

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 อะลูมิเนียมผสมเกรด 6063

อะลูมิเนียมผสมเกรด 6063 เป็นอะลูมิเนียมผสม Al-Mg-Si ซึ่งมีการใช้งานที่หลากหลายโดยเฉพาะอย่างยิ่งในรูปแบบการรีด (extruded forms) เช่น ท่อ ขอบประตู หน้าต่าง เนื่องจากความสามารถในการรีดหรือแปรรูปด้วยอัตราความเร็วสูง จึงทำให้ผลิตได้อย่างรวดเร็ว นอกจากนี้โลหะกลุ่มนี้ยังมีสมบัติทนต่อการกัดกร่อนได้ดี องค์ประกอบทางเคมีของอะลูมิเนียมเกรด 6063 แสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของอะลูมิเนียมผสมเกรด 6063 [2]

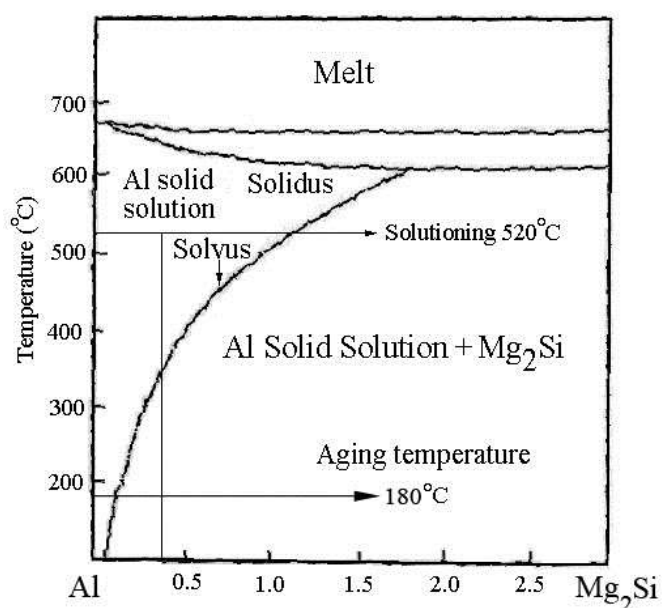
ธาตุ	ปริมาณ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)
Si	0.2-0.6
Fe	0.35 max
Cu	0.10 max
Mn	0.10 max
Mg	0.45-0.90 max
Cr	0.10 max
Zn	0.10 max
Ti	0.10 max
อื่นๆ	0.15 max
Al	balanced

สมบัติทางกลและความสามารถในการรีดของโลหะกลุ่มนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณของเฟสแมกนีเซียมซิลิไซด์ (Mg_2Si) โดยอะลูมิเนียมที่มีปริมาณ Mg_2Si ต่ำเช่น 0.7 wt% เหมาะสำหรับงานรีด 0.8 wt% เหมาะสำหรับงานทั่วไป และ 1.0 wt% เหมาะสำหรับงานที่ต้องการความแข็งแรง ทั้งนี้ปริมาณของ Mg_2Si ส่งผลต่อสมบัติทางกลของอะลูมิเนียม การเกิด Mg_2Si ในอะลูมิเนียมขึ้นอยู่กับวิธีการอบชุบ ตัวอย่างเช่น การอบชุบอะลูมิเนียมผสมเกรด 6063 ที่แสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 เทคนิคการอบชุบและสมบัติทางกลของอะลูมิเนียมผสมเกรด 6063 [2]

Temper	Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Elongation (%)	Hardness (kg/mm ²)
0	90	48	-	25
T1	152	90	20	42
T4	172	90	22	-
T5	186	145	12	60
T6	241	214	12	73

โดยทั่วไปการเกิด Mg_2Si จะต้องมีอัตราส่วนแมกนีเซียมต่อซิลิกอนโดยน้ำหนัก 1.73:1 หรือแมกนีเซียม 2 อะตอมต่อซิลิกอน 1 อะตอม ดังปฏิกิริยาที่ 2.1

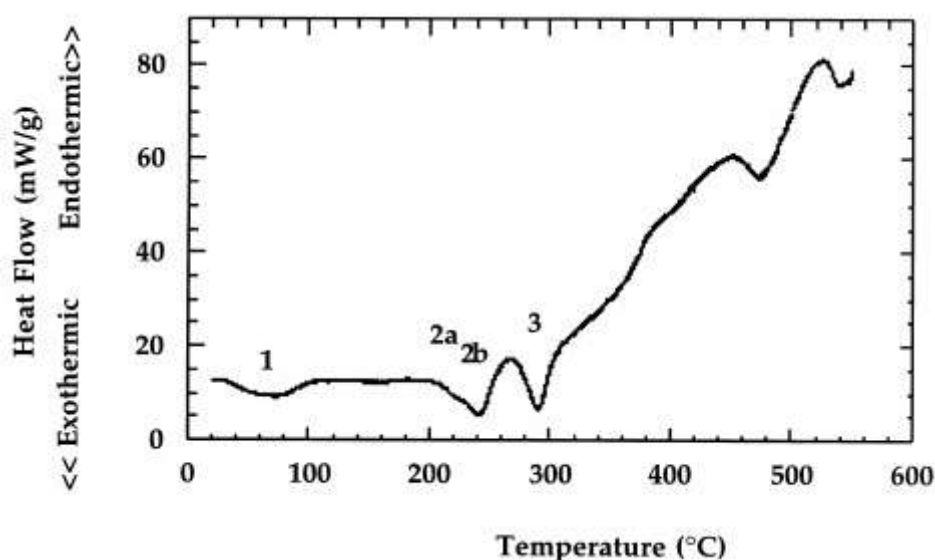


รูปที่ 2.1 เฟสไดอะแกรมของระบบ Al-Mg₂Si [14]

