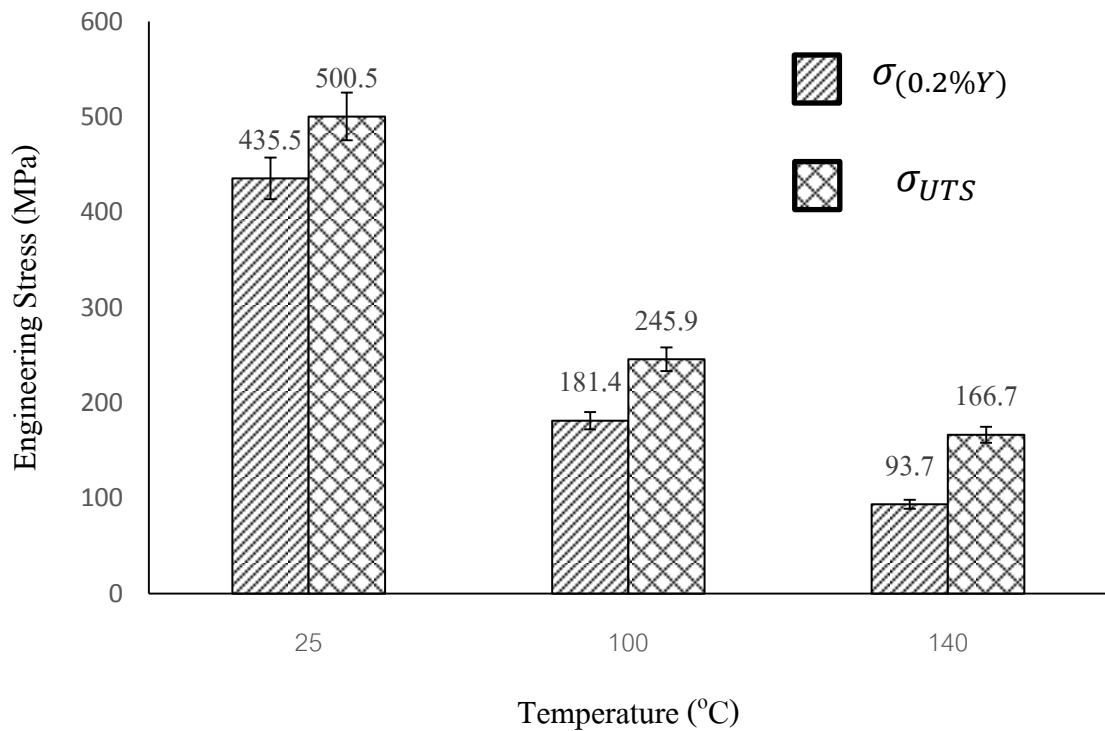
#### 4.1.3 ผลการทดสอบความแข็งแรงดึงที่อุณหภูมิ 140°C



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Engineering Stress และ Engineering Strain ที่อุณหภูมิ 140°C ของกลุ่มตัวอย่าง CSC, GSC5s และ GSC15s

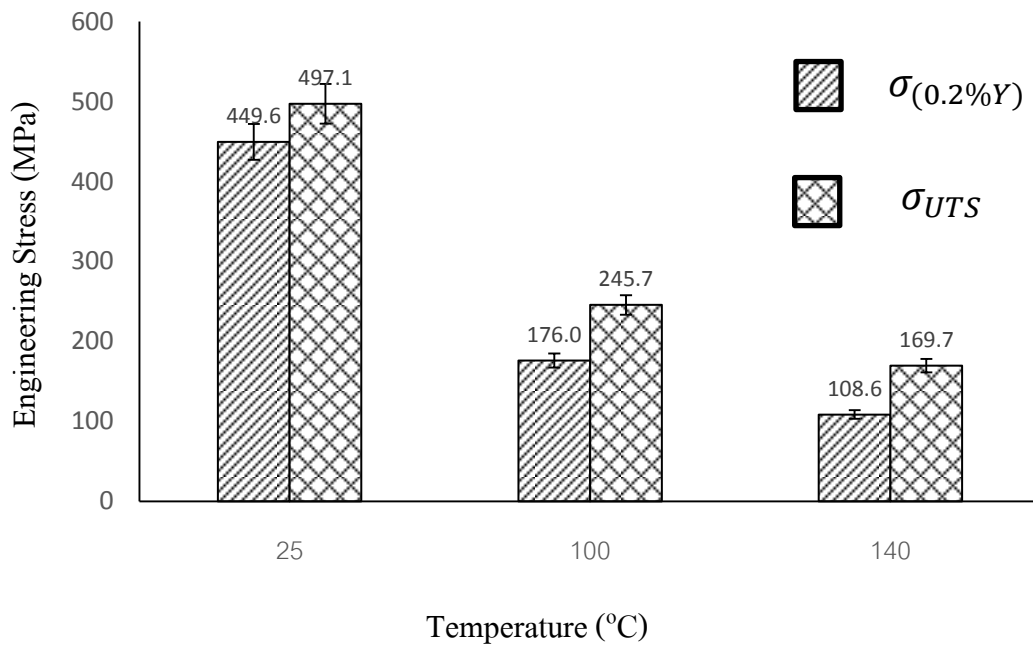
การทดสอบสมบัติแรงดึงของกลุ่มตัวอย่าง CSC, GSC5s และ GSC15s จะทำการทดสอบกลุ่มละ 3 ชิ้น เพื่อหาค่าเฉลี่ย (Average) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation)





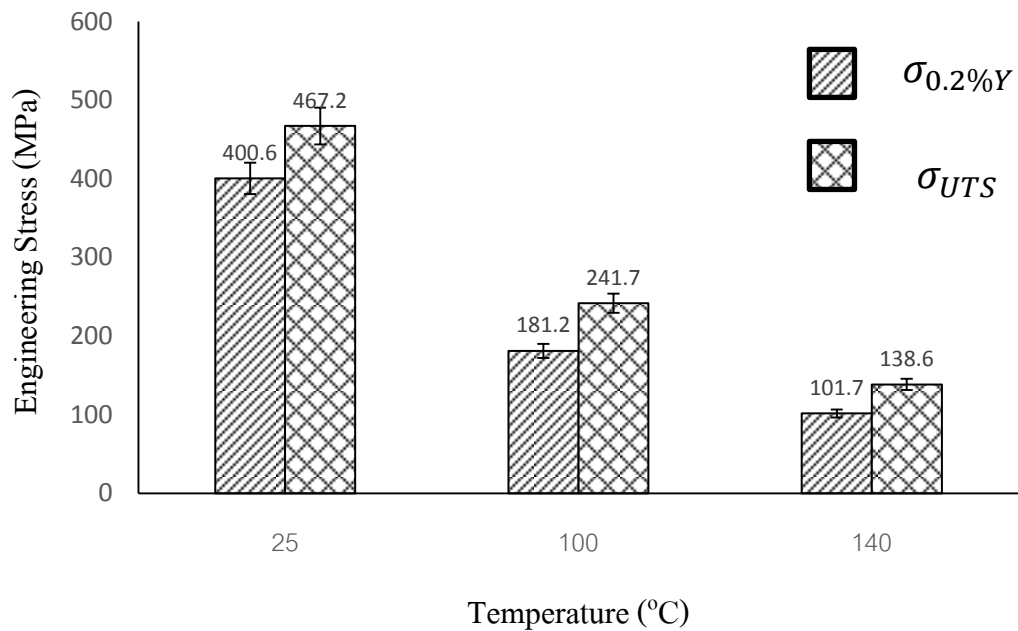
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับอุณหภูมิของชิ้นงานทดสอบที่ได้จากการหล่อแบบดั้งเดิม (CSC) ที่อุณหภูมิ 25, 100 และ 140°C

กราฟรูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นทางวิศวกรรมกับอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบ จะเห็นได้ว่ากลุ่มชิ้นงาน CSC ที่ได้ทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 25, 100 และ 140 องศาเซลเซียสมีค่าความแรงดึงสูงสุดเท่ากับ 500.5, 245.9 และ 166.7 MPa และมีค่าความเค้นคราก (0.2% Yield Strength) เท่ากับ 435.5, 245.9 และ 93.7 MPa ตามลำดับ และพบว่าเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิตดสอบจะทำให้ค่าความแรงดึงสูงสุดและค่าความเค้นครากมีค่าลดลง



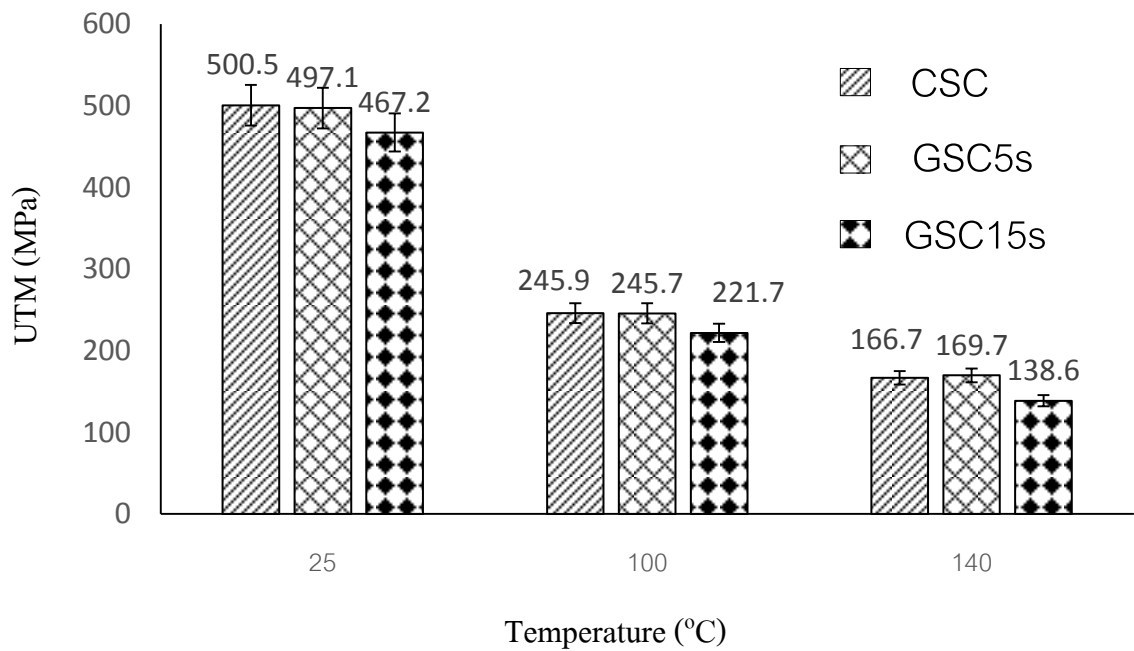
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับอุณหภูมิของชิ้นงานทดสอบที่ได้จากการหล่อ GSC5s ที่อุณหภูมิ 25, 100 และ 140°C

กราฟรูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นทางวิศวกรรมกับอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบ จะเห็นว่ากลุ่มชิ้นงานทดสอบ GSC5s ที่ได้ทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 25, 100 และ 140 องศาเซลเซียสมีค่าความแรงดึงสูงสุดเท่ากับ 497.1, 245.7 และ 169.7 MPa และมีค่าความเค้นคราก (0.2% Yield Strength) เท่ากับ 449.6, 176.0 และ 108.6 MPa และพบว่าเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิทดสอบจะทำให้ค่าความแรงดึงสูงสุดและค่าความเค้นครากมีค่าลดลง



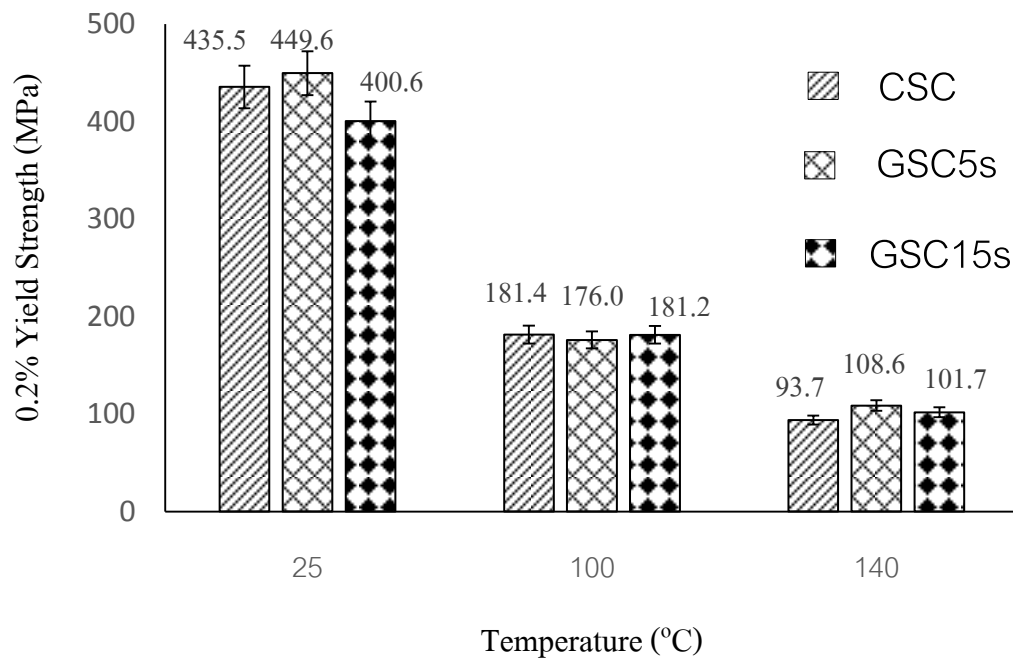
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความอุณหภูมิของชิ้นงานทดสอบที่ได้จากการหล่อ GSC15s ที่อุณหภูมิ 25, 100 และ 140°C

กราฟรูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นทางวิศวกรรมกับความอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบ จะเห็นได้ว่ากลุ่มชิ้นงานทดสอบ GSC5s ที่ได้ทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 25, 100 และ 140 องศาเซลเซียสมีค่าความแรงดึงสูงสุดเท่ากับ 467.2, 221.7 และ 138.6 MPa และมีค่าความเค้นคราก (0.2% Yield Strength) เท่ากับ 400.6, 181.2 และ 101.7 MPa และเช่นเดียวกันกับของชิ้นงานทดสอบกลุ่ม CSC และ GSC5s พบว่าเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิทดสอบจะทำให้ค่าความแรงดึงสูงสุดและค่าความเค้นครากมีค่าลดลง



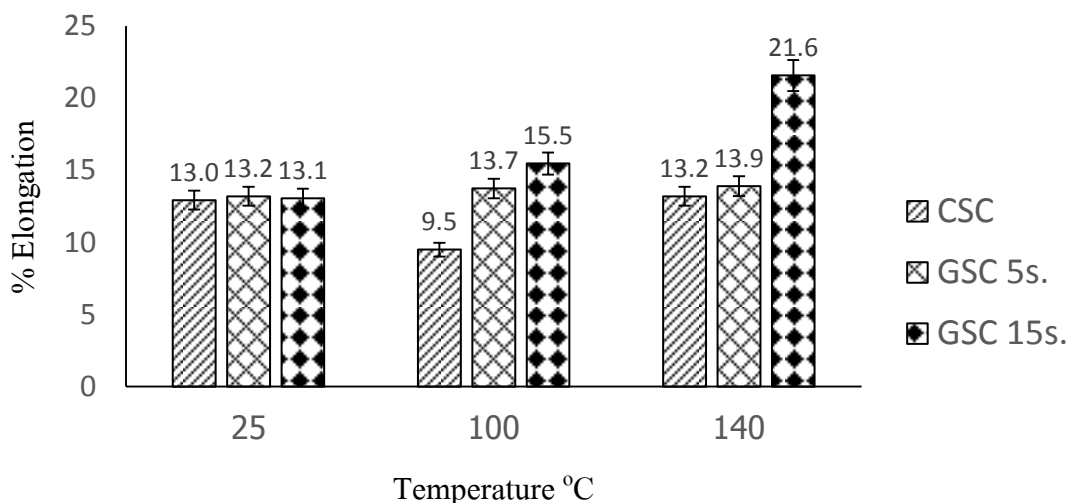
รูปที่ 4.7 กราฟเปรียบเทียบสมบัติความเค้นดึงสูงสุดของชิ้นงานทดสอบกลุ่ม CSC, GSC5s และ GSC15s ทดสอบที่อุณหภูมิ 25, 100 และ 140°C

กราฟรูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นดึงสูงสุดกับอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบ ที่อุณหภูมิ 25°C กลุ่มตัวอย่าง CSC, GSC5s และ GSC15s มีค่าความเค้นดึงสูงสุดเท่ากับ 500.5, 497.1 และ 467.2 MPa ที่อุณหภูมิทดสอบ 100°C มีค่าความเค้นดึงสูงสุดเท่ากับ 245.9, 245.7 และ 221.7 MPa และที่อุณหภูมิ 140°C มีค่าความเค้นดึงสูงสุดเท่ากับ 166.7, 169.7 และ 138.6 MPa ตามลำดับ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความเค้นดึงสูงสุดของตัวอย่างทั้ง 3 กลุ่ม มีแนวโน้มลดลง



รูปที่ 4.8 กราฟเปรียบเทียบสมบัติความเค้นครากที่ 0.2% ของชิ้นงานทดสอบกลุ่ม CSC, GSC5s และ GSC15s ทดสอบที่อุณหภูมิ 25, 100 และ 140°C

กราฟรูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นครากที่ 0.2% กับอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบ ที่อุณหภูมิ 25°C กลุ่มตัวอย่าง CSC, GSC5s และ GSC15s มีค่าความเค้นครากเท่ากับ 435.5, 449.6 และ 400.6 MPa ที่อุณหภูมิ 100°C มีค่าเท่ากับ 181.4, 176.0 และ 181.2 MPa และที่อุณหภูมิ 140°C มีค่าเท่ากับ 93.7, 108.6 และ 101.7 MPa ตามลำดับ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความเค้นครากของชิ้นงานทดสอบทุกกลุ่มมีแนวโน้มลดลงเช่นเดียวกับค่าความเค้นสูงสุด



รูปที่ 4.9 กราฟเปรียบเทียบการยืดของชิ้นงานทดสอบกลุ่ม CSC, GSC5s และ GSC15s ทดสอบที่อุณหภูมิ 25, 100 และ 140°C

กราฟรูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์การยืดของชิ้นงานกลุ่ม CSC, GSC5s และ GSC15s กับอุณหภูมิที่ 25°C มีค่าการยืดของชิ้นงานเท่ากับ 13.0, 13.2 และ 13.1% ที่อุณหภูมิ 100°C มีค่าการยืดของชิ้นงานเท่ากับ 9.5, 13.7 และ 15.5% และที่อุณหภูมิ 140°C มีค่าการยืดของชิ้นงานเท่ากับ 13.2, 13.9 และ 21.6% ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่ากลุ่มชิ้นงานที่ทำการหล่ออัดสเลอรัจะมีค่าการยืดที่สูงกว่าการหล่ออัดแบบดั้งเดิมในทุกๆอุณหภูมิและเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิแนวโน้มของการยืดของชิ้นงานจะมีค่าเพิ่มขึ้น

ผลจากการทดสอบการดึง (Tensile Tests) กลุ่ม CSC, GSC5s และ GSC15s ที่อุณหภูมิ 25°C พบว่ามีความเค้นสูงสุดเท่ากับ 500.5, 497.1 และ 467.2 ตามลำดับ เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิทดสอบสูงจนถึง 140°C จะเห็นว่าค่าความเค้นดึงสูงสุดของชิ้นงานทดสอบทั้ง 3 กลุ่มมีค่าที่ลดลงอย่างมากซึ่งมีค่าเท่ากับ 166.7, 169.7 และ 138.6 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นคุณสมบัติเชิงกลในสมบัติแรงดึงจะมีแนวโน้มที่ลดลงเป็นไปในทิศทางเดียวกันตามรูปที่ 4.7 แต่ในทางตรงกันข้ามเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิในการทดสอบแรงดึง จะทำให้ค่าการยืดของชิ้นงานมีค่าแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตามรูปที่ 4.9 ที่อุณหภูมิ 25°C จะมีค่าการยืดของชิ้นงานเท่ากับ 13.0, 13.2 และ 13.1% ตามลำดับ และ ที่อุณหภูมิ 140°C ค่าการยืดของชิ้นงานเท่ากับ 13.2, 13.9 และ 21.6% สอดคล้องกับผลการวิจัยของ B.K. Prasad [36, 37] ได้ทำการทดสอบแรงดึงของชิ้นงาน ZA-27 ที่อุณหภูมิ 25 – 200°C ซึ่งผลที่ได้ค่าแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานซึ่งมีค่าประมาณ 450 MPa และมีค่าต่ำสุดประมาณ 100 MPa แนวโน้มของค่าทดสอบแรงดึงจะมีค่าลดลงอย่างมากเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิในการทดสอบ และในส่วนของค่าการยืดของชิ้นงานจะมีค่าที่แปรผกผันที่ 25°C จะมีค่าการยืดประมาณ 12.5% และที่ 140°C มีค่าการยืดของชิ้นงานประมาณ 22.5% ซึ่งแนวโน้มของการยืดของชิ้นงานเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิตดสอบมีค่าเพิ่มขึ้น

จากการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานทั้ง 3 กลุ่มพบว่ากลุ่มชิ้นงานที่หล่อขึ้นรูปแบบดั้งเดิม (CSC) จะมีสมบัติความเค้นดึงสูงสุดที่มีค่าสูงกว่า ชิ้นงานทดสอบที่หล่อขึ้นรูปแบบหล่ออัด (GSC5s และ GSC15s) ในทุกอุณหภูมิของการทดสอบ 25, 100 และ 140°C แต่ในทางตรงกันข้ามกลุ่มชิ้นงาน CSC จะมีค่าความเค้นดึงที่สูงกว่ากลุ่มชิ้นงาน GSC แต่การยืดของชิ้นงานกลุ่ม CSC จะมีค่าที่ต่ำกว่า GSC ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างจุลภาคของกลุ่มชิ้นงานทั้งสองที่ต่างกัน ในกลุ่มของ CSC มีโครงสร้างเป็นแบบเดนไดรต์ ดังรูปที่ 4.35 (ก) และ 4.36 (ก) ซึ่งจะมีความแข็งแรงมากกว่ากลุ่ม GSC ที่มีโครงสร้างแบบก้อนกลมหรือ Globular ดังรูปที่ 4.35 (ข) และ 4.36 (ข) ส่วนโครงสร้างแบบก้อนกลมมีสมบัติการไหลที่ดีกว่าและมีความเหนียวสูงกว่าแบบเดนไดรต์

