

## อิทธิพลการแปรรูปเย็นและการอบอ่อนที่มีผลต่อพฤติกรรมการติดตัวกลับ ของอะลูมิเนียมแผ่น

สุรศิษฐ์ โรจนพันธ์<sup>1</sup> สุทัศน์ ทิพย์ปรักมาศ<sup>1</sup> สิริพร โรจนพันธ์<sup>2</sup>

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี บางมด กรุงเทพฯ 10140

ธรนิษฐ์ ไชยเรืองศรี<sup>3</sup> และ สุทธาวลัย อิมอุไร<sup>4</sup>

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เชียงใหม่ 50202

### บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ เพื่อศึกษาอิทธิพลของการแปรรูปเย็นและการอบอ่อนที่มีต่อสมบัติทางกลและการติดตัวกลับของอะลูมิเนียมผสมแมงกานีส เริ่มจากนำชิ้นงานไปอบโฮโมจีไนส์ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง หลังจากนั้นปล่อยให้ชิ้นงานเย็นในเตาภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน นำชิ้นงานไปรีดเย็นมีปริมาณการแปรรูป 50 ถึง 87 เปอร์เซ็นต์ มีความหนาสุดท้าย 1 มม. ศึกษาสมบัติทางกลและวัดมุมการคืนตัว นำชิ้นงานที่แปรรูป 87 เปอร์เซ็นต์ไปอบอ่อนที่อุณหภูมิต่างๆ กันช่วง 100 ถึง 600 องศาเซลเซียส ใช้เวลาคงที่ 30 นาที ทดสอบสมบัติต่างๆ ผลการทดสอบแรงดึง พบว่าชิ้นงานที่แปรรูปเย็น 87 เปอร์เซ็นต์ ความต้านแรงดึงสูงสุด 244 เมกกะปาสคาล มีความแข็ง 79 วิกเกอร์ มุมการติดกลับ 6.5 องศา ส่วนชิ้นงานอะลูมิเนียมที่รีดแปรรูปต่ำสุด 50 เปอร์เซ็นต์ มีความต้านแรงดึงสูงสุด 185 เมกกะปาสคาล มีความแข็ง 52 วิกเกอร์ มุมการติดตัวกลับ 4.5 องศา การอบอ่อนแต่ละอุณหภูมิสามารถลดมุมการติดตัวกลับได้ปริมาณแตกต่างกัน การอบที่อุณหภูมิสูงกว่า 400 องศาเซลเซียสขึ้นไป สามารถลดการติดตัวกลับได้หมด 100 เปอร์เซ็นต์ แต่อย่างไรก็ตามหลังการอบอ่อนมีผลให้ความแข็งแรงลดลง จึงต้องคำนึงถึงการรับแรงขณะใช้งาน ประโยชน์ที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถใช้เป็นแนวทางในการเลือกใช้อุณหภูมิอบให้เหมาะสมกับความต้องการในการลดปริมาณการติดตัวกลับของชิ้นงาน เป็นประโยชน์ด้านการแปรรูปที่ช่วยลดปัญหาการแก้ไขแม่พิมพ์หรือลดต้นทุนการทำแม่พิมพ์ชุดใหม่ได้

**คำสำคัญ** : การติดตัวกลับ / การรีดเย็น / การตัดงอ / โลหะอะลูมิเนียมผสม / การอบอ่อน

<sup>1</sup> อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์

<sup>2</sup> อาจารย์ สายวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ

<sup>3</sup> อาจารย์ ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์

<sup>4</sup> นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

## Effect of Cold Working and Annealing on Springback Behavior in Aluminium Sheet

Surasit Rojanananan <sup>1</sup>, Sutasn Thipprakmas <sup>1</sup>, Siriporn Rojanananan <sup>2</sup>

King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangmod, Toongkru, Bangkok 10140

Torranin Chairuangsrri <sup>3</sup>, and Suttawan Imurai <sup>4</sup>

Chiang Mai University, Chiang Mai 50202

### Abstract

The purpose of this project is to study the effect of cold working and annealing on springback behaviors of Al-Mn alloy. The received samples were homogenized at 550 °C for 5 hours before subsequently cold rolled to 1 mm thickness (50-87 percent of reduction). 87% reduction samples were annealed in various temperatures in the range of 100 to 600 °C, for 30 minutes. The results showed that tensile strength and hardness of the as-rolled samples with 87 % cold work were 244 MPa and 79 HV, respectively. A springback angle was 6.5 degree. After annealing of all conditions, tensile strength and hardness decreased with increasing the annealing temperatures. After annealing at 400 °C, tensile strength and hardness of samples were 139 MPa and 40 HV, respectively, resulting in reduction of springback. It could be concluded that the annealing temperature above 400 °C could reduce the springback completely. However, it should be beared in mind that the tensile strength of samples normally reduces after annealing. Annealing temperature selection on press forming sheet metal process to reduce springback behavior of Al-Mn alloy should therefore be compromised which is fruitful to eliminate the mold correction or to reduce cost in a suitable mold making.

**Keywords :** Springback / Cold Rolling / Bending / Aluminium Alloys / Annealing.

---

<sup>1</sup> Lecturer, Department of Tool and Materials Engineering, Faculty of Engineering.

<sup>2</sup> Lecturer, Division of Materials Technology, School of Energy, Environment and Materials.

<sup>3</sup> Lecturer, Department of Industrial Chemistry, Faculty of Science.

<sup>4</sup> Graduate Student, Department of Physics, Faculty of Science.

## 1. คำนำ

เป็นที่ทราบกันว่าอะลูมิเนียมผสมแมงกานีส (เกรด 3xxx) ไม่สามารถปรับปรุงคุณสมบัติทางกรรมวิธีทางความร้อนได้ แต่เพิ่มความแข็งแรงและความต้านแรงดึงได้โดยการแปรรูปเย็น อะลูมิเนียมผสมแมงกานีสมีความแข็งแรงปานกลาง ประมาณ 27 BHN [1] ความหนาแน่นต่ำ เชื่อมได้ดี สามารถแปรรูปได้ดี สามารถแปรรูปได้ที่อุณหภูมิปกติ เช่น การขึ้นรูปด้วยการบีบ การตัด การทุบ การรีด นำไปใช้ทำผลิตภัณฑ์ต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเหมาะสำหรับทำภาชนะบรรจุอาหาร เครื่องดื่ม ท่อ อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน แต่อย่างไรก็ตามพบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการบีบและการตัดขึ้นรูป มักพบปัญหาการติดตัวกลับ [2]

พฤติกรรมการติดตัวกลับของวัสดุ อธิบายได้จากการเปลี่ยนรูปที่เกิดขึ้นหลังการเคลื่อนที่พิมพอกในการขึ้นรูป โดยเฉพาะอย่างยิ่งงานขึ้นรูปโลหะแผ่น เนื่องจากเนื้อวัสดุตรงบริเวณเส้นแวงกลางของแผ่น มีความเค้นเกิดขึ้นไม่สูงมากอยู่ในช่วงยืดหยุ่น (elastic deformation) เมื่อยกพื้นออกจากตาย เนื้อวัสดุส่วนนี้จะพยายามติดตัวกลับสู่รูปร่างเดิม แต่เนื้อวัสดุที่อยู่ห่างเส้นแวงกลางจะมีความเค้นเกิดขึ้นเกินจุดครากเป็นตัวทำให้พยายามต้านการกลับสู่รูปร่างเดิม [3] ดังนั้นเมื่อตัดต่อวัสดุจนเปลี่ยนรูปร่างแล้ว จะยังคงมีเนื้อวัสดุบางส่วนยังอยู่ในสภาวะยืดหยุ่นปนอยู่บ้าง จึงเป็นผลให้เกิดการติดตัวกลับของวัสดุไม่เป็นไปตามมองศาของการตัดงอ [4] โดยปกติแนวโน้มการติดตัวกลับ ในวัสดุมีค่าสูง เมื่อวัสดุมีอัตราส่วนของความต้านแรงดึงต่อค่ามอดูลัส (strength to modulus ratio) มีค่าสูง เช่น อะลูมิเนียม และเหล็กกล้าแข็งแรงสูง [5] เป็นต้น วัสดุเหล่านี้มีความสำคัญในอุตสาหกรรมยานยนต์ เนื่องจากต้องการลดน้ำหนักรถลง และเพิ่มประสิทธิภาพของการใช้น้ำมันเชื้อเพลิง