จากเฟสไดอะแกรมในรูป 2.1 จะเห็นได้ว่าความสามารถในการละลายของ Mg_2Si ในอะลูมิเนียมลดลงอย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิลดลง ตัวอย่างเช่นถ้าทำการอบอะลูมิเนียมที่อุณหภูมิ 520 องศาเซลเซียส แล้วปล่อยให้เย็น แมกนีเซียมและซิลิกอนจะละลายกลับเข้าไปในอะลูมิเนียมทั้งหมด หลังจากนั้นหากทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว โลหะจะกลายเป็นอะลูมิเนียมอิ่มตัวยิ่งยวด (aluminium supersaturated solid

solution หรือ Al SSSS) ซึ่งมีปริมาณแมกนีเซียมและซิลิกอนละลายอยู่เกินกว่าความสามารถในการละลายที่อุณหภูมิห้อง ถ้าให้ความร้อนกับ Al SSSS ที่ 180 องศาเซลเซียส แมกนีเซียมจะทำปฏิกิริยากับซิลิกอนเกิดเป็น Mg_2Si

Edwards และคณะ [3] ได้ทำการวิจัยเพื่อค้นหาการเปลี่ยนแปลงเฟสของโลหะผสม Al-Mg-Si เริ่มต้นจาก อะลูมิเนียมอิ่มตัวยิ่งยวด (Al SSSS) โดยใช้เครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) และนำผลการทดลองจาก DSC (รูปที่ 2.2) ไปกำหนดตัวอย่างที่ต้องวิเคราะห์ด้วย High Resolution Transmission Electron Microscope (HRTEM) และ Atom Probe Field Ion Microscope (APFIM) โดยสามารถอธิบายผลได้ดังนี้



รูปที่ 2.2 ผลการทดลองจาก DSC สำหรับอะลูมิเนียม 6061 [3]

การตกผลึกของกลุ่มอะตอมซิลิกอน กลุ่มอะตอมแมกนีเซียม และกลุ่มอะตอมซิลิกอนและแมกนีเซียม เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (exothermic) ที่อุณหภูมิประมาณ 70-80 องศาเซลเซียส (หมายเลข 1) โดยจะเปลี่ยนสภาพเป็นผลึกที่มีอัตราส่วนของแมกนีเซียมและซิลิกอนเข้าใกล้ 1 ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส (หมายเลข 2a) ซึ่งเป็นผลึกขนาดเล็กที่ไม่มีโครงสร้างที่แน่นอน เฟส β'' ตกผลึกที่อุณหภูมิ 240 องศาเซลเซียส (หมายเลข 2b) มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ based-centered monoclinic มีความเป็น coherency กับโครงสร้างของอะลูมิเนียมอย่างสมบูรณ์ มีอัตราส่วนของ $Mg:Si$ เท่ากับ 1.2 เฟส β' ตกผลึกที่อุณหภูมิประมาณ 290 องศาเซลเซียส (หมายเลข 3) โดยเฟสนี้มีโครงสร้างผลึก Hexagonal โดยที่ $a = 10.4 \text{ \AA}$ และ $c = 4.05 \text{ \AA}$ มีอัตราส่วน $Mg:Si$ ประมาณ 1.15 นอกจากนั้นยังพบผลึกของเฟส β' ซึ่งมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ Hexagonal โดยที่ $a = 7.05 \text{ \AA}$ และ $c = 4.05 \text{ \AA}$ ในบางบริเวณ

