

บทที่ 4 ผลและการอภิปรายผลการทดลอง

สำหรับผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง จะแบ่งออกเป็นการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมเกรด 6063 การวัดสัมประสิทธิ์ซีบีคโดยใช้อุปกรณ์วัดสัมประสิทธิ์ซีบีคในแนวดิ่งและแนวนอน การศึกษาความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์ซีบีคที่เกิดจากการรีดเย็นและการบ่มแข็ง ทั้งจากอุปกรณ์วัดสัมประสิทธิ์ซีบีคในแนวดิ่งและแนวนอนซึ่งมีผลการทดลองและการวิเคราะห์ดังนี้

4.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมเกรด 6063 ด้วยเทคนิค Emission spectroscopy

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมเกรด 6063 ได้ผลวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมี (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ของชิ้นงานอะลูมิเนียมที่ใช้ในการทดลองเทียบกับมาตรฐานอะลูมิเนียมผสมเกรด 6063

ธาตุ	มาตรฐาน Al6063 [13]	ชิ้นงานที่ใช้ทำการทดลอง
Si	0.2-0.6	0.51
Fe	0.35 max	0.27
Cu	0.10 max	0.05
Mn	0.10 max	0.02
Mg	0.45-0.90 max	0.49
Cr	0.10 max	0.01
Zn	0.10 max	0.02
Ti	0.10 max	0.01
อื่นๆ	0.15 max	0.02
Al	balanced	98.60

4.2 การวัดสัมประสิทธิ์ซีเบ็คโดยใช้อุปกรณ์วัดสัมประสิทธิ์ซีเบ็คในแนวดิ่ง

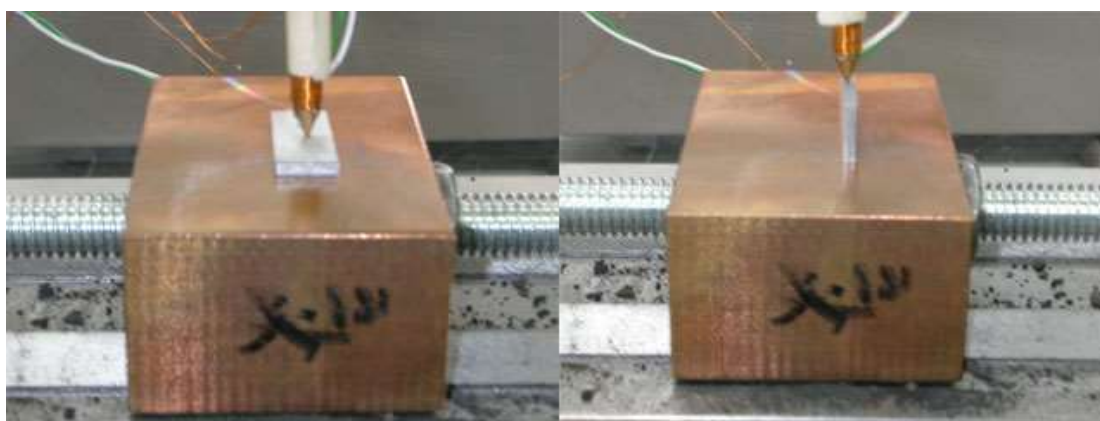
4.2.1 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์ซีเบ็คที่เกิดจากการรีดเย็น

การทดลองนี้เป็นการทดลองกับชิ้นงานขนาดเริ่มต้น 2×3 ตารางเซนติเมตร หนา 8 มิลลิเมตรซึ่งผ่านการรีดเย็นลดขนาดจนได้ขนาดของตัวอย่างตามที่กำหนด ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ขนาดชิ้นงานหลังจากการรีดเย็นและเปอร์เซ็นต์การลดขนาดอะลูมิเนียม 6063 ที่มีความหนาเริ่มต้น 8 มิลลิเมตร

ขนาดชิ้นงานหลังจากการรีดเย็น (มิลลิเมตร)	เปอร์เซ็นต์การลดขนาด
8	0
4	50
2	75
0.8	90

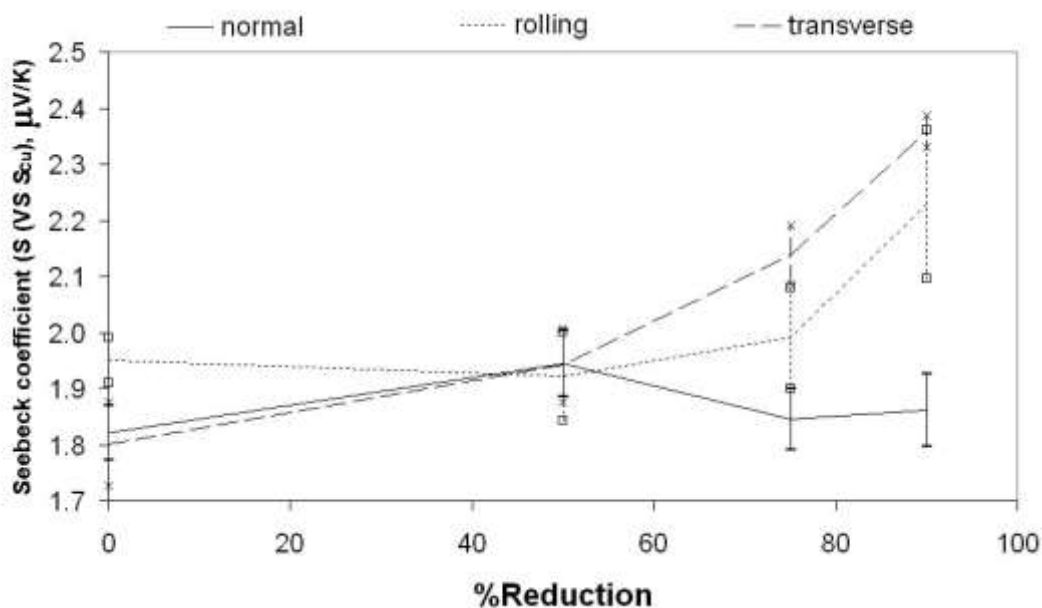
หลังจากนั้นนำชิ้นงานไปวัดสัมประสิทธิ์ซีเบ็คดังแสดงในรูปที่ 4.1 โดยได้ผลการวัดสัมประสิทธิ์ซีเบ็คของตัวอย่างเมื่อเทียบกับสัมประสิทธิ์ซีเบ็คของทองแดงแสดงไว้ในรูปที่ 4.2



ก) Normal direction

ข) Transverse direction

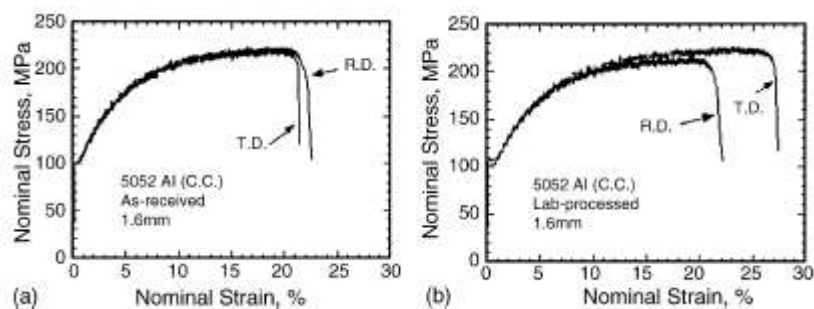
รูปที่ 4.1 การวางตัวอย่างในทิศทาง ก) normal และ ข) transverse



รูปที่ 4.2 ผลการวัดสัมประสิทธิ์ซีเบ็คด้วยเครื่องวัดแนวตั้งในทิศทางต่างๆของอะลูมิเนียม 6063 ที่ผ่านการรีดเย็นในทิศทางต่างๆ

จากรูปที่ 4.2 ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็คในแนว normal เพิ่มขึ้นเมื่อการลดขนาดเพิ่มขึ้นถึง 50 เปอร์เซ็นต์ หลังจากนั้นค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็คลดลงที่ 75 เปอร์เซ็นต์ และไม่เปลี่ยนแปลงแม้ว่าการลดขนาดเพิ่มขึ้นเป็น 90 เปอร์เซ็นต์ สัมประสิทธิ์ซีเบ็คในแนว rolling ลดลงเล็กน้อยจาก 0 เปอร์เซ็นต์การลดขนาด จนถึง 50 เปอร์เซ็นต์การลดขนาด และเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องไปจนถึง 90 เปอร์เซ็นต์การลดขนาด สัมประสิทธิ์ซีเบ็คในแนว transverse เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจาก 0 เปอร์เซ็นต์การลดขนาด จนถึง 90 เปอร์เซ็นต์การลดขนาด โดยทั่วไปในทิศทาง normal จะมีความหนาแน่นของ dislocation มากกว่า ทิศทาง rolling และ transverse เนื่องจากเป็นทิศทางที่รับแรงโดยตรงจากลูกรีด ทำให้สัมประสิทธิ์ซีเบ็ค ในทิศทาง normal น้อยกว่าสัมประสิทธิ์ในทิศทาง rolling และ transverse จากงานวิจัยของ Carreon [1] ซึ่งได้ทำการทดลองวัดสัมประสิทธิ์ซีเบ็คในไทเทเนียมผสม Ti-6Al-4V ที่ผ่านการรีดเย็นพบว่า สัมประสิทธิ์ซีเบ็คในทิศทาง normal ต่ำกว่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็คในทิศทาง transverse เมื่อเปรียบเทียบกับ ผลที่ได้จากการทดลองนี้จะพบว่าในทิศทาง normal สัมประสิทธิ์ซีเบ็คมีค่าลดลงที่เปอร์เซ็นต์การลด ขนาดมากกว่า 50 ซึ่งเป็นไปตามการทดลองของ Carreon ในขณะที่ที่เปอร์เซ็นต์การลดขนาดน้อยกว่า 50 ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็คมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากตัวอย่างที่ผ่านการรีดเย็นจะมีความหนาแน่นที่ไม่เท่ากัน ดังนั้น การที่จะหาผลของการรีดเย็นที่มีต่อสัมประสิทธิ์ซีเบ็คจะต้องทำการวัดตัวอย่างที่ไม่ผ่านการรีดเย็นที่มี ขนาดเท่ากับตัวอย่างที่ผ่านการรีดเย็นแล้วนำมาเปรียบเทียบกัน Hanliang และคณะ [16] ได้ทำการทดลอง วัดความแข็งแรงแรงดึงในแนว rolling และ transverse ของอะลูมิเนียม 5052 ซึ่งได้ผลตามรูปที่ 4.3 ซึ่ง จะพบว่าผลความแข็งแรงของกรณี commercial grade และ lab-processed grade ซึ่งมีแหล่งที่มาต่างกันมี

ความแตกต่างกันทั้งในแนว rolling และ transverse โดยสามารถอธิบายได้จากขนาดเกรนและผลึก precipitation ในเนื้อโลหะ ข้อมูลนี้สามารถนำมาใช้อธิบายผลของสัมประสิทธิ์ชีเบ็คได้เนื่องจากทั้งความแข็งแรงและสัมประสิทธิ์ชีเบ็คต่างมีผลจาก dislocation ในชิ้นงาน โดยที่ในการที่จะวิเคราะห์ความแตกต่างของสัมประสิทธิ์ในแนว rolling และ transverse อาจจะต้องทำการวิเคราะห์ขนาดเกรนและผลึก precipitation ของชิ้นงานด้วย



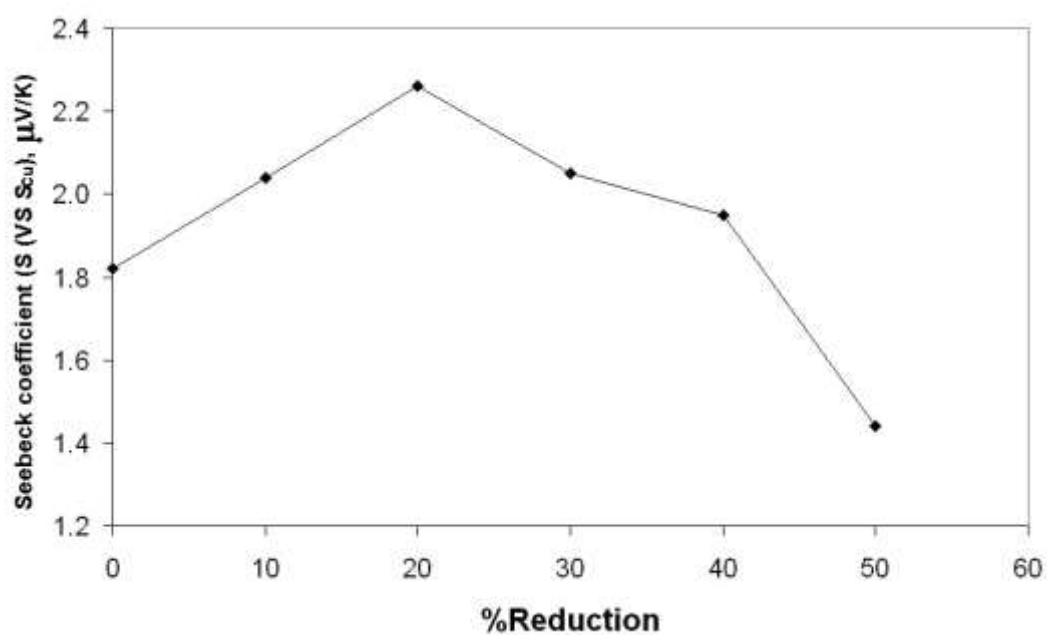
รูปที่ 4.3 ผลการวัดความแข็งแรงดึงของอะลูมิเนียม 5052 ที่มีความหนา 1.6 มิลลิเมตรในทิศทาง rolling และ transverse โดยที่ a) commercial grade b) Lab-processed grade [16]

การทดลองต่อไปคือการวัดสัมประสิทธิ์ชีเบ็คในตัวอย่างที่ผ่านการรีดเย็น โดยใช้ตัวอย่างที่มีขนาดเริ่มต้น 2×3 ตารางเซนติเมตร หนา 16 มิลลิเมตร ซึ่งจะใหญ่กว่าการทดลองแรก ตัวอย่างผ่านการรีดเย็นลดขนาดจนได้ขนาดของตัวอย่างดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.3 หลังจากนั้นจึงทำการวัดสัมประสิทธิ์ชีเบ็คในทิศทาง transverse เนื่องจากเป็นทิศทางที่ได้ระยะห่างจากข้อร้อนและข้อเย็นมากกว่าทิศทาง normal แต่ระยะห่างที่น้อยกว่า 3 เซนติเมตรก็ยังเป็นข้อจำกัดของเครื่องมือ โดยได้ผลการวัดสัมประสิทธิ์ชีเบ็คแสดงไว้ในรูปที่ 4.4