การเกิดพฤติกรรมการติดตัวกลับของโลหะ เป็นสาเหตุให้เกิดปัญหาในการขึ้นรูปไม่เป็นไปตามความต้องการตามขนาดและรูปร่างของแม่พิมพ์ที่ใช้ จึงต้องมีกระบวนการแม่พิมพ์ในการชดเชยการติดตัวกลับ การป้องกันการติดตัวกลับนั้นมีหลายวิธี เช่น ใช้การกดตัดกระแทก การยึด

ก่อนการตัดงอ ดัดงอให้มากกว่าที่ต้องการ โดยการทดลองแบบลองผิดลองถูก จากงานวิจัยที่ผ่านมา [6] รายงานว่าการลดพฤติกรรมการติดกลับของโลหะ สามารถทำได้โดยการลดค่าความต้านแรงดึงสูงสุด นอกจากนี้ Moon และคณะ [7] รายงานว่า การตัดขึ้นรูปอะลูมิเนียมแผ่นเกรด 1050 หนา 0.8 มม. เป็นรูปตัวยู โดยการให้ความร้อนตายมีอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส และพื้นช้เย็นอุณหภูมิต่ำกว่าศูนย์องศา มีค่า -10 องศาเซลเซียส สามารถลดปริมาณการติดตัวกลับได้ 20% เมื่อเทียบกับการตัดขึ้นรูปโดยใช้พื้นช้และตายที่อุณหภูมิห้อง

ปัจจัยอื่นที่มีผลต่อการติดตัวกลับของโลหะ มีอีกหลายอย่าง เช่น ชนิดของโลหะ ความแข็งแรงของโลหะ ความหนาของแผ่นโลหะ รัศมีการตัดงอและแรงที่ใช้ในการขึ้นรูป เป็นต้น การทำนายค่ามุมการติดตัวกลับอย่างถูกต้องล่วงหน้า จึงเป็นประโยชน์ในการลดเวลาในการออกแบบให้สั้นลง ประหยัดเวลาและต้นทุน ปัจจุบันมีงานวิจัยเกี่ยวกับการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยทำนายมุมการติดตัวกลับของวัสดุกับอย่างแพร่หลาย เพื่อที่จะนำข้อมูลมาช่วยในการออกแบบแม่พิมพ์ให้ผิดพลาดน้อยลงด้วย [8] นอกจากนี้ หากทราบข้อมูลของมุมการติดตัวของโลหะที่แน่นอน จะยังเป็นประโยชน์อย่างมากในภาคอุตสาหกรรม เช่น การบีบขึ้นรูป ครีบริบายความร้อน (finstock) เป็นชิ้นส่วนที่ไม่ต้องการให้เกิดปัญหาการติดตัวกลับ ในขณะที่ลักษณะการทำงานต้องการความแข็งแรงระดับปานกลาง ดังนั้นจึงเป็นที่มาของงานวิจัยที่จะศึกษาวิธีการลดพฤติกรรมการติดตัวของอะลูมิเนียมแผ่น วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ เพื่อทราบอิทธิพลของอุณหภูมิต่ออุณหภูมิที่ส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาคสมบัติทางกล และมุมการติดตัวกลับของอะลูมิเนียมแผ่นที่ได้จากการรีดเย็นหนา 1 มม. โดยการอบอ่อนที่อุณหภูมิต่างกัน ใช้เวลาและตัวแปรอื่นคงที่ และเพื่อให้ได้ข้อมูลที่ เป็นประโยชน์สำหรับภาคอุตสาหกรรมที่ต้องการขึ้นรูปชิ้นงานอะลูมิเนียม โดยไม่ต้องลองผิดลองถูกในการออกแบบแม่พิมพ์พื้นช้ตายใหม่

## 2. วิธีการทดลอง

อะลูมิเนียมผสมแมงกานีสแผ่นเริ่มต้น (As-received

sample) ที่ใช้ในการทดลอง ได้รับความอนุเคราะห์จาก โรงงานผลิตแห่งหนึ่ง ได้จากการหล่อแบบต่อเนื่อง (Continuous cast processing) โดยการเทโลหะ อะลูมิเนียมเหลวผ่าน Rotating steel belts เพื่อหล่อเป็น แผ่นหนาเรียกว่าสแลบ (slab) แล้วนำสแลบไปรีดร้อน ผ่านชุดลูกรีดร้อน 3 แท่น รีดต่อๆ กัน จนกระทั่งได้ความ หนาที่ต้องการเริ่มต้น 7.8 มม. ตัดเป็นชิ้นกว้าง 25 มม. และยาว 150 มม. วิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีโดยเครื่อง สเปกโตรสโคป มีค่าเฉลี่ยของธาตุดังนี้ 0.48%Mn, 0.36%Mg, 0.66%Si, 0.72%Fe, 0.30%Cr, 0.05%Ti, 0.007%B ที่เหลือเป็น Al (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) จากการเปรียบเทียบเกรดของอะลูมิเนียมผสมที่ได้จดทะเบียนไว้ กับ The Aluminium Association (Registration Record of International Alloys Designations and Chemical Composition Limits for Wrought Aluminium and Wrought Aluminium Alloys) [9] สามารถเทียบเคียง ได้กับเกรด 3105 ซึ่งมีส่วนผสมของ 0.3-0.8%Mn, 0.2-0.8Mg, 0.6%Si, 0.7%Fe, 0.2%Cr, 0.4%Zn, 0.1%Ti, 0.2%ธาตุอื่นๆ และที่เหลือเป็นอะลูมิเนียม ศึกษา โครงสร้างจุลภาคและทดสอบความแข็งแรงแบบจุลภาคของ

ชิ้นงานเริ่มต้น นำชิ้นงานไปทำการอบโฮโมจีไนส์ (homogenization) โดยนำชิ้นงานอบด้วย อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ด้วยเตาควบคุมบรรยากาศ ก๊าซไนโตรเจน ปล่อยให้ชิ้นงานให้เย็นตัวช้าๆ ภายในเตาอบ นำชิ้นงานไปทดสอบความแข็งแรงจุลภาค และศึกษาโครงสร้าง จุลภาคหลังการอบละลายเฟส

จากนั้นนำชิ้นงานไปรีดเย็นด้วยเครื่องรีดชนิด Two-roll mill ลดความหนาตามปริมาณการแปรรูปที่ต้องการ ตั้งแต่ 50 ถึง 87% มีความหนาสุดท้าย 1 มม. เท่ากัน ทั้งหมด ปริมาณการแปรรูปเย็นของชิ้นงาน แสดงในตาราง ที่ 1 ทดสอบความแข็งแรงดึง ทดสอบการตีดตัวกลับ และศึกษาโครงสร้างจุลภาคงานรีด หลังจากนั้น นำชิ้นงานที่มีปริมาณการแปรรูป 87% ไปทำการอบอ่อน ด้วยการอบที่อุณหภูมิต่างๆ กันตั้งแต่ 100, 150, 200, 250, 300, 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลาคงที่ 30 นาที ปล่อยให้ชิ้นงานให้เย็นตัวภายในเตาอบภายใต้ บรรยากาศก๊าซไนโตรเจน ทดสอบความแข็งแรงดึง ทดสอบการตีดตัวกลับ และศึกษาโครงสร้างจุลภาค ของชิ้นงานภายหลังจากอบอ่อน