ลำดับการเกิดเฟสต่างๆ สามารถสรุปได้ดังนี้

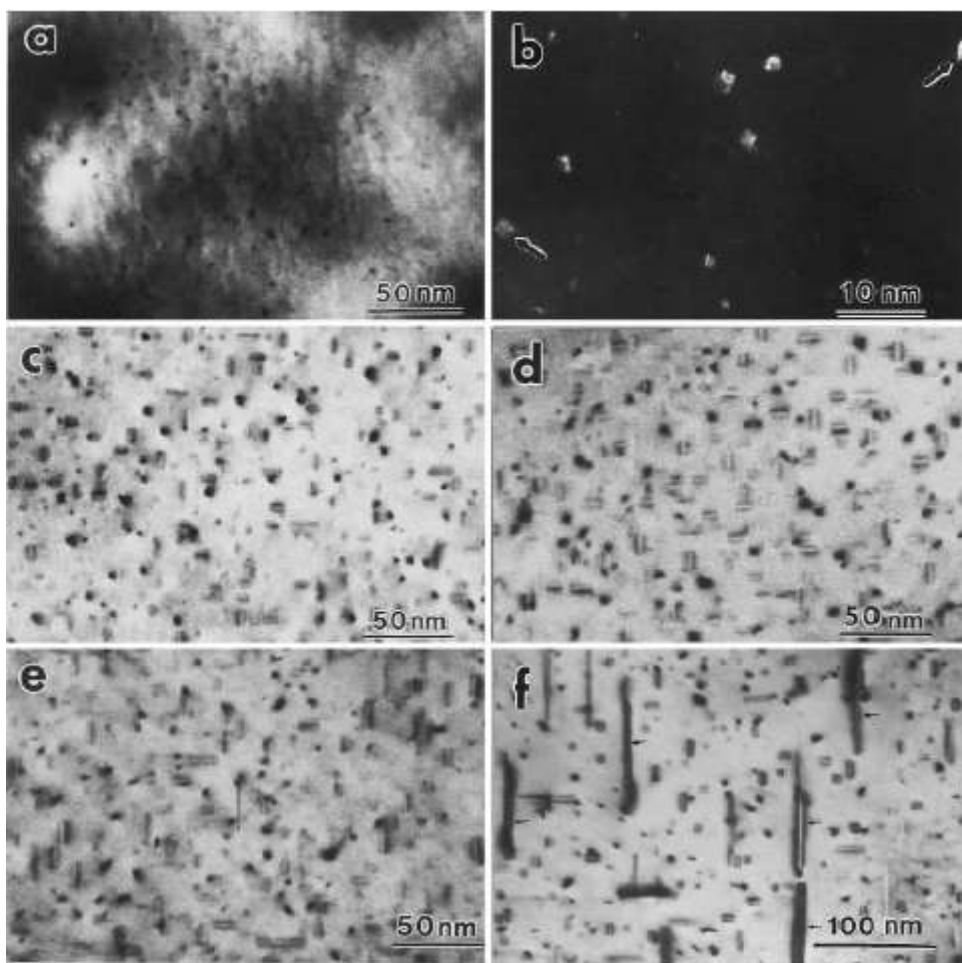
Al SSSS $\rightarrow$ กลุ่มอะตอม Si และ กลุ่มอะตอม Mg $\rightarrow$ การสลายตัวของกลุ่มอะตอม Mg $\rightarrow$ กลุ่มอะตอม Si และ Mg ร่วมกัน $\rightarrow$ ผลึกขนาดเล็กที่ยังไม่ทราบโครงสร้างที่แน่นอน $\rightarrow$ ผลึก β'' $\rightarrow$ ผลึก β' และ β'' $\rightarrow$ ผลึก β Mg_2Si

นอกจากนี้ Edwards และคณะยังได้ศึกษาโครงสร้างจุลภาคของเฟสต่างๆที่เกิดขึ้นโดย Transmission Electron Microscope เพื่อดูโครงสร้างจุลภาคของเฟสต่างๆ ที่เกิดขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.3

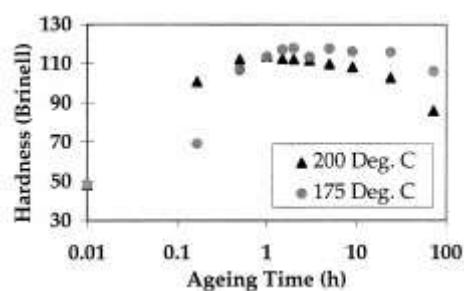
รูปที่ 2.3(a) และ 2.3(b) แสดงผลึกขนาดเล็กมากๆ โดยผลึกเหล่านี้ไม่มีโครงสร้างผลึกที่แน่นอน คล้ายคลึงกับผลึกที่พบใน Exothermic หมายเลข 1 ในรูปที่ 2.2 นอกจากนั้นยังพบผลึก β'' ในบางบริเวณ ผลึก β'' ที่พบในรูป 2.3(c) มีขนาดประมาณ 7 นาโนเมตรเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งทำให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้น แสดงถึงขนาดของเฟส β'' ที่เหมาะสม ในการเพิ่มความแข็งแรงของอะลูมิเนียม ผลึก β'' จะมีขนาดใหญ่ขึ้นเป็น 10-15 นาโนเมตรดังรูปที่ 2.3(d) ในโครงสร้างนี้อะลูมิเนียมจะมีค่าความแข็งแรงสูงสุด (รูปที่ 2.4) ซึ่งโครงสร้างจุลภาคจะไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก หลังจากนั้นหากยังบ่มแข็งต่อไปความแข็งแรงจะเริ่มลดลงเมื่อผลึกมีขนาดใหญ่ขึ้นดังปรากฏในรูปที่ 2.3(e) และเกิดผลึกของ β' (รูป 2.3(f)) ซึ่งเป็นสาเหตุของการที่ความแข็งแรงของตัวอย่างลดลงอย่างมาก

ปริมาณซิลิกอนที่มากเกินไปอัตราส่วน Mg:Si เท่ากับ 1.73:1 จะช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับโลหะผสม เนื่องจากจะช่วยควบคุมขนาดของ Mg_2Si โดยซิลิกอนจะอยู่ในรูปสารละลายของแข็งในอะลูมิเนียม แต่จะสูญเสียความเหนียวจากการแตกหักตามขอบเกรน Mg_2Si และซิลิกอนบางส่วนจะไปตกผลึกอยู่ตามขอบเกรน การที่มีธาตุชนิดอื่นเช่นเหล็ก แมงกานีสและโครเมียมอยู่ในอะลูมิเนียมจะทำให้เกิดการสูญเสียซิลิกอนบางส่วน โดยซิลิกอนจะไปเกิดเป็นสารประกอบ AlMnSi AlCrSi และ AlFeMnCrSi ทำให้เหลือซิลิกอนที่จะไปทำปฏิกิริยากับแมกนีเซียมน้อยลง [4]