จากรูปที่ 4.4 ค่าสัมประสิทธิ์ชีเบ็คเพิ่มขึ้นเมื่อชิ้นงานถูกลดขนาดจนถึง 20 เปอร์เซ็นต์ และลดลงมาเมื่อเปอร์เซ็นต์การลดขนาดมากกว่า 20 จนถึง 50 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น [11] และรูปที่ 4.2 จะพบว่ามีความขัดแย้งกัน โดยสัมประสิทธิ์ชีเบ็คจะลดลงเมื่อเปอร์เซ็นต์การลดขนาด เพิ่มขึ้น ในการทดลองนี้นอกจากจะต้องทำการวัดสัมประสิทธิ์ชีเบ็คของตัวอย่างที่ไม่ผ่านการรีดเย็นที่มีความหนาเท่ากันแล้ว ยังต้องระวังผิวของชิ้นงานในแนว transverse เนื่องจากมีความขรุขระสูง และปัญหาตัวอย่างงอตัวเนื่องจากการรีดเย็นตัวอย่างที่มีความหนามากๆ ด้วยเครื่องรีดเย็นที่มีลูกรีดคู่เดียว (ด้านบนและด้านล่าง) ซึ่งจะทำให้การวัดสัมประสิทธิ์ชีเบ็คทำได้ยากขึ้น

ตารางที่ 4.3 ขนาดชิ้นงานหลังจากการรีดเย็นและเปอร์เซ็นต์การลดขนาดของ อะลูมิเนียม 6063 ที่มีความหนาเริ่มต้น 16 มิลลิเมตร

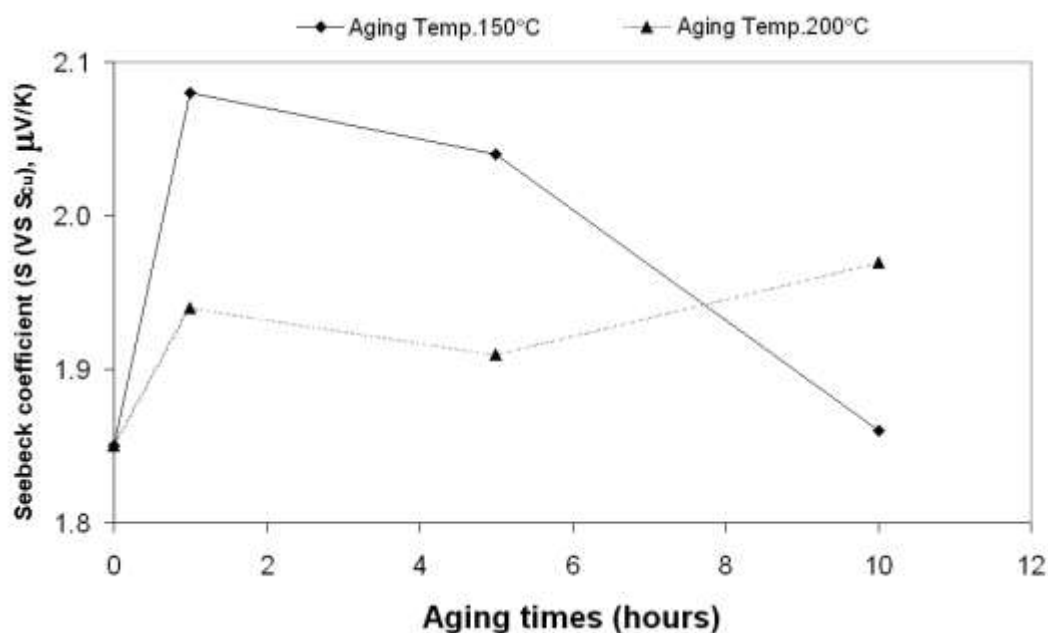
ขนาดชิ้นงานหลังจากการรีดเย็น (มิลลิเมตร)	เปอร์เซ็นต์การลดขนาด
16.0	0
14.4	10
12.8	20
11.2	30
9.6	40
8.0	50



รูปที่ 4.4 ผลการวัดสัมประสิทธิ์ซีเบ็คด้วยเครื่องวัดแนวตั้งในทิศทาง transverse ของอะลูมิเนียม 6063 ที่ผ่านการรีดเย็น

4.2.2 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์ซีเบ็คที่เกิดจากการบ่มแข็ง

ตัวอย่างที่ใช้มีขนาด 2×3 ตารางเซนติเมตร หนา 16 มิลลิเมตร ผ่านการอบ solutioning ที่อุณหภูมิ 520 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว บ่มแข็งที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส และ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลาต่างๆ หลังจากนั้นทำการวัดสัมประสิทธิ์ซีเบ็ค โดยได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.5

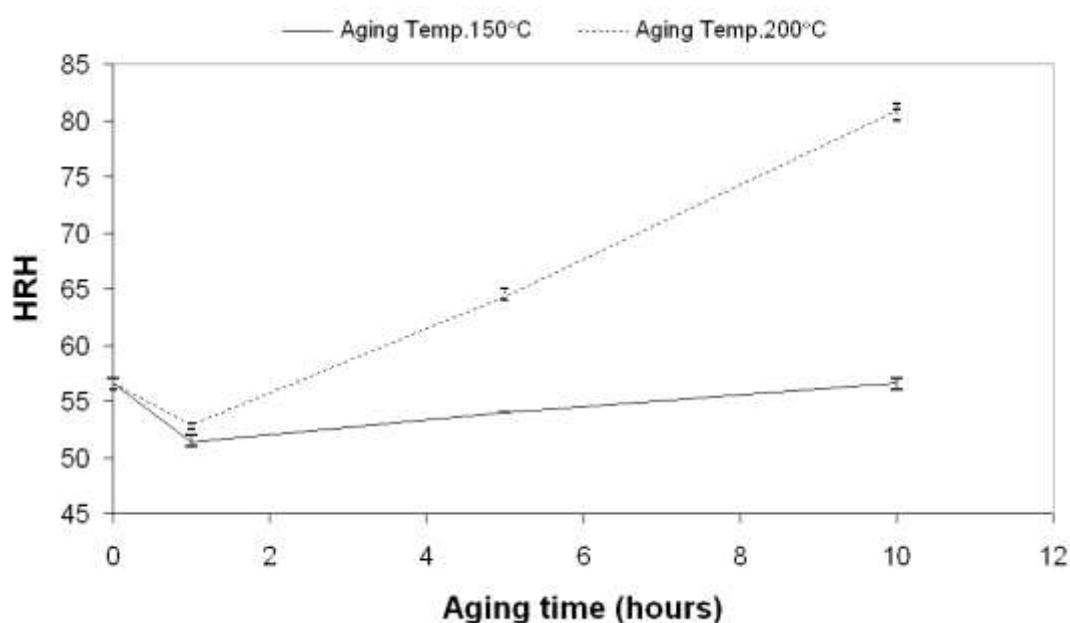


รูปที่ 4.5 ผลการวัดสัมประสิทธิ์ซีเบ็คในอะลูมิเนียม 6063 ที่ผ่านการบ่มแข็งด้วยเครื่องวัดแนวตั้ง

สัมประสิทธิ์ซีเบ็คของชิ้นงานเพิ่มขึ้นเมื่อชิ้นงานผ่านการบ่มแข็งเป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นตัวอย่างที่ผ่านการบ่มแข็งที่ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมงและ 10 ชั่วโมง มีค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็คลดลง ในขณะที่ตัวอย่างที่ผ่านการบ่มแข็งที่ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมงและ 10 ชั่วโมง มีการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์ซีเบ็คไม่มากนัก ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 2.24 จากงานวิจัยของ Abdala [13] และ รูปที่ 2.28 จากงานวิจัยของ Massardier [14] จะพบว่ามีความโน้มที่ต่างกันค่อนข้างมาก โดยเฉพาะในช่วงแรกของการบ่มแข็งที่จะเกิด GP Zone และการเกิดเฟส β' ซึ่งจะมีผลทำให้สัมประสิทธิ์ซีเบ็คลดลงเนื่องมาจากการสูญเสียแมกนีเซียมและซิลิกอนจากสารละลายของแข็ง อย่างไรก็ตามถ้ามีเหล็กละลายกลับเข้าไปในช่วงที่ทำการ solutioning และในช่วงทำการบ่มแข็งมีเหล็กออกจากสารละลายของแข็งทำปฏิกิริยากับซิลิกอนได้เป็นเฟส $\alpha\text{-Al}_3\text{Fe}_2\text{Si}_2$ หรือ $\beta\text{-Al}_3\text{FeSi}$ [2] อาจมีผลให้สัมประสิทธิ์ซีเบ็คเพิ่มขึ้นในช่วงแรกเนื่องมาจากการละลายของเหล็กในอะลูมิเนียมส่งผลให้

ลัมประสิทธิ์ซีบีคลดลงและการแยกตัวออกมาของเหล็กออกจากซิลิกอนส่งผลทำให้ลัมประสิทธิ์ซีบีคเพิ่มขึ้น [14]

เมื่อพิจารณาผลของการวัดความแข็งในรูปที่ 4.6 จะพบว่า ความแข็งของชิ้นงานเพิ่มขึ้นเมื่อทำการบ่มแข็งนานขึ้นเนื่องมาจากการเฟส Mg-Si ซึ่งมีความเป็น coherent กับอะลูมิเนียม โดยจะพบว่าความแข็งที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส จะให้ความแข็งสูงกว่าการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียสเมื่อเวลาการบ่มแข็งเท่ากันเนื่องมาจากการเฟส Mg-Si เกิดขึ้นได้เร็วกว่า



รูปที่ 4.6 ผลการวัดความแข็งร็อกเวลล์สเกล H ของอะลูมิเนียม 6063 ที่ผ่านการบ่มแข็ง

4.2.3 ข้อดีและข้อเสียของเครื่องมือวัดลัมประสิทธิ์ซีบีคในแนวดิ่ง

เครื่องมือวัดลัมประสิทธิ์ซีบีคซีบีคในแนวดิ่งมีข้อดีคือสามารถเพิ่มอุณหภูมิที่หัววัดด้านร้อนได้อย่างรวดเร็วเนื่องจากหัววัดมีขนาดเล็ก และสามารถเลื่อนตำแหน่งที่จะทำการวัดได้โดยไม่ต้องเปิดฝาเครื่อง แต่มีข้อเสียคือเทอร์โมคัปเปิลเปิดต่อกับแท่นทองแดงด้านเย็นที่บริเวณกลางแท่น ซึ่งมีโอกาสที่จะให้เกิดความคลาดเคลื่อนจากการวัดได้ถ้าตัวอย่างนำความร้อนได้ดี และความร้อนได้ผ่านเข้าไปยังแท่นทองแดงด้านเย็น นอกจากนี้ยังมีข้อจำกัดเกี่ยวกับระยะห่างระหว่างด้านร้อนและด้านเย็นสูงสุดที่ 3 เซนติเมตร ซึ่งจะทำให้ไม่สามารถสร้างความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างด้านร้อนด้านเย็นได้มากนัก จากข้อเสียดังกล่าวจึงได้มีการพัฒนาอุปกรณ์วัดค่าลัมประสิทธิ์ซีบีคในแนวนอนเพื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างด้านร้อนและด้านเย็น

4.3 การวัดสัมประสิทธิ์ชีเบ็คโดยใช้อุปกรณ์วัดสัมประสิทธิ์ชีเบ็คในแนวนอน

4.3.1 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์ชีเบ็คและความต้านทานไฟฟ้าที่เกิดจากการรีดเย็น

ตัวอย่างอะลูมิเนียมผสม 6063 ที่มีขนาดเริ่มต้นที่ 3.1 มิลลิเมตร ได้รับการรีดเย็นจนมีขนาดต่างๆดังที่แสดงในตารางที่ 4.4

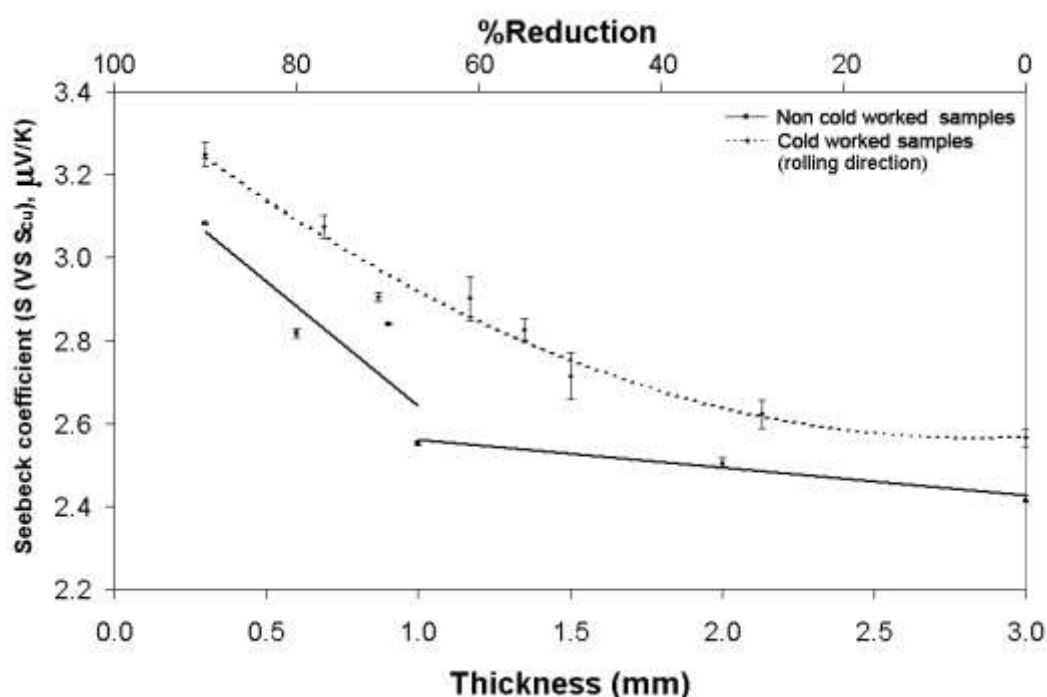
ตารางที่ 4.4 ขนาดชิ้นงานหลังจากการรีดเย็นและเปอร์เซ็นต์การลดขนาดของอะลูมิเนียม 6063 มีความหนาเริ่มต้น 3.1 มิลลิเมตร