## 4.2 ผลการทดสอบการคืบ (Creep Tests)

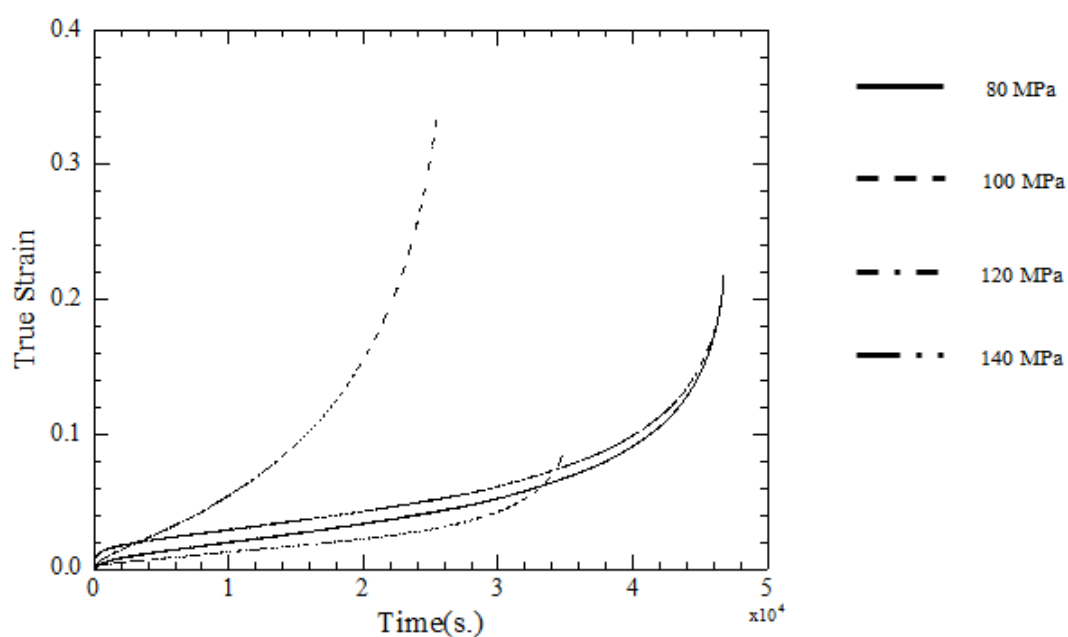
ผลการทดสอบการคืบที่อุณหภูมิ 3 ระดับ ได้แก่ 25, 100 และ 140°C ที่อุณหภูมิ 25 และ 100 °C ได้ทำการทดสอบที่ความเค้น 4 ระดับ ได้แก่ 80, 100, 120 และ 140 MPa สำหรับที่อุณหภูมิ 140°C ได้ทำการทดสอบที่ความเค้น 7 ระดับ ได้แก่ 20, 40, 60, 80, 100, 120 และ 140 MPa การวิเคราะห์สมบัติการคืบ ประกอบด้วยการศึกษาเส้นโค้งการคืบ (Creep Curve) ค่ายกกำลังของความเค้น (Stress Exponent,  $n$ ) และค่าพลังงานกระตุ้นการคืบ (Activation Energy for Creep,  $Q_c$ )

เส้นโค้งของการคืบในแต่ละการทดลองได้มาจากการพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดจริง (True Strain,  $\epsilon$ ) บนแกน Y และเวลาที่ทำการทดลอง (Time, s) ที่ใช้ในการทดลองการคืบจนกระทั่งชิ้นงานเกิดการแตกหัก (Fracture) บนแกน X จากเส้นโค้งการคืบสามารถแปลงเป็นอัตราการคืบ (Creep Rate) และนำไปพล็อตเทียบกับเวลาเพื่อวิเคราะห์หาอัตราการคืบต่ำสุด (Minimum Creep Rate)

### 4.2.1 ผลการทดสอบการคืบที่อุณหภูมิ 25°C

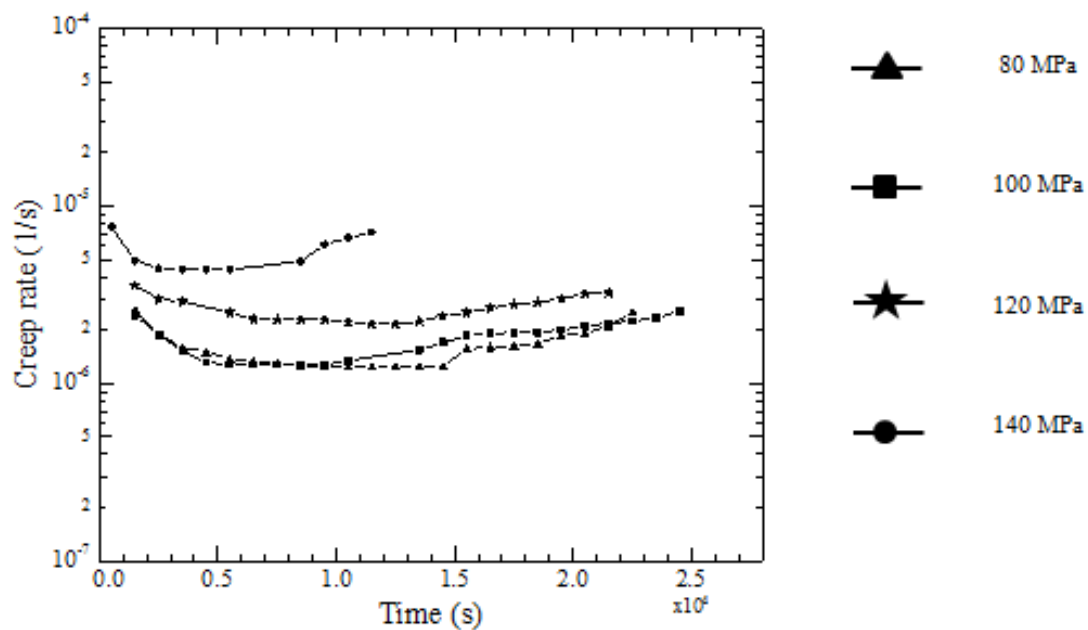
เส้นโค้งการคืบของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการหล่อแบบดั้งเดิม (CSC) และชิ้นงานที่ผ่านด้วยกระบวนการหล่อแบบ GISS เป็นเวลา 5 และ 15 วินาที (GSC5s และ GSC15s) ซึ่งได้ทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 25°C ความเค้นระหว่าง 80-140 MPa พบว่าในช่วงความเค้นนี้ ปรากฏพฤติกรรมการคืบทั้ง 3 ระยะ ได้แก่ ระยะแรก (Primary Creep Stage) ระยะที่สองหรือระยะที่การคืบมีอัตราการคืบคงที่ (Secondary or Steady-State Creep) และระยะที่สาม (Tertiary Creep Stage) และเมื่อทำการพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดจริงกับเวลาที่ใช้ในการทดลองการคืบดังแสดงในรูปที่ 4.10, 4.12 และ 4.14 และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการคืบกับเวลา ดังแสดงในรูปที่ 4.11, 4.13 และ 4.15 และข้อมูลการคืบ ได้แก่ ความเค้นในการทดสอบ อัตราการคืบต่ำสุด ความเครียดแตกหัก (Rupture Strain) เวลาการคืบแตกหัก (Rupture Time) ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.1, 4.2 และ 4.3 สำหรับชิ้นงานกลุ่ม CSC, GSC5s และ GSC15s ตามลำดับ จากข้อมูลการคืบพบว่า ที่อุณหภูมิ 25°C ที่ความเค้น 80, 100, 120 และ 140 MPa ชิ้นงานกลุ่ม CSC มีอัตราการคืบ

ต่ำสุดเท่ากับ  $1.23 \times 10^{-6}$ ,  $1.38 \times 10^{-6}$ ,  $2.17 \times 10^{-6}$  และ  $4.39 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$  กลุ่ม GSC5s มีค่าอัตราการคืบต่ำสุดเท่ากับ  $1.42 \times 10^{-6}$ ,  $2.72 \times 10^{-6}$ ,  $5.80 \times 10^{-6}$  และ  $2.80 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  และกลุ่ม GSC15s มีค่าอัตราการคืบต่ำสุดเท่ากับ  $5.88 \times 10^{-6}$ ,  $2.71 \times 10^{-5}$ ,  $4.44 \times 10^{-5}$  และ  $5.14 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  ตามลำดับ และพบว่าความเค้นเดียวกัน ชิ้นงานกลุ่ม CSC มีอัตราการคืบต่ำกว่ากลุ่ม GSC5s และ GSC15s เมื่อพิจารณาจากข้อมูลเวลาคืบแตกหักพบว่าชิ้นงานกลุ่ม CSC สามารถทนทานต่อการคืบได้ยาวนานกว่ากลุ่ม GSC5s และ GSC15s



รูปที่ 4.10 กราฟเส้นโค้งการคืบของชิ้นงานกลุ่ม CSC จากการทดสอบการคืบที่อุณหภูมิ  $25^{\circ}\text{C}$  และค่าความเค้นระหว่าง 80, 100, 120 และ 140 MPa

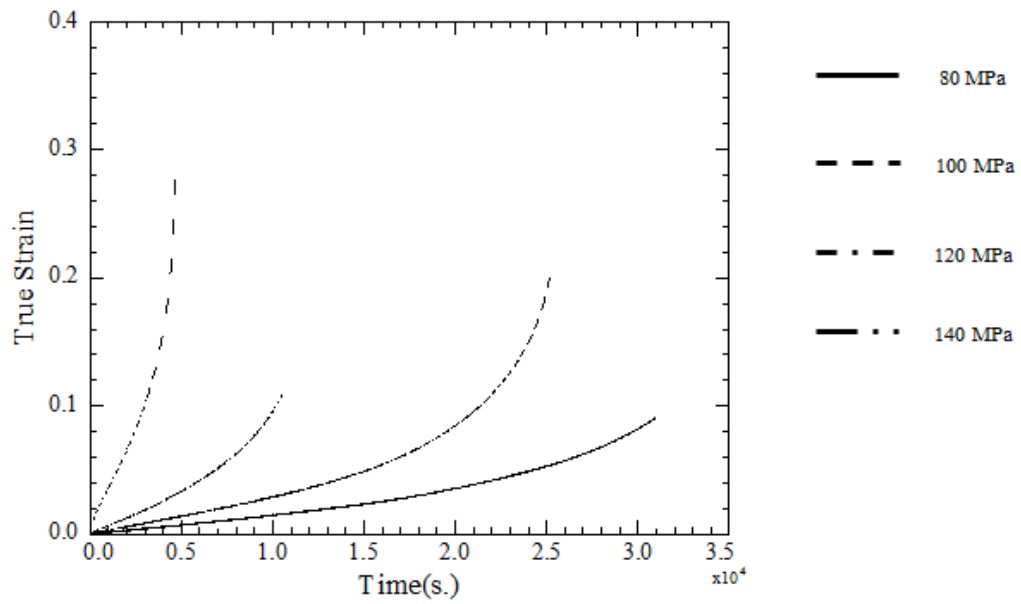




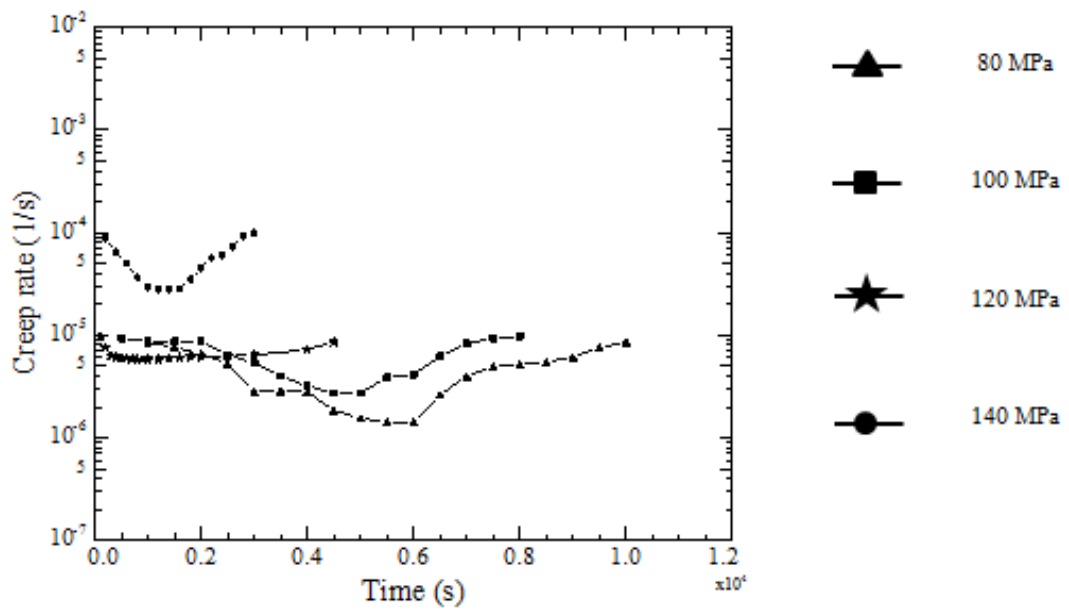
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการคืบกับเวลาของชิ้นงานกลุ่ม CSC จากการทดสอบการคืบที่อุณหภูมิ  $25^{\circ}\text{C}$  ความเค้นที่ 80, 100, 120 และ 140 MPa

ตารางที่ 4.1 ข้อมูลการคืบของชิ้นงานกลุ่ม CSC ทดสอบที่อุณหภูมิ  $25^{\circ}\text{C}$  ในช่วงความเค้น 80-140 MPa

Stress (MPa)	Min. Creep Rate (1/s)	Rupture Strain	Rupture Time (s.)	Stress Exponent ( $n$ )
80	$1.23 \times 10^{-6}$	0.2189	46,748	3.41
100	$1.38 \times 10^{-6}$	0.1966	46,534	
120	$2.17 \times 10^{-6}$	0.0927	34,832	
140	$4.39 \times 10^{-6}$	0.3147	25,301	



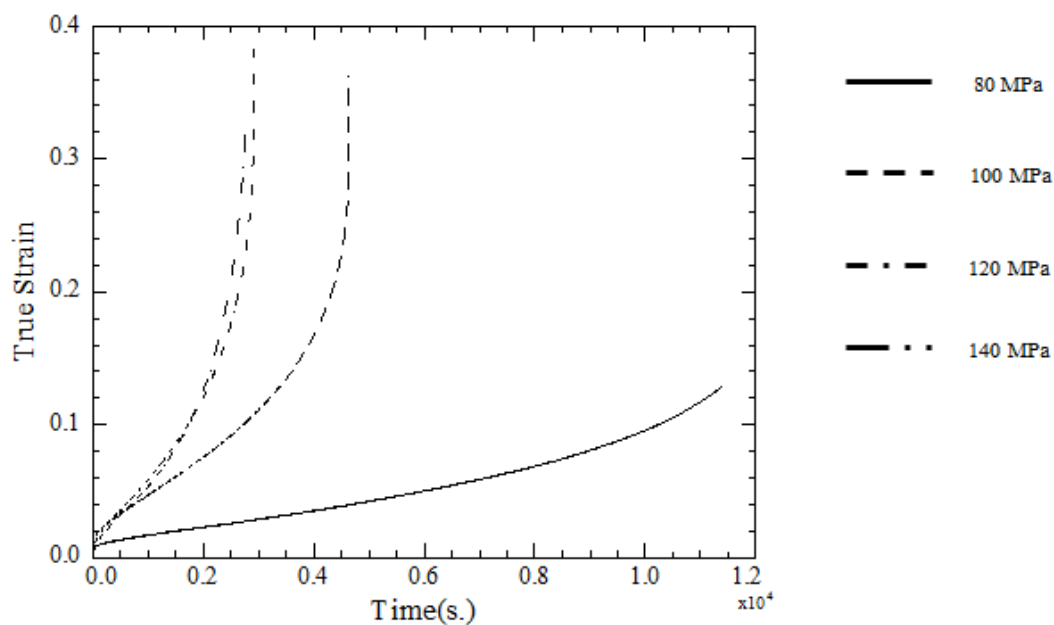
รูปที่ 4.12 กราฟเส้นโค้งการคืบของชิ้นงานกลุ่ม GSC5s จากการทดสอบการคืบที่อุณหภูมิ 25°C ที่ค่าความเค้น 80, 100, 120 และ 140 MPa



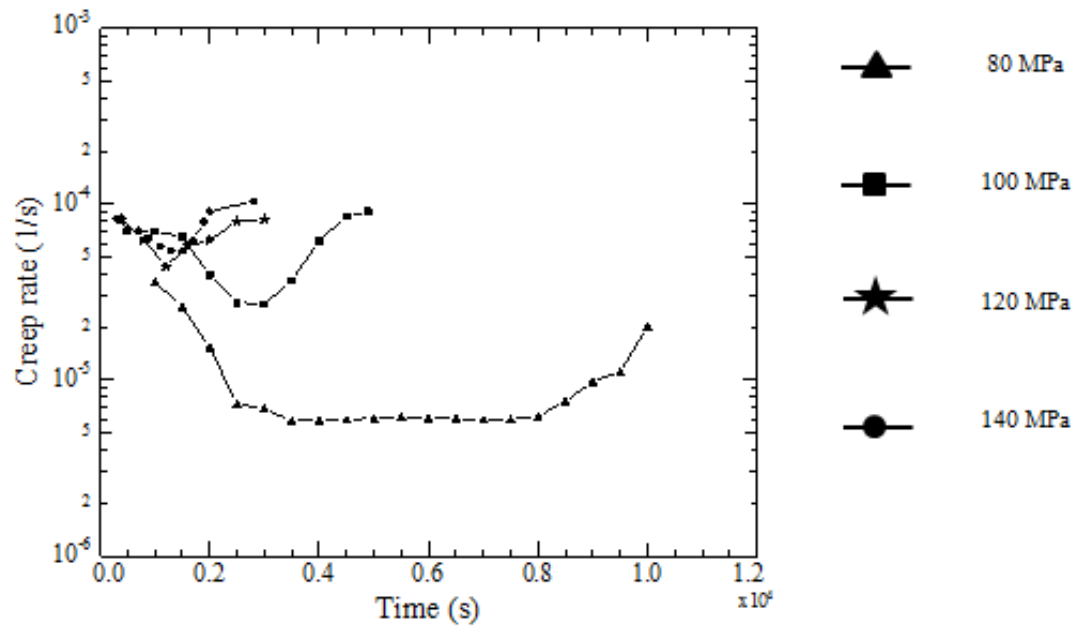
รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการคืบและเวลาของชิ้นงานกลุ่ม GSC5s จากการทดสอบการคืบที่อุณหภูมิ 25°C ที่ความเค้น 80, 100, 120 และ 140 MPa

ตารางที่ 4.2 ข้อมูลการคืบของชิ้นงานกลุ่ม GSC5s ทดสอบที่อุณหภูมิ 25°C ในช่วงความเค้น 80-140 MPa

Stress (MPa)	Min .Creep Rate (1/s)	Rupture Strain	Rupture Time (s.)	Stress Exponent ( <i>n</i> )
80	$1.42 \times 10^{-6}$	0.0089	31,210	5.08
100	$2.72 \times 10^{-6}$	0.2084	23,786	
120	$5.80 \times 10^{-6}$	0.0927	11,054	
140	$2.80 \times 10^{-5}$	0.3147	4,901	



รูปที่ 4.14 กราฟเส้นโค้งการคืบของชิ้นงานกลุ่ม GSC15s จากการทดสอบการคืบที่อุณหภูมิ 25°C ที่ค่าความเค้น 80, 100, 120 และ 140 MPa



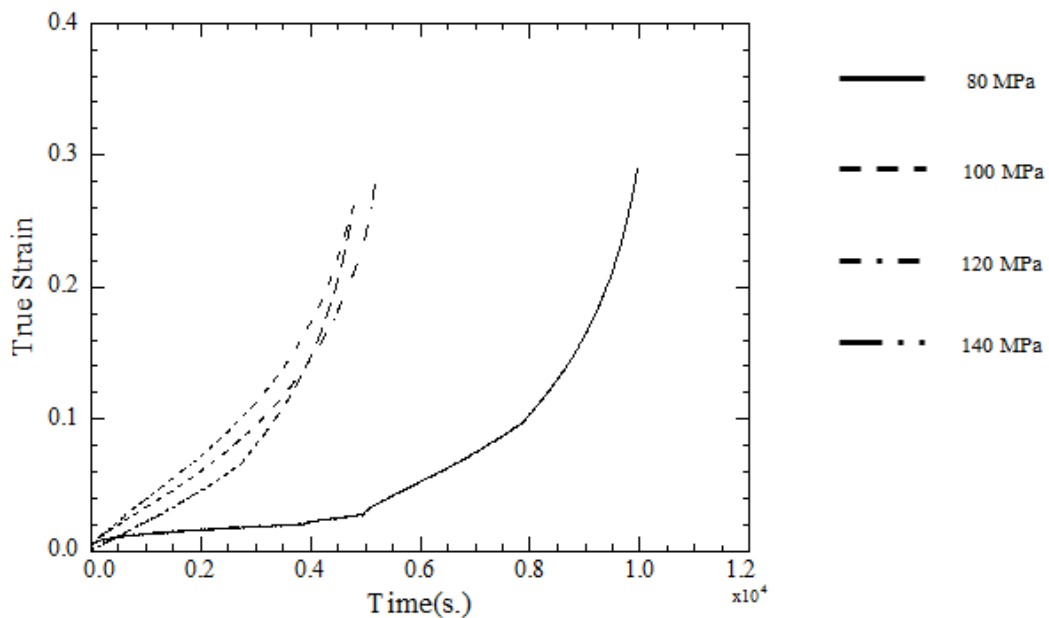
รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการคืบและเวลาของชิ้นงานกลุ่ม GSC15s จากการทดสอบการคืบที่อุณหภูมิ 25°C ที่ความเค้น 80, 100, 120 และ 140 MPa

ตารางที่ 4.3 ข้อมูลการคืบของกลุ่มชิ้นงาน GSC15s ทดสอบที่อุณหภูมิ 25°C ในช่วงความเค้น 80-140 MPa

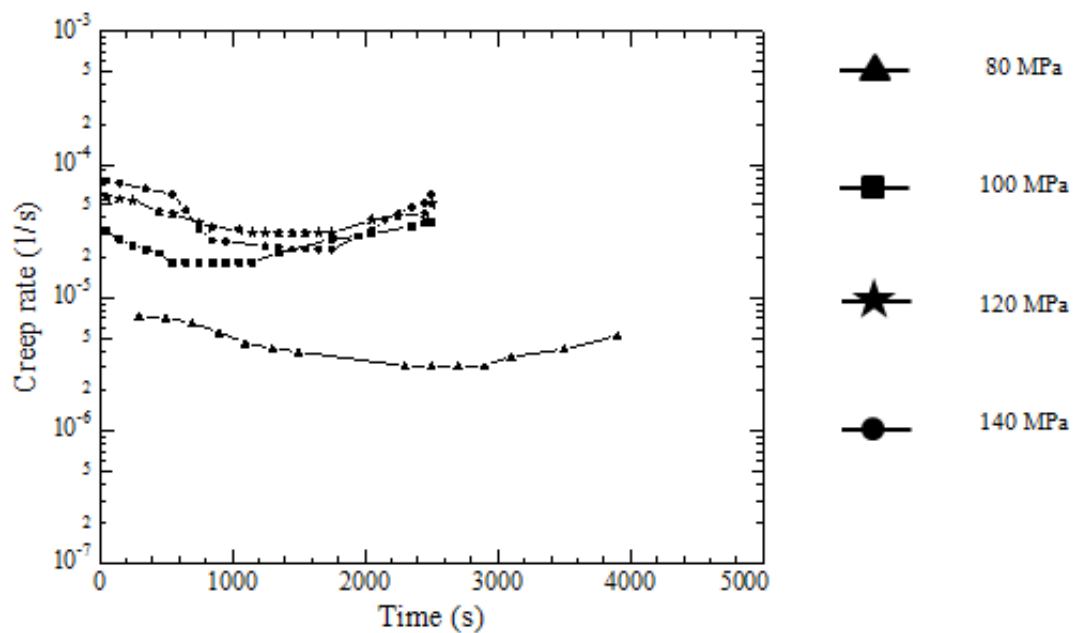
Stress (MPa)	Min. Creep Rate (1/s)	Rupture Strain	Rupture Time (s.)	Stress Exponent ( $n$ )
80	$5.88 \times 10^{-6}$	0.1103	11,847	3.87
100	$2.71 \times 10^{-5}$	0.3514	4,420	
120	$4.44 \times 10^{-5}$	0.3817	2,514	
140	$5.14 \times 10^{-5}$	0.3024	2,301	