เหล็กซึ่งเป็นส่วนผสมที่สำคัญธาตุหนึ่งในอะลูมิเนียมผสมเกรด 6063 มีหน้าที่เพิ่มความแข็งแรงให้กับอะลูมิเนียม เนื่องจากเหล็กจะช่วยลดขนาดของ Mg_2Si และลดขนาดเกรน แต่จะต้องควบคุมให้อยู่ในปริมาณที่เหมาะสมเพื่อไม่ให้ไปทำปฏิกิริยากับซิลิกอนจนได้เฟสสารประกอบเชิงโลหะ $\alpha\text{-Al}_{15}\text{Fe}_2\text{Si}_2$ หรือ $\beta\text{-Al}_5\text{FeSi}$ มากจนเกินไป [4]



รูปที่ 2.3 ภาพถ่ายจาก TEM ของอะลูมิเนียม 6061 ในช่วงการบ่มแข็ง (a) และ (b) 10 นาทีที่ 175 องศาเซลเซียส (c) 0.5 ชั่วโมงที่ 175 องศาเซลเซียส (d) 4 ชั่วโมงที่ 175 องศาเซลเซียส (e) 72 ชั่วโมงที่ 175 องศาเซลเซียส (f) 20 ชั่วโมงที่ 200 องศาเซลเซียส [3]



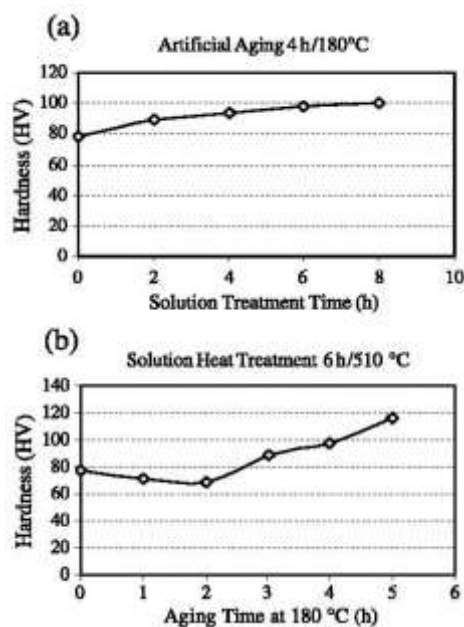
รูปที่ 2.4 ความแข็งของอะลูมิเนียม 6061 ที่เปลี่ยนไปเมื่อเวลาในการบ่มแข็งเพิ่มขึ้น[3]

Gavali และคณะ [5] ได้ทำการทดสอบความทนทานต่อการขัดสี (wear resistance) ของโลหะผสมอะลูมิเนียมหล่อ 6063 ด้วยเทคนิค pin-on-disc โดยอะลูมิเนียมเป็น disc และ ลูกบอล WC-6%Co เป็น pin โดยมีสภาวะการเตรียมตัวอย่างดังแสดงในตารางที่ 2.3

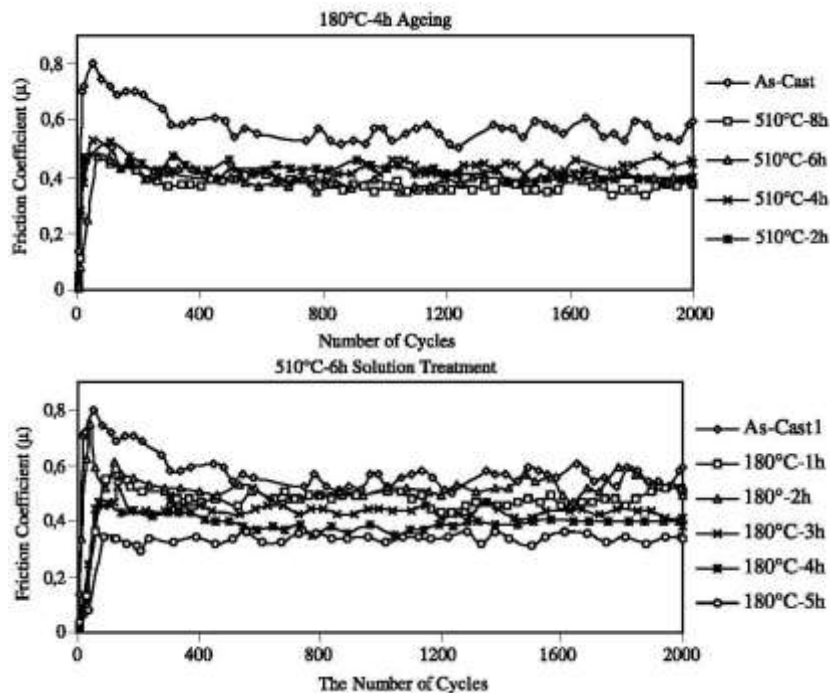
ตารางที่ 2.3 สภาวะการเตรียมตัวอย่างอะลูมิเนียมหล่อ 6063 เพื่อทดสอบความทนทานต่อการกัดกร่อน [5]

ชุดที่	Solutioning		Aging	
	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (ชั่วโมง)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (ชั่วโมง)
1	510	2, 4, 6, 8	180	4
2	510	6	180	1, 2, 3, 4, 5