**ตารางที่ 1** เปอร์เซ็นต์การแปรรูปเย็นของอะลูมิเนียมแผ่นที่มีความหนาสุดท้าย 1.00 มม.

ความหนาเริ่มต้น (มม.)	2.0	3.0	4.0	5.5	7.8
การแปรรูปเย็น (%)	50.0	67.0	75.0	80.0	87.2

การทดสอบความแข็งแรงแบบจุลภาคใช้สเกลวิกเกอร์ หัวกดเพชร ใช้แรงกด 300 ก. เวลากด 15 วินาที บริเวณ ผิวแนวรีด (longitudinal direction) หาค่าเฉลี่ยจากจำนวน วัด 10 จุด การทดสอบแรงดึงใช้เครื่องทดสอบแบบ Universal Testing Machine ผลิตโดยบริษัท LLOYDS Instruments ขนาดชิ้นงานภายใต้มาตรฐานการทดสอบ ASTM E646 [10] การทดสอบตีดตัวกลับใช้แม่พิมพ์ พันซ์และตายรูปร่างตัววี (V-shape) มุม 90 องศา รัศมี ปลายพันซ์ 5 องศา แรงกดพันซ์สูงสุด 150 กก. ผลการ ทดลองทั้งหมดเป็นเฉลี่ยจากการทดลองจำนวน 10 ตัวอย่าง กรดที่ใช้กัดผิวหน้าชิ้นงานเพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาค เป็น

สารละลายของกรดไฮโดรคลอริก 45 มล. กรดไนตริก 15 มล. กรดไฮโดรฟลูออริก 15 มล. และน้ำกลั่น 25 มล. การศึกษาโครงสร้างจุลภาคใช้กล้องจุลทรรศน์แสง กล้อง จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และกล้อง จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องทะลุ (TEM)

### 3. ผลการทดลอง และการวิเคราะห์

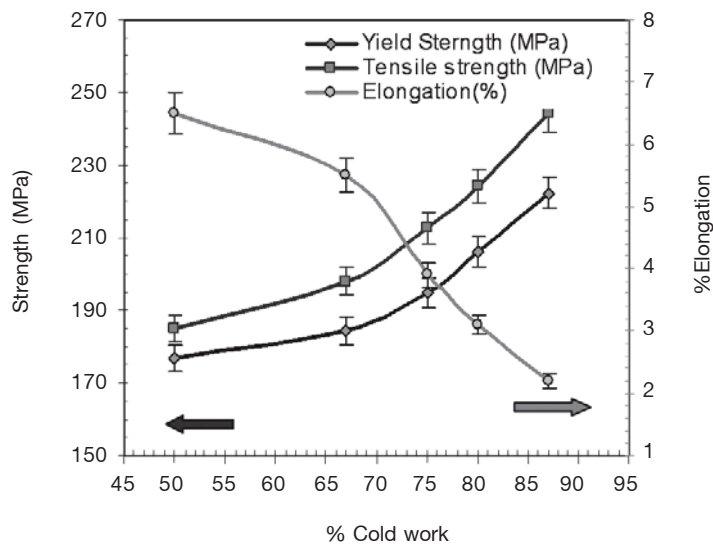
ความแข็งแรงของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมเริ่มต้น ที่มี ความหนา 7.80 มม. ผลการทดสอบความแข็งแรงเฉลี่ยมี ค่าเฉลี่ย  $70 \pm 2$  วิกเกอร์ ซึ่งเป็นความแข็งแรงที่มีผลมา จากกระบวนการผลิต หลังอบกำจัดโครงสร้างเดิมโดยการ

ทำไฮโมจีไนส์ วัดความแข็งแรงเฉลี่ยได้  $38 \pm 2$  วิกเกอร์ สำหรับชิ้นงานเริ่มต้นที่มีความหนาอื่นๆ ได้แก่ 2 3 4 และ 5.5 มม. หลังการอบไฮโมจีไนส์ วัดความแข็งแรงเฉลี่ยได้ค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งมีค่าประมาณ  $40 \pm 2$  วิกเกอร์ จะเห็นได้ว่าความแข็งแรงเฉลี่ยหลังอบไฮโมจีไนส์มีค่าใกล้เคียงกัน แสดงว่าอุณหภูมิและเวลาในการอบไฮโมจีไนส์ สามารถกำจัดความแข็งที่มาจากกระบวนการผลิตได้

### 3.1 ผลการทดสอบสมบัติทางกลและการดัดงอของชิ้นงานหลังผ่านการขึ้นรูป

การทดสอบสมบัติทางกลของอะลูมิเนียมผสมหลังผ่านการขึ้นรูปปริมาณแตกต่างกันตั้งแต่ 50 ถึง 87 เปอร์เซ็นต์ มีความหนา 1 มม.เท่ากัน แสดงในรูปที่ 1

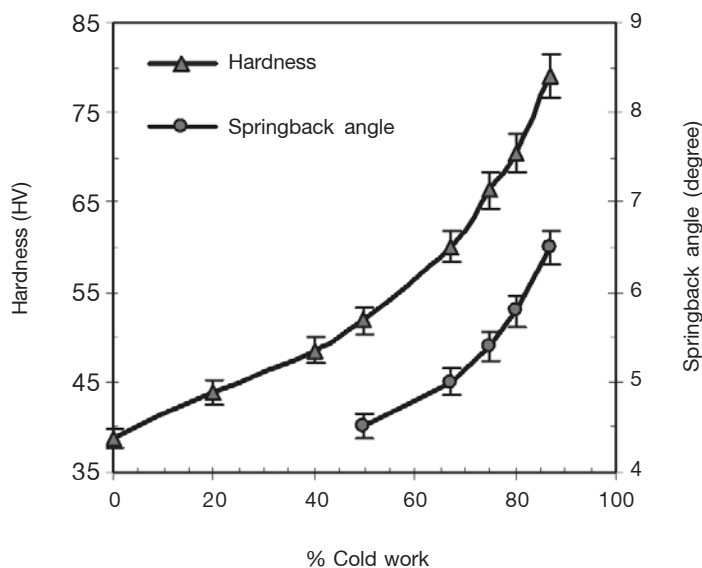
จะเห็นได้ว่าความเค้นแรงดึงสูงสุด และความต้านแรงดึงจุดคราก มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณการแปรรูปเย็นสูงขึ้น ในทางตรงกันข้ามปริมาณการยืดตัวของชิ้นงานมีค่าลดลง จากผลการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานที่ผ่านการแปรรูปเย็น 50 เปอร์เซ็นต์ มีค่าความต้านแรงดึงจุดครากเฉลี่ย 177 เมกกะปาสคาล และค่าความเค้นแรงดึงจุดสูงสุดมีค่าเฉลี่ย 185 เมกกะปาสคาล เปอร์เซ็นต์การยืดตัวมีค่าเฉลี่ย 6.5 เมื่อปริมาณการแปรรูปเย็นสูงขึ้นเป็น 87 เปอร์เซ็นต์ ทั้งความเค้นแรงดึงจุดครากและความเค้นแรงดึงจุดสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 222 และ 244 เมกกะปาสคาล ตามลำดับ การยืดตัวลดลงมีค่า 2.2 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างจุลภาค ซึ่งจะกล่าวถึงต่อไป