#### 4.2.2 ผลการทดลองการคืบที่อุณหภูมิ 100°C

เส้นโค้งการคืบของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการหล่อแบบดั้งเดิม (CSC) และชิ้นงานที่ผ่านด้วยกระบวนการหล่อแบบ GISS เป็นเวลา 5 และ 15 วินาที (GSC5s และ GSC15s) จากการทดสอบที่อุณหภูมิ 100°C ที่ความเค้น 80, 100, 120 และ 140 MPa ดังแสดงในรูปที่ 4.16, 4.18 และ 4.20 พบว่าพฤติกรรมการคืบทั้ง 3 ระยะ ได้แก่ ระยะแรก (Primary Creep Stage) ระยะที่สองหรือระยะที่การคืบมีอัตราการคืบคงที่ (Secondary or Steady-State Creep) และระยะที่สาม (Tertiary Creep Stage) เมื่อทำการพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการคืบกับเวลาในรูปที่ 4.17, 4.19 และ 4.21 และค่าอัตราการคืบต่ำสุด (Minimum Creep rate) ของชิ้นงานกลุ่ม CSC มีค่าเท่ากับ  $3.08 \times 10^{-6}$ ,  $1.86 \times 10^{-5}$ ,  $3.09 \times 10^{-5}$  และ  $2.92 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  ตามลำดับ ชิ้นงานกลุ่ม GSC5s มีค่าเท่ากับ  $7.60 \times 10^{-6}$ ,  $1.02 \times 10^{-5}$ ,  $2.33 \times 10^{-5}$  และ  $7.14 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  ตามลำดับ ในกลุ่มชิ้นงาน GSC15s มีค่าเท่ากับ  $1.22 \times 10^{-5}$ ,  $2.60 \times 10^{-5}$ ,  $4.00 \times 10^{-5}$  และ  $1.15 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  ข้อมูลการคืบที่ได้จากการวิเคราะห์เส้นโค้งการคืบ ได้แก่ ค่าอัตราการคืบต่ำสุด, ความเครียดแตกหัก, เวลาการคืบแตกหัก และค่ายกกำลังของความเค้น ดังแสดงในตารางที่ 4.4-4.6 พบว่าชิ้นงานกลุ่ม CSC ทนต่อการคืบได้สูงกว่าชิ้นงานกลุ่ม GSC5s และ GSC15s เนื่องจากมีค่าเวลาการคืบแตกหักยาวนานกว่าและเมื่อเปรียบเทียบชิ้นงานกลุ่มวัสดุที่ของแข็งเดียวกัน พบว่า GSC5s มีอายุการคืบยาวนานกว่า GSC15s



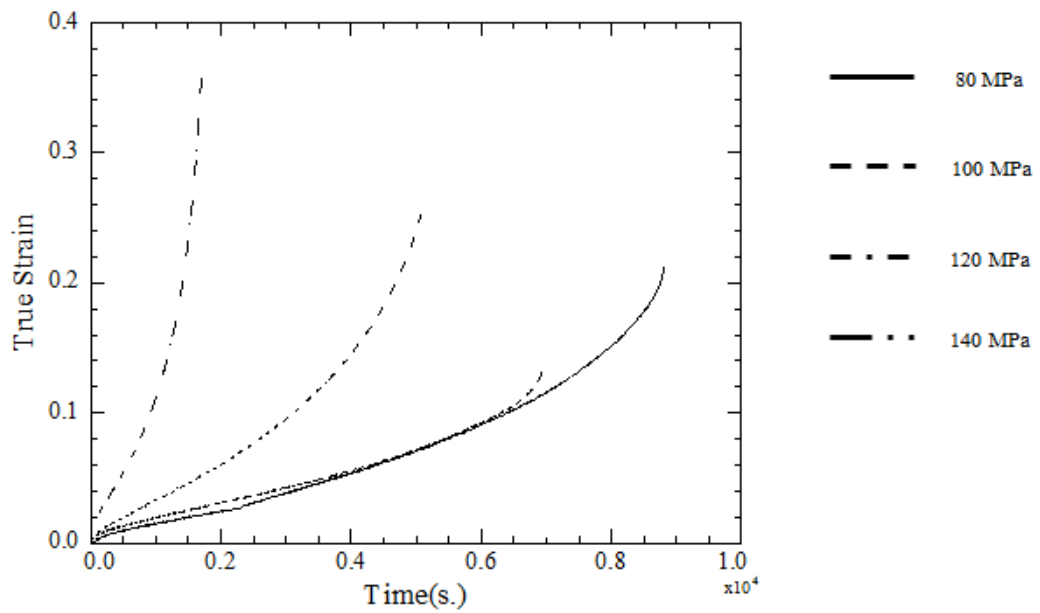
รูปที่ 4.16 กราฟเส้นโค้งการคืบของกลุ่มชิ้นงาน CSC ที่ได้จากการคืบอุณหภูมิ 100°C ที่ค่าความเค้นระหว่าง 80, 100, 120 และ 140 MPa



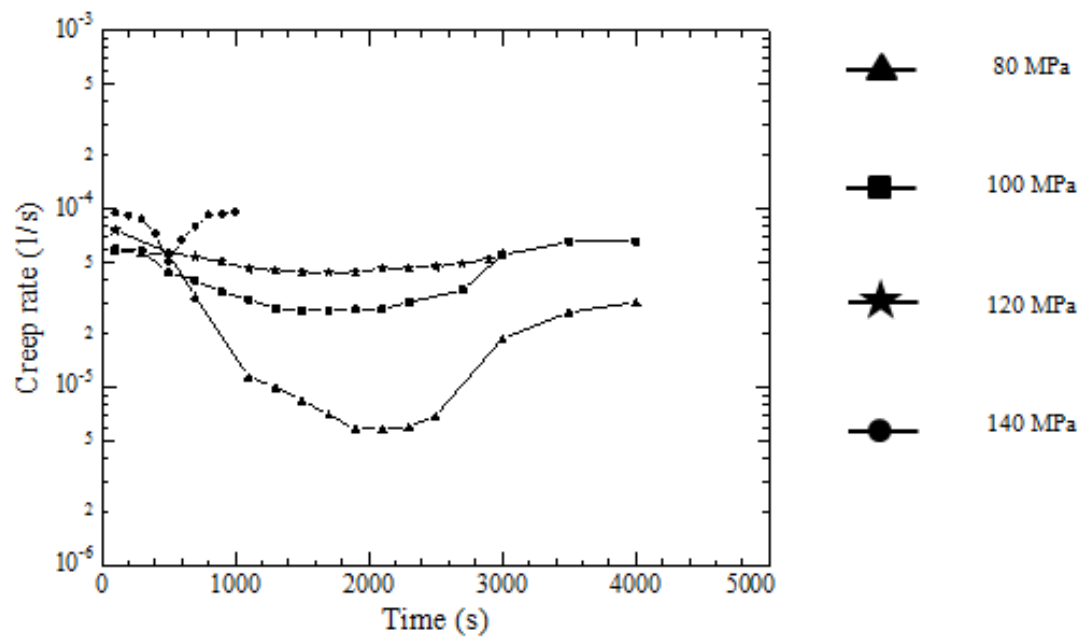
รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการคืบและเวลาของชิ้นงานกลุ่ม CSC ที่ได้จากการทดสอบการคืบที่อุณหภูมิ 100°C ที่ความเค้น 80, 100, 120 และ 140 MPa

ตารางที่ 4.4 ข้อมูลการคืบของกลุ่มชิ้นงาน CSC ทดสอบที่อุณหภูมิ 100°C ช่วงความเค้น 80-140 MPa

Stress (MPa)	Min. Creep Rate (1/s)	Rupture Strain	Rupture Time (s.)	Stress Exponent ( $n$ )
80	$3.08 \times 10^{-6}$	0.2873	9,915	4.05
100	$1.86 \times 10^{-5}$	0.2618	4,780	
120	$3.09 \times 10^{-5}$	0.2473	4,478	
140	$2.92 \times 10^{-5}$	0.2769	5,143	



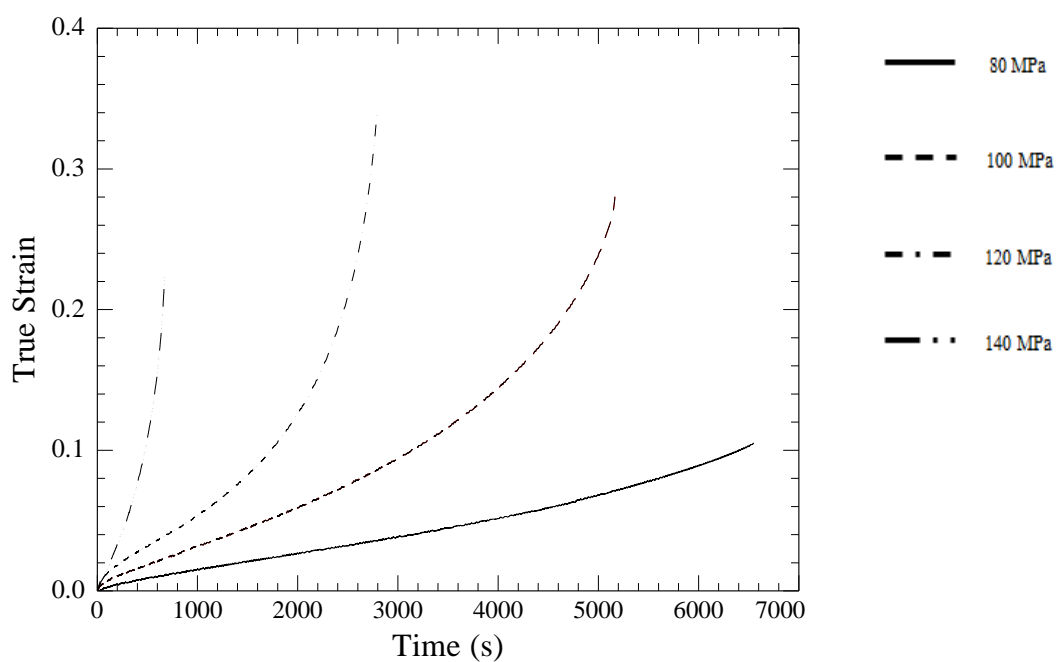
รูปที่ 4.18 กราฟเส้นโค้งการคืบของชิ้นงานกลุ่ม GSC5s ที่ได้จากการทดสอบการคืบที่อุณหภูมิ 100°C ค่าความเค้น 80, 100, 120 และ 140 MPa



รูปที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการคืบและเวลาของชิ้นงานกลุ่ม GSC5s จากการทดสอบที่อุณหภูมิ 100°C ที่ความเค้น 80, 100, 120 และ 140 MPa

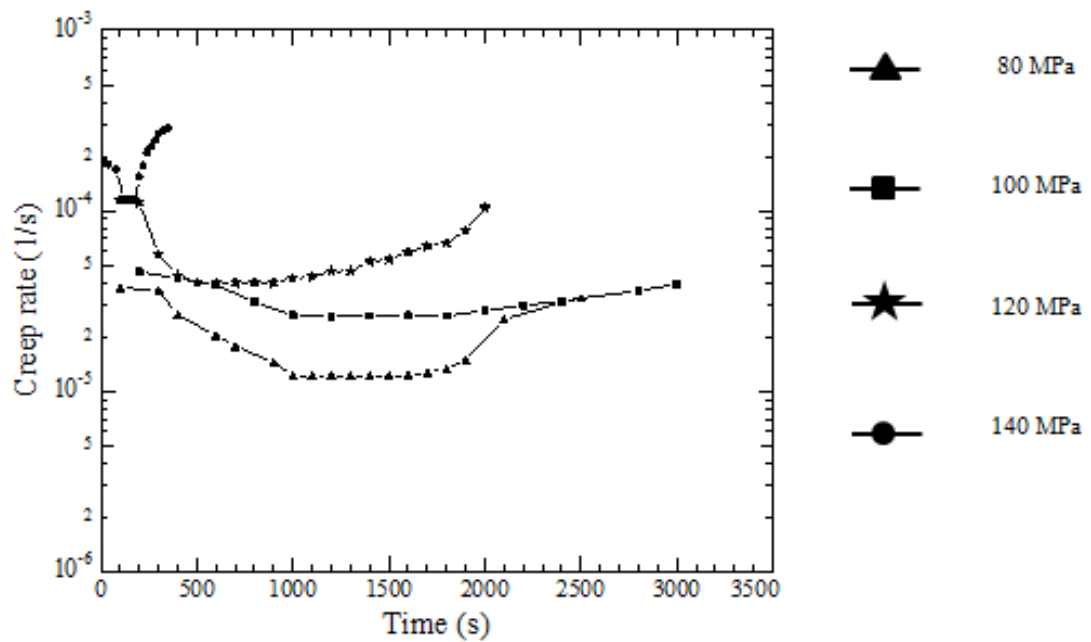
ตารางที่ 4.5 ข้อมูลการคืบของกลุ่มชิ้นงาน GSC5s ทดสอบที่อุณหภูมิ 100°C ในช่วงความเค้น 80-140 MPa

Stress (MPa)	Min. Creep Rate (1/s)	Rupture Strain	Rupture Time (s.)	Stress Exponent ( <i>n</i> )
80	$7.60 \times 10^{-6}$	0.1103	8,700	3.94
100	$1.02 \times 10^{-5}$	0.3514	6,917	
120	$2.33 \times 10^{-5}$	0.3817	5,170	
140	$7.14 \times 10^{-5}$	0.3024	1,725	



รูปที่ 4.20 กราฟเส้นโค้งการคืบของชิ้นงานกลุ่ม GSC15s ที่ได้จากการทดสอบการคืบที่อุณหภูมิ 100°C ที่ความเค้น 80, 100, 120 และ 140 MPa





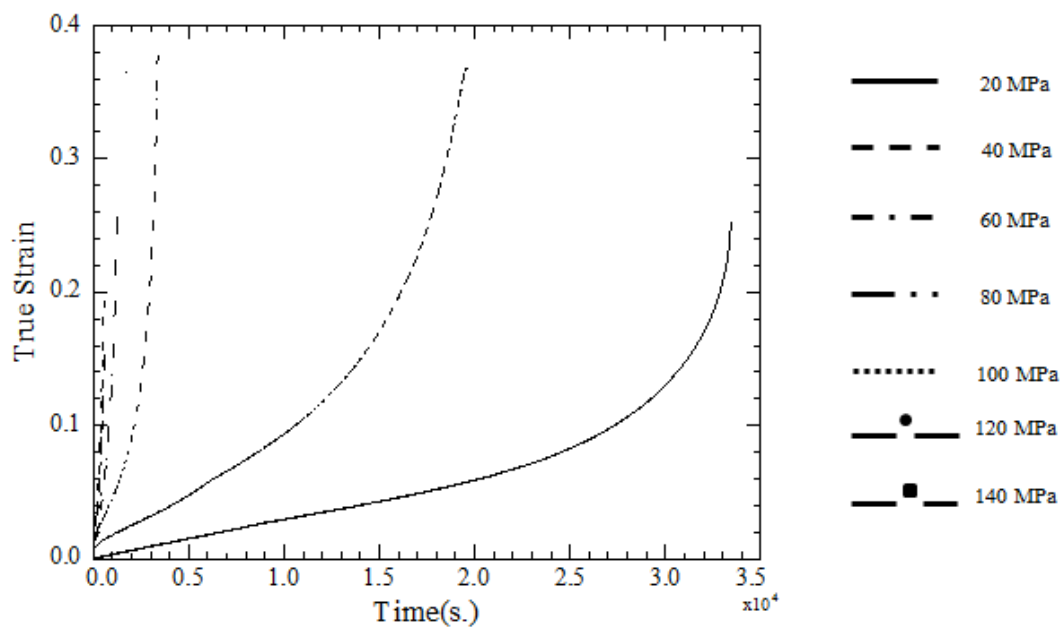
รูปที่ 4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการคืบและเวลาของชิ้นงานกลุ่ม GSC15s จากการทดสอบการคืบที่อุณหภูมิ  $100^{\circ}\text{C}$  ที่ความเค้น 80, 100, 120 และ 140 MPa

ตารางที่ 4.6 ข้อมูลการคืบของชิ้นงานกลุ่ม GSC15s ทดสอบที่อุณหภูมิ  $100^{\circ}\text{C}$  ในช่วงความเค้น 80-140 MPa

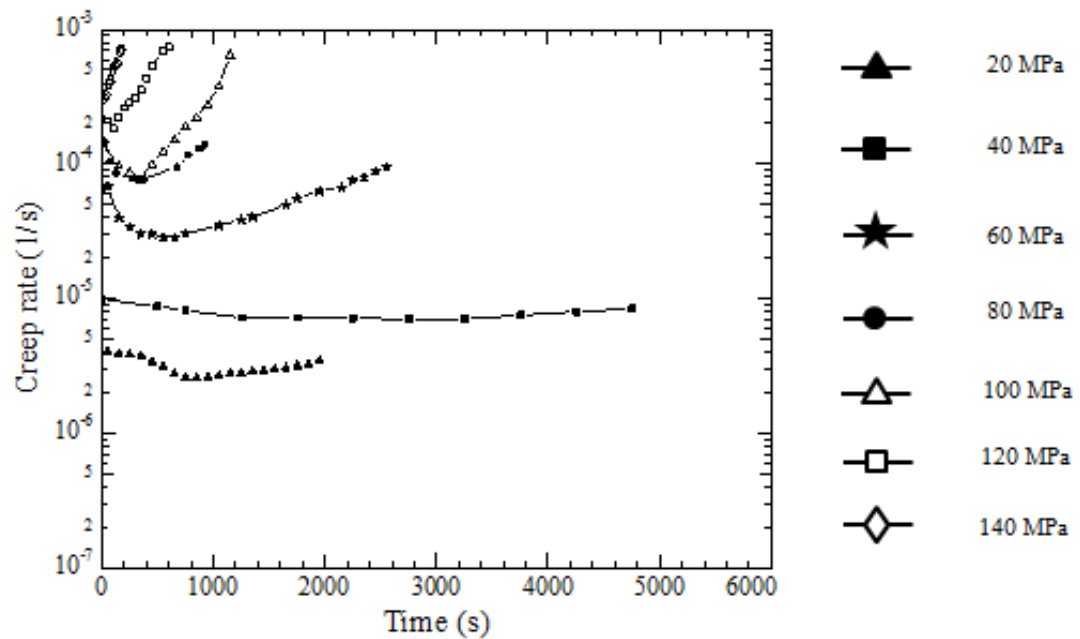
Stress (MPa)	Min. Creep Rate (1/s)	Rupture Strain	Rupture Time (s.)	Stress Exponent ( $n$ )
80	$1.22 \times 10^{-5}$	0.1035	6,951	3.79
100	$2.60 \times 10^{-5}$	0.2802	5,751	
120	$4.00 \times 10^{-5}$	0.3396	2,796	
140	$1.15 \times 10^{-4}$	0.2276	675	

### 4.2.3 ผลการทดสอบการคืบที่อุณหภูมิ 140°C

เส้นโค้งการคืบของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการหล่อแบบดั้งเดิม (CSC) และชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการหล่อแบบ GISS เป็นเวลา 5 และ 15 วินาที (GSC5s และ GSC15s) ซึ่งได้ทำการทดสอบการคืบที่อุณหภูมิ 140°C ความเค้นระหว่าง 20-140 MPa พบว่าปรากฏการณ์การคืบทั้ง 3 ระยะคือ ระยะแรก (Primary Creep Stage) ระยะที่สองหรือระยะที่อัตราการคืบคงที่ (Secondary or Steady-State Creep) และระยะที่สาม (Tertiary Creep Stage) ดังแสดงในรูปที่ 4.22, 4.24 และ 4.26 และเมื่อพล็อตความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดจริงกับเวลาที่ใช้ในการทดลองการคืบดังรูปที่ 4.23, 4.25 และ 4.27 พบว่าอัตราการคืบที่ต่ำสุดเมื่อทำการทดสอบที่ความเค้น 20, 40, 60, 80, 100, 120 และ 140 MPa ของชิ้นงานกลุ่ม CSC มีค่าเท่ากับ  $2.65 \times 10^{-6}$ ,  $7.09 \times 10^{-6}$ ,  $2.83 \times 10^{-5}$ ,  $7.42 \times 10^{-5}$ ,  $7.82 \times 10^{-5}$ ,  $1.84 \times 10^{-4}$  และ  $3.14 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  กลุ่มชิ้นงาน GSC5s มีค่าเท่ากับ  $4.38 \times 10^{-6}$ ,  $1.42 \times 10^{-5}$ ,  $4.55 \times 10^{-5}$ ,  $6.70 \times 10^{-5}$ ,  $9.78 \times 10^{-5}$ ,  $5.36 \times 10^{-4}$  และ  $6.62 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  และกลุ่มชิ้นงาน GSC15s มีค่าเท่ากับ  $2.56 \times 10^{-5}$ ,  $3.36 \times 10^{-5}$ ,  $6.47 \times 10^{-5}$ ,  $1.03 \times 10^{-4}$ ,  $1.70 \times 10^{-4}$ ,  $3.88 \times 10^{-4}$  และ  $6.91 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  ซึ่งได้รวบรวมไว้ในตารางที่ 4.7, 4.8 และ 4.9 เมื่อเปรียบเทียบที่ระดับความเค้นเดียวกัน พบว่าชิ้นงานกลุ่ม CSC มีความต้านทานการคืบสูงกว่าชิ้นงานกลุ่ม GSC5s และ GSC15s และพบว่าชิ้นงานกลุ่ม GSC5s มีค่าระยะยืดการคืบแตกหัก (Rupture Strain) สูงกว่าชิ้นงานกลุ่ม CSC และ GSC15s



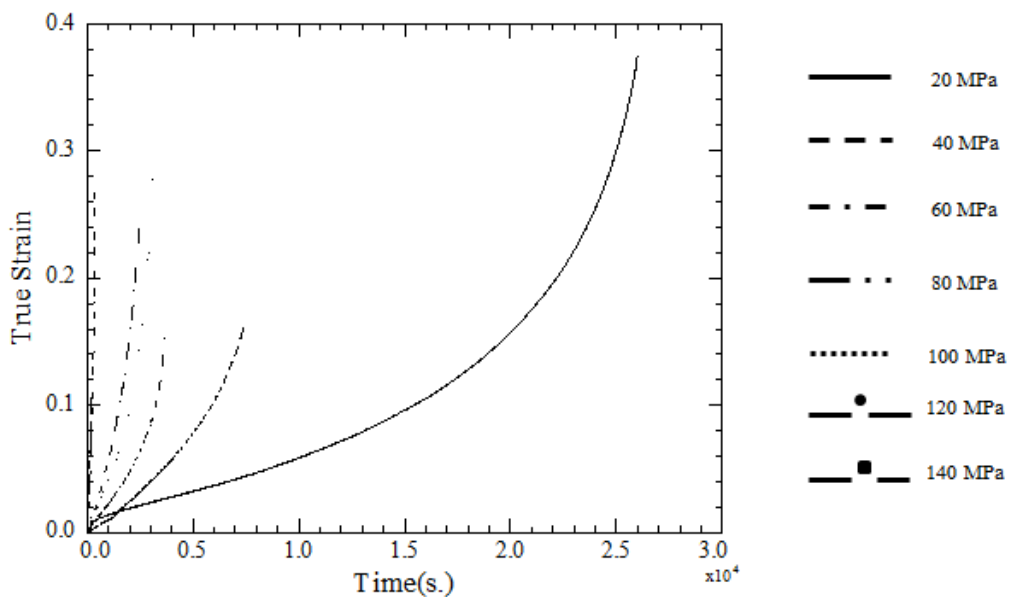
รูปที่ 4.22 กราฟเส้นโค้งการคืบของชิ้นงานกลุ่ม CSC จากการทดสอบการคืบที่อุณหภูมิ 140°C, ที่ช่วงความเค้นระหว่าง 20-140 MPa



