

## การแปรรูปอลูมิเนียมอัลลอยด์ AA6110 ที่อุณหภูมิสูง

### Hot Deformation of Aluminum Alloy AA6110

วาสนา วงษ์ฤทธิ์ และปฏิภาณ จุ้ยเจิม\*

Vasana Vongrit and Patiphan Juijerm\*

ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จตุจักร กรุงเทพฯ 10900

Department of Materials Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Jatujak, Bangkok 10900

\*Corresponding author, E mail: fengppj@ku.ac.th

#### บทคัดย่อ

อลูมิเนียมอัลลอยด์ AA6110 ได้ถูกนำมาใช้งานเพื่อเป็นชิ้นส่วนต่างๆ ในยานยนต์และอากาศยานอย่างแพร่หลาย โดยกระบวนการในการแปรรูปของอลูมิเนียมอัลลอยด์ AA6110 จะทำที่อุณหภูมิและอัตราความเร็วในการแปรรูปที่แตกต่างกัน ซึ่งจะมีผลทำให้อลูมิเนียมอัลลอยด์ AA6110 มีความแข็งแรงในขณะแปรรูปที่แตกต่างกัน ดังนั้นการเข้าใจในกลไกการแปรรูปของอลูมิเนียมอัลลอยด์ AA6110 ในระหว่างการผลิตที่อุณหภูมิสูงนั้นจึงมีความสำคัญและจะทำให้สามารถกำหนดและคำนวณแรงที่ใช้ในการแปรรูป รวมถึงขนาดหรือกำลังของเครื่องจักรที่จะใช้ในการแปรรูปได้ ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำศึกษาลักษณะการเปลี่ยนแปลงของความเค้น และความเครียดที่อุณหภูมิสูง (ความเค้นไหล, Flow stress) ของอลูมิเนียมอัลลอยด์ AA6110 โดยใช้การจำลองการแปรรูปร้อนแบบกดด้วยเครื่อง Deformation dilatometer ที่อุณหภูมิทดสอบ 350 450 และ 550 °C และอัตราความเครียด (Strain rate) ที่ 0.01 0.1 และ 1 s<sup>-1</sup> จากงานวิจัยพบว่าความเค้นไหลจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอัตราความเครียด และเมื่ออุณหภูมิการแปรรูปที่เพิ่มขึ้น ค่าความเค้นไหลสูงสุดจะลดลงเนื่องจากกลไกการเกิดผลึกใหม่ระหว่างการแปรรูป (Dynamic recrystallization) ที่อุณหภูมิสูง ซึ่งอิทธิพลที่กล่าวมานั้นจะส่งผลโดยตรงต่อสมบัติ และ โครงสร้างทางจุลภาคของอลูมิเนียมอัลลอยด์ AA6110

**คำสำคัญ:** การแปรรูปที่อุณหภูมิสูง; อลูมิเนียมอัลลอยด์ AA 6110; ความเค้น; ความเครียด

#### Abstract

Aluminum alloy AA6110 has been widely used for automotive and aerospace components. This study is a deformation process of aluminum alloy AA6110 performed at elevated temperatures with different stain rates. Consequently, the strength of aluminum alloy AA6110 alters during a hot deformation process. Therefore, an understanding of deformation mechanisms at elevated temperatures with different stain could be applied to the calculation and determination of force as well as power of a deformation machine. In this research, flow stresses and stress-strain curves at temperatures of 350, 450 and 550 °C with different strain rates of 0.01, 0.1 and 1 s<sup>-1</sup> were

investigated using a hot deformation dilatometer. It was found out that the flow stresses increased correlatively with increasing strain rates at the investigated temperatures. However, for the similar strain rate, the flow stress decreased after reaching a maximum stress. This manner could be contribute to the dynamic recrystallization mechanism occurred during the hot deformation, which directly affected the microstructure and properties of the aluminum alloy AA6110.