การทำ solutioning และการทำบ่มแข็งที่นานขึ้นจะทำให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.5 เนื่องจากแมกนีเซียมและซิลิกอนที่ผสมในอะลูมิเนียมจะตกผลึกเป็น Mg_2Si ซึ่งจะมีโครงสร้างผลึกที่มีลักษณะ coherent กับโครงสร้างผลึกของอะลูมิเนียม นอกจากนั้นผลึกของ Mg_2Si ยังช่วยในการลดสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของโลหะผสมอะลูมิเนียมดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.5 ผลการวัดความแข็งของอะลูมิเนียมหล่อ 6063 ที่แปรผันตาม (a) เวลาที่ใช้ในการทำ solutioning (b) เวลาที่ใช้ในการบ่มแข็ง [5]



รูปที่ 2.6 สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของอะลูมิเนียมหล่อ 6063 ที่เปลี่ยนไปเมื่อ (a) เปลี่ยนเวลาที่ใช้ในการทำ solutioning (b) เปลี่ยนเวลาที่ใช้ในการบ่มแข็ง [5]

2.2 ปรากฏการณ์ซีเบ็ค (Seebeck Effect)

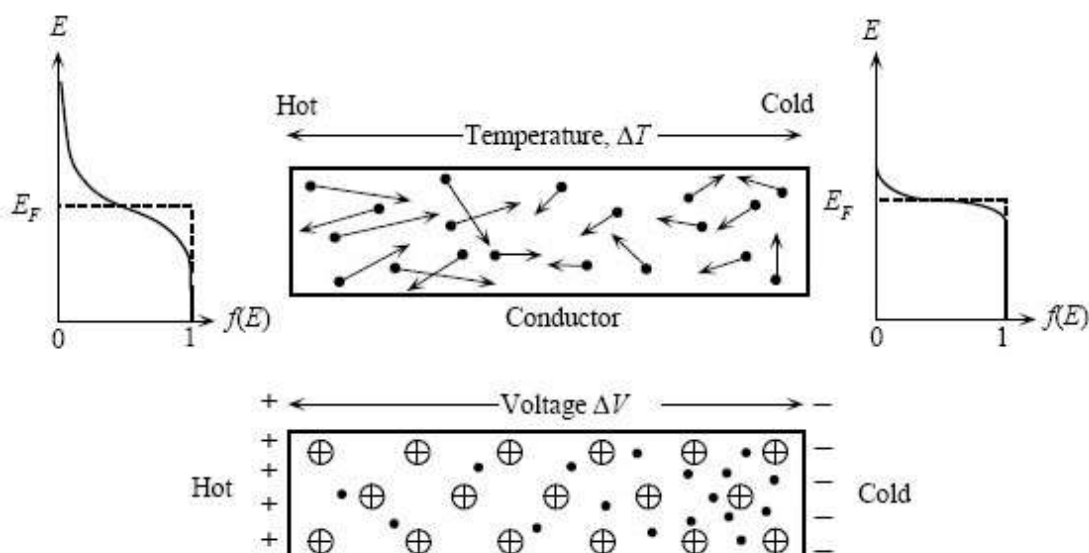
ปรากฏการณ์ซีเบ็คเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจากความแตกต่างของอุณหภูมิที่ปลายสองข้างของโลหะหรือสารกึ่งตัวนำ ทำให้อิเล็กตรอนที่ปลายด้านร้อนมีพลังงานสูงกว่าปลายด้านเย็น ทำให้อิเล็กตรอนจากปลายด้านร้อนแพร่ไปยังปลายด้านเย็น มีผลให้ปลายด้านร้อนมีศักย์ไฟฟ้าเป็นบวกและปลายด้านเย็นมีศักย์ไฟฟ้าเป็นลบ (รูปที่ 2.7) การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจะเกิดขึ้นต่อเนื่องจนกระทั่งสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างประจุบวกที่ด้านร้อนและประจุลบที่ด้านเย็นขัดขวางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน เนื่องจากความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากอุณหภูมิที่ต่างกันจึงเรียกความสามารถในการเหนี่ยวนำศักย์ไฟฟ้าด้วยความร้อนนี้ว่า Thermoelectric Power (TEP) อัตราส่วนความแตกต่างระหว่างศักย์ไฟฟ้าของทั้งสองด้านต่อความแตกต่างของอุณหภูมิเรียกว่า สัมประสิทธิ์ซีเบ็ค ดังแสดงในสมการที่ 2.2

$$S = \frac{dV}{dT} \quad (2.2)$$

โดยที่ S = สัมประสิทธิ์ซีเบ็ค ($\mu\text{V/K}$)

dV = แรงดันซีเบ็ค (μV)

dT = ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างด้านร้อนและด้านเย็น (K)



รูปที่ 2.7 ปรากฏการณ์ซีเบ็ค เกิดจากพลังงานที่ด้านร้อนสูงกว่าด้านเย็น ทำให้เกิดการผลักดัน อิเล็กตรอนและโฮลให้ไปรวมกันที่ด้านเย็น [6]

การคิดเครื่องหมายของสัมประสิทธิ์ซีเบ็คจะคิดเทียบจากศักย์ไฟฟ้าด้านเทียบกับด้านร้อน ถ้าอิเล็กตรอนแพร่จากด้านร้อนไปด้านเย็น ด้านเย็นจะมีศักย์เป็นลบเมื่อเทียบกับด้านร้อนซึ่งจะทำให้สัมประสิทธิ์ซีเบ็คจะมีค่าเป็นลบ ในกรณีของสารกึ่งตัวนำประเภท p-type โฮลซึ่งเป็นประจุส่วนใหญ่จะเคลื่อนที่ไปยังด้านเย็น ซึ่งจะทำให้สัมประสิทธิ์ซีเบ็คมีค่าเป็นบวก