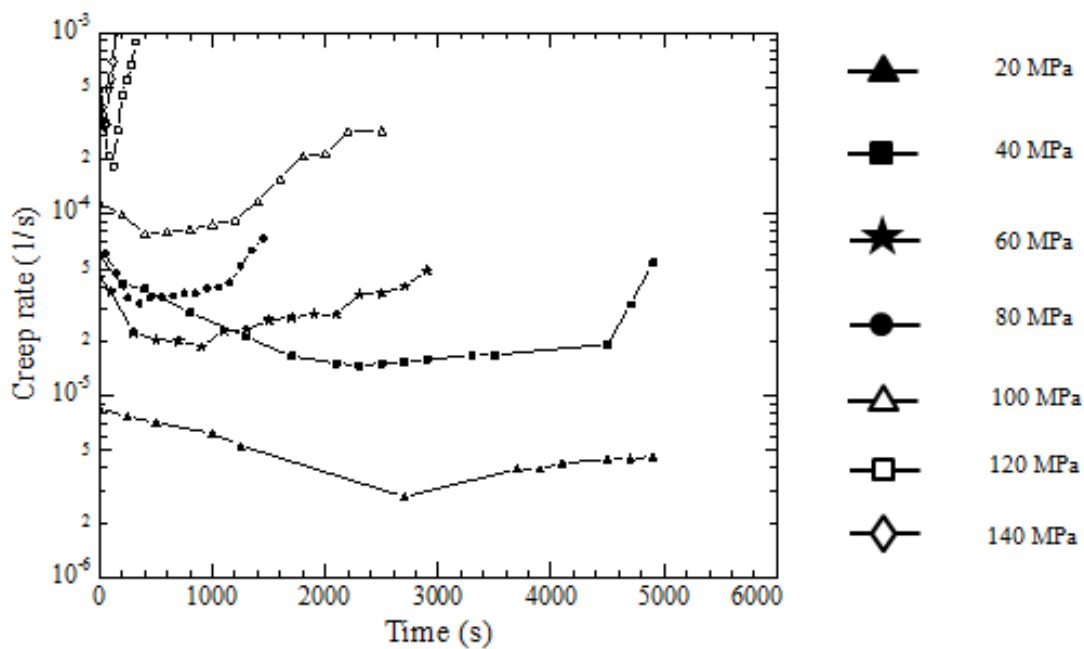
รูปที่ 4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการคืบและเวลาของชิ้นงาน CSC จากการทดสอบการคืบที่อุณหภูมิ 140°C ที่ช่วงความเค้นระหว่าง 20-140 MPa

ตารางที่ 4.7 ข้อมูลการคืบของชิ้นงานกลุ่ม CSC ทดสอบที่อุณหภูมิ 140°C ที่ช่วงความเค้นระหว่าง 20-140 MPa

Stress (MPa)	Min. Creep Rate (1/s)	Rupture Strain	Rupture Time (s)	Stress exponent (n)
20	$2.65 \times 10^{-6}$	0.2473	33,373	2.2
40	$7.09 \times 10^{-6}$	0.2489	19,455	
60	$2.83 \times 10^{-5}$	0.3654	3,320	
80	$5.42 \times 10^{-5}$	0.3607	1,636	
80	$5.42 \times 10^{-5}$	0.3607	1,636	3.3
100	$7.82 \times 10^{-5}$	0.2678	1,192	
120	$1.84 \times 10^{-4}$	0.1651	578	
140	$3.14 \times 10^{-4}$	0.0847	179	



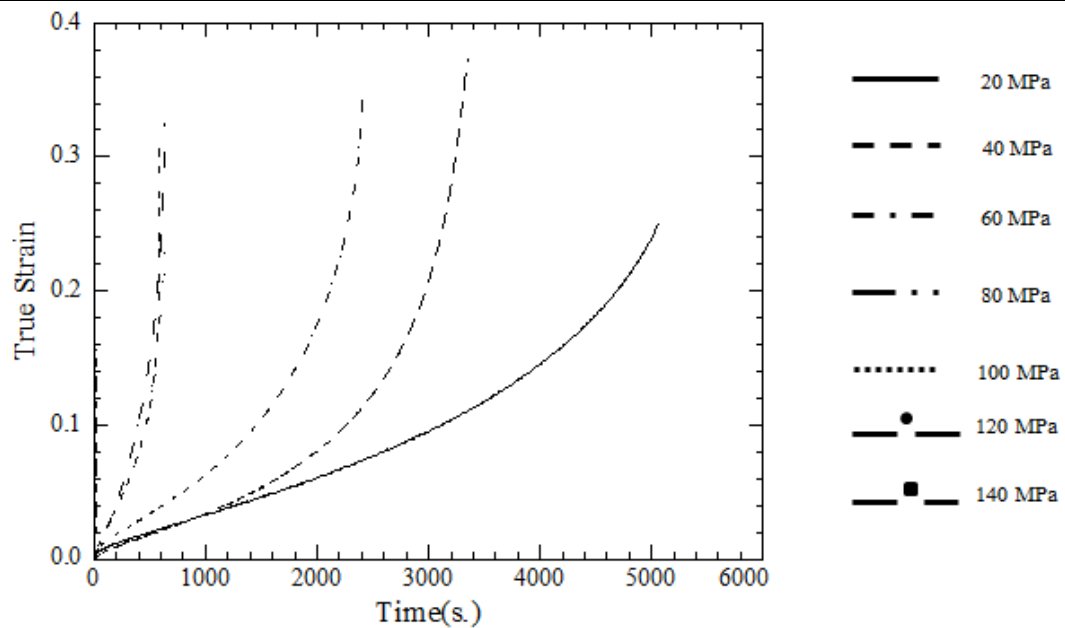
รูปที่ 4.24 กราฟเส้นโค้งการคืบของชิ้นงานกลุ่ม GSC5s จากการทดสอบการคืบที่อุณหภูมิ 140°C ค่าความเค้นระหว่าง 20-140 MPa



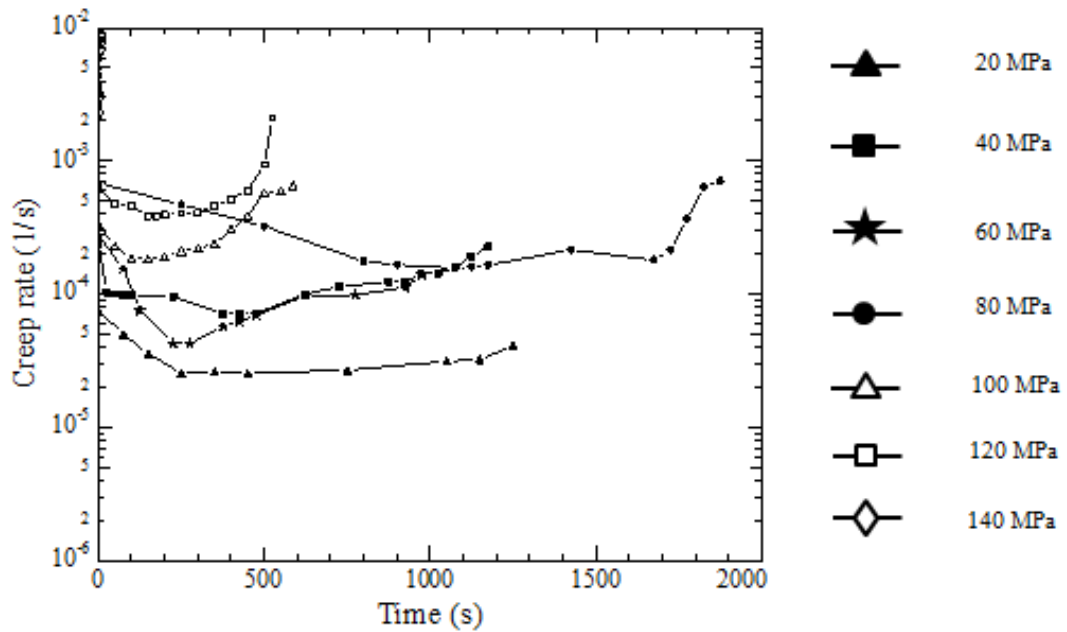
รูปที่ 4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการคืบและเวลาของชิ้นงานกลุ่ม GSC5s จากการทดสอบการคืบที่อุณหภูมิ 140°C ที่ความเค้นระหว่าง 20-140 MPa

ตารางที่ 4.8 ข้อมูลการคืบของชิ้นงานกลุ่ม GSC5s ทดสอบที่อุณหภูมิ 140°C ในช่วงความเค้น 20-140 MPa

Stress (MPa)	Min. Creep Rate (1/s)	Rupture Strain	Rupture Time (s)	Stress exponent (n)
20	$2.75 \times 10^{-6}$	0.3686	25,946	2.0
40	$7.29 \times 10^{-6}$	0.1654	7,481	
60	$2.98 \times 10^{-5}$	0.1497	3,606	
80	$7.42 \times 10^{-5}$	0.2741	3,074	
80	$7.42 \times 10^{-5}$	0.2741	3,074	4.6
100	$7.82 \times 10^{-5}$	0.2539	2,518	
120	$1.84 \times 10^{-4}$	0.2976	382	
140	$3.17 \times 10^{-4}$	0.0801	166	



รูปที่ 4.26 กราฟเส้นโค้งการคืบของชิ้นงานกลุ่ม GSC15s ที่ได้จากการทดสอบการคืบที่อุณหภูมิ 140°C, ที่ช่วงความเค้นระหว่าง 20-140 MPa



รูปที่ 4.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการคืบและเวลาของชิ้นงานกลุ่ม GSC15s ที่ได้จากการทดสอบการคืบที่อุณหภูมิ 140°C ที่ช่วงความเค้น 20-140 MPa

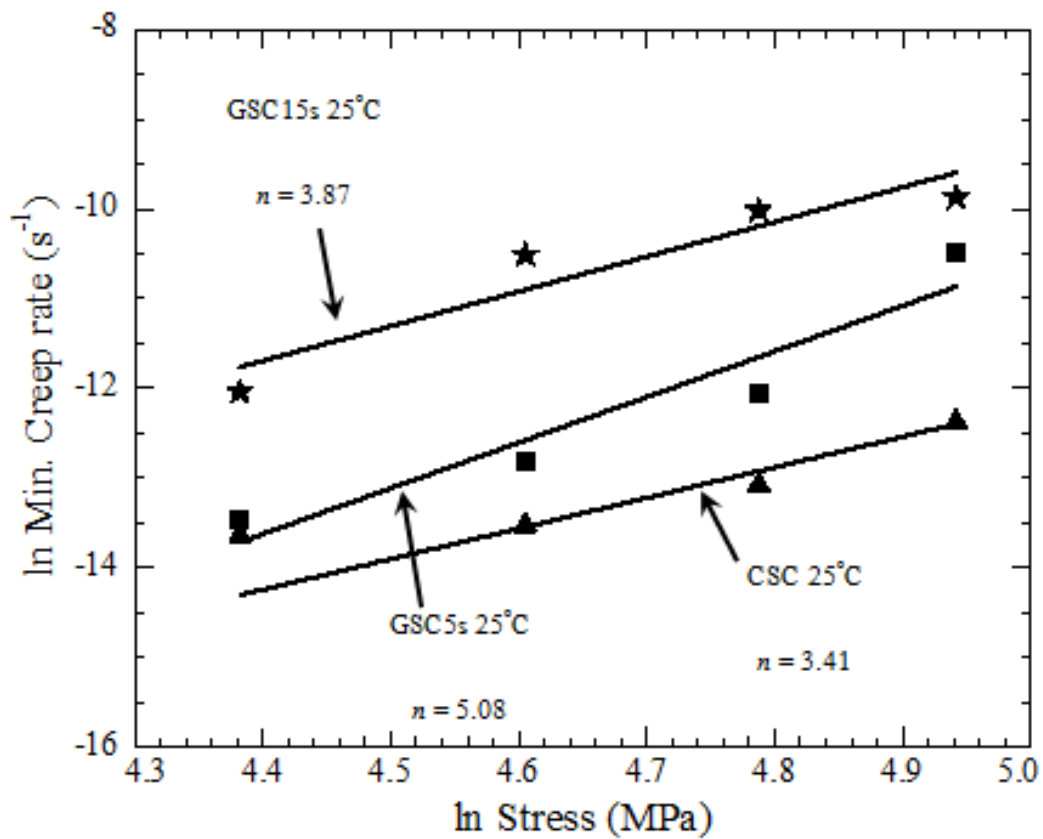
ตารางที่ 4.9 ข้อมูลการคืบของชิ้นงานกลุ่ม GSC15s ทดสอบที่อุณหภูมิ 140°C ในช่วงความเค้น 20-140 MPa

Stress (MPa)	Min. Creep Rate (1/s)	Rupture Strain	Rupture Time (s)	Stress exponent (n)
20	$2.56 \times 10^{-5}$	0.2495	5,052	1.0
40	$3.36 \times 10^{-5}$	0.3720	3,328	
60	$6.47 \times 10^{-5}$	0.3148	2,381	
80	$1.03 \times 10^{-4}$	0.3323	638	
80	$1.03 \times 10^{-4}$	0.3323	638	3.5
100	$1.70 \times 10^{-4}$	0.3164	587	
120	$3.88 \times 10^{-4}$	0.2542	525	
140	$6.91 \times 10^{-4}$	0.0535	17	

### 4.3 ค่ายกกำลังของค่าความเค้น (Stress Exponent, $n$ )

#### 4.3.1 ค่ายกกำลังของความเค้นจากการทดสอบการคืบที่อุณหภูมิ 25°C

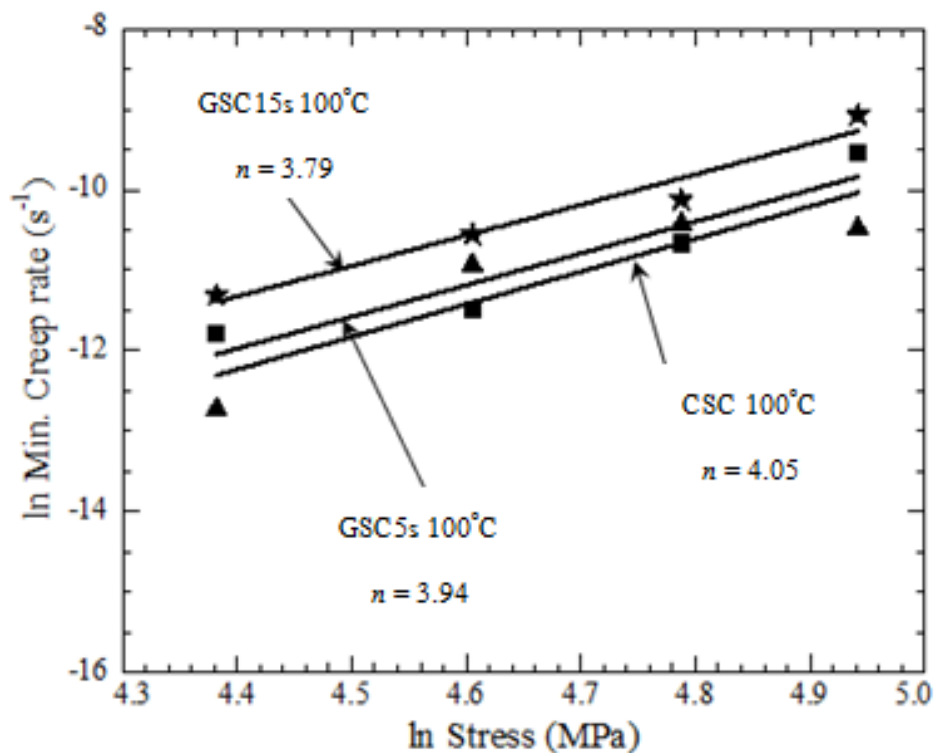
เมื่อนำข้อมูลอัตราการคืบต่ำสุด (Minimum Creep Rate,  $\dot{\epsilon}_{SS}$ ) และค่าความเค้น ( $\sigma$ ) จากตารางที่ 4.1, 4.2 และ 4.3 ไปพล็อตกราฟ  $\ln \dot{\epsilon}_{SS}$  บนแกน Y และ  $\ln \sigma$  บนแกน X ของชิ้นงาน CSC, GSC5s และ GSC15s ดังแสดงในกราฟรูปที่ 4.28, ความชันของกราฟคือค่ายกกำลังความเค้น ( $n$ ) พบว่าที่อุณหภูมิ 25°C และช่วงค่าความเค้นระหว่าง 80-140 MPa ชิ้นงานกลุ่ม CSC, GSC5s และ GSC15s มีค่า  $n$  เท่ากับ 3.41, 5.08 และ 3.87 สันนิษฐานว่าการคืบที่อุณหภูมิ 25°C ช่วงความเค้นระหว่าง 80-140 MPa การคืบถูกควบคุมด้วยกลไกการเลื่อนไถลและการป็นของดิสโลเคชัน ซึ่งโดยทั่วไปกลไกการคืบแบบนี้จะมีค่า  $n$  ประมาณ 4-5



รูปที่ 4.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\ln \dot{\epsilon}_{SS}$  กับ  $\ln \sigma$  ของชิ้นงานกลุ่ม CSC, GSC5s และ GSC15s ที่ความเค้นในช่วง 80-140 MPa ทดสอบที่อุณหภูมิ 25°C

#### 4.3.2 ค่ายกกำลังของความเค้นจากการทดสอบการคืบที่อุณหภูมิ 100°C

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\ln \dot{\epsilon}_{SS}$  กับค่า  $\ln \sigma$  ของชิ้นงานกลุ่ม CSC, GSC5s และ GSC15s จากการทดสอบการคืบที่อุณหภูมิ 100°C ที่ช่วงความเค้น 80-140 MPa ดังแสดงในรูปที่ 4.29 พบว่ามีค่ายกกำลังของความเค้น (n) ของชิ้นงานกลุ่ม CSC, GSC5s และ GSC15s มีค่าเท่ากับ 4.05, 3.94 และ 3.79 ตามลำดับ สันนิฐานได้ว่าการคืบถูกควบคุมโดยกลไกแบบเลื่อนไถลและการปีนของดิสโลเคชัน เช่นเดียวกันกับการคืบที่อุณหภูมิ 25°C ในช่วงความเค้นเดียวกัน



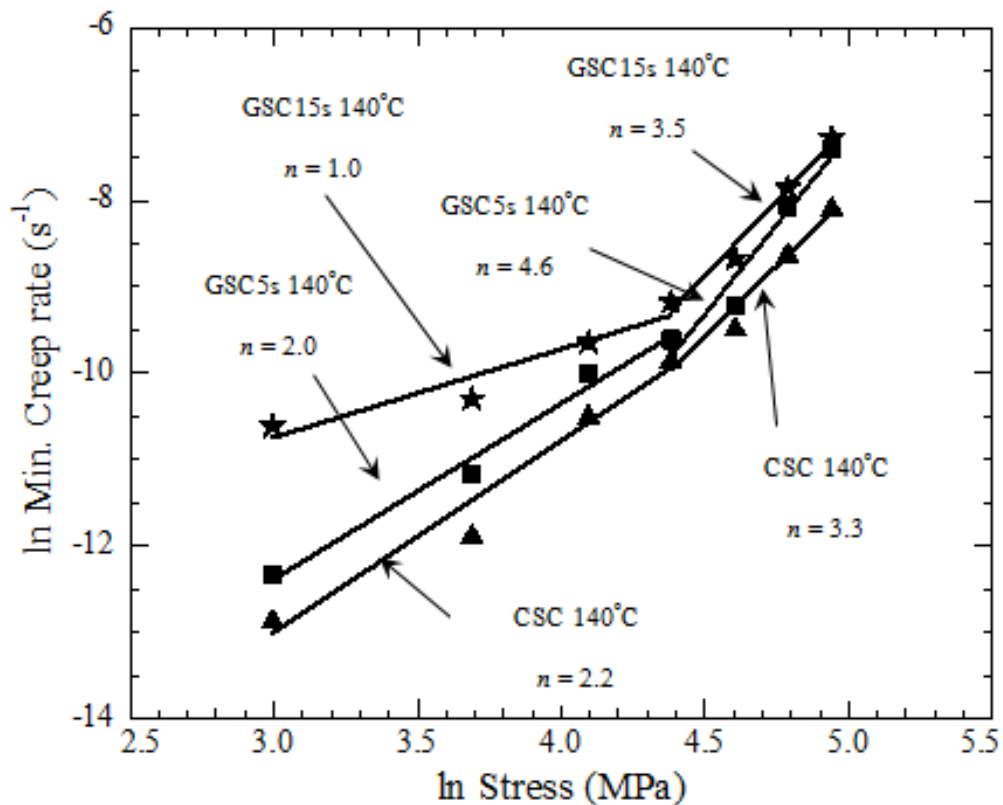
รูปที่ 4.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\ln \dot{\epsilon}_{SS}$  กับ  $\ln \sigma$  ของชิ้นงานกลุ่ม CSC, GSC5s และ GSC15s ที่ความเค้นในช่วง 80-140 MPa ทดสอบที่อุณหภูมิ 100°C

#### 4.3.3 ค่ายกกำลังของความเค้นจากการทดสอบการคืบที่อุณหภูมิ 140°C

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\ln \dot{\epsilon}_{SS}$  กับ  $\ln \sigma$  ของชิ้นงานกลุ่ม CSC, GSC5s และ GSC15s จากการทดสอบการคืบที่อุณหภูมิ 140°C ที่ความเค้น 20, 40, 60, 80, 100, 120 และ 140 MPa แสดงในรูปที่ 4.30 จะพบว่าค่าความชัน (Slope) หรือค่ายกกำลังของความเค้น (Stress Exponent, n) สามารถแบ่งออกเป็น 2 ช่วง ช่วงที่ 1 ที่ระดับค่าความเค้น 20-80 MPa และช่วงที่ 2 ที่ระดับความเค้น 80-140 MPa พบว่าในช่วงที่ 1 ชิ้นงาน CSC, GSC5s และ GSC15s มียกกำลังของความเค้น (n) เท่ากับ 2.2, 2.0 และ 1.0 ตามลำดับ ซึ่งสันนิษฐานได้ว่าการคืบที่อุณหภูมิ 140°C ที่ช่วงความเค้น 20-80 MPa อาจเกิดจากควบคุมด้วยกลไกการคืบแบบการแพร่ (Diffusional Creep)



ส่วนการคืบในช่วงความเค้นสูง 80-140 MPa ค่ายกกำลังความเค้นของชิ้นงานกลุ่ม CSC, GSC5s และ GSC15s มีค่าสูงชันเป็น 3.3, 4.6 และ 3.5 ตามลำดับ ซึ่งสันนิษฐานได้ว่าที่อุณหภูมิ 140°C ในช่วงความเค้น 80-140 MPa การคืบของชิ้นงานทั้ง 3 กลุ่ม ถูกควบคุมด้วยกลไกการคืบแบบการเลื่อนไถลและการป็นของดิสโลเคชัน เช่นเดียวกับการคืบที่อุณหภูมิ 25°C และ 100°C