**Keywords:** Hot deformation; Aluminum alloy AA6110; Stress; Strain

## 1. บทนำ

ในปัจจุบันอลูมิเนียมอัลลอยด์ถูกนำมาใช้งานด้านอุตสาหกรรมยานยนต์ และอากาศยานอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีสมบัติเด่นหลายด้าน เช่น มีความแข็งแรง น้ำหนักเบา ทนต่อการกัดกร่อน และสามารถแปรรูปได้ง่าย ทำให้อลูมิเนียมอัลลอยด์ถูกนำมาประยุกต์ใช้เป็นส่วนในอุตสาหกรรมยานยนต์และอากาศยานอย่างต่อเนื่อง อลูมิเนียมอัลลอยด์ AA6xxx เป็นกลุ่มที่นำมาใช้งานกันมากในปัจจุบัน โดยอลูมิเนียมในกลุ่มนี้จะมีส่วนผสมหลัก ได้แก่ แมกนีเซียม (Magnesium, Mg) และซิลิกอน (Silicon, Si) (ณรงค์ศักดิ์ ธรรม โษคติ 2556) ซึ่งสามารถเพิ่มความแข็งแรงได้ด้วยกระบวนการตกผลึกของแข็ง (Precipitation hardening) โดยทั่วไปอลูมิเนียมอัลลอยด์ต้องผ่านกระบวนการแปรรูปก่อนจะนำไปใช้ และกระบวนการแปรรูปนั้นก็จะมีความเร็วในการแปรรูปเข้ามาเกี่ยวข้อง เช่น กระบวนการอัดรีดขึ้นรูป (Extrusion process) จะใช้อัตราความเร็วในการขึ้นรูป  $0.01-1 \text{ s}^{-1}$  หรือ กระบวนการทุบขึ้นรูป (Forging process) จะใช้อัตราความเร็วในการขึ้นรูปที่  $1-10 \text{ s}^{-1}$  เป็นต้น (Thossatheppitak, 2014) ดังนั้นเพื่อให้ทราบถึงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของอลูมิเนียมอัลลอยด์ขณะแปรรูปที่อุณหภูมิสูง โดยการศึกษาลักษณะของการเปลี่ยนแปลงความเค้น-ความเครียด ของอลูมิเนียมอัลลอยด์ขณะแปรรูปที่มีแรงมากระทำที่อุณหภูมิสูง เพื่อดูกลไกของการเปลี่ยนแปลงนั้นๆ และนำมาเป็นแนวทางในการเลือกอัตราความเร็ว และอุณหภูมิที่ใช้ให้เหมาะสมกับกระบวนการผลิต เพิ่มประสิทธิภาพและลดเวลาในกระบวนการแปรรูปอลูมิเนียมอัลลอยด์ (Bruschi, 2004) เนื่องจากกลไกและลักษณะการเปลี่ยนแปลงความเค้น-ความเครียดที่อุณหภูมิสูงของโลหะแต่ละชนิดมีความแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ส่วนผสมทางเคมี โครงสร้างจุลภาคของโลหะ รวมไปถึงอุณหภูมิและความเร็วที่ใช้ในการแปรรูปจึงทำให้ในปัจจุบันมีการศึกษาลักษณะการเปลี่ยนแปลงความเค้น-ความเครียดที่อุณหภูมิสูงของโลหะหลากหลายชนิด (Liu, 2009), (Chen L., 2015) การทดสอบการกดขึ้นรูปร้อนนั้นเป็นวิธีที่จะเป็นไปได้ในการจำลองกลไกการแปรรูปของอลูมิเนียมอัลลอยด์ที่อุณหภูมิสูงได้ โดยการศึกษาความสัมพันธ์ของอัตราการไหลของความเค้นและอัตราการไหลของความเครียดที่อุณหภูมิต่างๆ ที่สนใจ (Shi, 2013), (Chen W., 2016) ระหว่างการแปรรูปที่อุณหภูมิสูงของอลูมิเนียมอัลลอยด์ จากกระบวนการทดสอบการกดขึ้นรูปนี้ทำให้ทราบถึงพฤติกรรมของความเครียดไหลและวิวัฒนาการของโครงสร้างจุลภาค ซึ่งจะเปลี่ยนไปตามเงื่อนไขในการแปรรูปร้อนนั้นๆ

โดยงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาลักษณะการเปลี่ยนแปลงความเค้น-ความเครียดที่อุณหภูมิสูงของอลูมิเนียมอัลลอยด์ AA6110 ในขณะที่ถูกแปรรูปที่อุณหภูมิสูงและที่ความเร็วในการแปรรูป (อัตราความเครียด) ที่แตกต่างกัน โดยจากการศึกษาจะทำให้เราทราบการเปลี่ยนแปลงของค่าความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นขณะเริ่มต้นจนถึงจบกระบวนการรวมถึงค่าความเค้นจริงและความเครียดจริง ) และกลไกที่เกิดขึ้นในขณะที่แปรรูปอลูมิเนียมอัลลอยด์

AA6110 ที่อุณหภูมิสูง ซึ่งสามารถใช้เป็นแนวทางในการกำหนดและคำนวณแรงที่ใช้ในการแปรรูป ขนาดหรือกำลังของเครื่องจักรที่จะใช้ในการแปรรูป รวมทั้งสามารถกำหนดสมบัติทางกลของผลิตภัณฑ์ หรือชิ้นส่วนที่ผ่านกระบวนการแปรรูปได้

## 2. วัตถุประสงค์

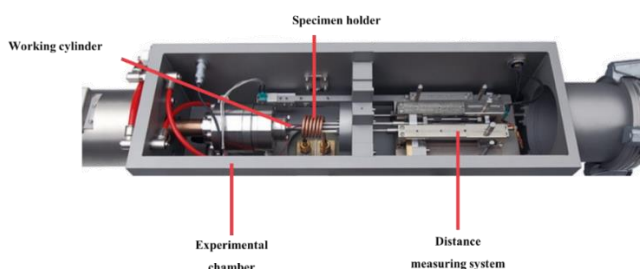
1. ศึกษากลไกการแปรรูปของอลูมิเนียมอัลลอยด์ AA6110 ขณะร้อนต่อลักษณะการเปลี่ยนแปลงความเค้น – ความเครียด

## 3. อุปกรณ์และวิธีการ / วิธีดำเนินการวิจัย

วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ อลูมิเนียมอัลลอยด์ AA6110 ที่ผ่านการอบละลายแล้วทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วและนำไปบ่มแข็งเทียม (T6) ซึ่งมีส่วนผสมทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งจะถูกตัดแต่งให้เป็นรูปทรงกระบอกขนาดเล็กที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 5 มิลลิเมตรและมีความยาวขนาด 10 มิลลิเมตร หลังจากนั้นจะทำการทดสอบการจำลองการกดแปรรูปร้อนด้วยเครื่อง Deformation dilatometer รุ่น 805/D จากบริษัท Baehr ซึ่งเป็นเครื่องมือสำคัญในการศึกษากระบวนการขึ้นรูปร้อนโดยมีฟังก์ชันที่สามารถปรับให้ความร้อนแก่ชิ้นงานตัวอย่างในสภาพบรรยากาศควบคุมหรือสุญญากาศและสามารถทำการขึ้นรูปร้อนขึ้นงานตัวอย่างตลอดจนควบคุมอัตราการเย็นตัวเมื่อเสร็จสิ้นการขึ้นรูป จึงสะดวกในการจำลองสภาวะที่ใกล้เคียงกับกระบวนการผลิตจริง ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งภายในเครื่องขณะทำการทดสอบที่อุณหภูมิสูงจะถูกควบคุมให้เป็นสุญญากาศ อัตราความร้อนที่ให้กับชิ้นงานเท่ากับ  $10^{\circ}\text{C s}^{-1}$  เมื่อถึงอุณหภูมิทดสอบที่ 350 450 และ 550  $^{\circ}\text{C}$  จะทำการให้ความร้อนคงที่เป็นระยะเวลา 1 นาที เพื่อให้ความร้อนกระจายตัวทั่วทั้งชิ้นงาน หลังจากนั้นจะทำการกดขึ้นงานด้วยอัตราความเครียดที่ 0.01 0.1 และ  $1 \text{ s}^{-1}$  โดยจะหยุดกดขึ้นงานเมื่อชิ้นงานมีความยาวลดลงเหลือ 5 มิลลิเมตร หรือมีค่าความเครียดประมาณ 50% จากนั้นจะทำการลดอุณหภูมิของชิ้นงานอย่างรวดเร็ว (Quench) ด้วยก๊าซอาร์กอนด้วยอัตราการเย็นตัวที่  $40^{\circ}\text{C s}^{-1}$

ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีของอลูมิเนียมอัลลอยด์ AA6110 (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)

| Si   | Fe   | Cu   | Mn   | Mg   | Cr   | Zn   | Ti   | Al   |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0.86 | 0.19 | 0.45 | 0.46 | 0.78 | 0.17 | 0.02 | 0.01 | Bal. |

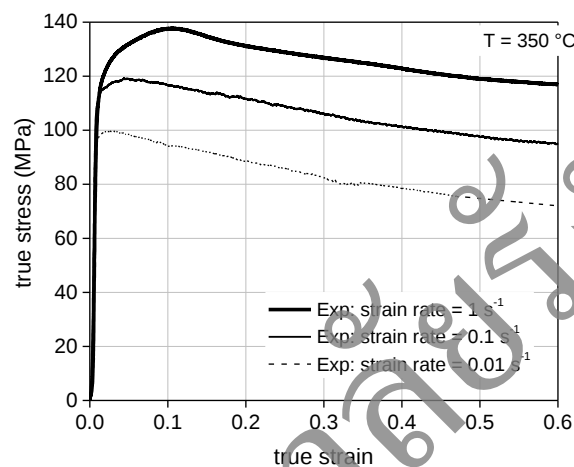


รูปที่ 1 เครื่องทดสอบ Deformation dilatometer รุ่น 805/D จากบริษัท Baehr

#### 4. ผลการวิจัย

##### 4.1 การแปรรูปอลูมิเนียมอัลลอยด์ AA6110 ที่อุณหภูมิ 350 °C และอัตราความเครียด 0.01 0.1 และ 1 s<sup>-1</sup>

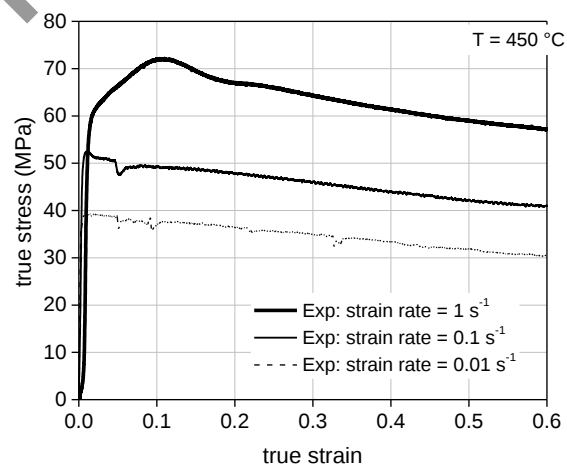
จากการทดสอบพบว่าเมื่ออัตราความเครียดเพิ่มขึ้น ค่าความเค้นจริงจะเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งค่าความเค้นครากของอลูมิเนียมอัลลอยด์ AA6110 ที่อุณหภูมิ 350 °C และอัตราความเครียดที่ 0.01 0.1 และ 1 มีค่าเท่ากับ 95.605 109.939 และ 113.464 MPa ตามลำดับ