รูปที่ 1 สมบัติทางกลของชิ้นงานหลังผ่านการแปรรูปตั้งแต่ 50 ถึง 87 เปอร์เซ็นต์

เมื่อเปรียบเทียบกับ ข้อมูลค่าสมบัติทางกลของ อะลูมิเนียมที่มีขายในท้องตลาด ซึ่งรวบรวมโดย Kissell ไว้ ในคู่มือการเลือกใช้วัสดุ [9] รายงานเป็นค่าเฉลี่ย สำหรับ อะลูมิเนียมที่มีขายในท้องตลาด เกรด 3105-H18 (full hard) มีค่าความต้านแรงดึงที่จุดคราก 195 เมกกะปาสคาล ความต้านแรงดึงสูงสุดมีค่า 215 เมกกะปาสคาล และการยืดตัวมีค่าประมาณ 3.0 เปอร์เซ็นต์ (ส่วนค่าความแข็งของ อะลูมิเนียมที่มีขายในท้องตลาดเกรดนี้ไม่มีรายงานไว้) จาก ผลการทดลองพบว่าชิ้นงานที่ผ่านการแปรรูปเย็น 75 เปอร์เซ็นต์ มีค่าเฉลี่ยของความต้านแรงดึงที่จุดคราก 195 เมกกะปาสคาล ความต้านแรงดึงสูงสุด 213 เมกกะปาสคาล และการยืดตัวมีค่า 3.1 เปอร์เซ็นต์ จะเห็นได้ว่าความต้านแรงดึงที่จุดคราก และความต้านแรงดึงสูงสุด มีค่าใกล้เคียงกับอะลูมิเนียมเกรดทางการค้า 3105-H18 แต่ในการทดลองนี้เลือกใช้ปริมาณการแปรรูปเย็น สูงสุด 87 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งความต้านแรงดึงที่จุดคราก และความต้านแรงดึงสูงสุด มีค่าสูงกว่าเกรดทางการค้า 3105-H18

ผลการวัดความแข็งและมุมการติดตัวกลับของ ชิ้นงาน เมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณการแปรรูปเย็นแสดงในรูป ที่ 3 จะเห็นได้ว่าเมื่อปริมาณการแปรรูปเย็นสูงขึ้น ทำให้ ความแข็งเฉลี่ยและมุมการติดตัวกลับเฉลี่ยมีสูงขึ้น จากหลัก การโดยทั่วไปของการติดตัวกลับ พบว่าโลหะที่มีความแข็ง และความแข็งแรงสูงจะมีมุมของการติดตัวกลับสูง ส่วน โลหะที่อ่อนจะมีมุมของการติดตัวกลับน้อย เนื่องจากโลหะ ที่แข็งนั้นจะเกิดสเตรนฮาร์ดเตนนิ่ง (strain hardening) สูง อันเนื่องมาจากการแปรรูปพลาสติกของโลหะมีผลให้ โครงสร้างจุลภาคเปลี่ยน มีปริมาณดิสโลเคชันสูงขึ้น ซึ่งผลการ ทดลองนี้สอดคล้องกับหลักการดังกล่าว นอกจากนี้ยัง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Eary and Keed [3] ได้เปรียบเทียบวัสดุต่างชนิดกัน ที่มีความแข็งต่างกัน พบว่าวัสดุที่ มีความแข็งกว่าจะมีมุมคืนตัวมากกว่า และได้เปรียบเทียบ วัสดุนิตเดียวกัน ที่มีความหนาต่างกัน รายงานว่าชิ้นงาน ที่มีความหนามากกว่า มีมุมการติดตัวกลับสูงกว่าชิ้นงานที่ บาง ดังนั้น การทดลองส่วนที่เหลือจึงเลือกใช้ปริมาณการ แปรรูป 87 เปอร์เซ็นต์ เพื่อให้เห็นการเปลี่ยนแปลงได้ อย่างชัดเจน

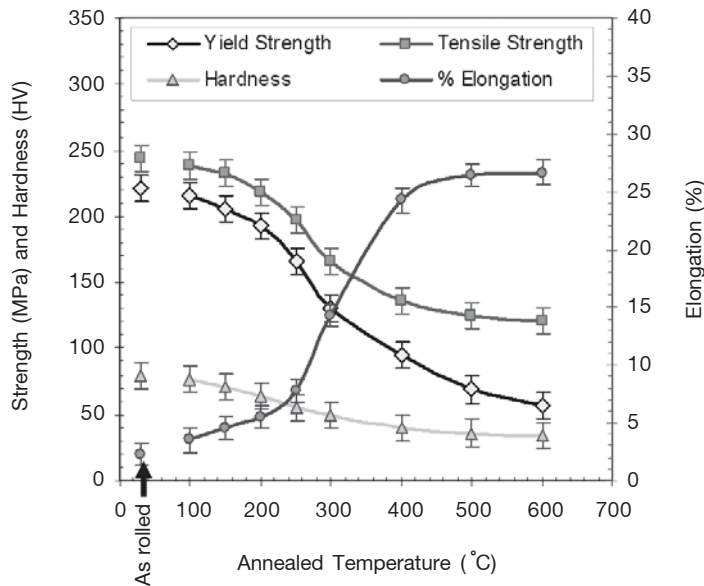


รูปที่ 2 ความแข็งและมุมการติดตัวกลับของอะลูมิเนียมกับปริมาณการแปรรูปเย็น

### 3.2 ผลการทดสอบสมบัติทางกล และการดัดงอของชิ้นงานหลังการอบอ่อน

รูปที่ 3 แสดงสมบัติทางกล และมุมการดัดตัวกลับของชิ้นงานหลังการรีดเย็น 87 เปอร์เซ็นต์ หลังการอบที่อุณหภูมิ 100 ถึง 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที พบว่าความต้านแรงดึงจุดคราก และความต้านแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงเหมือนกัน ความต้านแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานรีดเริ่มต้นมีค่า 239 เมกกะปาสคาล ความแข็งมีค่า 79 วิกเกอร์ หลังจากการนำชิ้น

งานไปอบอ่อนที่อุณหภูมิ 100, 150, 200 และ 250 องศาเซลเซียส พบว่าความต้านแรงดึงสูงสุดและความแข็งมีค่าลดลงจากชิ้นงานหลังรีดเย็นเล็กน้อย หลังการอบโดยใช้อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส พบว่าค่าความต้านแรงดึงสูงสุด มีค่าลดลงมีค่าเหลือ 136 เมกกะปาสคาล ความแข็งลดลงเหลือ 40 วิกเกอร์ หลังการอบด้วยอุณหภูมิ 500 และ 600 องศาเซลเซียส พบว่าความต้านแรงดึงสูงสุดมีค่าลดลงเหลือ 124 และ 120 เมกกะปาสคาล ตามลำดับ ความแข็งลดลงเหลือ 36 วิกเกอร์



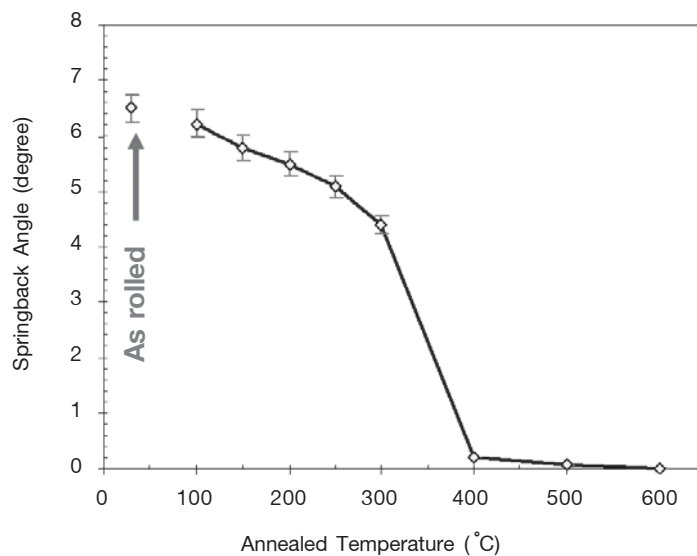
รูปที่ 3 สมบัติทางกลและมุมการดัดตัวกลับของชิ้นงานหลังการอบอ่อนที่อุณหภูมิต่างๆ