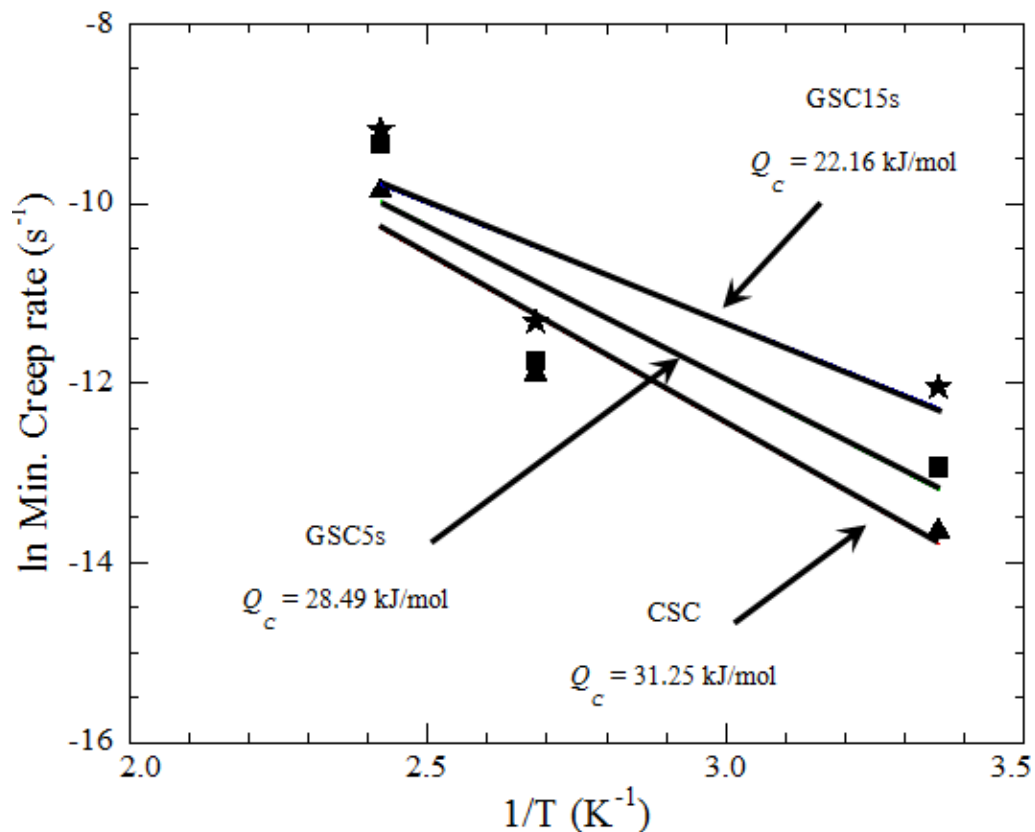
รูปที่ 4.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\ln \dot{\epsilon}_{SS}$  กับ  $\ln \sigma$  ของชิ้นงานกลุ่ม CSC, GSC5s และ GSC15s ที่ความเค้นในช่วง 80-140 MPa ทดสอบที่อุณหภูมิ 140°C

#### 4.4 พลังงานกระตุ้นสำหรับการคืบ (Activation Energy for Creep, $Q_c$ )

การประเมินค่าพลังงานกระตุ้นพลังงานในการคืบ ( $Q_c$ ) คำนวณจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\ln \dot{\epsilon}_{SS}$  และค่า  $1/T$  ที่ระดับความเค้นคงที่ ในการวิจัยนี้ได้วิเคราะห์ค่า  $Q_c$  ที่ระดับความเค้น 80, 100, 120 และ 140 MPa ได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

#### 4.4.1 พลังงานกระตุ้นสำหรับการคืบที่ความเค้น 80 MPa

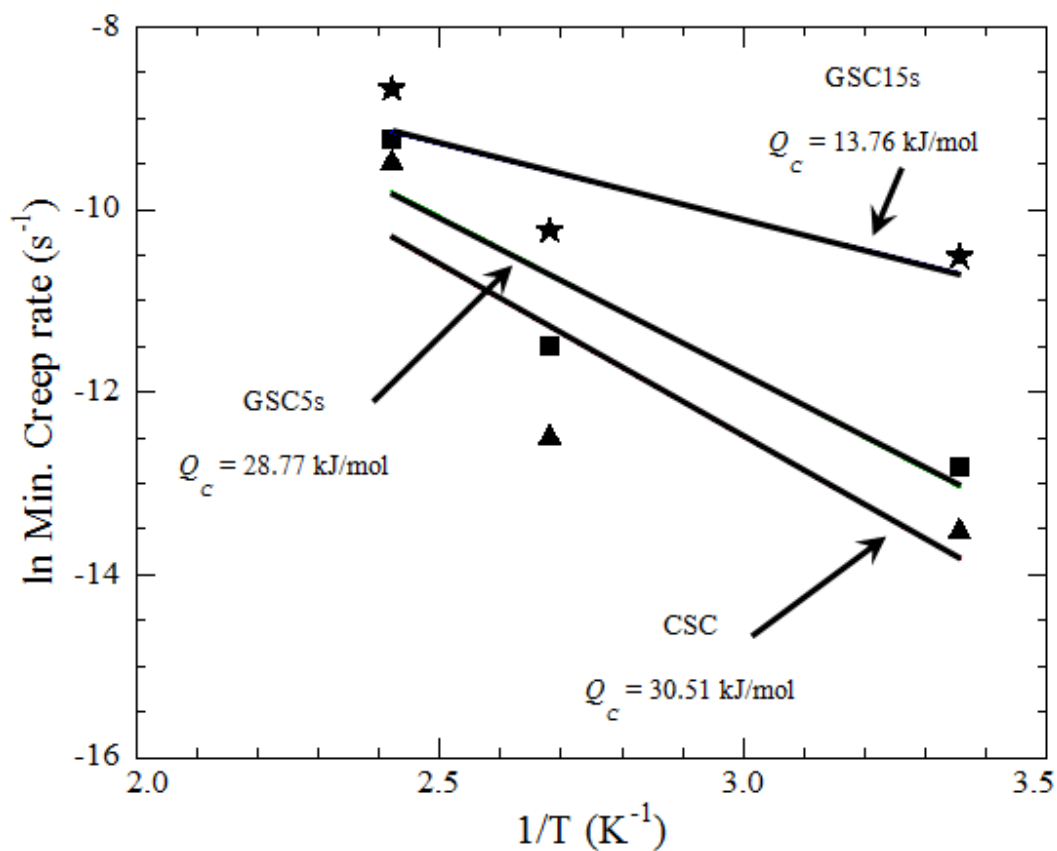
กราฟรูปที่ 4.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln \dot{\epsilon}_{SS}$  กับ  $1/T$  ของกลุ่ม CSC, GSC5s และ GSC15s จากการทดสอบการคืบที่ความเค้น 80 MPa ที่อุณหภูมิ 25, 100 และ 140°C มีค่าเท่ากับ 31.25, 28.49 และ 22.16 kJ/mol ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าชิ้นงานกลุ่ม CSC มีความต้านทานการคืบสูงกว่ากลุ่ม GSC5s และ GSC15s เพราะต้องใช้พลังงานที่ทำให้เกิดการคืบสูงกว่า



รูปที่ 4.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln \dot{\epsilon}_{SS}$  กับ  $1/T$  ของชิ้นงาน CSC, GSC5s และ GSC15s ทดสอบที่ความเค้น 80 MPa, ที่อุณหภูมิ 25, 100 และ 140°C

#### 4.4.2 พลังงานกระตุ้นสำหรับการคืบที่ความเค้น 100 MPa

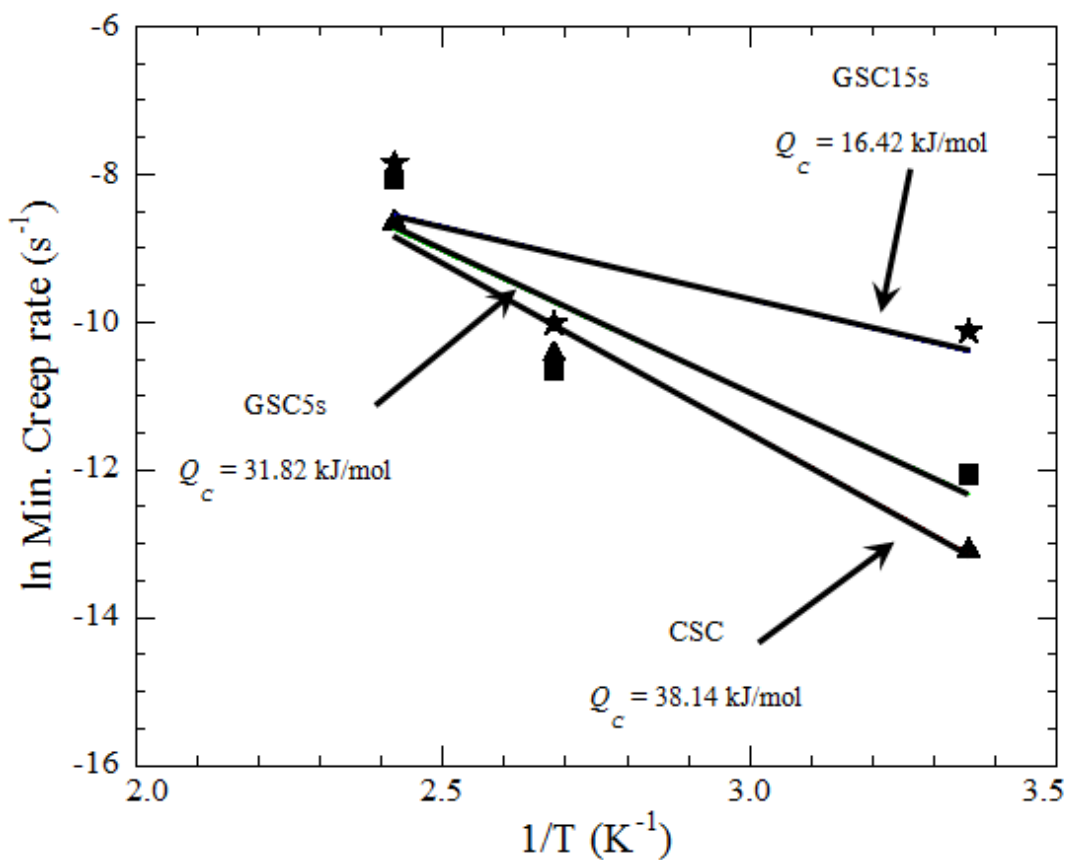
สำหรับการคืบที่ระดับความเค้น 100 MPa ชิ้นงานกลุ่ม CSC, GSC5s และ GSC15s มีค่าพลังงานกระตุ้นการคืบ ( $Q_c$ ) เท่ากับ 38.51, 28.77 และ 13.76 kJ/mol ตามลำดับ ดังแสดงในกราฟรูปที่ 4.32 ชิ้นงานกลุ่ม CSC ต้องใช้พลังงานในการกระตุ้นให้เกิดการคืบที่สูงกว่ากลุ่ม GSC5s และ GSC15s เช่นเดียวกับการคืบที่ระดับความเค้น 80 MPa



รูปที่ 4.32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln \dot{\epsilon}_{ss}$  กับ  $1/T$  ของชิ้นงานกลุ่ม CSC, GSC5s และ GSC15s ทดสอบที่ความเค้น 100 MPa, ที่อุณหภูมิ 25, 100 และ 140°C

#### 4.4.3 พลังงานกระตุ้นสำหรับการคืบที่ความเค้น 120 MPa

กราฟรูปที่ 4.33 แสดงข้อมูลการคืบที่ความเค้น 120 MPa ที่อุณหภูมิ 25, 100 และ 140°C พบว่าการคืบของชิ้นงานกลุ่ม CSC, GSC5s และ GSC15s มีค่าพลังงานกระตุ้นการคืบ ( $Q_c$ ) เท่ากับ 38.14, 31.82 และ 16.42 kJ/mol ตามลำดับ ซึ่งมีค่าเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับการคืบที่ 80 และ 100 MPa ในช่วงอุณหภูมิ 25-140°C

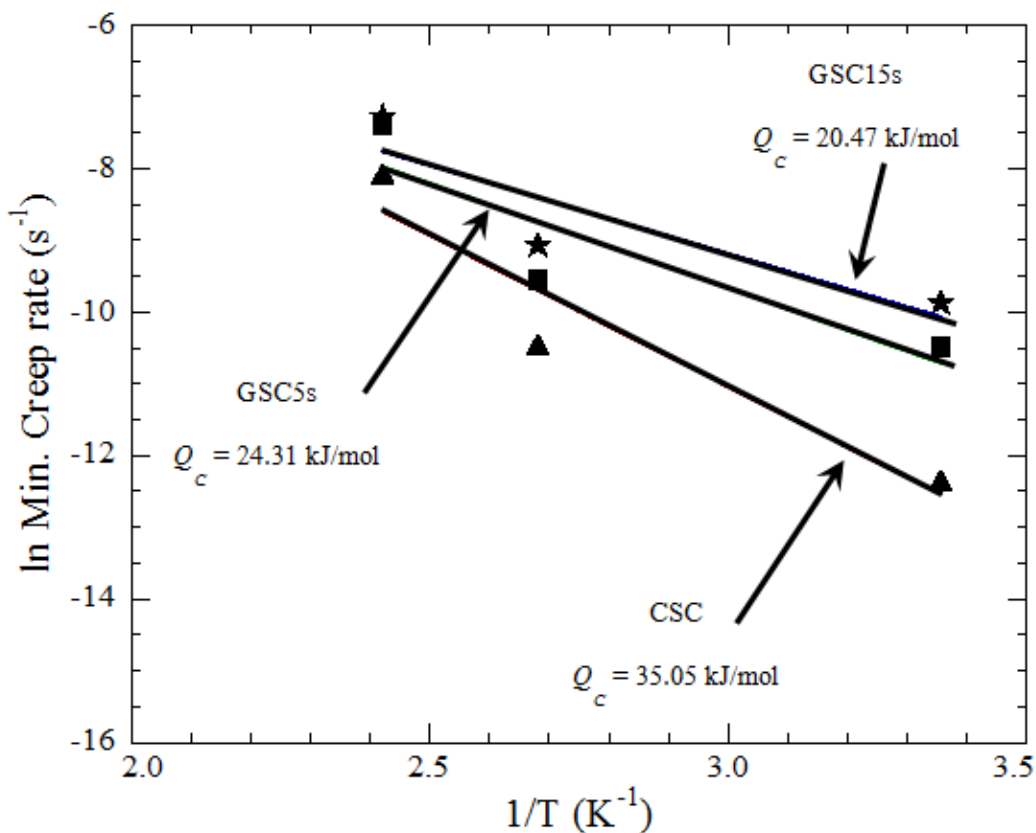


รูปที่ 4.33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln \dot{\epsilon}_{ss}$  กับ  $1/T$  ของชิ้นงานกลุ่ม CSC, GSC5s และ GSC15s ทดสอบที่ความเค้น 120 MPa, ที่อุณหภูมิ 25, 100 และ  $140^{\circ}\text{C}$

#### 4.4.4 พลังงานกระตุ้นสำหรับการคืบที่ความเค้น 140 MPa

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln \dot{\epsilon}_{ss}$  กับ  $1/T$  ของชิ้นงานกลุ่ม CSC, GSC5s และ GSC15s จากการทดสอบการคืบความเค้น 140 MPa ที่อุณหภูมิ 25, 100 และ  $140^{\circ}\text{C}$  แสดงในรูปที่ 4.34 พบว่าค่าพลังงานกระตุ้นสำหรับการคืบ มีค่าเท่ากับ 35.05, 24.31 และ 20.47 kJ/mol ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับการคืบที่ระดับความเค้น 80, 100 และ 120 MPa

จากการทดสอบการคืบในช่วงอุณหภูมิ 25- $140^{\circ}\text{C}$  ที่ระดับความเค้น 80, 100, 120 และ 140 MPa ของชิ้นงานกลุ่ม CSC, GSC5s และ GSC15s พบว่าชิ้นงานกลุ่ม CSC มีค่า  $Q_c$  สูงสุด รองลงมาคือกลุ่ม GSC5s และ GSC15s

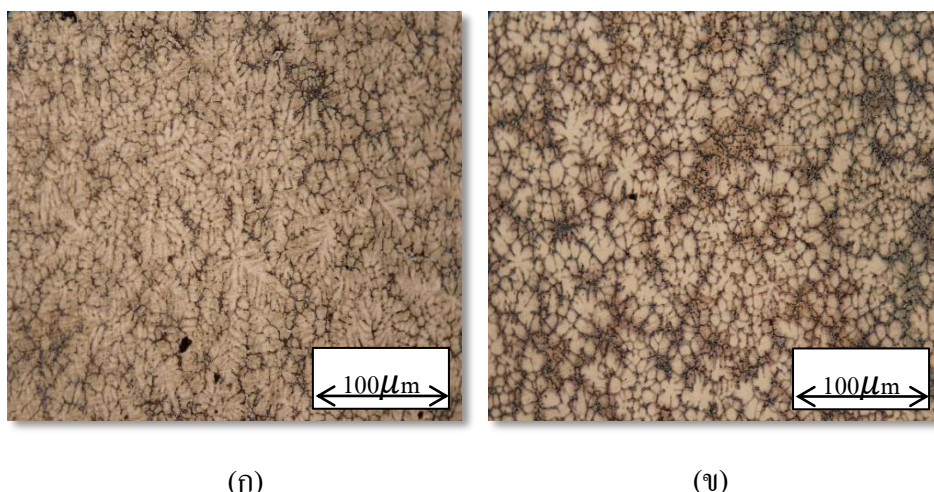


รูปที่ 4.34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln \dot{\epsilon}_{ss}$  กับ  $1/T$  ของชิ้นงานกลุ่ม CSC, GSC5s และ GSC15s ทดสอบที่ความเค้น 140 MPa ที่อุณหภูมิ 25, 100 และ 140°C

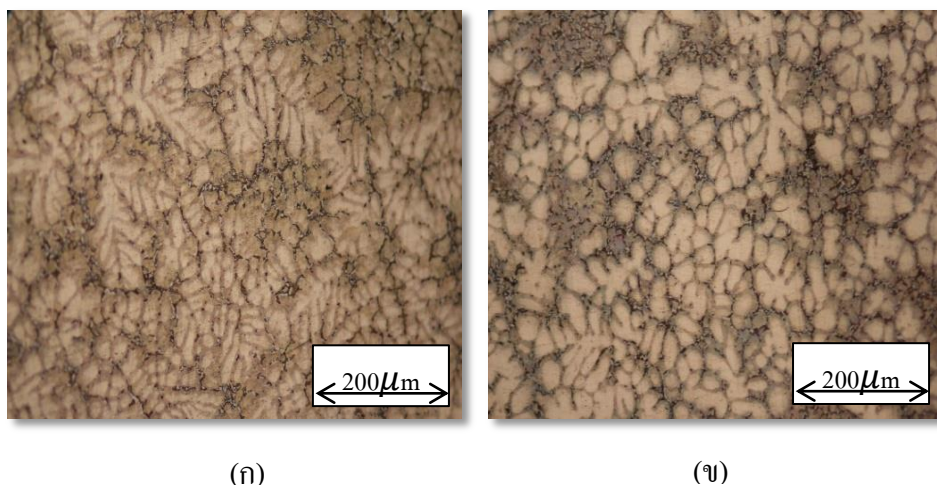
แสดงให้เห็นว่า ชิ้นงานที่เตรียมจากการหล่ออัดแบบดั้งเดิม มีความต้านทานการคืบได้ดีกว่าชิ้นงานที่เตรียมจากการหล่ออัดแบบสเลอรี เมื่อเปรียบเทียบชิ้นงานกลุ่ม GSC5s และ GSC15s พบว่าชิ้นงานที่ใช้เวลาในการพ่นฟองแก๊ส 5 วินาที (GSC5s) มีความต้านทานการคืบได้ดีกว่าชิ้นงานที่เตรียมจากการพ่นฟองแก๊สนาน 15 วินาที (GSC15s) ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างแบบเดรนไดร์ตเปลี่ยนเป็นลักษณะเกรนก้อนกลมมากขึ้น ซึ่งเป็นโครงสร้างที่ทนต่อการคืบด้อยกว่าโครงสร้างแบบเดรนไดร์ต

#### 4.5 การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของ ZA-27 ที่ผ่านการหล่อขึ้นรูปโดยวิธีการหล่ออัด

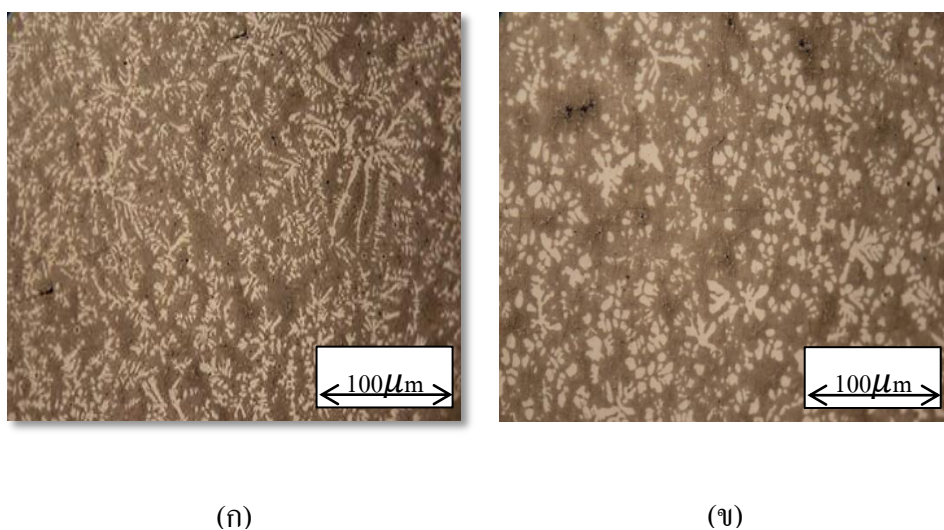
จากการศึกษาโครงสร้างชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการหล่อแบบดั้งเดิม (Conventional Squeeze Casting, CSC) และแบบการหล่ออัดสเลอรี่ (Slurry Squeeze Casting, GSC) พบว่าชิ้นงานกลุ่ม CSC มีลักษณะโครงสร้างเฟสแอลฟา ( $\alpha$ -phase) เป็นแบบเดนไดรต์ซึ่งคล้ายกับกิ่งไม้ ส่วนชิ้นงานกลุ่ม GSC มีลักษณะโครงสร้างลักษณะก้อนกลมและคล้ายกลีบกุหลาบ (Rosett) ชิ้นงานภายหลังจากการหล่ออัด (As-Cast) ภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบ OM โครงสร้างสีจางคือเฟส  $\alpha$  ซึ่งประกอบด้วยธาตุหลักคือ Al-rich และในส่วนที่บริเวณสีทึบหรือเทาดำคือเฟส  $\eta$  ซึ่งประกอบด้วยธาตุหลักคือ Zn-rich ดังแสดงในรูปที่ 4.35-4.38 และเมื่อนำชิ้นงานไปผ่านกระบวนการทางความร้อน Stabilization โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทั้งสองกลุ่มจะอยู่ในเฟสที่เสถียรและเกิดการเปลี่ยนแปลงเฟสดังสมการ  $\alpha + \epsilon \rightarrow T' + \eta$  อ้างจากงานวิจัยของ S. Vongcharoenpon [38] ซึ่งได้ศึกษากระบวนการทางความร้อนของ ZA-27 ที่หล่อขึ้นรูปด้วยกระบวนการหล่ออัดสเลอรี่ โดยศึกษาการอบละลาย Solution Treatment ที่อุณหภูมิ  $365^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และบ่มเทียม (Artificial Ageing) ที่อุณหภูมิ  $150^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 0.5, 1, 3, 6, 12 และ 24 ชั่วโมง พบว่าหลังจากการทำ Solution Treatment เฟส  $\alpha$  และ  $\eta$  เกิดการละลายและเปลี่ยนเฟสไปเป็น  $\beta$  หลังจากเกิดการเปลี่ยนแปลงของเฟส  $\alpha$  และ  $\epsilon$  ไปเป็นเฟส  $T'$  และ  $\eta$  เฟสใหม่มีลักษณะโครงสร้างแบบ Lamella ซึ่งทำให้ค่าความแข็งของวัสดุลดลง