รูปที่ 2 กราฟแสดงความเค้นจริง-ความเครียดจริงที่อุณหภูมิ 350 °C และอัตราความเครียด 0.01 0.1 และ 1 s<sup>-1</sup>

##### 4.2 การแปรรูปอลูมิเนียมอัลลอยด์ AA6110 ที่อุณหภูมิ 450 °C และอัตราความเครียด 0.01 0.1 และ 1 s<sup>-1</sup>

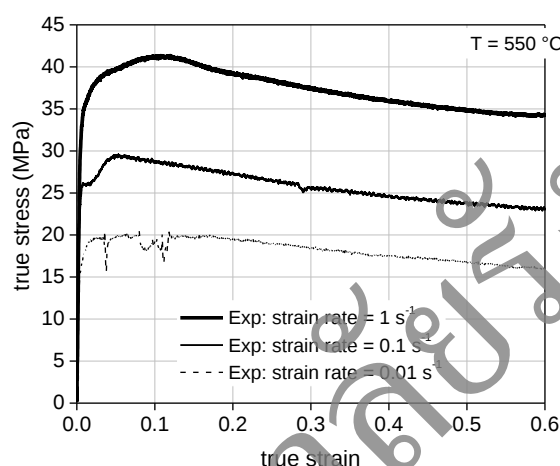
จากการทดสอบพบว่าเมื่ออัตราความเครียดเพิ่มขึ้น ค่าความเค้นจริงจะเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งค่าความเค้นครากของอลูมิเนียมอัลลอยด์ AA6110 ที่อุณหภูมิ 450 °C และอัตราความเครียดที่ 0.01 0.1 และ 1 s<sup>-1</sup> มีค่าเท่ากับ 37.567 51.418 และ 56.485 ตามลำดับ



รูปที่ 3 กราฟแสดงความเค้นจริง-ความเครียดจริงที่อุณหภูมิ 450 °C และอัตราความเครียด 0.01 0.1 และ 1 s<sup>-1</sup>

#### 4.3 การแปรรูปอลูมิเนียมอัลลอยด์ AA6110 ที่อุณหภูมิ 550 °C และอัตราความเครียด 0.01 0.1 และ 1 s<sup>-1</sup>

จากการทดสอบพบว่าเมื่ออัตราความเครียดเพิ่มขึ้น ค่าความเค้นจริงจะเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งค่าความเค้นครากของอลูมิเนียมอัลลอยด์ AA6110 ที่อุณหภูมิ 550 °C และอัตราความเครียดที่ 0.01 0.1 และ 1 s<sup>-1</sup> มีค่าเท่ากับ 16.125 25.151 และ 35.796 ตามลำดับ

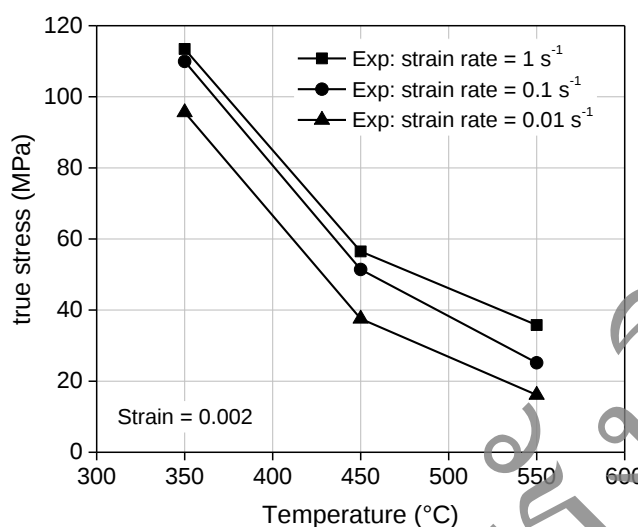


รูปที่ 4 กราฟแสดงความเค้นจริง-ความเครียดจริงที่อุณหภูมิ 550 °C และอัตราความเครียด 0.01 0.1 และ 1 s<sup>-1</sup>