ในความเป็นจริงอิเล็กตรอนจะมีอันตรกิริยา (interaction) กับอิเล็กตรอนด้วยกันเอง รวมไปถึงมีอันตรกิริยากับอะตอมของโลหะและการสั่นของอะตอมในโครงสร้างผลึก (lattice vibration) หรือที่เรียกว่าโฟนอน นอกจากนั้นความเร็วในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนยังขึ้นอยู่กับการจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอนอีกด้วย ทำให้อิเล็กตรอนไม่ได้เคลื่อนที่อย่างเป็นอิสระ (free electron) เหมือนในอุดมคติ การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานและตัวแปรอื่นๆ เช่น mean free path (MFP) ดังสมการที่ 2.3

$$\lambda = v\tau \quad (2.3)$$

โดยที่ λ = mean free path (m)

v = mean free speed (m/s)

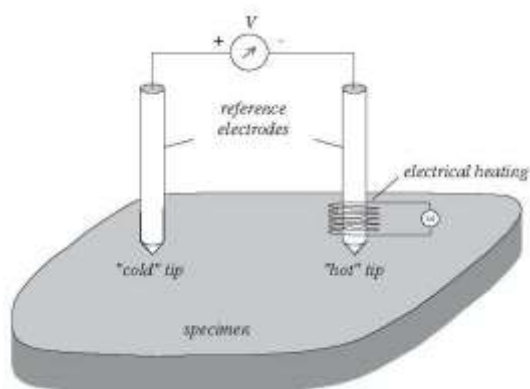
τ = mean free time ในช่วงของการกระเจิง (s)

ตัวอย่างเช่นถ้า MFP เพิ่มขึ้นเมื่อพลังงานเพิ่มขึ้น สัมประสิทธิ์ซีเบ็คของโลหะชนิดนั้นจะเป็นลบ แต่ถ้า MFP ลดลงเมื่อพลังงานเพิ่มขึ้น สัมประสิทธิ์ซีเบ็คของโลหะชนิดนั้นจะเป็นบวก ดังตัวอย่างในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 สัมประสิทธิ์ซีเบ็ค (S) ของโลหะบางชนิด [6]

ชนิดโลหะ	S ที่ 0 องศาเซลเซียส ($\mu\text{V K}^{-1}$)
อะลูมิเนียม	-1.6
ตะกั่ว	-1.15
ทองแดง	+1.70
เงิน	+1.38
ทองคำ	+1.79

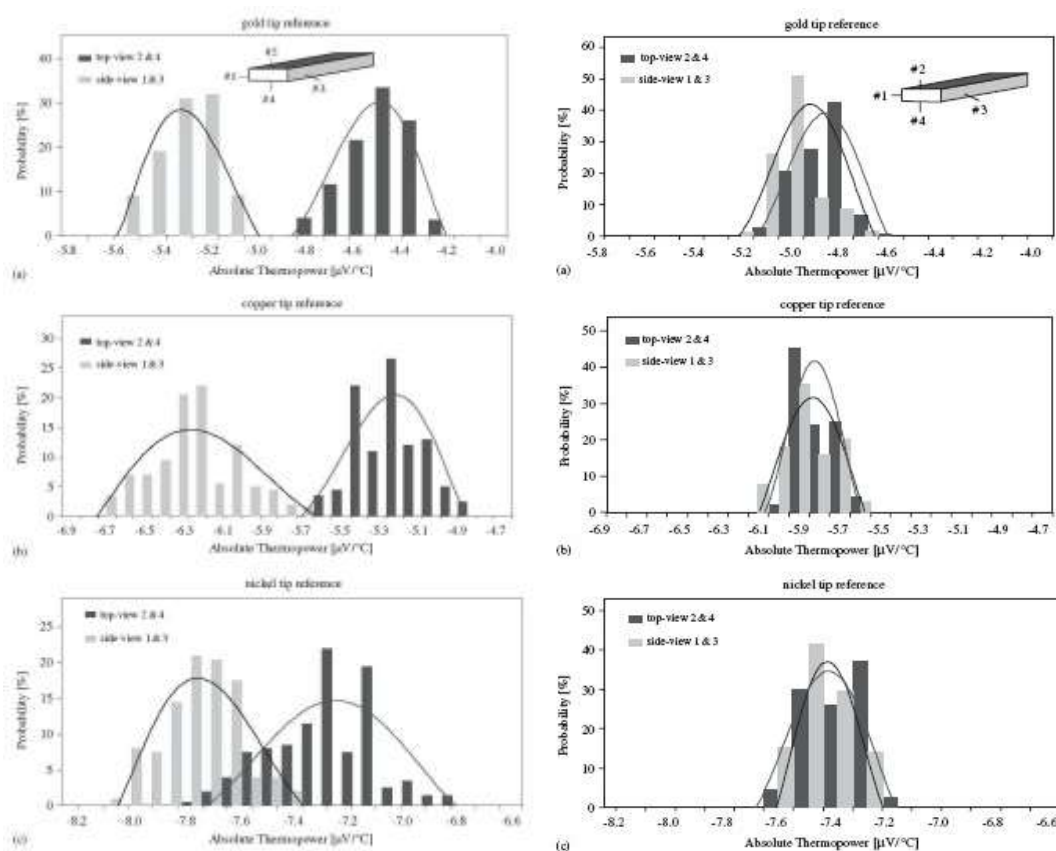
ชนิดของโลหะที่ใช้ทำหัววัดสัมประสิทธิ์ซีเบ็คมีผลต่อความแม่นยำและความถูกต้องของค่าที่วัดได้ ตัวอย่างเช่น Carreon [1] ได้ทำการทดลองวัดสัมประสิทธิ์ซีเบ็คของโลหะผสม Ti-6Al-4V ที่ผ่านการรีดเย็น โดยใช้เครื่องมือตามแผนผังในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แผนผังอุปกรณ์สำหรับวัดสัมประสิทธิ์ซีเบ็คแบบ dual-tipped probe [1]