รูปที่ 4.35 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ OM โครงสร้างจุลภาคของ ZA-27 ภายหลังจากหล่อ (As-Cast) ที่กำลังขยาย 10 เท่า (ก) หล่ออัดแบบ Conventional (ข) หล่ออัดสเลอรี่ (GISS)

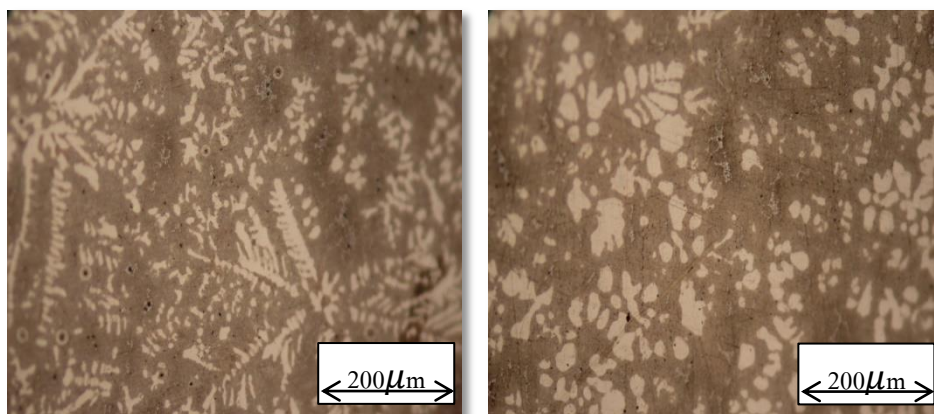


รูปที่ 4.36 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ OM โครงสร้างจุลภาคของ ZA-27 ภายหลังจากหล่อ (As-Cast) ที่กำลังขยาย 20 เท่า (ก) หล่ออัดแบบ Conventional (ข) หล่ออัดสเลอริ (GISS)



รูปที่ 4.37 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ OM โครงสร้างจุลภาคของ ZA-27 ที่ผ่านการทำ Stabilization ที่กำลังขยาย 10 เท่า (ก) หล่ออัดแบบ Conventional และ (ข) หล่อสเลอริ (GISS)





(ก)

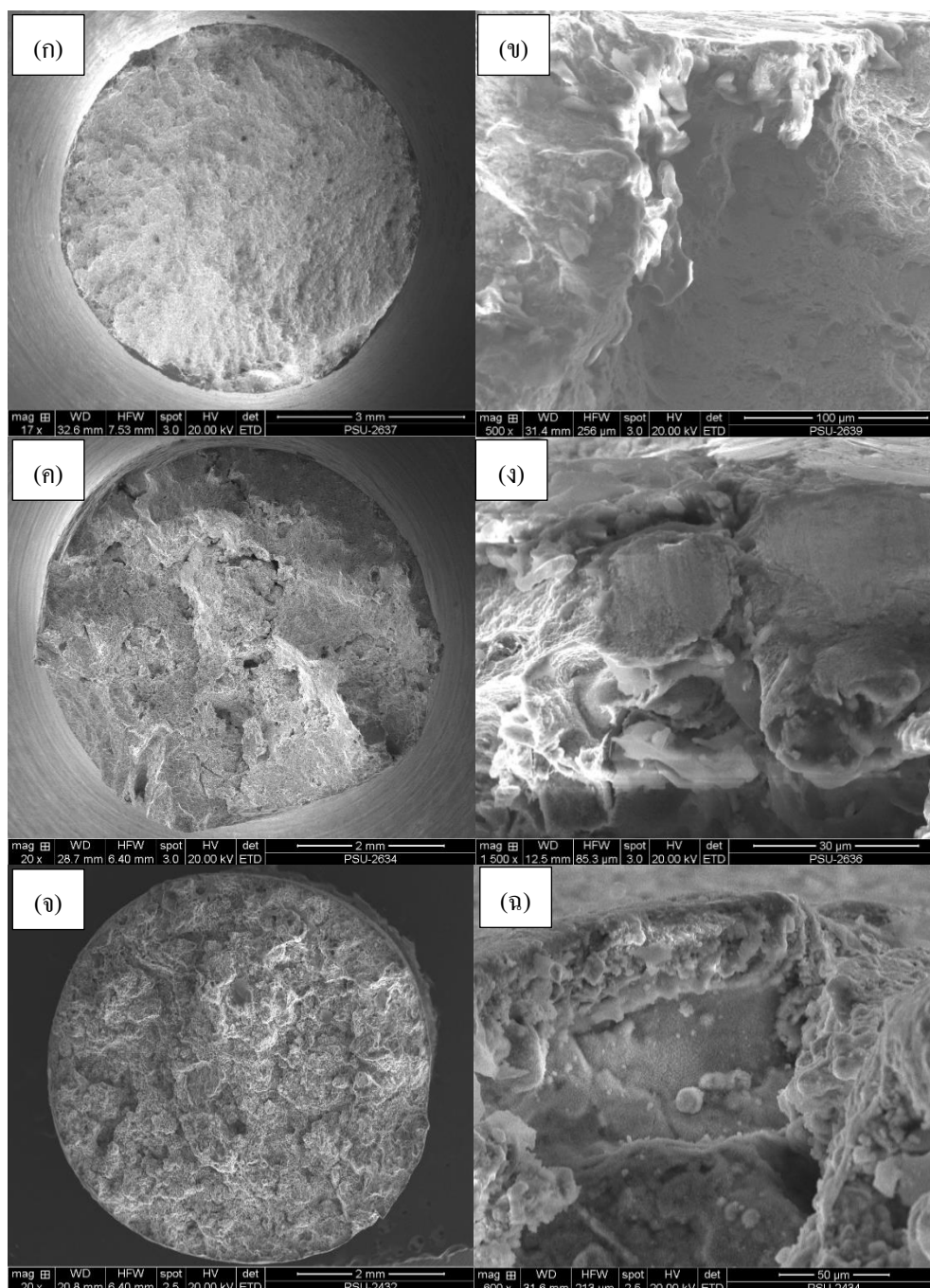
(ข)

รูปที่ 4.38 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ OM โครงสร้างจุลภาคของ ZA-27 ที่ผ่านการทำ Stabilization ที่กำลังขยาย 20 เท่า (ก) หล่ออัดแบบ Conventional และ (ข) หล่อสเลอริ (GISS)

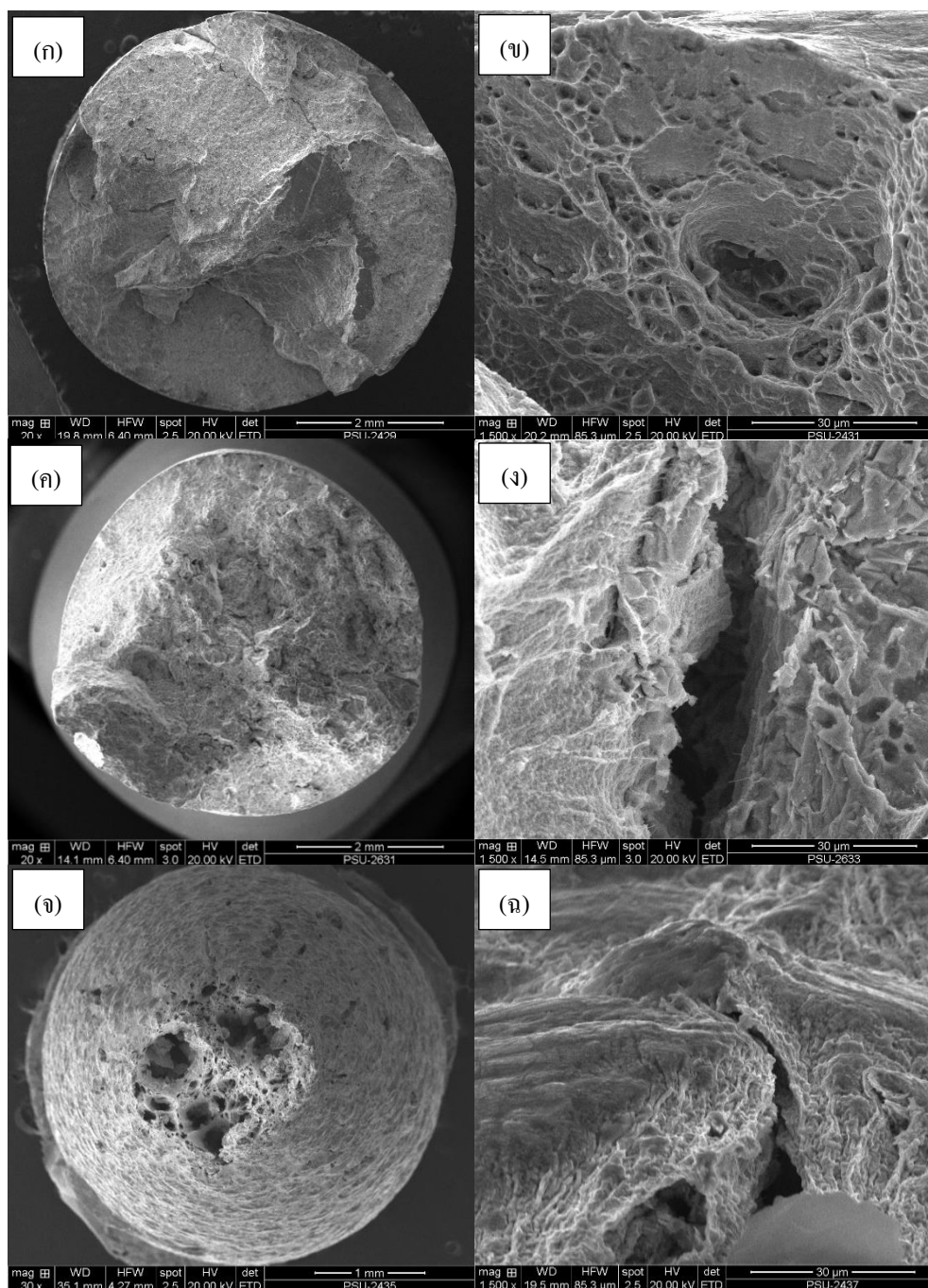
#### 4.6 ลักษณะผิวของรอยแตกหักจากการคืบ (Creep Fracture Surface)

รูปที่ 4.39-4.40 แสดงภาพถ่ายลักษณะผิวของรอยแตกหลังจากการทดสอบการคืบที่ อุณหภูมิ 25, 100 และ 140°C ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าชิ้นงาน กลุ่ม CSC ลักษณะการแตกหักแบบเปราะ (Cleavage) ส่วนชิ้นงานกลุ่ม GSC15s มีลักษณะการแตกหักแบบเหนียวซึ่งผิวรอยแตกมีลักษณะเป็นหลุมเล็กๆ (Dimple)





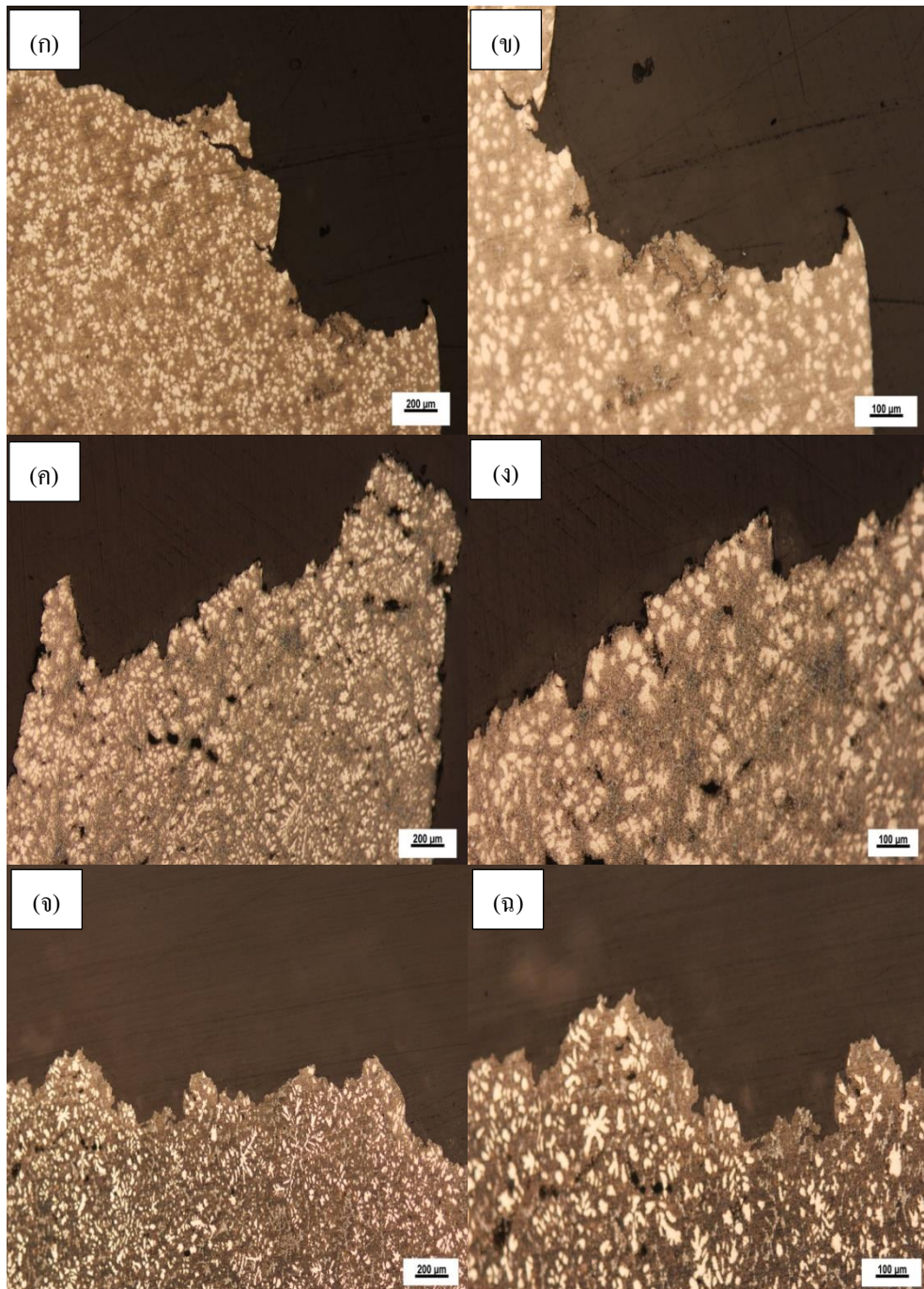
รูปที่ 4.39 ภาพถ่าย SEM ของผิวรอยแตกหัก (Fracture Surface) ของชิ้นงานหลังการตีกลุ่ม CSC (ก) - (ข) ทดสอบที่อุณหภูมิ 25°C ความเค้น 120 MPa (ค) - (ง) ทดสอบที่อุณหภูมิ 100°C ความเค้น 120 MPa และ (ฉ) - (ฉ) ทดสอบที่อุณหภูมิ 140°C ความเค้น 20 MPa



รูปที่ 4.40 ภาพถ่าย SEM ของผิวรอยแตกหักภายหลังจากการคืบ (Fracture Surface) ของชิ้นงาน ภายหลังจากการคืบกลุ่ม GSC15s (ก) - (ข) ทดสอบที่อุณหภูมิ 25°C ความเค้น 120 MPa (ค) - (ง) ทดสอบที่อุณหภูมิ 100°C ความเค้น 120 MPa และ (จ) - (ฉ) ทดสอบที่อุณหภูมิ 140°C ความเค้น 20 MPa

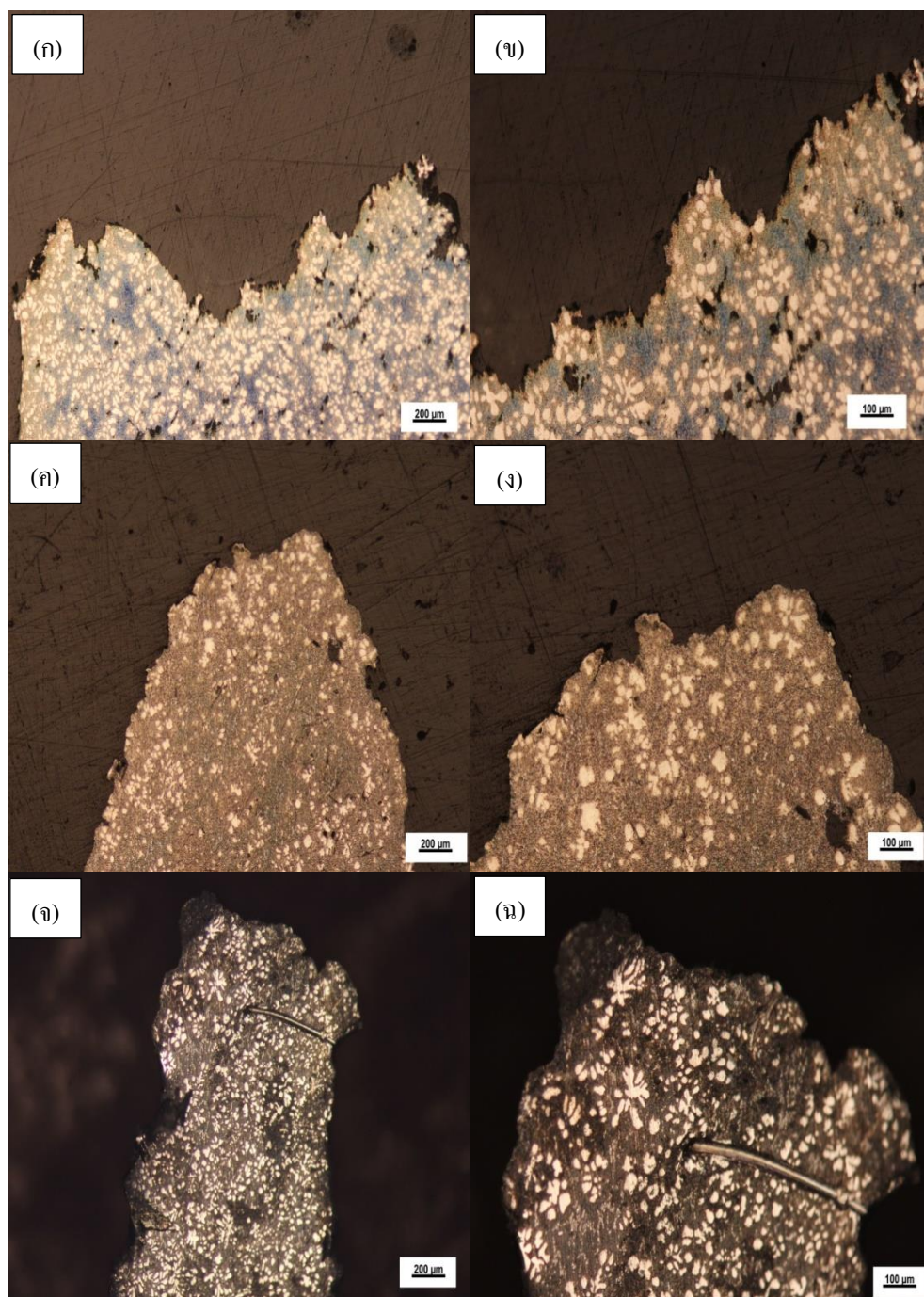
#### 4.7 โครงสร้างจุลภาคของบริเวณใกล้รอยแตกหักของชิ้นงานหลังการทดสอบการคืบ

รูปที่ 4.41-4.42 เป็นภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์ OM ของภาคตัดขวางตามแนวความเค้นของชิ้นงานกลุ่ม CSC และ GSC15s ซึ่งจะช่วยบ่งบอกถึงลักษณะการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคตามแนวความเค้นคืบ พบว่ากลุ่มชิ้นงาน CSC และ GSC15s เมื่อเฟสต่างๆจะยึดไปตามแนวความเค้นที่ใช้ในการทดสอบการคืบ พบว่าเกิดช่องว่างที่เกิดจากการคืบ (Creep Cavitation) มากขึ้น และเมื่อช่องว่างเกิดการเชื่อมต่อกันทำให้การเกิดรอยแตกหัก สังเกตได้ว่ารอยแตกหักจะไม่ตัดผ่านเฟส  $\alpha$  แต่จะเริ่มร้าวไปตามขอบของเฟส  $\alpha$  ซึ่งเป็นเฟส  $\eta$  หรือเมตริกซ์