## 5. การอภิปรายผล

### 5.1 การแปรรูปอลูมิเนียมอัลลอยด์ AA6110

การแปรรูปที่อุณหภูมิสูงจะเกิดกลไกการทำให้แข็งด้วยความเครียดและการอ่อนตัวในระหว่างการแปรรูปที่อุณหภูมิสูงขึ้น พบว่าความเค้นจะเพิ่มขึ้นในช่วงแรกของการเสียรูปอย่างถาวร (Bert Verlinden, 2007) เนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณดิสโลเคชัน ทำให้มีความหนาแน่นของดิสโลเคชัน (dislocation density) เพิ่มขึ้นซึ่งส่งผลให้อัตราการทำให้แข็งด้วยความเครียดในช่วงเริ่มต้นมีผลมากกว่าผลของการอ่อนตัวในระหว่างการแปรรูปที่อุณหภูมิสูง จากนั้นอัตราการทำให้แข็งด้วยความเครียดจะค่อยๆ ลดลงจนค่าความเค้นมีค่าสูงสุด ซึ่ง ณ จุดที่มีค่าความเค้นสูงสุดคือจุดสมดุลระหว่างการทำให้แข็งด้วยความเครียดและการอ่อนตัว (การคืนตัว (dynamic recovery)) ในระหว่างการแปรรูปที่อุณหภูมิสูง หลังจากนั้นค่าความเค้นจะค่อยๆ ลดลงจนเข้าสู่สภาวะคงที่ ถ้าอุณหภูมิในการแปรรูปมีค่าที่สูงมากกว่าอุณหภูมิในการเกิดผลึกใหม่ ค่าความเค้นจะลดลงอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากอัตราของการอ่อนตัวระหว่างการแปรรูปที่ประกอบด้วย การคืนตัวและการเกิดผลึกใหม่ มีผลมากกว่าอัตราการทำให้แข็งด้วยความเครียด



รูปที่ 5 แสดงค่าความเค้นที่ค่าความเครียดเท่ากับ 0.002 ที่อุณหภูมิ 350 450 และ 550 °C

## 5.2 อิทธิพลของอุณหภูมิต่อการแปรรูปอลูมิเนียมอัลลอยด์ AA6110

จากผลการทดสอบในรูปที่ 2, 3 และ 4 สามารถรวบรวมค่าความเค้นที่ค่าความเครียดเท่ากับ 0.002 ในทุกอุณหภูมิและอัตราความเครียดที่ใช้ในการทดสอบ ได้ ดังแสดงในรูปที่ 5 จากกราฟพบว่าค่าความเค้นมีแนวโน้มที่ลดลงตามอุณหภูมิการทดสอบที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นไปตามปกติที่โลหะจะมีความแข็งแรงลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น นอกจากนั้นในขณะทำการแปรรูปที่อุณหภูมิสูงจะทำให้เกิดกลไกการเกิดผลึกใหม่เกิดขึ้นในอลูมิเนียมอัลลอยด์ AA6110 ทำให้ลักษณะของกราฟความเค้น-ความเครียด มีแนวโน้มที่ความเค้นลดลงเมื่อความเครียดสูงขึ้น

## 5.3 อิทธิพลของอัตราความเครียดต่อการแปรรูปอลูมิเนียมอัลลอยด์ AA6110

จากผลทดสอบในรูปที่ 2 3 4 และรูปที่ 5 พบว่าค่าความเค้นจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อทดสอบด้วยอัตราความเครียดที่สูงขึ้น จากการทดสอบที่อัตราความเครียดที่สูงขึ้นนั้นมีความหนาแน่นของดิสโลเคชันเพิ่มมากขึ้น (Bert Verlinden, 2007) มากกว่าการทดสอบที่อัตราความเครียดที่ต่ำกว่า ทำให้อัตราการทำให้แข็งด้วยความเครียดมีค่าเพิ่มมากขึ้นด้วย มีผลทำให้ความเค้นมีค่าสูงขึ้นในทุกอุณหภูมิของการทดสอบ