การวัดกระทำในทิศทาง normal และ transverse และใช้หัววัดที่ทำจากทองคำ ทองแดง และนิกเกิล ซึ่งได้ผลการทดลองดังรูปที่ 2.9 โดยสามารถสรุปได้ว่าความสามารถในการแยกความแตกต่างของค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็คในทิศทางต่างๆ ขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะที่ใช้ทำหัววัด โดยทองคำเป็นโลหะที่ดีที่สุด

สำหรับการทำห้วงเนื่องจากสามารถแยกความแตกต่างของสัมประสิทธิ์ซีเบ็คที่ได้จากการวัดทั้งสองทิศทางได้อย่างชัดเจน

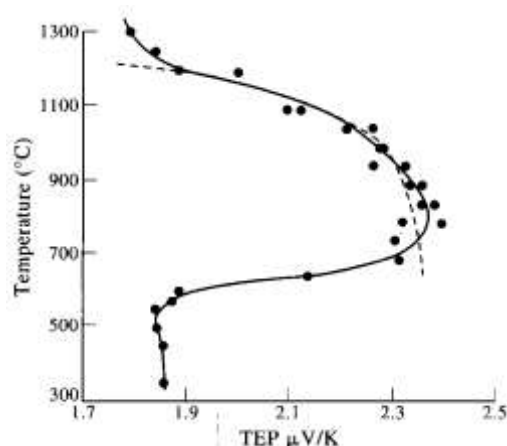


รูปที่ 2.9 สัมประสิทธิ์ซีเบ็คของ Ti-6Al-4V ตามทิศทาง normal (สีดำ) และ transverse (สีเทา) ที่ผ่านการรีดเย็น (ด้านซ้าย) และผ่านการอบอ่อน (ด้านขวา) โดยใช้หัววัดที่ทำจาก (a) ทองคำ b) ทองแดง และ (c) นิกเกิล [1]

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในหัวข้องานวิจัยที่เกี่ยวข้องจะแสดงถึงการนำปรากฏการณ์ซีเบ็คไปใช้อธิบายปรากฏการณ์ทางโลหะวิทยาที่เกิดขึ้น โดยอาศัยหลักการที่ว่าถ้าปรากฏการณ์นั้นทำให้เกิดการขัดขวางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนซึ่งเป็นพาหะหลักในโลหะที่ใช้ในการนำพาความร้อน ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็คจะมีค่าลดลง แต่หากปรากฏการณ์นั้นไปช่วยลดการขัดขวางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็คจะมีค่าเพิ่มขึ้น

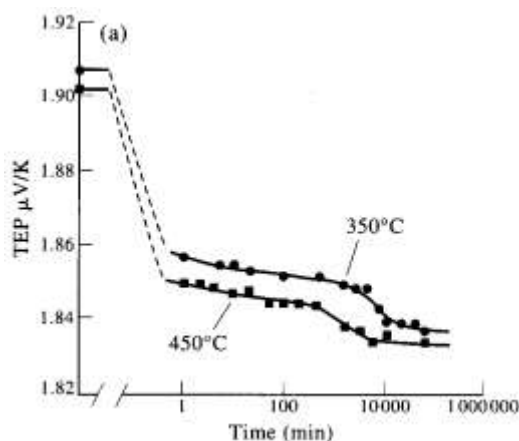
Brami และ Borrelly [7] ได้ศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์ซีเบ็คจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโดยการอบอ่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำซึ่งมีอะลูมิเนียม 460 ppm และ ไนโตรเจน 74 ppm ผสมอยู่ในเนื้อโลหะ ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็คของชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิต่างๆเป็นเวลา 1 ชั่วโมงแสดงในรูปที่ 2.10



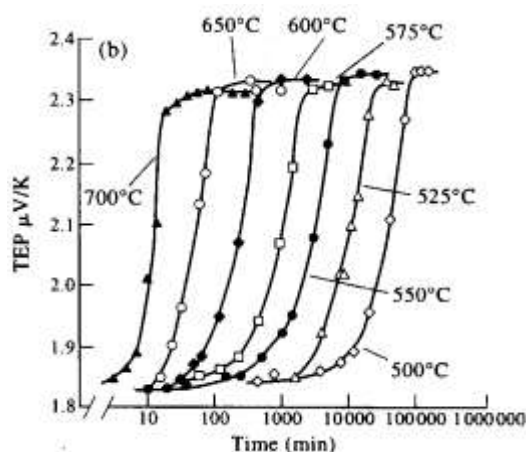
รูปที่ 2.10 การเปลี่ยนแปลงของ TEP เทียบกับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ [7]