ขนาดชิ้นงานหลังจากการรีดเย็น (มิลลิเมตร)	เปอร์เซ็นต์การลดขนาด
3.1	0
2.2	29
1.7	50
1.4	55
1.2	61
0.9	71
0.7	77
0.3	90

หลังจากการลดขนาด ชิ้นงานจะถูกวัดสัมประสิทธิ์ชีเบ็คในทิศทาง rolling เพื่อดูผลของการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์ชีเบ็คที่เกิดจากการลดขนาดด้วยการรีดเย็น ประเด็นหนึ่งซึ่งอาจมีผลต่อสัมประสิทธิ์ชีเบ็คคือความหนาของตัวอย่างเนื่องจากเครื่องมือวัดสัมประสิทธิ์ชีเบ็คในแนวนอนให้ความร้อนกับตัวอย่างเพียงด้านเดียว ดังนั้นถ้าตัวอย่างมีความหนามากจะมีผลทำให้สัมประสิทธิ์ชีเบ็คมีค่าน้อยกว่าตัวอย่างที่มีความหนาน้อย จึงได้มีการทำการทดลองเพิ่มเติมโดยทำการวัดตัวอย่างที่มีความกว้างและความยาวเท่ากันแต่มีความหนาต่างกัน โดยตัวอย่างชุดนี้ไม่ได้ผ่านการรีดเย็น จึงไม่มีตัวแปรที่เกิด dislocation เข้ามาเกี่ยวข้อง ซึ่งได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.7

จากผลการทดลองจะสังเกตเห็นว่าตัวอย่างที่ผ่านการรีดและไม่ผ่านการรีดมีแนวโน้มของสัมประสิทธิ์ชีเบ็คไปในทิศทางเดียวกันคือสัมประสิทธิ์ชีเบ็คสูงขึ้นเมื่อมีความหนาลดลง นอกจากนี้จะเห็นว่าความ

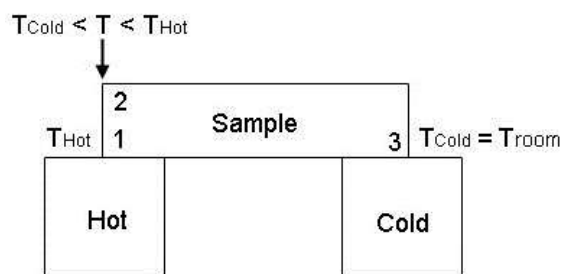
แตกต่างของเส้นแนวโน้มของทั้ง 2 เส้นมีขนาดใกล้เคียงกันตลอดช่วงความหนาของชิ้นงาน จะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็คในแนว rolling เพิ่มขึ้นเมื่อเปอร์เซ็นต์การลดขนาดเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามไม่สามารถสรุปผลของแนวโน้มค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็คจากการรีดเย็นของตัวอย่างขนาดเล็กกว่า 1.0 มิลลิเมตรได้ เนื่องจากชิ้นงานที่ใช้วัดไม่ผ่านการรีดเย็นแต่เตรียมจากการทำ wire cut ซึ่งอาจทำให้ผิวชิ้นงานมีความเรียบที่ต่างออกไปหรืออาจทำให้โครงสร้างจุลภาคแตกต่างจากโครงสร้างก่อนรีด



รูปที่ 4.7 การเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์ซีเบ็คของอะลูมิเนียม 6063 ที่มีขนาดต่างกัน โดยผ่านการรีดเย็นและไม่ผ่านการรีดเย็น การวัดสัมประสิทธิ์ซีเบ็คของตัวอย่างที่ผ่านการรีดเย็นกระทำในแนว rolling (ตัวอย่างที่ไม่ผ่านการรีดเย็นที่มีความหนาต่ำกว่า 1 มิลลิเมตรได้มาจากระบวนการ wire cut)

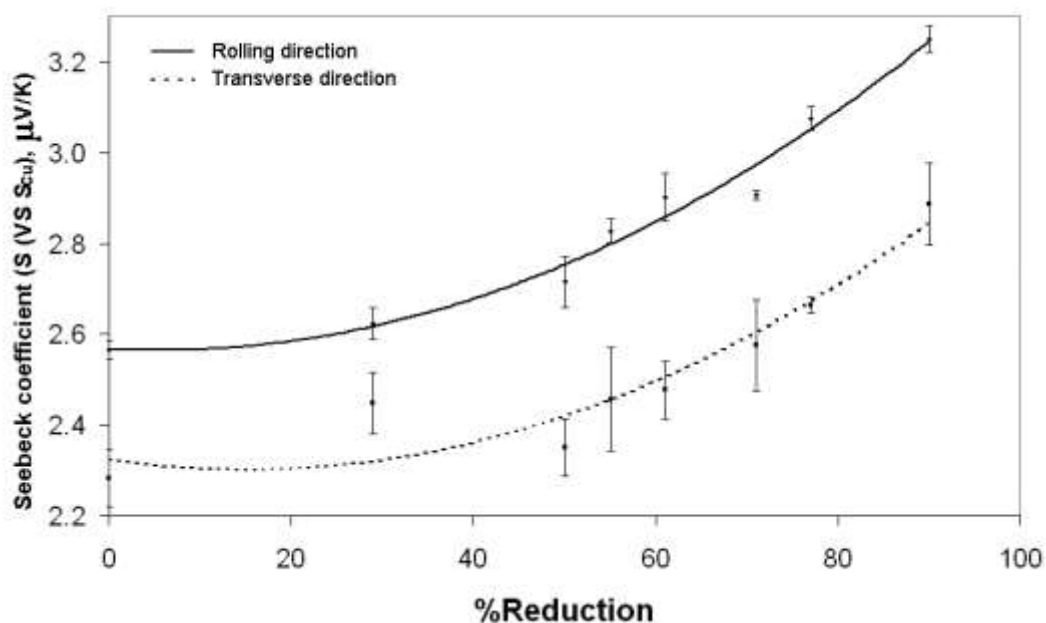
ผลการทดลองสัมประสิทธิ์ซีเบ็คที่เปลี่ยนไปจากการรีดเย็นในงานนี้ต่างจากเอกสารอ้างอิงส่วนใหญ่ซึ่งระบุว่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็คลดลงเมื่อเปอร์เซ็นต์การลดขนาดเพิ่มขึ้น เช่นการทดลองของ Bami และคณะ [7] ซึ่งทำการรีดเย็นเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำในช่วงเปอร์เซ็นต์การลดขนาด 0-80 ได้ความต่างของสัมประสิทธิ์ซีเบ็ค $0.34 \mu\text{V/K}$ และ Khelifaoui และคณะ [9] ทำการรีดเย็นไทเทเนียมผสม Ti-Ni ที่ช่วงเปอร์เซ็นต์การลดขนาด 0-40 ได้ความต่างของสัมประสิทธิ์ซีเบ็ค $4.5 \mu\text{V/K}$ ทั้งนี้แนวโน้มที่แตกต่างนี้อาจเนื่องมาจากวัสดุที่แตกต่างกันซึ่งอะลูมิเนียมเป็นโลหะอ่อนที่ขึ้นรูปได้ง่ายจึงอาจทำให้ dislocation เกิดขึ้นไม่มากนัก

นอกจากนี้จะเห็นได้ว่า ความหนาของชิ้นงานก็ส่งผลต่อสัมประสิทธิ์ซีเบ็คซึ่งสาเหตุของความเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์ซีเบ็คที่เปลี่ยนไปตามความหนาสามารถอธิบายได้โดยใช้แบบจำลองดังรูปที่ 4.8 ความต่างศักย์จากอิทธิพลซีเบ็คระหว่างจุดที่ 1 และจุดที่ 3 จะมากกว่าความต่างศักย์จากอิทธิพลซีเบ็คระหว่างจุดที่ 2 และจุดที่ 3 ซึ่งทำให้ความต่างศักย์จากอิทธิพลซีเบ็คของทั้งชิ้นงานมีค่าอยู่ระหว่างความต่างศักย์จากอิทธิพลซีเบ็คจากจุดที่ 1 ถึงจุดที่ 3 และ ความต่างศักย์จากอิทธิพลซีเบ็คจากจุดที่ 2 ถึงจุดที่ 3 ตามหลักการทางไฟฟ้า เมื่อพิจารณาถึงความหนาของตัวอย่างที่เปลี่ยนไปจะพบว่า ถ้าตัวอย่างบางมากๆ อุณหภูมิ T จะมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิ T_{hot} ทำให้สัมประสิทธิ์ซีเบ็ครวมใกล้เคียงกับสัมประสิทธิ์ซีเบ็คทางอุดมคติ แต่ถ้าตัวอย่างมีความหนามากขึ้นอุณหภูมิ T จะมีค่าน้อยกว่าอุณหภูมิ T_{hot} มากขึ้นซึ่งจะทำให้สัมประสิทธิ์ซีเบ็ครวมมีค่าน้อยลงตามความหนาที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.8 แบบจำลองการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในตัวอย่างในขณะทำการวัดสัมประสิทธิ์ซีเบ็ค

การทดลองต่อไปคือการวัดสัมประสิทธิ์ซีเบ็คของตัวอย่างที่ผ่านการรีดเย็นในแนว transverse ซึ่งได้ผลการทดลองเทียบกับสัมประสิทธิ์ซีเบ็คของตัวอย่างที่ผ่านการรีดเย็นในแนว rolling ดังแสดงในรูปที่ 4.9 ซึ่งจะพบว่ามีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันคือสัมประสิทธิ์ซีเบ็คเพิ่มขึ้นเมื่อเปอร์เซ็นต์การลดขนาดเพิ่มขึ้น โดยสัมประสิทธิ์ซีเบ็คในแนว transverse มีค่าน้อยกว่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็คในแนว rolling แต่เนื่องจากมีประเด็นของขนาดเข้ามาเกี่ยวข้องโดยในการทดลองนี้ โดยที่ขนาดตัวอย่างมีความยาว 5 เซนติเมตรในแนว rolling และ 2.5 เซนติเมตรในแนว transverse ซึ่งอาจส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์ซีเบ็ค ดังนั้นจึงอาจจะต้องออกแบบการทดลองใหม่โดยทำการตัดตัวอย่างที่ผ่านการรีดให้มีขนาดเท่ากับตัวอย่างที่ไม่ผ่านการรีดที่มีความหนาเท่ากัน มีความยาวในแนว rolling และ transverse เท่ากัน ซึ่งน่าจะได้ผลของการรีดเย็นที่มีต่อสัมประสิทธิ์ซีเบ็คในแนว rolling และ transverse ที่ชัดเจนยิ่งขึ้น



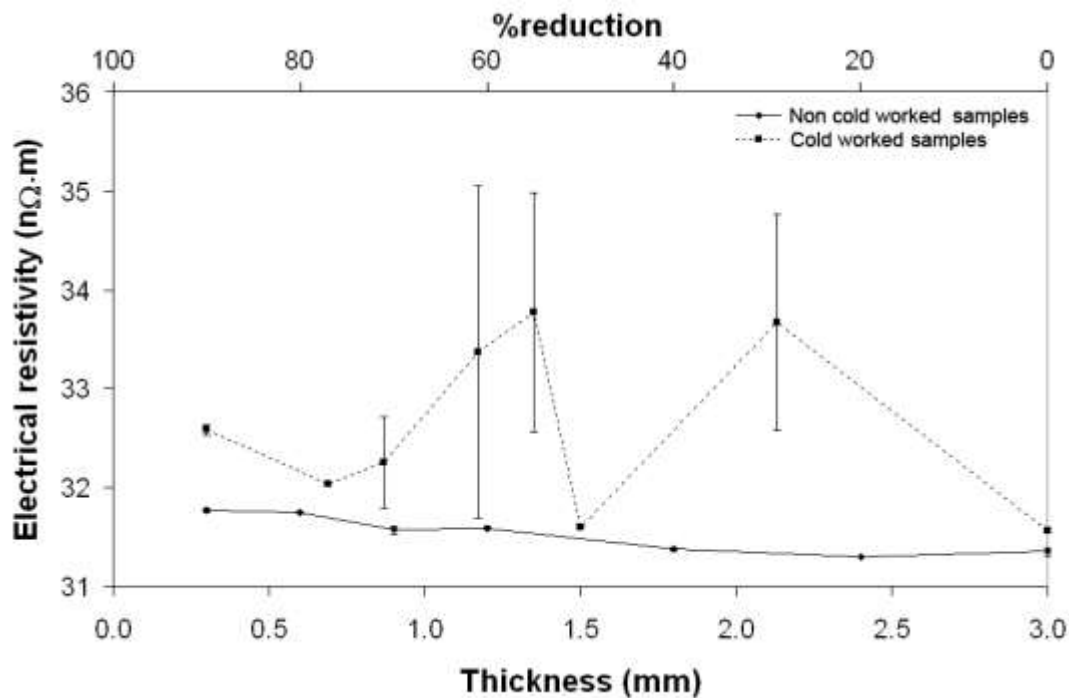
รูปที่ 4.9 ผลการวัดสัมประสิทธิ์ซีเบ็คของอะลูมิเนียม 6063 ที่ผ่านการรีดเย็นในแนว rolling และ transverse

ผลของการวัดความต้านทานไฟฟ้า (resistivity) ของตัวอย่างที่ผ่านการรีดเย็นและตัวอย่างที่ไม่ผ่านการรีดเย็นแสดงไว้ในรูปที่ 4.10 เครื่องมือที่ใช้วัดความต้านทานไฟฟ้าใช้หลักการของ eddy current ซึ่งทำให้ความหนาของชิ้นงานต่ำสุดที่จะวัดได้จะต้องมากกว่า 3 เท่าของ effective penetration depth ดังสมการที่ 4.1

$$eff = \frac{503}{\sqrt{\sigma \cdot f}} \quad (4.1)$$

โดยที่ eff = effective penetration depth (mm)
 σ = conductivity (MS/m)
 f = frequency (Hz)