จากผลการทดลองพบว่าความแข็งของชิ้นงานหลังการอบอ่อนทุกอุณหภูมิมีค่าลดลง โดยเฉพาะการอบที่ 600 องศาเซลเซียส มีค่าความต้านแรงดึงจุดคราก 56 เมกกะปาสคาล ความต้านแรงดึงสูงสุดมีค่า 120 เมกกะปาสคาล ส่วนเปอร์เซ็นต์การยืดตัวมีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดเป็น 27 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับอะลูมิเนียมที่มีขายในท้องตลาด เกรด 3105-O (full annealed) มีค่าความต้านแรงดึงจุดคราก 55 เมกกะปาสคาล ความต้านแรงดึงสูงสุด 117 เมกกะ

ปาสคาล และการยืดตัว 24% [9] นั้นหมายความว่า อะลูมิเนียมหลังอบมีความแข็งแรงลดลง ความเหนียวเพิ่มขึ้น ทำให้ความสามารถในการแปรรูปทางกลเพิ่มขึ้น ลดการเสี่ยงต่อการแตกหัก และยังใช้แรงทางกลน้อยลง ทั้งนี้สามารถอธิบายได้ว่าเนื่องจากหลังการอบอ่อน จะทำให้ความเครียดและความเค้นตึงต่างๆ ที่สะสมอยู่ในเนื้อโลหะที่เกิดจากการแปรรูปเย็นลดลง ซึ่งขึ้นกับอุณหภูมิและเวลาที่อบ เนื่องจากโครงสร้างของโลหะนั้นจะเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิที่ใช้ออบ

ถ้าอุณหภูมิสูงทำให้อะตอมเกิดการแพร่ได้ง่ายขึ้น ทำให้ดิสโลเคชันและความเค้นที่ยังคงเหลืออยู่สามารถถูกขจัดไป มุมการติดตัวกลับจึงลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [11-12]

ผลการวัดมุมติดกลับแสดงในรูปที่ 4 พบว่า ชีงงานอะลูมิเนียมที่ผ่านการแปรรูปเย็นที่ไม่ได้ผ่านการอบอ่อน มีมุมการติดตัวกลับเฉลี่ย 6.5 องศา หลังการอบที่อุณหภูมิ 100 ถึง 300 องศาเซลเซียส พบว่ามุมการติดตัวกลับมีค่าลดลงจาก 6.2 ถึง 4.4 องศา ทุกค่ามีความผิดพลาดประมาณ  $\pm 0.2$  องศาเซลเซียส



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ทำการอบอ่อนกับมุมการติดตัวกลับ

ซึ่งเห็นได้ชัดเจนว่าเมื่อใช้อุณหภูมิอบต่ำกว่า 300 องศาเซลเซียส มุมการติดตัวกลับลดลงเล็กน้อย แต่เมื่อใช้อุณหภูมิการอบอ่อน 400 องศาเซลเซียส มุมการติดตัวกลับลดลงอย่างมาก มีค่าเหลือเพียง 0.2 องศาเท่านั้น นอกจากนี้ยังเห็นได้ชัดว่าหลังการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 500 และ 600 องศาเซลเซียส มุมการติดตัวกลับสามารถถูกกำจัดได้หมด 100 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ยังได้ทดลองอบชิ้นงานที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส โดยเพิ่มเวลาในการอบจาก 30 นาที เป็น 180 และ 300 นาที พบว่ามุมการติดตัวกลับของชิ้นทดสอบ มีค่าเฉลี่ย 4.4 และ 4.3 ตามลำดับ

จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มเวลาในการอบที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส มีผลต่อการติดตัวกลับของชิ้นทดสอบเล็กน้อยเท่านั้น

จากผลการทดลอง จะเห็นได้ว่าการอบอ่อนเพื่อลดมุมการติดตัวกลับนั้น เป็นผลมาจากความแข็งแรงและความแข็งแรงของวัสดุที่ลดลง ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการทดลองนี้จะเป็นประโยชน์ในการเลือกใช้อุณหภูมิที่เหมาะสม ในการอบอะลูมิเนียมก่อนการบ่มขึ้นรูป หรืออาจเลือกสั่งอะลูมิเนียมเกรดที่มีสมบัติเหมาะสมกับการบ่มขึ้นรูปสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมด้านงานบ่มขึ้นรูป

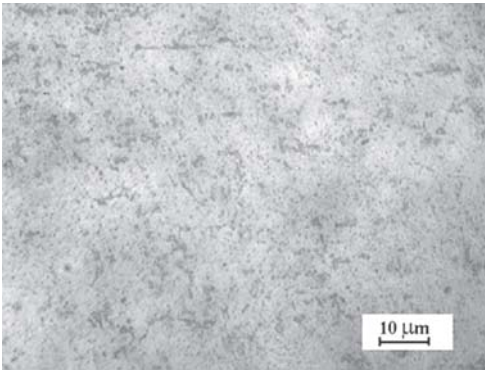


อะลูมิเนียมได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง งานที่มีปัญหาเรื่องการติดตัวกลับที่เป็นปัญหาหลัก ปัญหาด้านความแข็งแรงเป็นเรื่องรองลงมา เช่น งานครีบบรรายความร้อน (Finstock) ซึ่งไม่ได้ต้องการความแข็งแรงเป็นเรื่องหลัก หากว่าการบีบขึ้นรูปแล้ว ชิ้นงานติดตัวกลับเกินค่าที่รับได้ จะส่งปัญหาในการประกอบชิ้นงาน ทำให้เกิดความเสียหายขึ้น

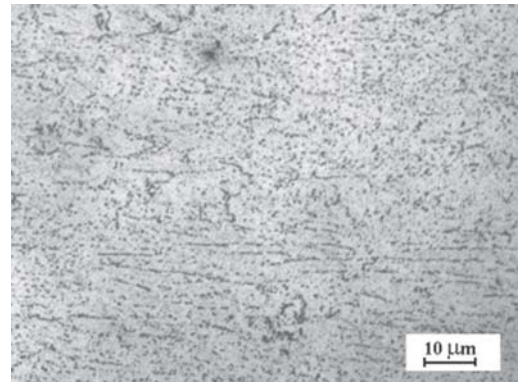
### 3.4 ผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการรีดและหลังการอบ

โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเริ่มต้น มีเกรนขนาดเล็ก ละเอียด สม่ำเสมอ เกรนมีลักษณะยาวรีเป็นริ้วตามแนวรีด เนื่องจากชิ้นงานเริ่มต้นในการทดลองนี้ ได้จากการหล่อแบบต่อเนื่อง ซึ่งเป็นลักษณะโดยทั่วไปของอะลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการหล่ออย่างต่อเนื่อง [13] รูปที่ 5 ก)-จ) แสดงโครงสร้างจุลภาคถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงของอะลูมิเนียมที่ผ่านการอบไฮโดรเจนที่ 550 องศาเซลเซียส 5 ชั่วโมง และโครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมที่ผ่านการรีด 20-87% จะเห็นว่าโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่อบไฮโดรเจนมีอนุภาคเป็นเม็ดกลม กระจายในโครงสร้างพื้น โดยทั่วไปอนุภาคที่มักพบในอะลูมิเนียมผสมแมงกานีส ได้แก่  $(\text{Fe,Mn})\text{Al}_6$ ,  $\text{Al}_2\text{Mn}$ ,  $\text{Al}_{12}\text{Si}(\text{Mn,Fe})_3$  [14] ทั้งนี้เนื่องจากการอบไฮโดรเจนสามารถละลายเฟสของอนุภาคให้ละลายเข้าไปในโครงสร้างพื้น ของสารละลายของแข็ง  $\propto$  phase (Fe, Mn, Si, Al) ได้มากขึ้น จึงส่งผลให้ความแข็งแรงหลังอบไฮโดรเจนลดลงเหลือ 40 วิกเกอร์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [15]