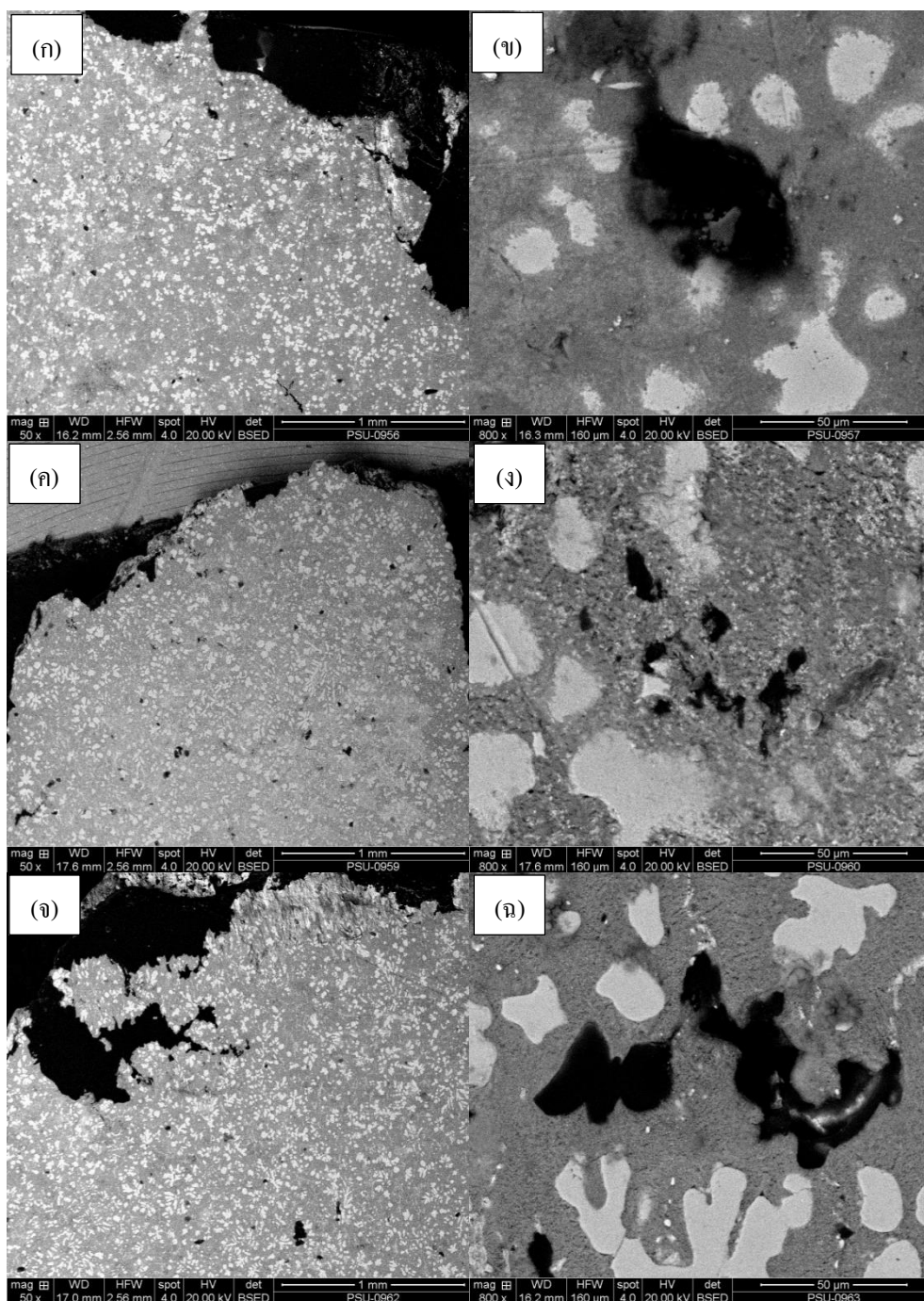


รูปที่ 4.41 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์ OM ภาคตัดขวางตามแนวความเค้น ภายหลังจากการคืบของชิ้นงานกลุ่ม CSC (ก) - (ข) ทดสอบที่อุณหภูมิ 25°C ความเค้น 120 MPa (ค) - (ง) ทดสอบที่อุณหภูมิ 100°C ความเค้น 120 MPa และ (จ) - (ฉ) ทดสอบที่อุณหภูมิ 140°C ความเค้น 20 MPa (หมายเหตุ แนวตั้งคือทิศทางของความเค้น)

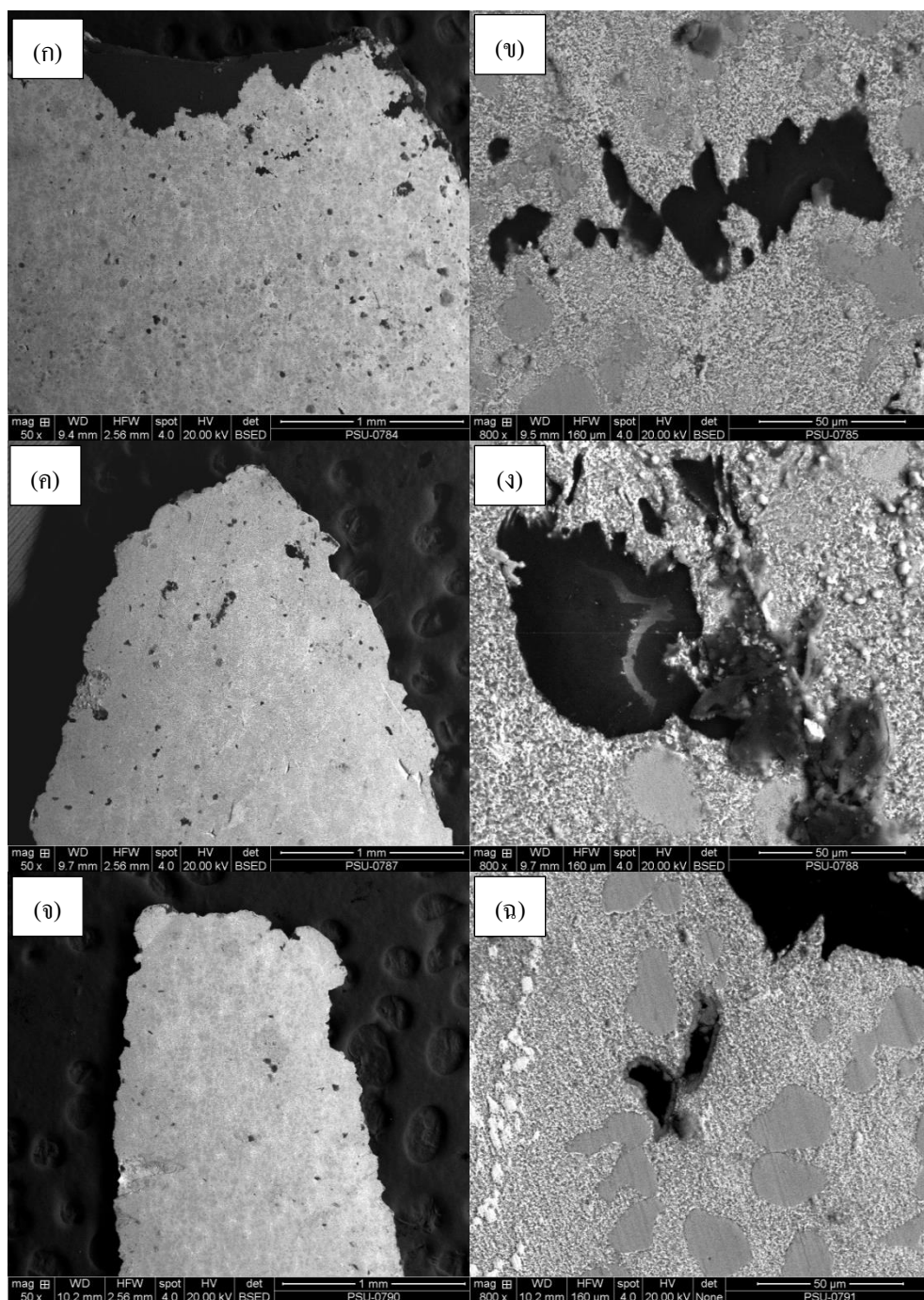




รูปที่ 4.42 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์ OM ภาคตัดขวางตามแนวความเค้น ภายหลังจากการคืบของชิ้นงานกลุ่ม GSC15s (ก) - (ข) ทดสอบที่อุณหภูมิ 25°C ความเค้น 120 MPa (ค) - (ง) ทดสอบที่อุณหภูมิ 100°C ความเค้น 120 MPa และ (จ) - (ฉ) ทดสอบที่อุณหภูมิ 140°C ความเค้น 20 MPa (หมายเหตุ แนวตั้งคือทิศทางของความเค้น)



รูปที่ 4.43 ภาพถ่าย SEM โครงสร้างจุลภาคใกล้บริเวณรอยแตกหลังการคืบของชิ้นงานกลุ่ม CSC (ก) - (ข) ทดสอบที่อุณหภูมิ 25°C ความเค้น 120 MPa (ค) - (ง) ทดสอบที่อุณหภูมิ 100°C ความเค้น 120 MPa และ (ฉ) - (ฉ) ทดสอบที่อุณหภูมิ 140°C ความเค้น 20 MPa



รูปที่ 4.44 ภาพถ่าย SEM โครงสร้างจุลภาคใกล้บริเวณรอยแตกหักหลังจากการคืบของชิ้นงานกลุ่ม GSC15s (ก) - (ข) ทดสอบที่อุณหภูมิ 25°C ความเค้น 120 MPa (ค) - (ง) ทดสอบที่อุณหภูมิ 100°C ความเค้น 120 MPa และ (จ) - (ฉ) ทดสอบที่อุณหภูมิ 140°C ความเค้น 20 MPa

เมื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคของบริเวณใกล้รอยแตกหักหลังการคืบด้วยกล้องจุลทรรศน์ SEM ดังแสดงในรูปที่ 4.43-4.44 พบว่าภายหลังการทดสอบการคืบที่อุณหภูมิ 25, 100 และ 140°C ขึ้นงานทั้งกลุ่ม CSC และ กลุ่ม GSC15s รอยแตกหักจะไม่ตัดผ่านเฟส  $\alpha$  มีความแข็งแรงมากกว่าบริเวณเฟสที่เมตริกซ์ ซึ่งเป็นเฟส  $\eta$  การเกิดรูช่องว่าง เนื่องจากการคืบ (Creep Cavity) สามารถมองเห็นได้ชัดเจน การเชื่อมต่อกันของช่องว่างดังแสดงในรูปที่ 4.43 (ฉ), 4.44 (ข) และ 4.44 (ง) และเป็นที่น่าสนใจว่าเมื่อทดสอบการคืบที่อุณหภูมิสูง อาจจะทำให้เกิดการบ่มเทียมขณะทดสอบ สามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของเฟสดังรายงานของ S. Vongcharoenpon ซึ่งอาจทำให้ความต้านทานการคืบลดต่ำลง



## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษากระบวนการขึ้นรูปโลหะสังกะสีผสม ZA-27 ด้วยวิธีการหล่ออัด ซึ่งแบ่งขึ้นงานออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ 1. ขึ้นงานหล่ออัดแบบดั้งเดิม (Conventional Squeeze Casting, CSC) 2. ขึ้นงานหล่ออัดสเลอรีแบบ GISS ที่ใช้เวลาในการปล่อยฟองแก๊สนาน 5 วินาที (Slurry Squeeze Casting, GSC5s) และ 3. ขึ้นงานหล่ออัดสเลอรีแบบ GISS ที่ใช้เวลาในการปล่อยฟองแก๊สนาน 15 วินาที (GSC15s) ได้ศึกษาสมบัติเชิงกลของขึ้นงานทั้งสามกลุ่ม ได้แก่ สมบัติแรงดึง และสมบัติการคืบ ที่อุณหภูมิ 25, 100 และ 140°C ศึกษาโครงสร้างจุลภาคของขึ้นงานก่อนและหลังการทดสอบการคืบ และศึกษาลักษณะผิวของรอยแตกหักหลังการคืบ สามารถสรุปผลการศึกษาได้ ดังนี้

1. ตัวอย่างขึ้นงานกลุ่ม CSC มีความต้านทานแรงดึงที่อุณหภูมิ 25, 100 และ 140°C สูงกว่าขึ้นงานกลุ่ม GSC5s และ GSC15s แต่มีค่าการยืดแตกหักน้อยกว่า ทั้งนี้เนื่องจากขึ้นงานกลุ่ม CSC มีลักษณะโครงสร้างของเฟส Al-rich  $\alpha$  เป็นแบบเดนไดรต์ (Dendrite) ซึ่งทนต่อความเค้นดึงได้ดีกว่าโครงสร้างแบบก้อนกลม (Globular) และแบบกลีบกุหลาบ (Rosette) ที่พบในขึ้นงานกลุ่ม GSC5s และ GSC15s แต่ขึ้นงานที่มีลักษณะโครงสร้างของเฟส Al-rich  $\alpha$  แบบก้อนกลมและแบบกลีบกุหลาบจะมีความเหนียวและสามารถยืดตัวได้สูงกว่า
2. ตัวอย่างขึ้นงานกลุ่ม CSC มีความต้านทานการคืบที่อุณหภูมิ 25, 100 และ 140°C สูงกว่าขึ้นงานกลุ่ม GSC5s และ GSC15s แต่มีค่าความเครียดแตก (Creep Rupture Strain) ที่ต่ำกว่า เมื่อเปรียบเทียบความต้านทานการคืบของขึ้นงานที่หล่ออัดสเลอรีด้วยกัน พบว่าขึ้นงานกลุ่ม GSC5s มีความต้านทานการคืบได้ดีกว่าขึ้นงานกลุ่ม GSC15s เนื่องจากเมื่อใช้เวลาในการปล่อยฟองแก๊สนานขึ้น ทำให้เฟส Al-rich  $\alpha$  มีขนาดโตขึ้น (Grain Growth) ยังผลให้ความต้านทานการคืบของขึ้นงานกลุ่ม GSC15s ลดต่ำลง
3. การคืบที่อุณหภูมิ 25, 100 และ 140°C ที่ช่วงความเค้น 80-140 MPa ขึ้นงานกลุ่ม CSC, GSC5s และ GSC15s มีค่ายกกำลังของความเค้น  $n = 3.4-5.1$  ซึ่งสันนิษฐานว่าที่อุณหภูมิและช่วงความเค้นนี้การคืบอาจจะถูกควบคุมด้วยกลไกการคืบแบบการเลื่อนไถลและการป็นของดิสโลเคชัน (Dislocation Glide-Climb Mechanism,  $n = 4-5$ ) แต่ที่อุณหภูมิ 140°C ช่วงความเค้น 20-80 MPa ค่ายกกำลังของความเค้นลดลงเหลือประมาณ  $n = 2.0$  ซึ่งมีแนวโน้มว่ากลไกการคืบเปลี่ยนจากกลไกที่ถูกควบคุมโดยการเลื่อนไถลและการป็นของดิสโลเคชันไปเป็นกลไกการคืบที่ถูกควบคุมจากการแพร่ (Diffusional Creep Mechanism,  $n = 1-2$ )

4. ค่าพลังงานกระตุ้นสำหรับการคืบ (Activation Energy for Creep,  $Q_c$ ) ที่ความเค้น 80, 100, 120 และ 140 MPa ที่ช่วงอุณหภูมิ 25-140°C ของชิ้นงานกลุ่ม CSC, GSC5s และ GSC15s มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 33.7, 28.4 และ 18.2 kJ/mol ตามลำดับ ซึ่งยืนยันว่าชิ้นงานกลุ่ม CSC ต้านทานการคืบได้ดีกว่าชิ้นงานกลุ่ม GSC5s และ GSC15s และในทำนองเดียวกัน ชิ้นงานกลุ่ม GSC5s ทนต่อการคืบได้สูงกว่า GSC15s
5. การคืบทำให้เกิดช่องว่างการคืบ (Creep Cavity) ขนาดเล็กขึ้นในเฟส  $\eta$  หรือเฟสเมตริกซ์ ซึ่งอยู่รอบ ๆ เฟส Al-rich  $\alpha$  ระหว่างการคืบช่องว่างจะเชื่อมต่อกัน (Void Coalescent) ทำให้เกิดรอยร้าว รอยร้าวจะขยายตัวไปเรื่อย ๆ ในเฟสเมตริกซ์จนตัวอย่างชิ้นงานเกิดการแตกหัก และพบว่ารอยร้าวจะไม่ตัดผ่านเฟส Al-rich  $\alpha$

### ข้อเสนอแนะ

1. เต้าที่ใช้ในการทดสอบการคืบเป็นเต้าที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานที่อุณหภูมิสูงกว่า 300°C แต่ในงานในงานวิจัยนี้ทดสอบการคืบจะที่อุณหภูมิต่ำกว่า 300°C ซึ่งอาจทำให้ความแม่นยำลดลง
2. ในการเก็บบันทึกข้อมูลระยะการยืดของชิ้นงาน ซึ่งอาจจะมีสัญญาณรบกวนค่อนข้างมาก เนื่องจากการเปิดปิดประตูเข้าออกภายในห้องทดสอบการคืบทำให้เกิดการแกว่งของคานของเครื่องทดสอบการคืบ ดังนั้นขณะทำการทดสอบการคืบจึงไม่ควรเปิด-ปิดประตูห้องทดสอบ
3. ควรมีระบบสำรองไฟเพื่อป้องกันไฟดับและไฟตก ซึ่งอาจทำให้ข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีความคลาดเคลื่อน

### บรรณานุกรม

1. V.N. Chalwa and N. Kadli: Some Tribological Investigations on Zinc Base Alloy, International Journal of Science and Research (IJSR) Vol.2 (2013).
2. H.B. Lokesh, S.P. Fakrudeen and V.B. Raju: An Electro Chemical Investigation on The Corrosion Behavior of ZA-27 alloy in 1M Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> in The Presence of Cationic Surfactants as Inhibitors, IOSR Journal of Humanities and Social Science (IOSR-JHSS) Vol.19 Issue 6 Ver. 1, pp. 9-20 (2014).
3. D. Bozic, J. Stasic and V. Rajkovic: Microstructure and Mechanical Properties of ZA27-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Composites Obtained by Powder Metallurgy Process, Science of Sintering, 43, pp. 63-70 (2011).
4. C. Tijun, F. Mingfeng and H. Yuan: Microstructure Evolution of Fine-Grained ZA27 Alloy During Partial Remelting, Research and Development (2010).
5. M. A. M. Arif, M. Z. Omar and N. Muhamad: Effect of Solid Solution Treatment on Semisolid Microstructure of Zn-22Al Alloy, Pertanika J. Sci. & Technol. 20, pp. 121-127 (2012).
6. N. Mahathaninwong, T. Plookphol, J. Wannasin and S. Wisutmethangoon: T6 Heat Treatment of Rheocasting 7075 Al Alloy, Materials Science and Engineering A 532, pp. 91-99 (2012).
7. W. Xiao-wei and S. Bao-luo: Effect of Zr on Behavior of Compressive Creep in As Cast ZA27 Alloy, Trans. Nonferrous Met. Soc. China Vol.13 (2003).
8. L. Gao-yong, R. Zhang, L. Wang, L. Yu-xia and H. Jia-jian: Effects of Stabilizing Heat-Treatment on Microstructures and Creep Behavior of Zn-10Al-2Cu-0.02Ti Alloy, Trans. Nonferrous Met. Soc. China Vol.23, pp. 86-91 (2013).
9. N. Mahathaninwong, Y.Zhou, S.E. Babcock, T. Plookphol, J. Wannasin and S. Wisutmethangoon: Creep Rupture Behavior of Semi-Solid Cast 7075-T6 Al Alloy, Materials Science and Engineering A 556, pp. 107-113 (2012).
10. C. Tijun, Y. Chengren, F. Mingfeng, M. Ying, L. Yuandong and H. Yuan: Friction and Wear Properties of Casting in-situ Silicon Particle Reinforced ZA27 Composites, Research & Development (2009).
11. E. Gervais, R.J. Barnhurst and C.A. Loong: An Analysis of Selected Properties of ZA Alloys, Applied Technology Journal of Metals (1985).

12. [www.nystar.com](http://www.nystar.com) (สืบค้นเมื่อวันที่ 1 สิงหาคม 2561).
13. Zinc-Diecasting-Alloys. <https://www.dynacast.com/zinc-die-casting> (สืบค้นวันที่ 1 สิงหาคม 2561).
14. J. Wannasin, S. Janudom, T. Rattanochaikul, R. Canyook, R. Burapa, T. Chucheeep and S. Thanabumrungskul: Research and development of gas induced semi-solid process for industrial application, Trans. Nonferrous Met. Soc. China 20 S1010-1015 (2010).
15. R. Burapa, R. Canyook and J. Wannasin: Development of the gas semi-solid metal processing for A356 Aluminum alloy (2009).
16. J. Wannasin: Metal Forming, Technology production Vol. 37 No. 215 (2011).
17. Study Materials Creep Test.  
<http://onlinestudymaterials4us.blogspot.com/2016/12/creep-test.html> (สืบค้นเมื่อวันที่ 2 สิงหาคม 2561).
18. Ch.13 Modulus for Creep.  
[http://sungkomonline.com/file/Webboard\\_ans.php?webID=11&pageID=3&questionID=16](http://sungkomonline.com/file/Webboard_ans.php?webID=11&pageID=3&questionID=16) (สืบค้นเมื่อวันที่ 8 ธันวาคม 2558).
19. TALAT Lecture 1253, Creep of Aluminium and Aluminium alloys, Department of mechanics, University of Ancona, Ancona Italy.  
[www.slideshare.net/corematerials/talat-lecture-1253](http://www.slideshare.net/corematerials/talat-lecture-1253). (สืบค้นเมื่อวันที่ 8 ธันวาคม 2558).
20. Creep Deformation of Metals-Creep rate Equation, Univesity of Cambridge.  
[https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/creep/rate\\_equation.php](https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/creep/rate_equation.php) (สืบค้นเมื่อวันที่ 8 ธันวาคม 2561).
21. S. Thongkam, S. Wisutmethangoon, J. Wannasin, S. Chantaramanee and T. Plookphol: Creep of rheocast 7075 aluminum alloy at 300 oC, Applied Mechanics and Materials Vol. 372 (2013).
22. R.W. Evans and B. Wilshire: Introduction to creep, Department of materials engineering university of wales Swansea, book 429 28 (1999).
23. M.E. Kassner: Fundamentals of creep in metals and alloys third edition, Departments of Aerospace and Mechanical Engineering, Chemical Engineering and Materials science University of Southern California USA, (2015).

24. สุชาติ จันทรมณีย์ การศึกษาพฤติกรรมการคืบของอะลูมิเนียมผสมที่ใช้ทำแม่พิมพ์สำหรับฉีดพลาสติก ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ 2549 หน้า 20-24
25. สุกฤษฏี สงเกื้อ การศึกษาสมบัติการคืบของอะลูมิเนียมกึ่งของแข็ง 6061 ที่ผ่านการเตรียมโดยวิธีการGISS ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ 2557 หน้า 15-16
26. สุกฤษฏี สงเกื้อ การศึกษาสมบัติการคืบของอะลูมิเนียมกึ่งของแข็ง 6061 ที่ผ่านการเตรียมโดยวิธีการGISS ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ 2557 หน้า 17
27. สุกฤษฏี สงเกื้อ การศึกษาสมบัติการคืบของอะลูมิเนียมกึ่งของแข็ง 6061 ที่ผ่านการเตรียมโดยวิธีการGISS ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ 2557 หน้า 19
28. D. Božić, J. Stašić V. Rajković: Microstructures and Mechanical Properties of ZA27-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Composites Obtained by Powder Metallurgy Process, P.63-70 (2011).
29. M. Rosso: Thixocasting and rheocasting technologies, improvements going on, Politecnico di Torino, Department of Applied Science and Technology, C.so Duca degli Abruzzi, 24-10129 Torino, Italy Vol. 54 (2012).
30. R. Burapa, R. Canyook and J. Wannasin: Development of the Gas Induced Semi-Solid Metal Processing for A356 Aluminum Alloy 1, 2,3Department of Mining and Materials Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla (2010).
31. Y.H Zhu: Microstructure dependence of the creep behavior of a Zn-Al based alloy, Journal of Materials Science 32 P.5811-5815 (1997).
32. R. Roberti, M. Gilles and D. Rollez: Primary and steady state creep deformation in Zamak5 Die-casting alloy at 80°C, Mater Sci Eng, 2008.
33. W. Xiao-Wei, S. Bao-Luo: Effect of Zr on behavior of compressive creep in as cast ZA27 alloy, Trans. Nonferrous Met. Soc. China, Vol. 13 (2003).
34. L. Zi-Quan, Z. Heng-Zhi, L. Xin-Yi: Aging microstructural characteristics of ZA-27 alloy and SiCp/ZA-27 composite, College of Materials Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China, (2005).

35. Y.Liu, L.Hong-Ying, LU.Xiao-Chao: Effects of heat treatment on microstructure and mechanical properties of ZA27 alloy, School of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China, pp. 642-649 (2014).
36. B.K. Prasad: Tensile properties of some zinc-based alloy comprising 27.5% Al: effects of alloy microstructure, composition and test conditions, Materials Science and Engineering A245, India 257-266 (1998).
37. B.K. Prasad: Microstructure and tensile property characterization of a nickel-containing zinc-based alloy: effects of heat treatment and test conditions, Materials Science and Engineering A277, India 95-101 (2000).
38. S. Vongcharoen, S. Janudom and T. Plookphol: Heat treatment of slurry squeeze-cast ZA-27 alloy at 150°C, Material Science Forum Vol. 867 14-18 (2016).