เมื่อแทนค่า $\sigma = 28.5$ MS/m ซึ่งเป็นค่าการนำไฟฟ้าที่ต่ำที่สุดในการทดลองนี้ และ $f = 960,000$ Hz (960 kHz) จะได้ค่าเป็นสามเท่าของ effective penetration depth (0.29 มิลลิเมตร) ซึ่งต่ำกว่าความหนาของตัวอย่างที่น้อยที่สุดคือ 0.3 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.10 ผลการวัดความต้านทานไฟฟ้าของอะลูมิเนียม 6063 ที่ผ่านการรีดเย็นไม่ผ่านการรีดเย็น

ค่าการนำไฟฟ้าที่วัดได้จะถูกแปลงเป็นค่าความต้านทานไฟฟ้าดังสมการที่ 4.2

$$\rho = \frac{1000}{\sigma} \quad (4.2)$$

โดยที่ ρ = resistivity (nΩ·m)
 σ = conductivity (MS/m)

ตัวอย่างที่ไม่ผ่านการรีดเย็นมีความต้านทานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจากความหนา 3 มิลลิเมตร ความต้านทานไฟฟ้า 31.36 nΩ·m จนถึงความหนา 0.3 มิลลิเมตร ความต้านทาน 31.77 nΩ·m ซึ่งโดยปกติความต้านทานไฟฟ้าควรมีค่าคงที่ทุกๆความหนาเนื่องจากความต้านทานไฟฟ้าไม่ขึ้นอยู่กับความหนาและความยาวของตัวอย่างดังสมการที่ 4.3

$$\rho = \frac{R \cdot A}{l} \quad (4.3)$$

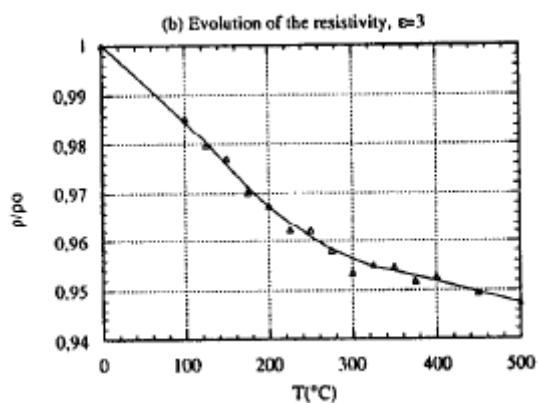
โดยที่ ρ = resistivity (Ω·m)
 R = resistance (Ω)
 l = length (m)

$$A = \text{area} \quad (\text{m}^2)$$

อย่างไรก็ตามการตัดชิ้นงานให้บางด้วยกระบวนการ wire cut ซึ่งเกี่ยวข้องกับการทำให้ตัวอย่างเกิดการเหนียวทางไฟฟ้าจนกระทั่งตัวอย่างละลายและขาดในแนวที่ต้องการอาจส่งผลให้เกิดการ

เปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมเกรด 6063 ที่บริเวณผิวของชิ้นงานเนื่องจากมีธาตุที่ละลายอยู่ในอะลูมิเนียมสามารถตกผลึกได้ที่อุณหภูมิสูง ดังนั้นจึงอาจจะต้องขัดผิวในส่วนที่เกิดการหลอมเหลวทิ้งไปก่อนทำการทดลองในขั้นต่อไป

จากงานวิจัยของ Verdier และคณะ [17] ซึ่งได้ทำการทดลองรีดเย็นโลหะผสม Al-2.5Mg แล้วอบตัวอย่างในช่วงอุณหภูมิ 100-500 องศาเซลเซียส ซึ่งจะทำให้เกิดปรากฏการณ์ recovery ในชิ้นงาน หลังจากนั้นจึงวัดความต้านทานไฟฟ้า ได้ผลการทดลองตามรูปที่ 4.11 ซึ่งแสดงถึงให้เห็นว่าความต้านทานไฟฟ้าลดลงที่อุณหภูมิสูงขึ้น ความต้านทานไฟฟ้าที่ลงอาจจะอธิบายได้จากปริมาณ dislocation ลดลงเมื่อชิ้นงานผ่านกระบวนการ recovery จากหลักการนี้สามารถนำมาอธิบายผลการทดลองในอะลูมิเนียม 6063 ได้ ในช่วงเปอร์เซ็นต์การลดขนาด 77 และ 90 ซึ่งมีแนวโน้มเป็นไปตาม dislocation density ที่เพิ่มขึ้นที่เกิดจากการรีดเย็น โดยดูได้จาก error bar ซึ่งอยู่ในช่วงแคบมาก ๆ และความต้านทานไฟฟ้าที่สูงกว่าตัวอย่างที่ไม่ได้รีดเย็นที่ความหนาเดียวกัน ผลการทดลองส่วนอื่นๆยังคงมีความผันแปรค่อนข้างสูงเช่นผลการทดลองที่เปอร์เซ็นต์การลดขนาด 29 55 และ 61 เปอร์เซ็นต์ อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่าชิ้นงานที่ผ่านการรีดเย็นมีค่าความต้านทานไฟฟ้าสูงกว่าชิ้นงานที่ไม่ผ่านการรีดเย็นในทุกช่วงความหนาของชิ้นงาน

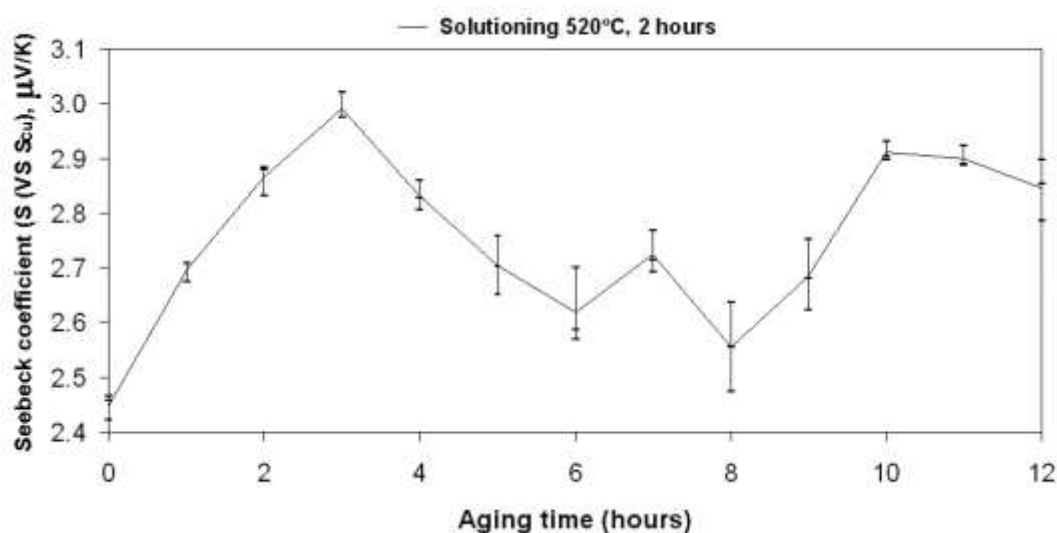


รูปที่ 4.11 การเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้าสัมผัสของโลหะผสม Al-2.5Mg ที่ผ่านการรีดเย็นและผ่านการอบที่อุณหภูมิต่างๆ [17]

4.3.2 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์ซีเบ็คที่เกิดจากการบ่มแข็ง

4.3.2.1 การทดลองช่วงที่ 1 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์ซีเบ็คของตัวอย่างขนาดเล็กที่ผ่านการบ่มแข็ง

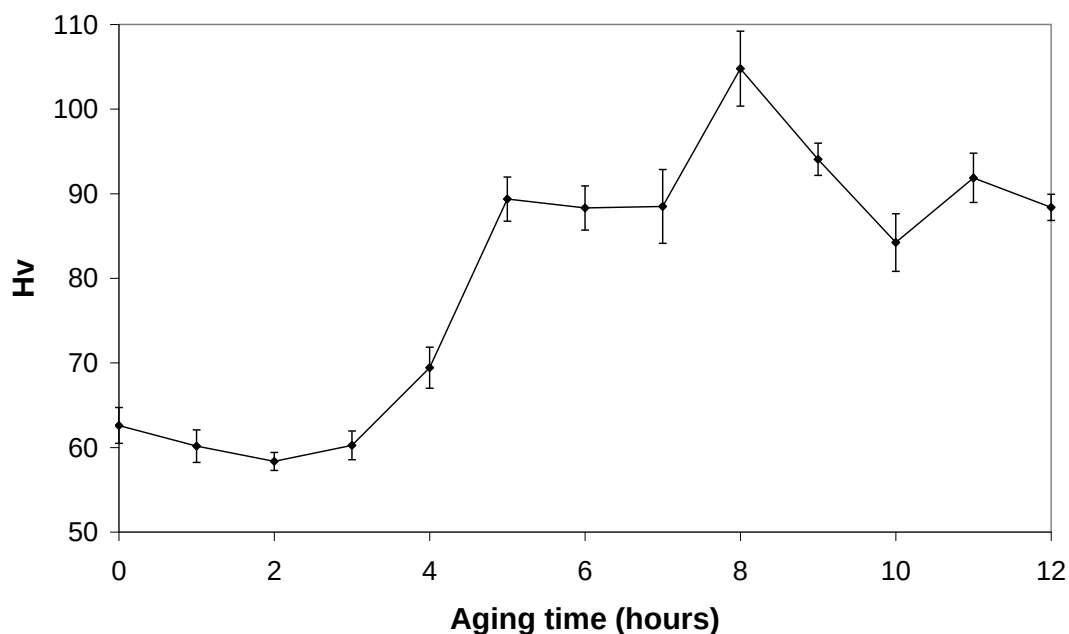
การทดลองในช่วงนี้เป็นการทดลองกับชิ้นงานขนาด $1.9 \times 1.9 \times 5.0$ ลูกบาศก์เซนติเมตรที่ผ่านการอบ solutioning ที่อุณหภูมิ 520 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และทำการบ่มแข็งในช่วงเวลา 0-12 ชั่วโมง ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็คของชิ้นงานแสดงในรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 การเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์ซีเบ็คของอะลูมิเนียมผสมแมกเนต 6063 ขนาด $1.9 \times 1.9 \times 5.0$ ลูกบาศก์เซนติเมตรที่เกิดจากการบ่มแข็ง

จากรูปที่ 4.1.2 สัมประสิทธิ์ซีเบ็คเพิ่มขึ้นในช่วงการบ่มแข็ง 0-3 ชั่วโมงและค่อยๆลดลงจนถึงค่าต่ำสุดภายหลังการบ่มแข็ง 8 ชั่วโมงและเพิ่มขึ้นอีกครั้งหนึ่งหลังจากนั้น โดยเมื่อเทียบกับงานวิจัยอื่นๆ [13,14] จะได้ผลที่มีความแตกต่างกัน โดยอบประมาณ 1 ชั่วโมงจะทำให้เกิด GP. Zone และเมื่ออบต่อไปเรื่อยๆ จนถึงประมาณ 8 ชั่วโมงจะได้เฟส Mg-Si ที่เป็นโครงสร้าง coherent กับเมตริกซ์ ทำให้สัมประสิทธิ์ซีเบ็คลดลง หลังจากนั้นสัมประสิทธิ์ซีเบ็คอาจจะเพิ่มขึ้นถ้าในช่วงอบ solutioning มีเหล็กละลายกลับเข้าไปเป็นสารละลายของแข็ง และในช่วงบ่มแข็งเหล็กแยกตัวออกมาจากสารละลายของแข็ง

ตัวอย่างที่ผ่านการวัดสัมประสิทธิ์ซีเบ็คมาแล้ว ถูกนำไปวัดความแข็ง โดยในชุดการทดลองนี้ได้เลือกความแข็งวิกเกอร์ ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.13

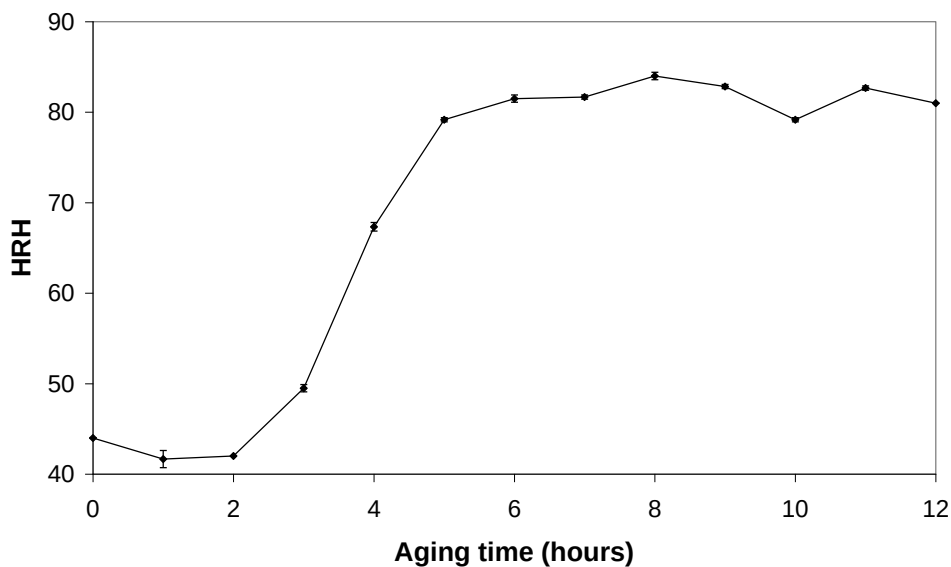


รูปที่ 4.13 การเปลี่ยนแปลงความแข็งวิกเกอร์ของอะลูมิเนียมผสมเกรด 6063 ขนาดเล็กที่เกิดจากการบ่มแข็ง ภายหลังการอบ solutioning ที่ 520 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง

ผลการทดสอบความแข็งวิกเกอร์ในงานวิจัยนี้ได้ค่าความแข็งสูงสุดเมื่อขึ้นงานผ่านการอบเป็นเวลา 8 ชั่วโมงสอดคล้องกับผลการวัดความแข็งวิกเกอร์ในงานวิจัยของ Abdala และคณะ [13] ซึ่งทำการทดลองกับอะลูมิเนียมผสมเกรด 6013 โดยจะได้ความแข็งสูงสุดที่ 6 ชั่วโมง เนื่องจากเป็นช่วงที่เกิดเฟส β'' ซึ่งเป็นเฟสของ Mg-Si ที่มีโครงสร้างผลึก coherent กับโครงสร้างผลึกของอะลูมิเนียม โดยจากงานวิจัยของ Edward และคณะ [3] เฟส β'' ที่เกิดขึ้นมีขนาดประมาณ 10-15 นาโนเมตร