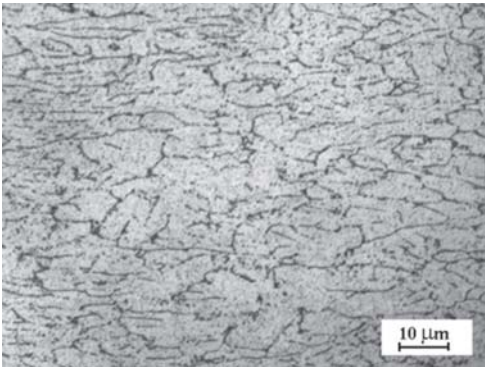
โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมที่ผ่านการแปรรูปเย็น 87 เปอร์เซ็นต์ หลังผ่านการอบอ่อนด้วยอุณหภูมิ 100, 150, 200, 250 และ 300 องศาเซลเซียส พบว่าโครงสร้างจุลภาคทั้งหมดมีลักษณะคล้ายกัน ตัวอย่างรูปโครงสร้างจุลภาคถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงของชิ้นงานที่ผ่านการอบด้วยอุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส แสดงในรูปที่ 6 เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ในการอบนี้ เป็นช่วงของอุณหภูมิการคืนตัว (recovery) เป็นการลดความเค้นที่เกิดขึ้นภายในเนื้อโลหะเล็กน้อย ทำให้ดิสโลเคชันเกิดการจัดเรียงตัวของอะตอมใหม่ บางครั้งทำให้เกิดเกรนย่อยๆ (subgrain structure) ขึ้น โครงสร้างเปลี่ยนไปเพื่อที่จะเกิดผลึกใหม่ และในช่วงการคืนตัวทำให้ความต้านแรงดึงของโลหะจึงลดลงเล็กน้อย แต่ความเหนียวจะเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Gomma และคณะ [11] รายงานว่าการอบอ่อนอะลูมิเนียมผสมแมงกานีสที่ผ่านการรีดเย็น 27 เปอร์เซ็นต์ หลังการอบอ่อนที่อุณหภูมิต่ำกว่า 327 องศาเซลเซียส อนุภาคซึ่งประกอบด้วยธาตุแมงกานีสและแมกนีเซียม จะทำหน้าที่ขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (diffusion coefficient) ของธาตุแมงกานีสและแมกนีเซียมมีค่าต่ำในอะลูมิเนียม ความแข็งแรงลดลงเล็กน้อย เนื่องจากมีการเกิดผลึกใหม่ (recrystallization) บางส่วน และเกิดการละลายของอนุภาคที่มีขนาดเล็กที่สุดได้บ้างบางส่วน ทำให้ช่องว่าง (vacancy) ลดลง



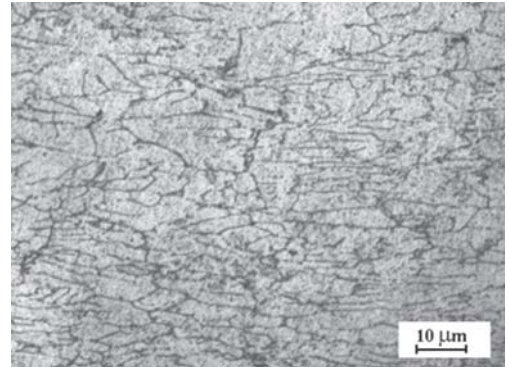
(ก) ทำไฮโมจีไนส์ 550 องศาเซลเซียส



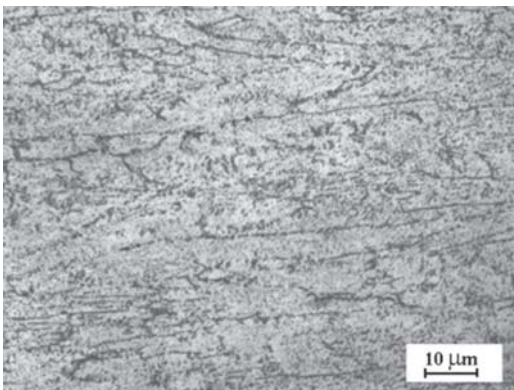
(ข) แปรรูปเย็น 20 เปอร์เซ็นต์



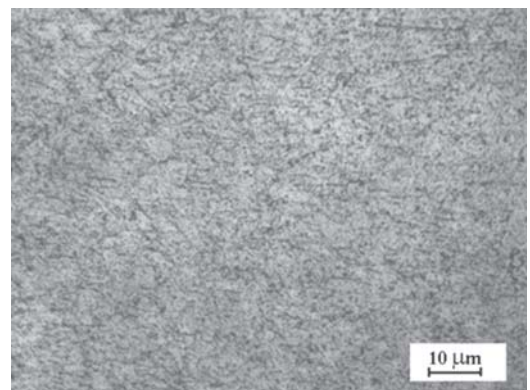
(ค) แปรรูปเย็น 50 เปอร์เซ็นต์



(ง) แปรรูปเย็น 67 เปอร์เซ็นต์

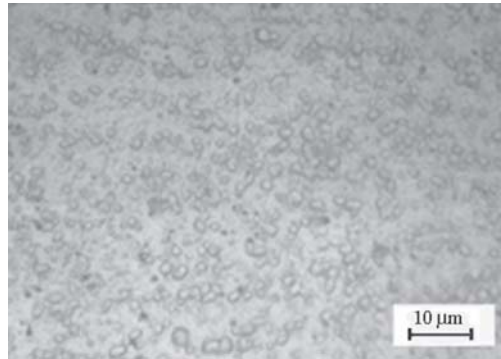


(จ) แปรรูปเย็น 75 เปอร์เซ็นต์



(ฉ) แปรรูปเย็น 87 เปอร์เซ็นต์

**รูปที่ 5 (ก)-(ฉ)** โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมที่ผ่านการอบไฮโมจีไนส์และผ่านการแปรรูปเย็น 20-87 เปอร์เซ็นต์



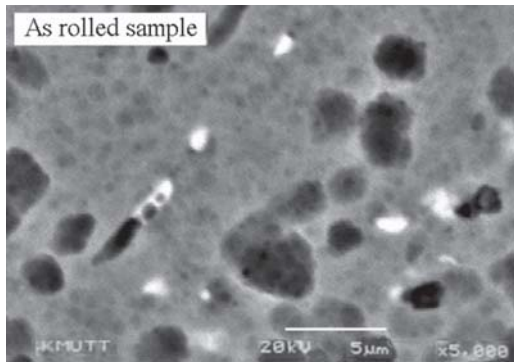
**รูปที่ 6** โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมหลังผ่านการอบที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส

การอบที่อุณหภูมิสูงขึ้นที่ 400 องศาเซลเซียส ความแข็งแรงลดลงอย่างชัดเจน เนื่องจากมีการเกิดผลึกใหม่ขึ้น โดยทั่วไปการเกิดผลึกใหม่เป็นกระบวนการที่เกิดจากโลหะที่ผ่านการแปรรูปเย็นที่ได้รับความร้อนสูงพอ และเป็นเวลานานพอ จนกระทั่งทำให้เกิดเกรนใหม่ที่ไม่มี ความดันเครียดสูง ทำให้ความแข็งแรงลดลง ความต้านแรงดึงต่ำลง มีความอ่อนตัวสูงขึ้น การเกิดผลึกใหม่ของโลหะสามารถเกิดขึ้นได้ในช่วงอุณหภูมิที่กว้างขึ้นกับตัวแปรหลายอย่าง ดังนั้น จึงไม่อาจระบุอุณหภูมิของการเกิดผลึกใหม่ว่ามีค่าแน่นอนและคงที่ จากงานวิจัยของ Tokizane และ Yamauchi [16] ได้รายงานว่าธาตุซิลิคอน เหล็ก และแมงกานีส เป็นธาตุที่ช่วยเป็นจุดเริ่มเกิดนิวเคลียส (nucleation sites) สำหรับการเกิดเกรนใหม่ มีรูปร่างเป็น Dispersoids กระจายในโครงสร้างพื้น นอกจากนี้ซิลิคอน ยังช่วยให้ขนาดของอนุภาคที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็ก

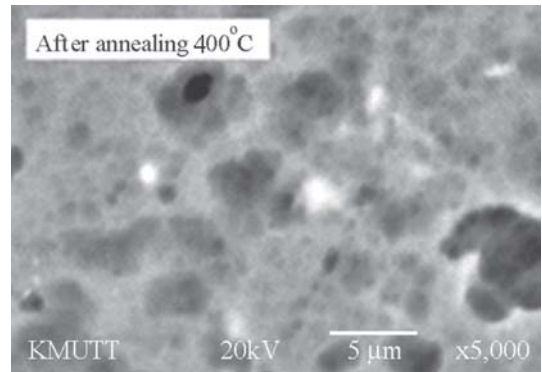
โครงสร้างจุลภาคถ่ายด้วยกล้อง SEM ของอะลูมิเนียมหลังการแปรรูป 87 เปอร์เซ็นต์ ที่ไม่ผ่านการอบอ่อนและที่ผ่านการอบอ่อนที่ 400 องศาเซลเซียส แสดงได้ดังรูปที่ 7(ก)-(ข) ตามลำดับ จากรูป (ก) จะเห็นได้ว่าโครงสร้างของชิ้นงานที่ไม่ได้อบ มีเฟสที่เห็นเป็นเม็ดดำขนาด

เส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 3-5 ไมครอน และมีอนุภาคที่ขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน กระจายทั่วในโครงสร้างพื้น จากรูป (ข) โครงสร้างของชิ้นงานหลังการอบอ่อนที่ 400 องศาเซลเซียส พบว่าอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 3-5 ไมครอน มีปริมาณลดลง อธิบายได้ว่าการอบที่อุณหภูมิสูงขึ้น ตั้งแต่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสขึ้นไป ทำให้อนุภาคต่างๆ ละลายเข้าไปในโครงสร้างพื้นได้มากขึ้น และเมื่ออบที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส อนุภาคมีระยะห่างกันมากขึ้น เนื่องจากอนุภาคขนาดเล็กละลายเข้าไปในโครงสร้างพื้นได้มากขึ้น ทำให้ความแข็งแรง และความต้านแรงดึงของอะลูมิเนียมลดลงอย่างมาก รวมทั้งมีการเกิดผลึกใหม่ขึ้น

จากการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมหลังการแปรรูป 87 เปอร์เซ็นต์ ที่ไม่ผ่านการอบอ่อนและที่หลังการอบอ่อนที่ 400 องศาเซลเซียส ด้วยเทคนิค EDS แสดงไว้ดังตารางที่ 2 ชิ้นงานที่ไม่ผ่านการอบอ่อน ได้วิเคราะห์บริเวณโครงสร้างพื้น 3 บริเวณ และบริเวณอนุภาคสีดำ 3 อนุภาคเฉพาะที่มีขนาดประมาณ 3-4 ไมครอน (อนุภาคสีเทาและสีขาวไม่ได้วิเคราะห์ เนื่องจากขนาดเล็กเกินไป)



(ก) ผ่านการแปรรูป 87 เปอร์เซ็นต์



(ข) หลังอบอ่อนที่ 400 องศาเซลเซียส

**รูปที่ 7 (ก)-(ข)** โครงสร้างจุลภาคถ่ายด้วยกล้อง SEM ของอะลูมิเนียมหลังการแปรรูป 87 เปอร์เซ็นต์ที่ไม่ผ่านการอบอ่อน และที่หลังการอบอ่อน 400 องศาเซลเซียส

จากตารางที่ 2 พบว่าส่วนผสมของอนุภาคประกอบด้วยธาตุแมงกานีส ปริมาณใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 0.32-0.47 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณธาตุเหล็กและซิลิคอนแตกต่างกันมาก อย่างไรก็ตามเนื่องจากขนาดของอนุภาคค่อนข้างเล็ก ผลการวิเคราะห์อาจมีผลข้างเคียงจากโครงสร้างพื้นได้ ผลการวิเคราะห์ที่ส่วนผสมของอะลูมิเนียมหลังการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส บริเวณที่เป็น

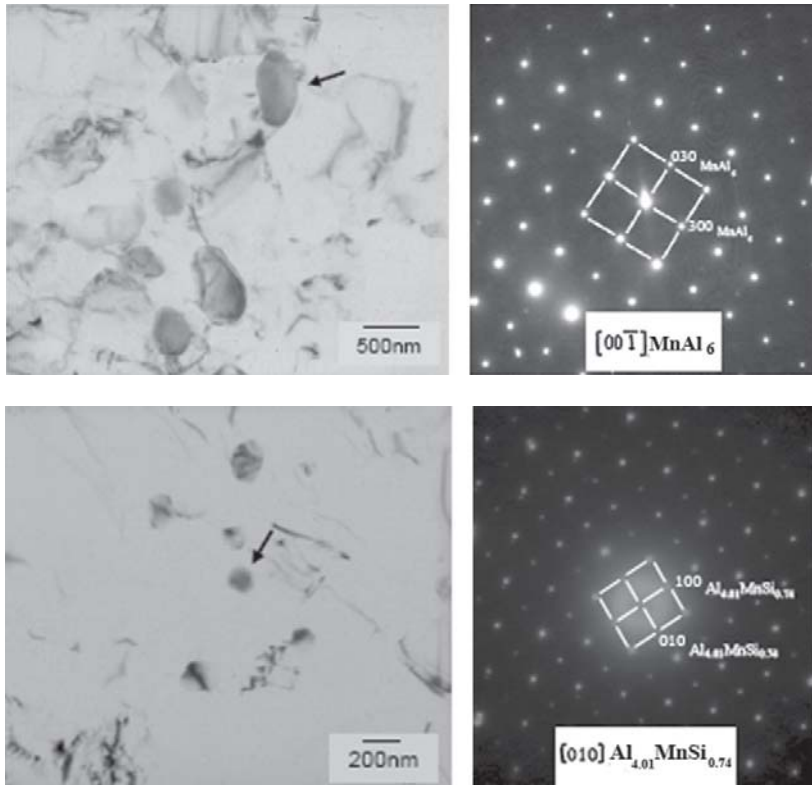
โครงสร้างพื้น 1 บริเวณ และ บริเวณอนุภาคที่เห็นในรูปเป็นสีดำ 1 จุด พบว่าส่วนผสมทางเคมีของอนุภาคและโครงสร้างพื้นประกอบด้วยธาตุในปริมาณที่แตกต่างกัน จากผลการวิเคราะห์นี้พบว่าปริมาณ Mn ในอนุภาคมีค่า 0.24 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าต่ำกว่าในโครงสร้างพื้น จึงเป็นหลักฐานว่าในระหว่างอบอ่อนมีการละลายของอนุภาคที่มีแมงกานีสเข้าไปในโครงสร้างพื้น