## 6. บทสรุป

จากการทดสอบความลักษณะการเปลี่ยนแปลงความเค้น-ความเครียดของอลูมิเนียมอัลลอยด์ AA6110 ที่อุณหภูมิสูงซึ่งเป็นการจำลองการกดแปรรูปร้อนด้วยเครื่อง Deformation dilatometer โดยการปรับเปลี่ยน อุณหภูมิและอัตราความเครียดในช่วงที่สนใจนั้น สรุปได้ว่า

6.1 ในระหว่างการแปรรูปที่อุณหภูมิสูงนั้น จะเกิดกลไกการทำให้แข็งด้วยความเครียดและการอ่อนตัวระหว่างการแปรรูป ซึ่งค่าความเค้นที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการแปรรูปนั้นเป็นผลจากการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของความหนาแน่นของดิสโลเคชัน ซึ่งอัตราการทำให้แข็งด้วยความเครียดมีมากกว่าการอ่อนตัว และหลังจากนั้นจะเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุดและจะค่อยๆลดลงจนถึงสภาวะคงที่

6.2 ค่าความเค้นมีแนวโน้มลดลงตามอุณหภูมิการทดสอบที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นผลจากกระบวนการแปรรูปที่อุณหภูมิสูงนั้นเกิดกลไกการเกิดผลึกใหม่ ในออลูมิเนียมอัลลอยด์ AA6110 ทำให้ลักษณะของกราฟความเค้นความเครียด มีแนวโน้มที่มีความเค้นลดลง เมื่อความเครียดสูงขึ้น

6.3 ค่าความเค้นจะมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่ออัตราความเครียดสูงขึ้น ซึ่งเป็นผลจากความหนาแน่นของดิสโลเคชันที่มากขึ้น และส่งผลให้อัตราการทำให้แข็งด้วยความเครียดมีค่าเพิ่มมากขึ้น

## 7. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และสถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้งานเครื่องมือทดสอบสำหรับงานวิจัยในครั้งนี้

## 8. เอกสารอ้างอิง

- ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ (2556) โลหะวิทยา Metallurgy. 1. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- Bruschi, S., S. Poggio, F. Quadrini and M.E. Tala. (2004) Workability of Ti-6Al-4V Alloy at High Temperatures and Strain Rates. *Materials Letters*. 58(27-28): 3622-3629.
- Bert Verlinden, J. D. Indradev Samajdar and Roger D. Doherty (Ed.). (2007). Chapter 14 Thermo-mechanical processing of aluminium alloys. In *Pergamon Materials Series* (Vol. 11, pp. 365-404)
- Chen, L., G. Zhao and J. Yu. (2015) Hot Deformation Behavior and Constitutive Modeling of Homogenized 6026 Aluminum Alloy. *Materials & Design*. 74(25-35).
- Chen, W., Y.-p. Guan and Z.-h. Wang. (2016) Hot Deformation Behavior of High Ti 6061 Al Alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 26(2): 369-377
- Liu, X.Y., Q.L. Pan, Y.B. He, W.B. Li, W.J. Liang and Z.M. Yin. (2009) Flow Behavior and Microstructural Evolution of Al-Cu-Mg-Ag Alloy During Hot Compression Deformation. *Materials Science and Engineering: A*. 500(150-154).
- Shi, C., W. Mao and X.G. Chen. (2013) Evolution of Activation Energy during Hot Deformation of Aa7150 Aluminum Alloy. *Materials Science and Engineering: A*. 571(83-91).
- Thossatheppitak, B., V. Uthaisangsuk, P. Mungsuntisuk, S. Suranuntchai and A. Manonukul. (2014) Flow Behavior of Nickel Aluminum Bronze under Hot Deformation. *Materials Science and Engineering: A*. 604(183-190).