นอกจากนี้ยังพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็คแปรผกผันกับค่าความแข็ง ซึ่งอาจเป็นผลเนื่องมาจากแมกนีเซียมและซิลิกอนในอะลูมิเนียมเกิดตกตะกอนเป็น Mg_2Si ทำให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้น ปริมาณแมกนีเซียมและซิลิกอนที่ลดน้อยลงส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็คลดลงเมื่อความแข็งเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็คที่เพิ่มขึ้นในช่วงแรกอาจเกิดจากการละลายกลับเข้าไปของแมกนีเซียมและซิลิกอนทำให้สัมประสิทธิ์ซีเบ็คเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้ยังต้องมีการพิสูจน์โครงสร้างจุลภาคอีกครั้งหนึ่ง

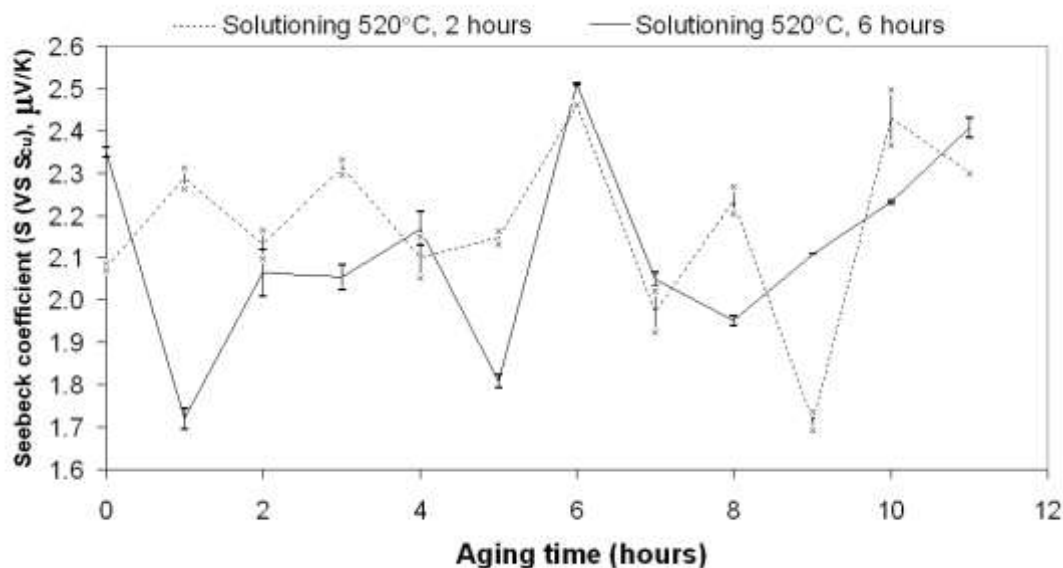
นอกจากนั้นตัวอย่างยังได้ถูกนำไปวัดความแข็งแบบร็อกเวลล์สเกล H เพื่อยืนยันผลการทดลอง โดยได้ผลดังในรูปที่ 4.14 ซึ่งพบว่าผลที่ได้มีแนวโน้มเดียวกันกับรูปที่ 4.13 คือได้ความแข็งสูงสุดที่การบ่มแข็งเป็นเวลา 8 ชั่วโมง



รูปที่ 4.14 การเปลี่ยนแปลงของความแข็งร็อกเวลล์สเกล H ของตัวอย่างอะลูมิเนียมผสมเกรด 6063 ขนาดเล็กที่เกิดจากการบ่มแข็ง

4.3.2.2 การทดลองช่วงที่ 2 การศึกษาผลของขนาดชิ้นงานต่อค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็ค

ทำการทดลองกับชิ้นงานขนาด $2.5 \times 2.5 \times 20.0$ ลูกบาศก์เซนติเมตร เพื่อเปรียบเทียบผลกับชิ้นงานขนาดเล็กและเพื่อใช้ตัวอย่างสำหรับการทดสอบความแข็งแรงดึง ผลของการวัดสัมประสิทธิ์ซีเบ็คแสดงไว้ในรูปที่ 4.15

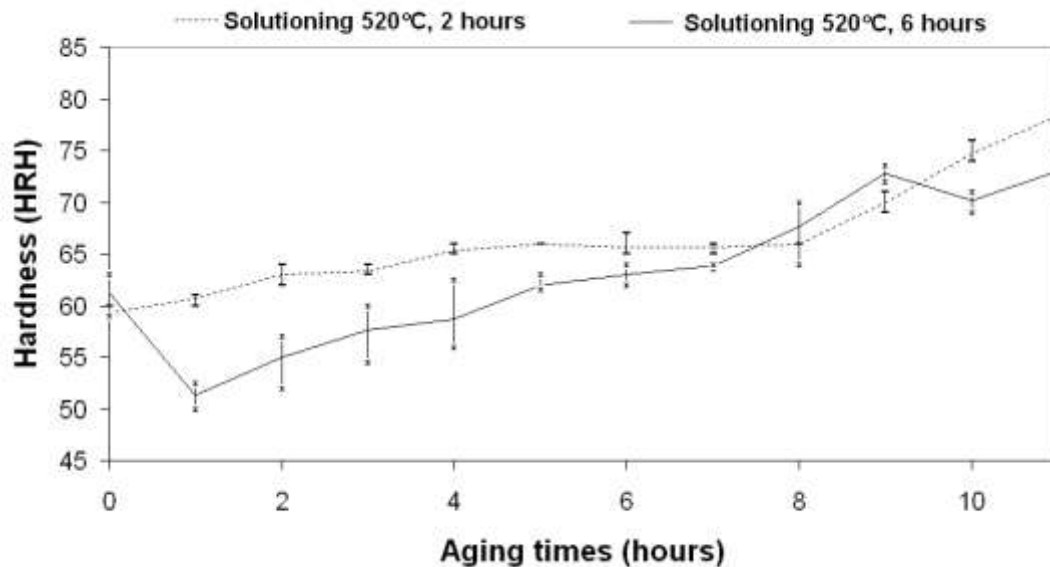


รูปที่ 4.15 การเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์ซีเบ็คของอะลูมิเนียมผสมเกรด 6063 ที่เกิดจากการบ่มแข็งในชิ้นงานขนาดใหญ่

จากรูปที่ 4.15 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็คทั้งสองสถานะไม่มีแนวโน้มที่แน่นอน โดยจากสมมติฐานที่ตั้งไว้ ชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่อาจจะต้องการการอบ solutioning ที่นานกว่าชิ้นงานขนาดเล็กเพื่อให้แมกนีเซียมและซิลิกอนซึ่งตกผลึกอยู่ในอะลูมิเนียมละลายกลับเข้าไปในอะลูมิเนียมเป็นสารละลาย

ของแข็งจนหมด โดยจากงานวิจัยของ Massardier และคณะ [14] แมกนีเซียมและทองแดงทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็คเพิ่มขึ้นเมื่อละลายในอะลูมิเนียม (ตารางที่ 2.5) ซิลิกอนและเหล็กทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็คลดลงเมื่อละลายในอะลูมิเนียม ดังนั้นถ้าการสารละลายของแข็งเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ สัมประสิทธิ์ซีเบ็คควรมีค่ามากกว่ากรณีที่การเกิดสารละลายของแข็งเกิดขึ้นอย่างไม่สมบูรณ์

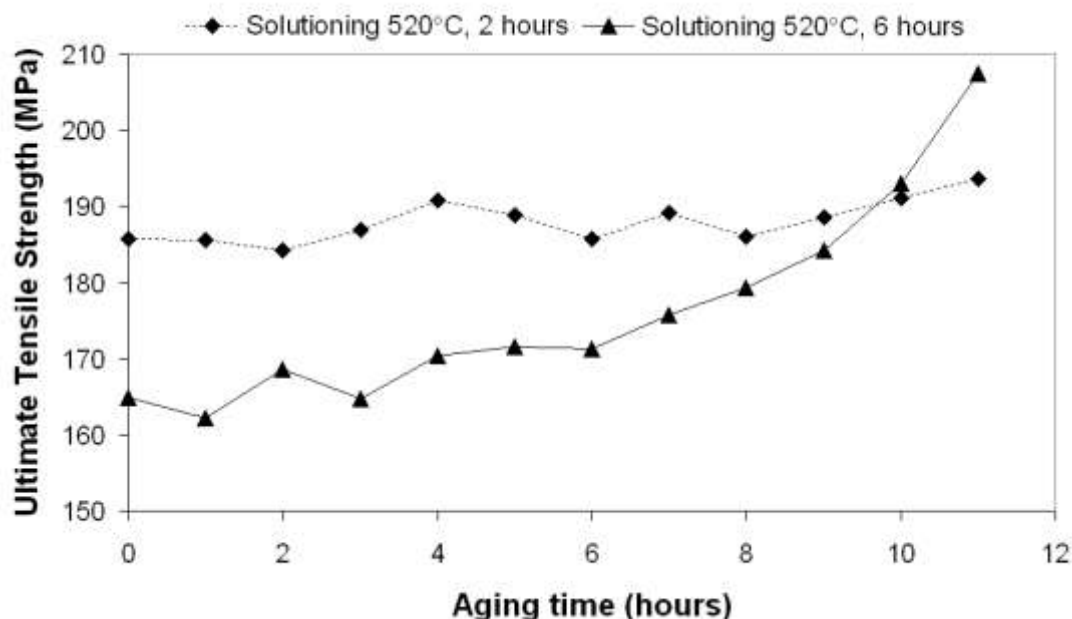
(พิจารณาว่ามีเพียงแค่แมกนีเซียมและซิลิกอนละลายกลับเข้าไปในอะลูมิเนียม ส่วนเหล็กและทองแดงไม่ละลายกลับเข้าไปในอะลูมิเนียม) เมื่อเริ่มทำการบ่มแข็งสัมประสิทธิ์ซีเบ็คจะเริ่มลดลงเนื่องจากการเกิด G.P.zones และเกิดเฟส β'' และสัมประสิทธิ์ซีเบ็คจะเพิ่มขึ้นอีกครั้งเมื่อเฟส β'' เปลี่ยนเป็นเฟส β' และเฟส β เนื่องจากทั้ง 2 เฟสมีความเป็น coherent กับอะลูมิเนียมน้อยกว่าเฟส β'' และถ้าทำ solutioning ไม่นานพอที่จะละลายแมกนีเซียมและซิลิกอนกลับเข้าไปได้ทั้งหมด การเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์ซีเบ็คที่เกิดจากการบ่มแข็งจะมีผลน้อยลง หลังจากนั้นตัวอย่างถูกนำไปวัดความแข็งร็อกเวลล์สเกล H ดังในรูปที่ 4.16 ซึ่งพบว่า ความแข็งของตัวอย่างทั้งสองสถานะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องซึ่งแสดงถึงการเปลี่ยนเฟสในตัวอย่างเป็นไปตามที่ได้คาดการณ์ไว้



รูปที่ 4.16 การเปลี่ยนแปลงของความแข็งร็อกเวลล์สเกล H ของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียม 6063 ขนาดใหญ่ที่เกิดจากการบ่มแข็ง

เมื่อเปรียบเทียบผลในรูปที่ 4.16 ซึ่งเป็นตัวอย่างขนาดใหญ่ และรูปที่ 4.13 ซึ่งเป็นตัวอย่างขนาดเล็กที่เวลาอบ solutioning 2 ชั่วโมง จะพบว่าตัวอย่างขนาดเล็กจะให้ความแข็งสูงสุดที่การบ่มแข็ง 8 ชั่วโมง ในขณะที่ตัวอย่างขนาดใหญ่ไม่ได้ความแข็งสูงสุดที่การบ่มแข็ง 8 ชั่วโมง ซึ่งอาจพิจารณาได้เป็นสองกรณีคือในช่วงการอบ solutioning การละลายของ Mg และ Si กลับเข้าไปในชิ้นงานขนาดใหญ่ทำได้ไม่สมบูรณ์เท่ากับชิ้นงานขนาดเล็ก หรือในช่วงบ่มแข็งเกิดผลึก precipitate ของเฟส Mg-Si ในชิ้นงานขนาดใหญ่ช้ากว่าในชิ้นงานขนาดเล็ก

หลังจากนั้นตัวอย่างถูกนำไปกลึงจนมีรูปร่างเป็นคัมเบลเพื่อทดสอบความแข็งแรงแรงดึง ซึ่งได้ผลการทดสอบแรงดึงสูงสุด (ultimate tensile strength) ดังรูปที่ 4.17 ซึ่งจะพบว่าความแข็งแรงแรงดึงสูงสุดของตัวอย่างที่ผ่านการทำ solutioning ที่ 6 ชั่วโมงมีแนวโน้มเดียวกับความแข็ง ในขณะที่ความแข็งแรงแรงดึงของตัวอย่างที่ผ่านการทำ solutioning ที่ 2 ชั่วโมง มีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก ซึ่งมีแนวโน้มไม่เกินไปตามความแข็งที่วัดได้ ทั้งนี้อาจสามารถอธิบายว่าตัวอย่างที่มีขนาดใหญ่ต้องใช้เวลาในการให้ความร้อนที่นานกว่าในการทำให้แมกนีเซียมและซิลิกอนละลายกลับเข้าไปในอะลูมิเนียมหมด ซึ่งตัวอย่างที่ผ่านการทำ solutioning ที่ 6 ชั่วโมงน่าจะเป็นเวลาที่เหมาะสม ในขณะที่ตัวอย่างที่ผ่านการทำ solutioning ที่ 2 ชั่วโมง อาจจะมีเวลาน้อยเกินไปจึงทำให้ผลของการละลายกลับเกิดขึ้นเฉพาะที่บริเวณผิวของตัวอย่าง โดยสามารถอ้างอิงได้จากความแข็งที่เพิ่มขึ้นแต่ความแข็งแรงแรงดึงไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก



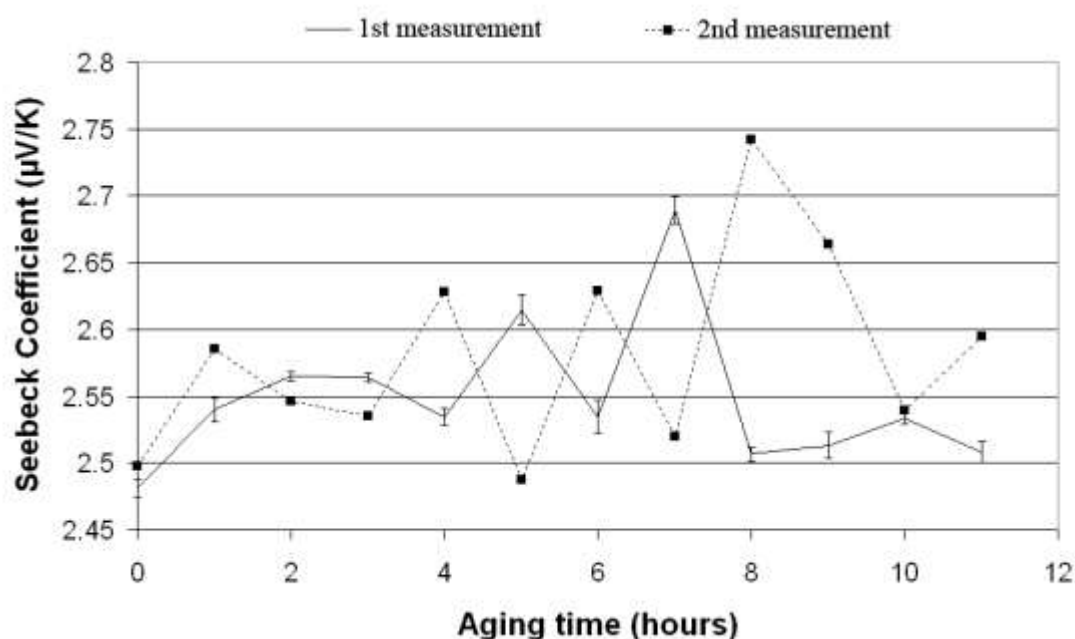
รูปที่ 4.17 การเปลี่ยนแปลงของความแข็งแรงแรงดึง (ultimate tensile strength) ของอะลูมิเนียมผสมเกรด 6063 ที่เกิดจากการบ่มแข็ง

4.3.2.3 การทดลองช่วงที่ 3 การศึกษาผลของการขัดผิวตัวอย่างที่มีต่อการวัด

สัมประสิทธิ์ซีเบ็ค

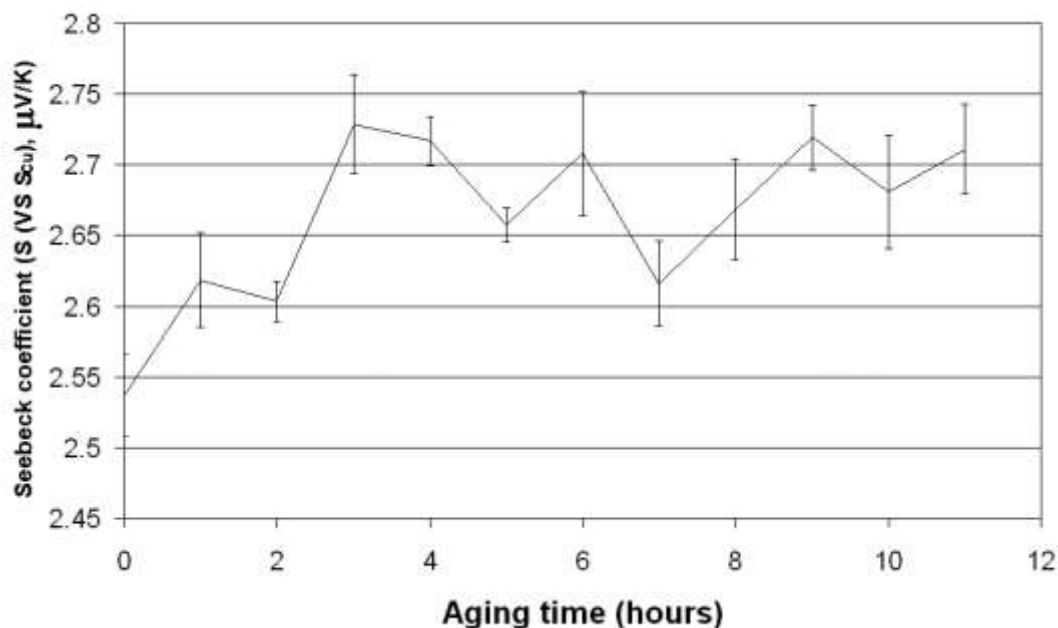
การทดลองในช่วงนี้เป็นการพยายามหาสาเหตุที่ทำให้ผลการวัดสัมประสิทธิ์มีความคลาดเคลื่อน โดยเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองในรูป 4.11 และ รูป 4.14 จะพบว่าที่สภาวะการเตรียมตัวอย่างที่เหมือนกัน ผลการวัดสัมประสิทธิ์ซีเบ็คมีแนวโน้มที่จะแตกต่างกันค่อนข้างมาก โดยปัญหาที่เกิดขึ้นอาจจะเกิดปัญหาที่อุปกรณ์หรือที่ตัวอย่าง ซึ่งการแก้ปัญหาที่อุปกรณ์ได้ทำการปรับแก้โปรแกรมเพื่อให้การอ่านอุณหภูมิด้านร้อน อุณหภูมิด้านเย็น ความต่างศักย์ต่อเนื่องกันไปก่อนที่จะทำการจัดเก็บข้อมูลลงในฮาร์ดดิสก์ ลดการเวลาการกรองข้อมูลที่นาโนโวลต์มิเตอร์ให้สั้นลงเพื่อลดการเหลื่อมเวลาการอ่านอุณหภูมิและความต่างศักย์ซีเบ็ค นอกจากนี้ยังเพิ่มความเร็วของการประมวลผลของเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ควบคุมการวัดสัมประสิทธิ์ซีเบ็คจากความเร็วซีพียู 600 MHz เป็น 3.4 GHz ส่วนการแก้ปัญหาที่ตัวอย่างทำโดยการขัดตัวอย่างด้วยกระดาษทรายเพื่อกำจัดฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ซึ่งเกิดขึ้นตามธรรมชาติบนผิวของอะลูมิเนียม การกำจัดฟิล์มนี้ออกไปเพราะความต่างศักย์จากอิทธิพลซีเบ็คที่เกิดขึ้นที่วัสดุที่ไม่นำไฟฟ้าจะมีความผันแปรอยู่ค่อนข้างมาก [15] นอกจากนั้นยังทำการขัดขั้วร้อนและขั้วเย็นซึ่งทำจากทองแดงหลังจากการเปลี่ยนตัวอย่างทุกครั้ง เพื่อให้มั่นใจว่าหน้าสัมผัสระหว่างทองแดงและอะลูมิเนียมเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์

ตัวอย่างที่นำมาใช้ในการทดลองคือตัวอย่างหลังจากการทดสอบความแข็งแรงแรงดึงในสภาวะ solutioning ที่อุณหภูมิ 520 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ซึ่งอยู่ในรูปดัมเบลที่ขาดแล้ว ทำการตัดปลายจนได้ขนาดชิ้นงานขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร ความสูง 1 เซนติเมตรและนำส่วนที่ถูกตัดออกมาไปทำการวัดสัมประสิทธิ์ซีเบ็คในสภาพที่ยังไม่ขัดผิวและขัดผิวแล้ว ผลการทดลองของตัวอย่างที่ยังไม่ขัดผิวแสดงไว้ในรูปที่ 4.18 จากกราฟจะพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็คที่วัดได้ทั้งสองครั้งในตัวอย่างเดียวกันมีแนวโน้มที่แตกต่างกันมาก



รูปที่ 4.18 การเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์ซีเบ็คของอะลูมิเนียมผสมเกรด 6063 ที่เกิดจากการบ่มแข็งโดยไม่ทำการขัดผิวก่อนการวัดสัมประสิทธิ์ซีเบ็คเปรียบเทียบค่าที่ได้ในการวัด 2 ครั้ง

การทดลองต่อไปคือการวัดสัมประสิทธิ์ซีเบ็คของตัวอย่างเดิมแต่เพิ่มขึ้นตอนการขัดผิวชิ้นงานก่อนการวัดเพื่อกำจัดตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ออก ตัวอย่างแต่ละชิ้นจะแบ่งออกเป็น 4 ตำแหน่ง แต่ละตำแหน่งห่างกัน 90 องศา ดังนั้นการวัดหนึ่งชิ้นงานจึงจะได้ข้อมูล 4 จุด ผลการวัดสัมประสิทธิ์ซีเบ็คแสดงไว้ในรูปที่ 4.19 พบว่า กราฟเริ่มมีแนวโน้มที่ชัดเจนมากขึ้น โดยสัมประสิทธิ์ซีเบ็คเพิ่มขึ้นจากการบ่มแข็งที่ 0-3 ชั่วโมง ลดลงเล็กน้อยจาก 3-7 ชั่วโมง และเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจาก 7-11 ชั่วโมง ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นที่เกี่ยวข้องกับอะลูมิเนียม [13, 14] จะพบความแตกต่างในช่วงแรกของการบ่มแข็ง โดยที่ในงานวิจัยอื่นสัมประสิทธิ์ซีเบ็คมีค่าลดลงตั้งแต่เริ่มทำการบ่มแข็ง ในขณะที่งานวิจัยนี้สัมประสิทธิ์ซีเบ็คมีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Rana และคณะ [12] ซึ่งเกี่ยวกับการตกผลึกในเหล็กกล้า จะได้แนวโน้มที่เหมือนกับงานวิจัยนี้

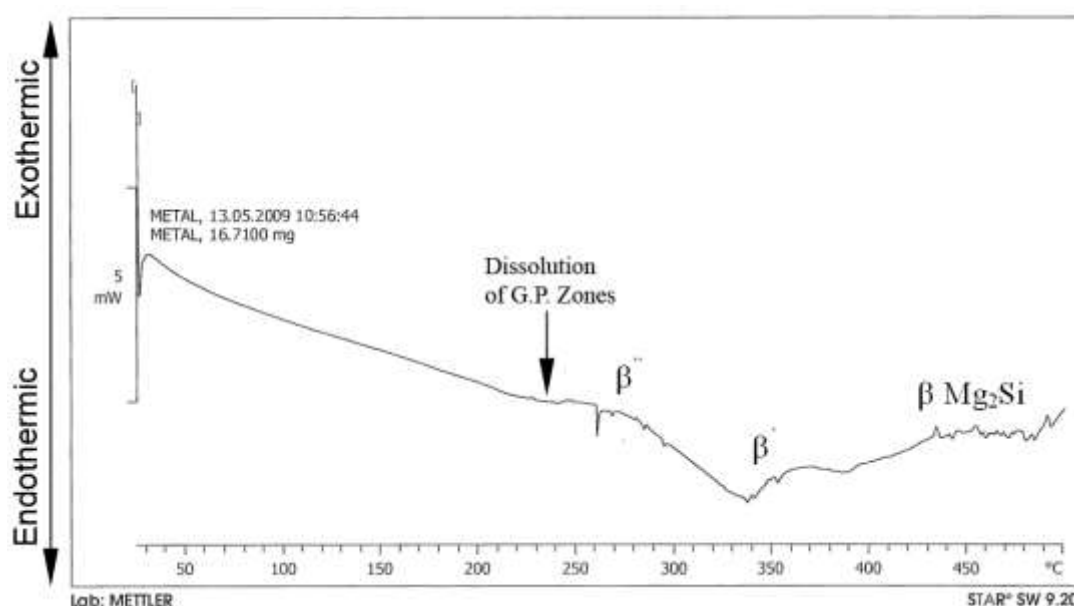


รูปที่ 4.19 การเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์ซีเบ็คของอะลูมิเนียมผสมเกรด 6063 ที่เกิดจากการบ่มแข็ง การวัดกระทำหลังจากการขัดผิวชิ้นงานทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร หน้า 1 เซนติเมตร

นอกจากนี้ยังพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็คในรูปที่ 4.19 มีแนวโน้มในทางเดียวกับค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็คของชิ้นงานอะลูมิเนียมเกรด 6063 ขนาด $1.9 \times 1.9 \times 5.0$ ลูกบาศก์เซนติเมตร ในรูปที่ 4.12 ที่ได้ทำการทดลองไปก่อนหน้านี้ โดยสังเกตพบว่าแนวโน้มค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็คในรูปที่ 4.19 ภายหลังจากการอบเป็นเวลา 3 ชั่วโมงมีแนวโน้มเดียวกับค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็คในรูปที่ 4.12 แต่มีแนวโน้มเร็วขึ้นประมาณ 1 ชั่วโมง ตัวอย่างเช่นค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็คในรูปที่ 4.19 จะเพิ่มขึ้นที่ระยะเวลาอบ 6 ชั่วโมงแล้วลดลงที่ 7 ชั่วโมง หลังจากนั้นจึงเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็คในรูปที่ 4.13 เริ่มลดลงภายหลังจาก 3 ชั่วโมง แล้วเพิ่มขึ้นที่ระยะเวลาในการอบ 7 ชั่วโมง หลังจากนั้นจึงลดลงที่ระยะเวลาอบ 8 ชั่วโมงแล้วจึงเพิ่มขึ้น ทั้งนี้แนวโน้มดังกล่าวที่ต่างกัน 1 ชั่วโมงอาจจะเกิดจากจลนศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยาที่ต่างกัน

การทดลองต่อไปคือการวิเคราะห์ชิ้นงานที่ผ่านการอบ solutioning และยังไม่ผ่านการบ่มแข็งด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) วัตถุประสงค์ของการวิเคราะห์ตัวอย่างด้วย DSC คือการหาเฟสที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่างๆในอะลูมิเนียมผสม 6063 ที่ผ่านการอบ solutioning ที่ 520 องศาเซลเซียสมาเป็นเวลา 6 ชั่วโมง การวิเคราะห์ข้อมูลจะอ้างอิงจากงานวิจัยของ Abdala และคณะ [13] เป็นหลัก โดยหลักการวิเคราะห์คือถ้าเกิด peak ไปในทิศทาง exothermic แสดงว่าเกิดเฟสใหม่ขึ้น และถ้าเกิด peak ไปในทิศทาง endothermic (หรืออาจเรียกว่า valley) แสดงว่าเกิดการสลายตัวของเฟสเดิม จากผลการ