**ตารางที่ 2** ผลการวิเคราะห์ที่ส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมที่ผ่านการแปรรูป 87 เปอร์เซ็นต์ที่ไม่ผ่านการอบอ่อน และหลังการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส

บริเวณที่วิเคราะห์	ปริมาณธาตุ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)							
	Mn	Si	Fe	Cu	Mg	Cr	Ti	Al
<b>ชิ้นงานรีดที่ไม่ผ่านการอบอ่อน</b>								
โครงสร้างพื้น บริเวณ 1	0.40	0.74	0.09	0.04	-	-	0.18	ที่เหลือ
โครงสร้างพื้น บริเวณ 2	0.55	1.05	0.32	0.09	-	-	-	ที่เหลือ
โครงสร้างพื้น บริเวณ 3	0.35	0.88	0.55	0.06	-	0.01	-	ที่เหลือ
อนุภาค 1	0.47	0.92	0.54	0.08	-	-	0.06	ที่เหลือ
อนุภาค 2	0.32	0.64	0.15	-	-	-	-	ที่เหลือ
อนุภาค 3	0.36	0.42	0.75	-	-	-	0.11	ที่เหลือ
<b>ชิ้นงานหลังอบอ่อนที่ 400 องศาเซลเซียส</b>								
โครงสร้างพื้น	0.44	0.01	0.82	0.04	-	-	0.01	ที่เหลือ
อนุภาค	0.24	0.10	0.69	0.04	-	-	0.01	ที่เหลือ

ในการวิเคราะห์ชนิดของอนุภาคที่เกิดขึ้นในโครงสร้างของอะลูมิเนียมผสมแมงกานีส ได้ศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) โดยเลือกศึกษาชิ้นงานใดชิ้นงานหนึ่ง ในที่นี้เลือกชิ้นงานหลังอบที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส แสดงในรูปที่ 8 พบอนุภาค

กลมมนหรือรี จาก SADP (Selected area diffraction pattern) เป็นการยืนยันว่าอนุภาค (Precipitate) เหล่านี้ น่าจะเป็น  $MnAl_6$  และ  $Al_{4.01}MnSi_{0.74}$  ในโครงสร้างพื้นของสารละลายของแข็งเฟสอัลฟา



รูปที่ 8 โครงสร้างจุลภาคถ่ายด้วยกล้อง TEM ของอะลูมิเนียมหลังอบที่ 200 องศาเซลเซียส

## 5. สรุปผลการทดลอง

1. อะลูมิเนียมเกรด 3105 ที่แปรรูปเย็น 87 เปอร์เซ็นต์ มีความต้านแรงดึงสูงสุด 244 เมกกะปาสคาล ความแข็ง 70 วิกเกอร์ ยึดตัวได้ 2.2 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ชิ้นงานที่รีดแปรรูป 50 เปอร์เซ็นต์ มีความต้านแรงดึงสูงสุดมีค่า 185 เมกกะปาสคาล ความแข็งมีค่า 52 วิกเกอร์ ยึดตัวได้ 6.5 เปอร์เซ็นต์

2. ปริมาณการแปรรูปเย็น มีผลทำให้มุมการติดตัวกลับสูงขึ้น อะลูมิเนียมผสมแมงกานีส ที่ผ่านการรีดแปรรูป 87 เปอร์เซ็นต์ ความหนา 1 มม. มีมุมการติดตัวกลับ 6.5

องศา ในขณะที่อุณหภูมิที่รีดแปรรูปเพียง 50 เปอร์เซ็นต์ มีมุมติดตัวกลับ 4.5 องศา

3. การอบอ่อนทุกอุณหภูมิสามารถลดปริมาณการติดตัวกลับได้ การอบอ่อนอะลูมิเนียมที่แปรรูปเย็น 87 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้อุณหภูมิสูงกว่า 400 องศาเซลเซียส สามารถลดการติดตัวกลับได้ 100 เปอร์เซ็นต์

4. หลังอบอ่อนที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส อนุภาคมีลักษณะเป็นเม็ดรีค่อนข้างกลมมน เป็นอนุภาคของ  $Al_{4.01}MnSi_{0.74}$  และ  $MnAl_6$  ในโครงสร้างพื้นของสารละลายของแข็ง  $\infty$  phase (Fe, Mn, Si, Al)

## 6. เอกสารอ้างอิง

1. Smith, W. F., 1981, "Structure and Properties of Engineering Alloys", *Materials Science and Engineering Series*, Professor of Engineering University of Central Florida, pp. 170-171.
2. Carden, W.D., Geng, Matlock, L.M., Wagone, D.K., 2002, "Measurement of Springback", *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 44, pp. 79-101.
3. Eary, D. F., Keed, E.A., 1974, *Techniques of Press Working Sheet Metal and Engineering Approach to Die*, New Jersey: Prentice-Hall Inc, Engle Wood Cliffs, pp.56-61.
4. Kalpekjian, S., 1998, *Manufacturing Engineering and Technology*, Addison Wesley, Reading, MA.
5. Tekiner, Z., 2004, "An Experimental Study on the Examination of Springback of Sheet Metals with Several Thicknesses and Properties in Bending Dies", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 145, pp. 109-117.
6. Wenner, M. L., 1983, "On Work hardening and Springback in Plane Strain Draw Forming", *Journal of Applied Metal Working*, Vol. 2 No. 4.
7. Moon, Y. H., Kang, S.S., Cho, J.R., and Kim, T.G., 2003, "Effect of Tool Temperature on the Reduction of the Springback of Aluminium Sheets", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 32, pp. 365-368.
8. Mullan, H.B., 2004, "Improved Prediction of Springback on Final Formed Components", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 153-154, pp. 464-471.
9. Kissell J. R., 2001, "Aluminum and Its Alloys", *Handbook of Materials for Product design*, Charles A. Harper Editor, Technology Seminars Inc., Lutherville, Maryland Third Edition McGraw-Hill Inc., New York, pp. 2.1-2.12.
10. Kaufman, J.G, 2000, "Typical Mechanical Properties of Wrought Aluminum Alloys", *Introduction to Aluminum Alloys and Temper*, United States of America, pp. 25-46.
11. Gomaa, E., Mohsen, M., Taha, A.S., Mostafa, M.M., 2003, "A Study of Annealing Stages in Al-Mn (3004) Alloy after Cold Rolling using PAL Technique and Vickers Microhardness Measurements", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 362, pp. 274-279.
12. Mohamed, S., Mostafa, N., Gomaa, E., and Mohsen, M., 2003, *Journal of Materials Engineering Perform*, Vol. 12, pp. 95-98.
13. Liu, W.C. and Morris, J. G., 2006, "Effect of Hot and Cold Deformation on the P {011} [455] Recrystallization Texture in a Continuous Cast Al-Mn-Mg Aluminium Alloy", *Scripta Materialia*, Vol. 54, pp. 2095-2099.
14. Lok, Z.J., Miroux, A., and Van der Zwaag, S, 2004, "Recrystallization and the Rate of Mn Precipitation in AA3103", *Materials Forum*, Vol. 28, pp. 1073-1079.
15. Aghaie-Khafri, M. and Mahmudi, R., 2005, "Optimizing Homogenization Parameters for Better Stretch Formability in an Al-Mn-Mg Alloy Sheet", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 399, pp. 173-180.
16. Tokizane, N. and Yamauchi, S., 1993, "Effect of Silicon and Iron Addition on Recrystallization Behaviour of Al-Mn Alloy Fin Stock", *Sumitomo Light Metal Technical Reports*, Vol. 34, No. 2, pp. 14-22.