ภาคผนวก ก

ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จากการทดสอบแรงดึง

ตารางที่ ก1 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานกลุ่ม CSC

Material	Temp.(°C)	$\sigma_{uts}$ (MPa)	$\sigma_{y\ 0.2\%}$ (MPa)	% $\epsilon_f$
CSC	25	496.6	423.7	12.8
		499.2	436.6	14.2
		505.6	446.2	11.9
	Average	500.5	435.5	13.0
	SD	4.6	11.3	1.2
	100	241.7	180.6	10.7
		232.5	165	9.1
		263.4	198.6	8.7
	Average	245.9	181.4	9.5
	SD	15.9	16.8	1.1
	140	160	84.1	13.7
		179.7	80.2	12.4
		160.5	116.9	13.5
	Average	166.7	93.7	13.2
	SD	11.2	20.2	0.7

#### หมายเหตุ

$\sigma_{uts}$  = Ultimate Tensile Strength (MPa)

$\sigma_{y\ 0.2\%}$  = 0.2 % Yield Strength (MPa)

%  $\epsilon_f$  = % Elongation at break



ตารางที่ ก2 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานกลุ่ม GSC5s

Material	Temp.(°C)	$\sigma_{\text{uts}}$ (MPa)	$\sigma_{y\ 0.2\%}$ (MPa)	% $\epsilon_f$
GSC5s	25	503.0	451.3	15.3
		509.0	459.3	11.2
		479.3	438.2	13.1
	Average	497.1	449.6	13.2
	SD	15.7	10.7	2.1
	100	260	180.1	17.8
		245	179.5	7.8
		232	168.4	15.6
	Average	245.7	176.0	13.7
	SD	14.0	6.6	5.3
	140	140	109.2	11.8
		172	104.3	14.6
		179	112.2	15.3
	Average	163.7	108.6	13.9
	SD	20.8	4.0	1.9

#### หมายเหตุ

$\sigma_{\text{uts}}$  = Ultimate Tensile Strength (MPa)

$\sigma_{y\ 0.2\%}$  = 0.2 % Yield Strength (MPa)

%  $\epsilon_f$  = % Elongation at break

ตารางที่ ก3 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานกลุ่ม GSC15s

Material	Temp.(°C)	$\sigma_{uts}$ (MPa)	$\sigma_{y\ 0.2\%}$ (MPa)	% $\epsilon_f$
GSC15s	25	487.0	450.0	10.9
		479.0	425.0	12.7
		435.5	326.7	15.6
	Average	467.2	400.6	13.1
	SD	27.7	65.2	2.4
	100	251.2	189	14.6
		232.4	179.1	15.1
		241.6	175.4	16.7
	Average	241.7	181.2	15.5
	SD	9.4	7.0	1.1
	140	127.6	96.7	21.8
		159.7	109.2	23.2
		128.5	99.1	19.7
	Average	138.6	101.7	21.6
	SD	18.3	6.6	1.8

#### หมายเหตุ

$\sigma_{uts}$  = Ultimate Tensile Strength (MPa)

$\sigma_{y\ 0.2\%}$  = 0.2 % Yield Strength (MPa)

%  $\epsilon_f$  = % Elongation at break

ตารางที่ ก4 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบการคืบ

Temperature(°C)	Yield strength (MPa)	Stress (MPa)	% Stress	Load (N)
25	437.5	80	18	471.0
	437.5	100	23	588.8
	437.5	120	27	706.5
	437.5	140	32	824.3
100	184	80	43	471.0
	184	100	54	588.8
	184	120	65	706.5
	184	140	76	824.3
140	102.9	20	19	117.8
	102.9	40	39	235.5
	102.9	60	58	353.3
	102.9	80	78	471.0
	102.9	100	97	588.8
	102.9	120	117	706.5
	102.9	140	136	824.3

ภาคผนวก ข

ผลงานที่เผยแพร่ในการประชุมทางวิชาการ

## Creep of Slurry Squeeze-Cast ZA-27 Zinc Alloy with Different Solid Fractions at 140 °C

Chinnarut Panpun<sup>1,a</sup>, Thawatchai Plookphol<sup>1,b</sup> and Somjai Janudom<sup>1,c</sup>

<sup>1</sup>Department of Mining and Materials Engineering, Faculty of Engineering  
Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla 90112, Thailand

<sup>a</sup>zeroaek\_9@hotmail.com, <sup>b</sup>thawatchai.p@psu.ac.th, <sup>c</sup>jsomjai@eng.psu.ac.th

**Keywords:** Creep, Zinc alloy, ZA-27, Slurry Casting, Semi-Solid, GISS

**Abstract.** This research work was aimed at studying creep of a slurry squeeze-cast ZA-27 zinc alloy. The Gas-Induced Semi-Solid (GISS) technique was used for preparing semi-solid metal slurry with two different solid fractions. The ZA-27 alloy slurry was squeeze cast to form plate-like specimens with dimension of 100×100×15 mm<sup>3</sup>. The tensile specimens were machined from the squeeze-cast plates and heat-treated before mechanical test. Tensile creep tests were performed at 140 °C, at stresses of 20, 40, 60 and 80 MPa, in an ambient air. Two groups of specimens, the low solid fraction ZA-27 alloy (GISS 5s) and the high solid fraction ZA-27 alloy (GISS 15s) were tested for comparison of creep property. The results show that the GISS 5s has longer creep life than the GISS 15s. The power-law creep stress exponents (*n*) of GISS 5s and GISS 15s are 1.45 and 1.04, respectively. Based on the creep stress exponents found from the present study, it could be concluded that at the temperature of 140 °C and stress between 20 and 80 MPa, creep of both alloys was governed by the diffusional creep mechanism.

### Introduction

Zn-Al alloys have been commercially used for industries because of their good casting ability and mechanical properties. A family of Zn-Al alloys with high aluminum content are ZA-8, ZA-12 and ZA-27 [1-3]. Among the alloys in the Zn-Al family, ZA-27 has the highest tensile strength and creep resistance. The ZA-27 has been used for many applications as casting products because of its advantages, such as light weight compared to steel and good corrosion resistance [4,5]. In the recent years, Gas-Induced Semi-Solid (GISS) technique has been used for preparing semi-solid metal slurry which contains different solid fractions by varying time for introducing the fine gas bubbles into the molten alloys [6-8]. The GISS technique can be used for casting many alloys, such as aluminum alloys, tin alloys, and zinc alloys. Recently, GISS technique was used for casting ZA-27 alloy gear part [9]. Creep is an important mechanical property of metals and alloys when they are used at high temperature and stress. The creep property of ZA-27 alloy and its composites were recently studied [1,4,10,11]. In the present work, GISS technique was used for preparing semi-solid ZA-27 slurry in combination with squeeze casting process. The tensile creep tests were performed on the GISS-squeeze-cast ZA-27 specimens with two different solid fractions for comparison.

### Experimental

**Specimen Preparation.** Commercial grade ZA-27 alloy ingots purchased from Padaeng Industry Public Co., Ltd., Thailand, were used in this study. The chemical composition of ZA-27 alloy is shown in Table 1. The ZA-27 alloy ingots were melted at 600 °C in an electric furnace for 6 h. The GISS technique was used for preparing the semi-solid metal slurry. Two groups of semi-solid metal slurry were prepared by introducing the fine nitrogen gas bubbles into the molten ZA-27 alloy for 5 s and 15 s. The slurry was then squeeze cast into square plate specimens with dimension of 100×100×15 mm<sup>3</sup> by using a casting machine with the compression pressure of 80 MPa. The as-squeeze-cast plates were cut into small bars with dimension of 15×15×100 mm<sup>3</sup>. The bars were homogenized at 320 °C for 3 h and quenched in water. The homogenized bars were then stabilized

at 100 °C for 1 h and quenched in water. The bars were machined into tensile specimens with gage diameter of 6 mm and gauge length of 30 mm, followed the ASTM-E8 standard [12] as shown Fig. 1.

Table 1. Chemical composition of ZA-27 zinc alloy (wt. %)

Alloy	Al	Mg	Cu	Pb	Cd	Fe	Sn
ZA-27	27	0.01-0.02	2-2.5	<0.006	<0.006	<0.075	<0.003

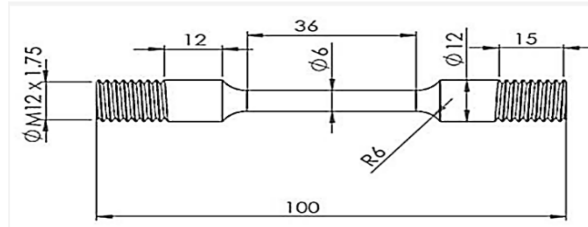


Fig. 1. Dimensions of creep specimen, ASTM-E8 [12]

**Creep Test.** The tensile creep tests were carried out at temperature 140 °C in an electric furnace, under an ambient air, at creep stresses of 20, 40, 60 and 80 MPa using a lever-arm creep machine, followed the ASTM-E139 standard [13]. The temperature was observed by using Type-K thermocouples. The extension of specimen was measured by a Linear Variable Displacement Transducer (LVDT). The temperature, displacement and time were simultaneously recorded by a personnel computer, using DAQmx and LabVIEW software.

## Result and Discussion

**Creep Behavior.** The representative creep curves of GISS-squeeze-cast ZA-27 alloys, tested at 140 °C, stresses of 20, 40, 60 and 80 MPa, for low solid fraction alloy (GISS 5s) and high solid fraction alloy (GISS 15s) are shown in Fig. 2 (a) and (b), respectively. Tables 2 and 3 show the minimum creep rate ( $\dot{\epsilon}_{ss}$ ), rupture time at four different stresses for GISS 5s and GISS 15s, respectively. It is found that at all stresses levels the creep rupture times of GISS 5s are longer than those of GISS 15s. In addition, the minimum creep rates of GISS 5s are slower than those of GISS 15s at all creep stresses. Hence, the creep resistance of GISS 5s is better than that of GISS 15s.

The minimum creep rate or steady state creep rate ( $\dot{\epsilon}_{ss}$ ) is a function of creep stress and temperature. It can be expressed as the power law creep equation [14,15]:

$$\dot{\epsilon}_{ss} = A\sigma^n \exp\left(-\frac{Q_c}{RT}\right) \quad (1)$$

where,  $\sigma$  is the creep stress,  $T$  is the absolute temperature,  $n$  is the stress exponent,  $Q_c$  is the activation energy for creep,  $R$  is the universal gas constant and  $A$  is the material constant. At a constant  $T$  and using the assumption that  $Q_c$  is not varied with stress, Eq. (1) can be reduced to

$$\dot{\epsilon}_{ss} = B\sigma^n \quad (2)$$

Which is so called the Norton's law equation [14-16], where  $B$  is a temperature-dependent material parameter.

The minimum creep rate ( $\dot{\epsilon}_{ss}$ ) data are plotted against creep stress ( $\sigma$ ) on the logarithmic scale as shown in Fig. 3. The value of stress exponent ( $n$ ) can be evaluated from the slope of the fitted line. It is found that  $n$ -values of GISS 5s and GISS 15s are 1.45 and 1.04, respectively, which are close to 1. According to the power law creep theory, these  $n$ -values implies that the creep of both GISS 5s and GISS 15s are controlled by the diffusional creep mechanism of which  $n = 1$ . [14].

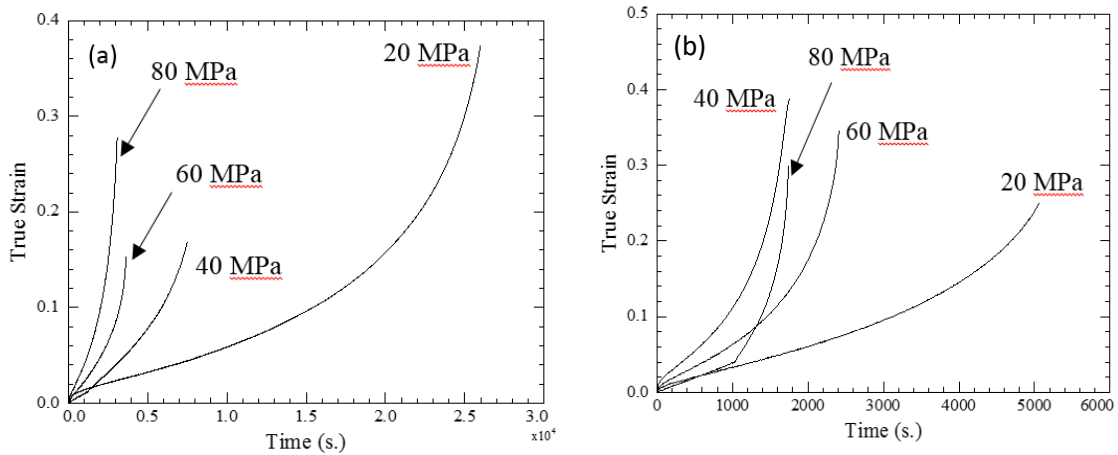


Fig. 2. Creep curves of (a) Low solid fraction ZA-27 alloy (GISS 5s),  
(b) High solid fraction ZA-27 alloy (GISS 15s)

Table 2. Minimum creep rate, rupture time and stress exponent ( $n$ ) of low solid fraction ZA-27 alloy (GISS 5s) at different stresses, at 140 °C

Stress (MPa)	Minimum Creep Rate (1/s)	Rupture time (s)	Stress Exponent ( $n$ )
20	$3.96 \times 10^{-6}$	25,946	1.45
40	$1.47 \times 10^{-5}$	7,481	
60	$1.86 \times 10^{-5}$	3,606	
80	$3.22 \times 10^{-5}$	3,074	

Table 3. Minimum creep rate, rupture time and stress exponent of high solid fraction ZA-27 alloy (GISS 15s) at different stresses, at 140 °C

Stress (MPa)	Minimum Creep Rate (1/s)	Rupture time (s)	Stress Exponent ( $n$ )
20	$2.56 \times 10^{-5}$	5,052	1.04
40	$7.18 \times 10^{-5}$	1,765	
60	$4.79 \times 10^{-5}$	2,409	
80	$1.51 \times 10^{-4}$	1,734	

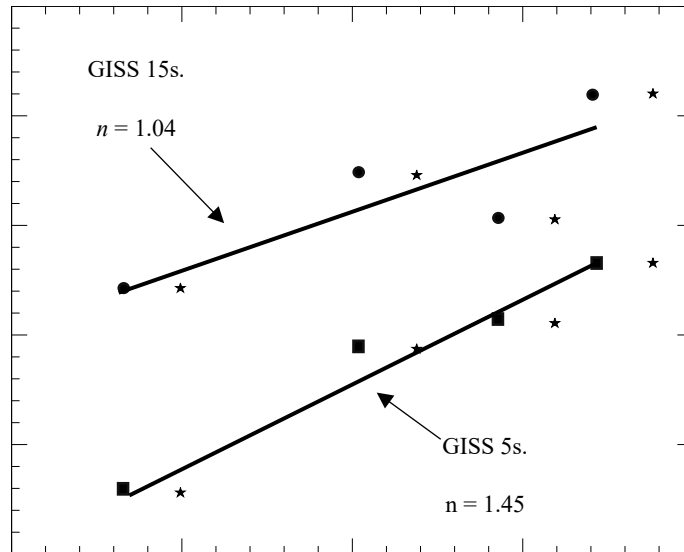


Fig. 3. Plot of  $\ln$  minimum creep rate against  $\ln$  stress of GISS 5s (■) and GISS 15s (●), at 140 °C and stresses of 20, 40, 60 and 80 MPa

**Microstructures and Fracture Surfaces.** The microstructures of low solid fraction (GISS 5s) and high solid fraction (GISS 15s) ZA-27 alloys are shown in Fig. 4. They are composed of globular and rosette grains of aluminum-rich  $\alpha$ -phase (light color) and zinc-rich  $\eta$ -phase (dark color) [9,17]. Apparently, the size of  $\alpha$ -phase of GISS 15s is larger than that of GISS 5s. The  $\alpha$ -phase of GISS 15s are also more rosette. The fracture surface of specimens after creep test observed by using scanning electron microscope (SEM) are shown in Fig. 5. The fracture surface of GISS 15s (Fig. 5 (b)) shows smaller dimples than those of GISS 5s (Fig. 5 (a)). Also, the size of fracture surface area of GISS 15s is smaller than that of GISS 5s. These evidences indicate that the GISS 15s is more ductile.

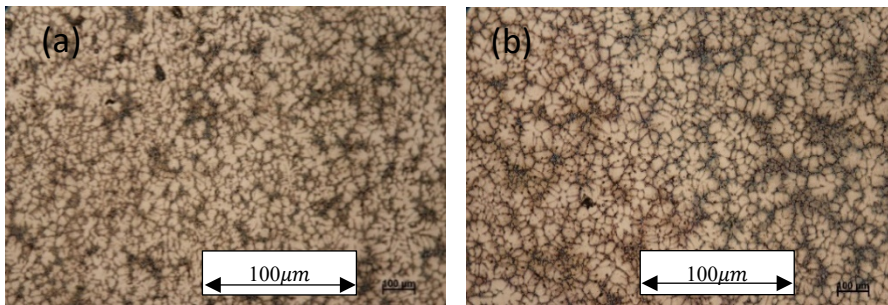


Fig. 4. OM microstructures of as-cast ZA-27, (a) GISS 5s and (b) GISS 15s

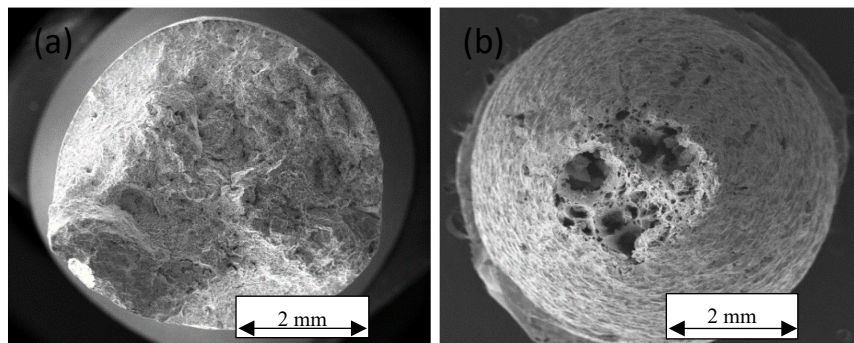


Fig. 5. SEM fracture surfaces of ZA-27 alloy after creep test, (a) GISS 5s and (b) GISS 15s



## Conclusions

From the experimental results of creep tests on the low solid fraction ZA-27 alloy (GISS 5s) compared with those of the high solid fraction ZA-27 alloy (GISS 15s), tested at 140 °C and stress range of 20-80 MPa, it can be concluded that:

1. The GISS 5s exhibits longer creep rupture time and slower creep rate than the GISS 15s. The GISS 5s has better creep resistance than the GISS 15s at the temperature and stress range tested.
2. The stress exponents,  $n$  of GISS 5s and GISS 15s are 1.04 and 1.45, respectively which are close to 1. According to the power-law creep theory, creep of both alloys should be governed by the diffusional creep mechanism.

## Acknowledgement

This research work was supported by the Higher Education Research Promotion and the National Research University Project of Thailand, Center of Excellence in Materials Engineering (CEME), the Graduate Engineering Scholarship and the Graduate school scholarship, Prince of Songkla University. The authors would like to thank the Department of Mining and Materials Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University for providing lab facilities.

## References

- [1] K.H.W. Seah, S.C. Shama and B.M. Girish: Mechanical properties of cast ZA-27/graphite particulate composites, *Materials & Design* Vol. 16 (1995).
- [2] T. Savaskan and A.P. Hekimoglu: Microstructure and mechanical properties of Zn-15Al-based ternary and quaternary alloys, *Materials Science & Engineering A* 603(2014) 52-57.
- [3] H. Sevik: The effect of silver on wear behavior of zinc-aluminium-based ZA-12 alloy produce by gravity casting, *Materials Characterization* 89 (2014) 81-87.
- [4] W. Xiao, S. Bao-luo, and Y. Yong: Negative creep during compressive creep of as-cast ZA27 alloy, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*. Vol. 13 (2003).
- [5] J.L. Jorstad, Q.Y. Pan, and D. Apelian: Solidification microstructure affecting ductility in semi-solid-cast products. *Mater. Sci. Eng.* A413–414, (2005) 186–191.
- [6] J. Wannasin, S. Janudom, T. Rattanochaikul, R. Canyook, R. Burapa, T. Chucheeep, and S. Thanabumrungrkul: Research and development of gas-induced semi-solid process for industrial, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* (2010) 1010-1015.
- [7] Z. Wen-zhi, M. Wei-min and T. Qin: Preparation of semi-solid 7075 aluminum alloy slurry by serpentine pouring channel, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* 24 (2014) 954-960.
- [8] B. Binesh and M. Aghaie-Khafri: Microstructure and texture characterization of 7075 Al during the SIMA process, *Materials Characterization* 106 (2015) 390-403.
- [9] S. Vongcharoenpon, S. Janudom and T. Plookphol: Heat treatment of a slurry squeeze-cast ZA-27 alloy at 150 °C, *Materials Science Forums* Vol.867 (2016) 14-18.
- [10] K.H.W. Seah, S.C. Shama and B.M. Girish: Mechanical properties of as-cast and heat-treated ZA-27/Silicon carbide particulate composites, *Materials & Design* Vol. 16 (1995).
- [11] W. Xiao-wei, S. Bao-luo: Effect of Zr on behavior of compressive creep in as cast ZA27 alloy, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* Vol. 13 No. 4 (2003).
- [12] ASTM international: Designation E8/E8M standard test methods for tension testing of metallic materials, (2011).

- 
- [13] ASTM international: Designation E139 Standard test method for conducting creep, creep-rupture and stress-rupture on metallic materials
- [14] R.W. Evans and B. Wilshire: Introduction to creep, Department of materials engineering university of wales Swansea, book 429 (1999) 28.
- [15] M.E. Kassner: Fundamentals of creep in metals and alloys third edition, Departments of Aerospace and Mechanical Engineering, Chemical Engineering and Materials science University of Southern California USA, (2015) 8-10.
- [16] S. Thongkam, S. Wisutmethangoon, J. Wannasin, S. Chantaramanee and T. Plookphol: Creep of rheocast 7075 aluminum alloy at 300 °C, Applied Mechanics and Materials Vol. 372 (2013) 288-291.
- [17] Y. Liu, H. Li, H. Jiang, and X. Lu: Effects of heat treatment on microstructure and mechanical properties of ZA-27 alloy, Trans. Nonferrous Met. Soc. China 23(2013) 642-649.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล	นายชินรัตน์ ปานผัน	
รหัสประจำตัวนักศึกษา	5810120068	
วุฒิการศึกษา		
วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมวัสดุ)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2557

### ทุนการศึกษา

ทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อวิทยานิพนธ์ ก้นฤดูคณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

### การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

C. Panpun, T. Plookphol and S. Janudom. Creep of Slurry Squeeze-Cast ZA-27 Zinc Alloy with Different Solid Fractions at 140°C. Materials Science Forum Vol. 928 pp.194-199. 3<sup>rd</sup> International Conference on Composite Materials and Materials Engineering, 26-28 January 2018, Singapore.