วิเคราะห์ในรูปที่ 4.20 G.P. zones เกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 70 องศาเซลเซียส [2] ซึ่งไม่สามารถเห็นได้อย่างชัดเจนในกราฟนี้ G.P. zones สลายตัวที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส เฟส β'' เกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 260-290 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ยังพบ endothermic peak ที่อุณหภูมิ 260 องศาเซลเซียสซึ่งไม่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนเฟสของอะลูมิเนียมผสม 6063 เฟส β'' เปลี่ยนเป็น เฟส β' ที่อุณหภูมิ 340-360 องศาเซลเซียส และสุดท้ายเฟส β' เปลี่ยนเป็น เฟส β Mg_2Si ที่อุณหภูมิ 440 องศาเซลเซียสเป็นต้นไป ที่บริเวณอุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียสมีแอ่ง endothermic ขนาดใหญ่ซึ่งคาดว่าจะเกิดขึ้นจากการสลายตัวของความเค้นตกค้างที่มีอยู่ในตัวอย่างเนื่องจากตัวอย่างได้มาจากคัมเบลที่ผ่านการทดสอบความแข็งแรงดึง แต่อย่างไรก็ตามการที่ไม่ปรากฏ exothermic peak อย่างชัดเจนในช่วงที่เกิดเฟส β'' และ β' ในผลจาก DSC นี้อาจทำให้ไม่สามารถทำการสรุปพัฒนาการของการเกิดเฟสต่างๆของสารประกอบเชิงโลหะ Mg-Si ในตัวอย่างนี้ได้



รูปที่ 4.20 ผลการทดสอบอะลูมิเนียมผสมเกรด 6063 ที่ผ่านการอบ solutioning 6 ชั่วโมง ด้วย DSC

การทดลองต่อไปคือการวิเคราะห์ชิ้นงานด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer (XRD) จุดมุ่งหมายของการวิเคราะห์ตัวอย่างด้วย XRD คือการวิเคราะห์เฟสที่เกิดขึ้นหลังจากการบ่มแข็งที่อุณหภูมิต่างๆในอะลูมิเนียมผสม 6063 ที่ผ่านการอบ solutioning ที่ 520 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ผลจากการวิเคราะห์การเปลี่ยนเฟสของอะลูมิเนียมผสมเกรด 6063 ที่ผ่านการอบ solutioning ที่ 520 องศาเซลเซียส มาเป็นเวลา 6 ชั่วโมง และทำการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลาต่างๆได้แสดงไว้รูปที่ 4.21 โดยพบเฟสอะลูมิเนียม [no.04-0787] และ Iron Silicon ($\text{Fe}_{1.34}\text{Si}_{0.66}$) [no.89-5975] และพบตำแหน่ง

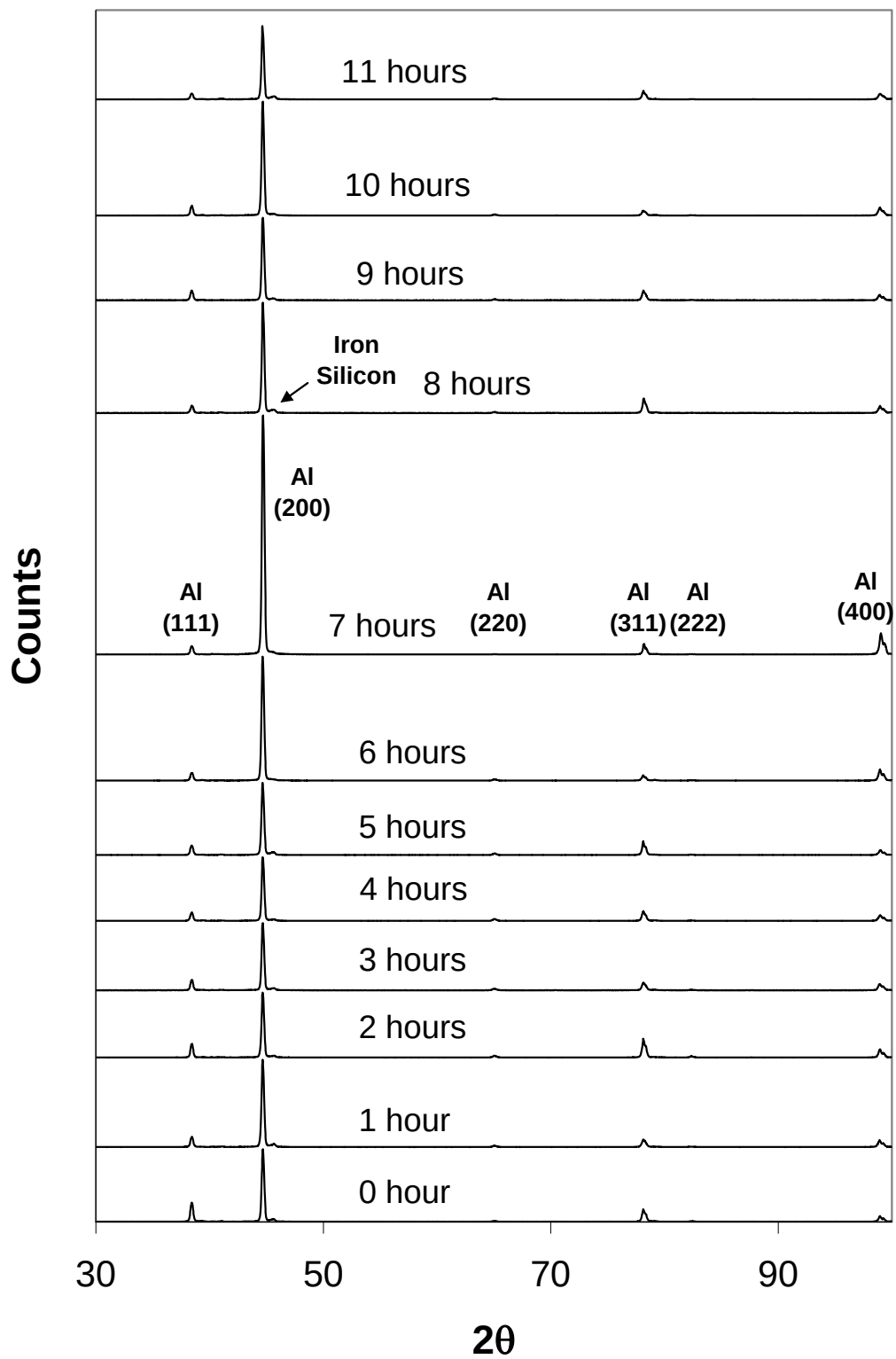
ที่น่าจะเป็น peak หลักของเฟส Mg_2Si ที่มุม 2θ ประมาณ 40 องศา แต่เนื่องจากเป็น peak ที่มีขนาดเล็ก และไม่พบ peak รองของเฟส Mg_2Si จึงไม่อาจยืนยันว่าเป็น peak ของเฟส Mg_2Si หรือไม่

รายละเอียดของเฟสอะลูมิเนียมได้แสดงไว้ตารางที่ 4.5

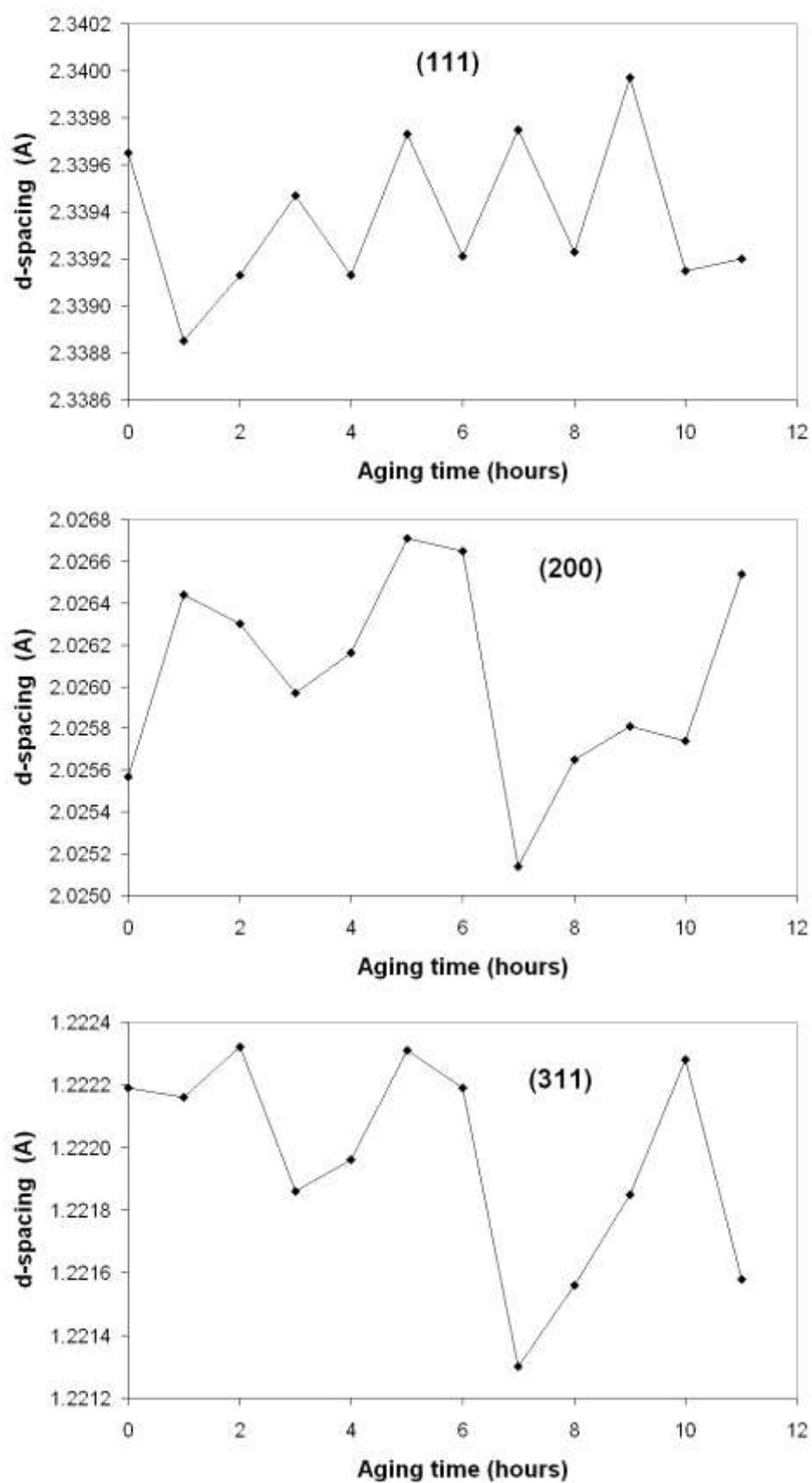
ตารางที่ 4.5 XRD peaks ของ อะลูมิเนียม [no.04-0787], λ ของ $\text{CuK}\alpha 1 = 1.54056$ อังสตรอม

2θ	d (Å)	Intensity	h	k	l
38.472	2.3380	100	1	1	1
44.738	2.0240	47	2	0	0
65.133	1.4310	22	2	2	0
78.227	1.2210	24	3	1	1
82.435	1.1690	7	2	2	2
99.078	1.0124	2	4	0	0

เมื่อเปรียบเทียบความสูงของ peak ของอะลูมิเนียม ในรูปที่ 4.21 พบว่า ที่มุม 44.783 และมุม 99.078 องศา มีความสูงมากกว่าค่ามาตรฐานซึ่งแสดงถึงการเกิด preferred orientation ที่ plane (200) และ (400) เนื่องจากเป็นตัวอย่างที่ตัดมาจากตัวอย่างดัมเบลที่ผ่านการดึงทดสอบแรงดึงแล้ว และจากการวิเคราะห์ค่า d-spacing ที่ plane (111) (200) และ (311) ดังแสดงในรูปที่ 4.22 พบว่าไม่มีแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจน จึงทำให้ไม่สามารถนำไปสร้างความสัมพันธ์กับกระบวนการเกิดแมกนีเซียมซิลิไซด์ในอะลูมิเนียมได้



รูปที่ 4.21 XRD peaks จากอะลูมิเนียมผสมแกรด6063 ที่ผ่านการบ่มแข็งที่ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0-11 ชั่วโมง

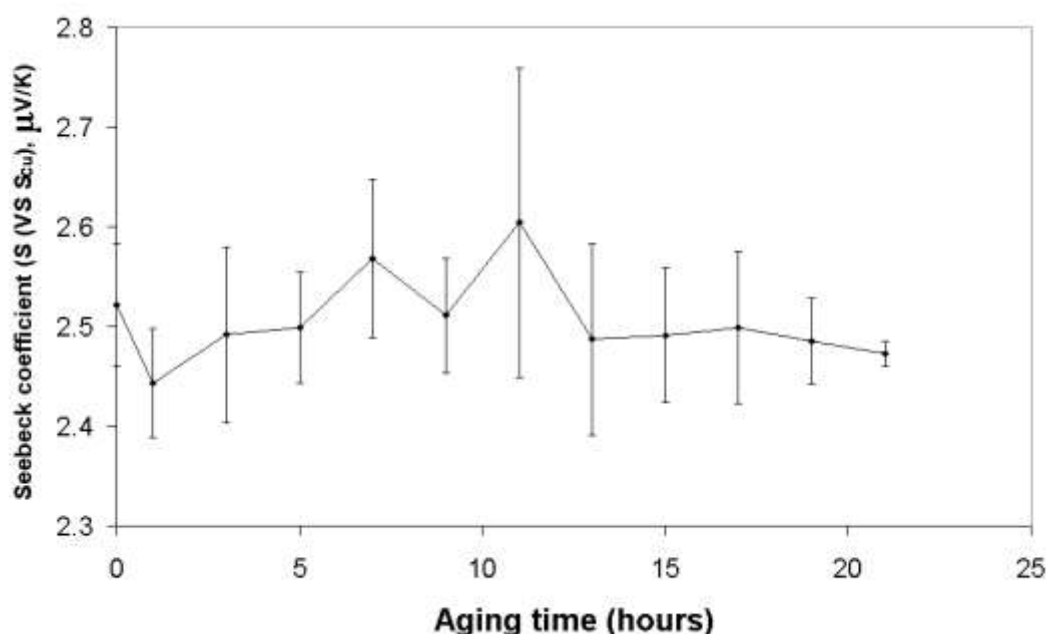


รูปที่ 4.22 ค่า d-spacing จาก XRD peaks ของ plane (111), (200), (311) ที่เวลาบ่มแข็งต่างๆ

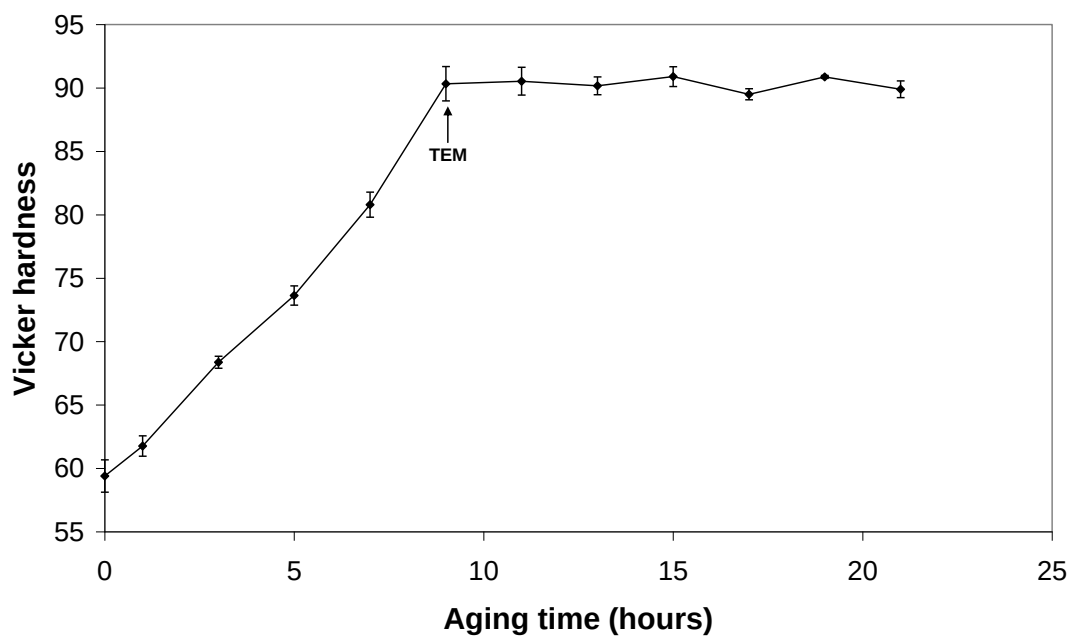
4.3.2.4 การทดลองช่วงที่ 4 การศึกษาผลของระยะเวลาที่ใช้ในการบ่มแข็งที่มีต่อสัมประสิทธิ์ซีเบ็คของอะลูมิเนียม

ในการทดลองนี้เป็นการศึกษากระบวนการอบ solutioning และการบ่มแข็งในชิ้นงานอะลูมิเนียม 6063 ชุดใหม่ ซึ่งมีขนาด $1.9 \times 1.9 \times 5$ ลูกบาศก์เซนติเมตร โดยมีจุดประสงค์เพื่อพยายามหาแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์ซีเบ็คที่เกิดจากการบ่มแข็ง การใช้ TEM เพื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและการวัดการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานไฟฟ้าที่เกิดจากการบ่มแข็ง โดยอบ solutioning ที่ 520 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง และทำการบ่มแข็งที่เวลา 0 1 3 5 7 9 11 13 15 17 19 และ 21 ชั่วโมง ซึ่งได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้

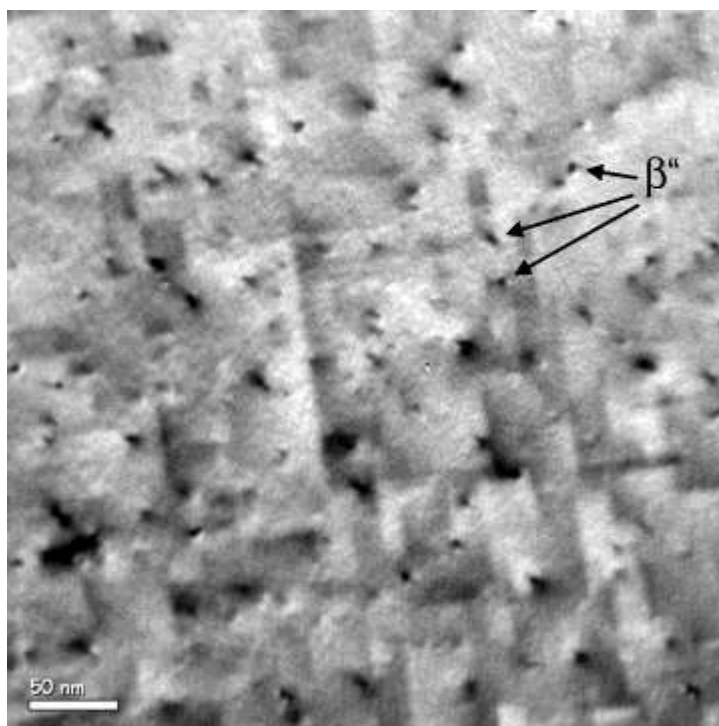
ผลของการเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์ซีเบ็คที่เกิดจากการบ่มแข็งแสดงไว้ในรูปที่ 4.23 พบว่า error bar ที่วัดได้มีขนาดที่ใหญ่กว่ารูปแบบของการเปลี่ยนแปลง ซึ่งอาจจะมีปัญหาจากเครื่องมือที่ยังมีความละเอียดไม่เพียงพอ ผลของการเปลี่ยนแปลงความแข็งแรงที่วัดจากการบ่มแข็งแสดงไว้ในรูปที่ 4.24 ซึ่งจะพบว่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเมื่อทำการบ่มแข็งนานขึ้นจนได้ความแข็งแรงสูงสุดที่การบ่มแข็ง 9 ชั่วโมง การบ่มแข็งที่นานกว่า 9 ชั่วโมงไม่ทำให้ความแข็งแรงเปลี่ยนไปมากนัก ตัวอย่างที่ผ่านการบ่มแข็ง 9 ชั่วโมงถูกนำไปตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยเครื่อง TEM ซึ่งได้ผลดังรูปที่ 4.25 โดยเมื่อเทียบกับงานวิจัยของ Miao [18] เฟส β คือเฟสที่ค่าขนาดเล็กมีขนาดประมาณ 10 นาโนเมตรและแนวเส้นตรงในแนวตั้งและแนวนอนคือ strain field ตามรูปที่ 4.26



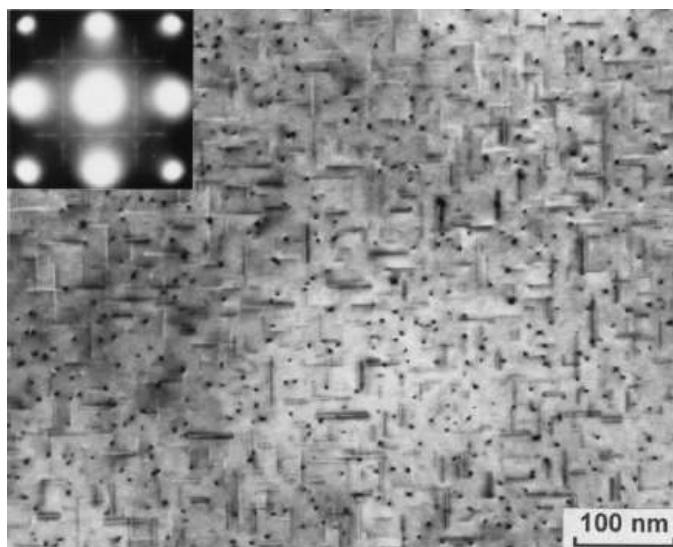
รูปที่ 4.23 การเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์ซีเบ็คของอะลูมิเนียมผสมเกรด 6063 ที่เกิดจากการบ่มแข็งโดยเพิ่มเวลาการบ่มแข็งจนถึง 21 ชั่วโมง



รูปที่ 4.24 การเปลี่ยนแปลงความแข็งวิกเกอร์ของอะลูมิเนียมผสมเกรด 6063 ที่เกิดจากการบ่มแข็ง

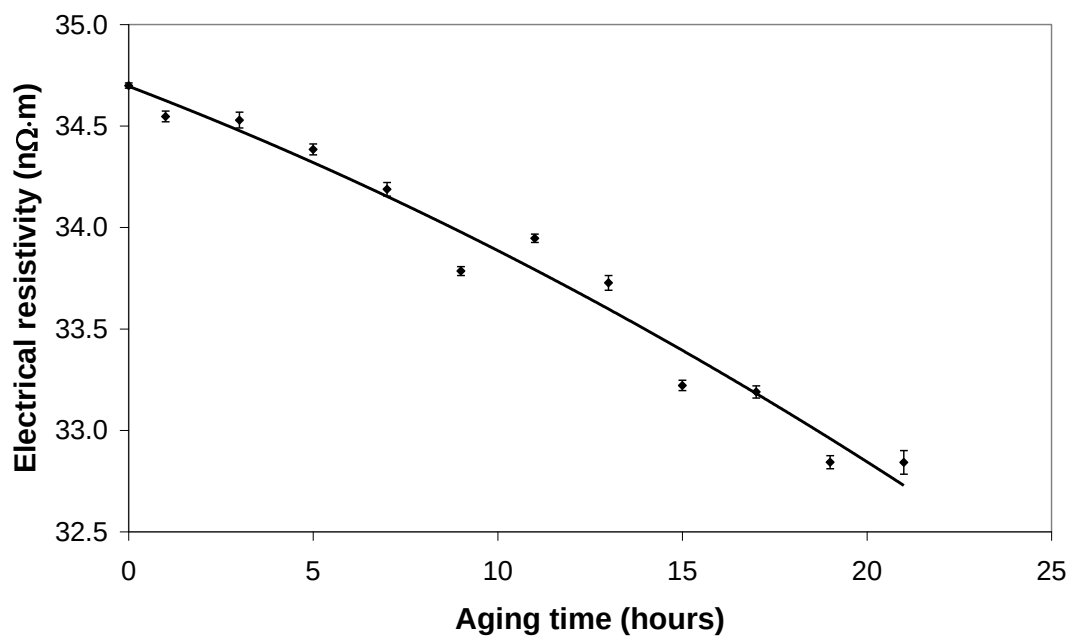


รูปที่ 4.25 โครงสร้างจุลภาคจากเครื่อง TEM ของอะลูมิเนียม 6063 ที่ผ่านการทำ solutioning ที่ 520 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง บ่มแข็งเป็นเวลา 9 ชั่วโมง

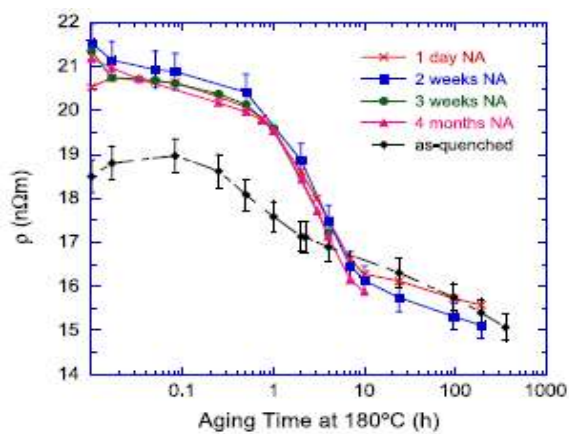


รูปที่ 4.26 โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียม 6022 ในทิศทาง $[001]_{Al}$ บ่มแข็งที่อุณหภูมิ 175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1000 นาที (16.7 ชั่วโมง) จุดสีดำคือเฟส β'' แนวเส้นตรงในแนวตั้งและแนวนอนคือ strain field [18]

ผลของการเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้าที่เกิดจากบ่มแข็งแสดงไว้ในรูปที่ 4.27 ผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มของความต้านทานไฟฟ้าที่ลดลงเมื่อใช้เวลาบ่มแข็งนานขึ้น โดยมีสาเหตุหลักเนื่องมาจากปริมาณแมกนีเซียมและซิลิกอนที่ละลายอยู่ในอะลูมิเนียมในช่วงความเข้มข้นยวดยิ่ง (supersaturated solid solution) มีปริมาณลดลงเมื่อบ่มแข็งนานขึ้น โดยแมกนีเซียมและซิลิกอนตกผลึกกลายเป็นเฟส β'' , β' และ β - Mg_2Si ตามลำดับ Esmacili และคณะ [19] ได้ทำการทดลองวัดการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานไฟฟ้าเมื่อทำการบ่มแข็งอะลูมิเนียม 6111 ซึ่งได้ผลดังในรูปที่ 4.28 พบว่าการเริ่มบ่มแข็งจากตัวอย่างที่ถูกทำให้เย็นตัวโดยรวดเร็ว (as-quenched) โดยไม่เปิดโอกาสให้เกิดการบ่มแข็งตามธรรมชาติ จะได้รูปแบบความต้านทานไฟฟ้าแตกต่างไปจากตัวอย่างที่ผ่านการบ่มแข็งตามธรรมชาติ โดยเฉพาะการบ่มแข็งตามธรรมชาติตั้งแต่ 2 สัปดาห์เป็นต้นไปจะให้แนวโน้มที่เหมือนกัน สาเหตุของปรากฏการณ์นี้เกิดจากกลุ่ม (cluster) ของอะตอมแมกนีเซียมและซิลิกอนถูกละลายในอะลูมิเนียมในการบ่มแข็งตามธรรมชาติซึ่งมีผลให้ความต้านทานไฟฟ้าเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองในอะลูมิเนียม 6063 จะพบว่าแนวโน้มที่ได้จะเหมือนกับอะลูมิเนียมที่ผ่านการบ่มแข็งตามธรรมชาติมาบ้างแล้ว



รูปที่ 4.27 การเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้าของอะลูมิเนียมผสมเกรด 6063 ที่เกิดจากการบ่มแข็ง



รูปที่ 4.28 การเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้าของอะลูมิเนียมผสมเกรด 611 ที่เกิดจากการบ่มแข็ง โดยเริ่มจากบ่มแข็งธรรมชาติ (NA, natural aging) ก่อนทำการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส [19]