จากรูปที่ 2.10 เมื่อชิ้นงานถูกอบที่อุณหภูมิ 400-600 องศาเซลเซียส ค่า TEP จะลดต่ำลงเล็กน้อยเนื่องจากเกิดการละลายของเหล็กไนไตรด์ และเหล็กคาร์โบไนไตรด์กลับเข้าไปในเมตริกซ์ เมื่ออุณหภูมิอบเพิ่มเป็น 600 องศาเซลเซียส ค่า TEP เพิ่มขึ้นเนื่องจากอะลูมิเนียมและไนโตรเจนแยกตัวออกมาจากเมตริกซ์และตกผลึกเป็น AlN ซึ่งเข้าสู่จุดสมดุลที่อุณหภูมิเหนือ 700 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิอบสูงกว่า 800 องศาเซลเซียส ชิ้นงานตัวอย่างมีค่า TEP ลดลงอีกครั้งหนึ่งเนื่องมาจากการสลายตัวของ AlN เป็นอะตอมอะลูมิเนียมและไนโตรเจน และละลายกลับเข้าไปในเหล็กซึ่งได้เปลี่ยนเป็นเฟส γ

การเปลี่ยนแปลงค่า TEP จากการทดลองอบอ่อนชิ้นงานที่ 350 องศาเซลเซียส และ 450 องศาเซลเซียส แสดงในรูปที่ 2.11 พบว่า TEP มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วในช่วงเวลา 1 นาที และลดลงอย่างช้าๆ หลังจากนั้นจนถึงจุดสมดุล ซึ่งหมายถึงการสลายตัวของเหล็กไนไตรด์และเหล็กคาร์โบไนไตรด์เป็นไปอย่างสมบูรณ์



รูปที่ 2.11 การเปลี่ยนแปลงค่า TEP เมื่ออบชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส และ 450 องศาเซลเซียส [7]



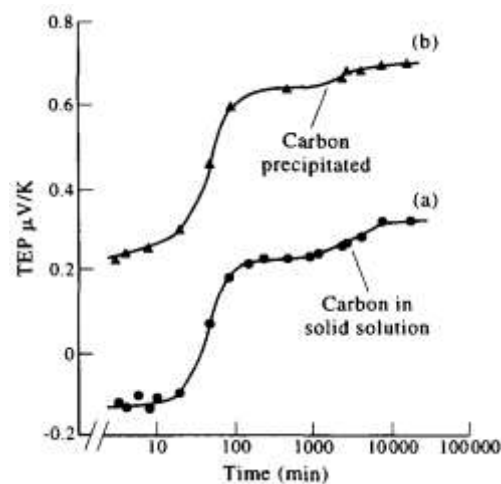
รูปที่ 2.12 การเปลี่ยนแปลงค่า TEP เมื่ออบชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่อุณหภูมิต่างๆ [7]

ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการอบต่อค่า TEP ของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำแสดงในรูปที่ 2.12 จากการอบอ่อนชิ้นงานแบบอุณหภูมิคงที่ที่อุณหภูมิต่างๆตั้งแต่ 500 องศาเซลเซียส จนถึง 700 องศาเซลเซียส พบว่าการตกผลึกของ AIN ซึ่งเป็นสาเหตุให้ TEP เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าการอบอ่อนที่อุณหภูมิสูงขึ้นจะใช้เวลาเร็วขึ้นในการทำให้ค่า TEP อิ่มตัวที่ประมาณ 2.3 $\mu\text{V/K}$

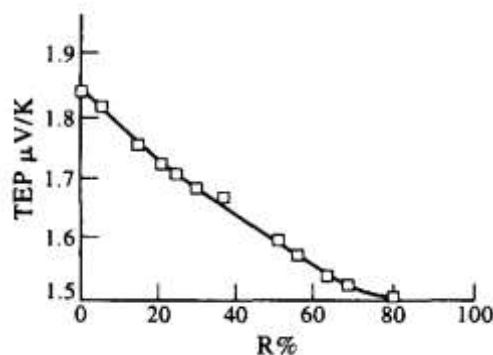
ผลของกระบวนการอบอ่อนต่อค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็คของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่มีอะลูมิเนียม 590 ppm ไนโตรเจน 65 ppm คาร์บอน 370 ppm แมงกานีส 2400 ppm โดยทำการอบที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส และทำให้เกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็วแสดงในรูปที่ 2.13 จากรูปจะเห็นว่าในช่วงแรกคาร์บอนยังคงอยู่ในสารละลายของแข็ง หลังจากนั้นเมื่อทำการบ่มแข็งที่ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 50 ชั่วโมง จะเห็นว่ากราฟของ TEP ในช่วงเย็นตัวอย่างรวดเร็วจะต่ำกว่าช่วงที่ทำการบ่มแข็ง ซึ่งหมายถึงการตก

ผลึกจะเกิดขึ้นเร็วกว่าที่อุณหภูมิสูงขึ้น จากกราฟจะสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ช่วง ช่วงแรกค่า TEP เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วซึ่งเป็นผลจากการแยกตัวของอะลูมิเนียมและไนโตรเจนออกจากสารละลายของแข็ง ตกผลึกเป็น AlN และในช่วงที่สองเกิดจากการตกผลึกของซีเมนไทต์ (Fe_3C) ที่มีแมงกานีสผสมอยู่ด้วย Brami และคณะได้เสนอแนะว่ารูปแบบของกราฟที่เหมือนกันทั้ง a และ b ในรูปที่ 2.13 หมายถึงปฏิกิริยาที่สามารถทำซ้ำได้ (reproducible)

นอกจากนั้น Brami และ Borrelly [7] ยังได้ทำการทดลองวัดค่า TEP ของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่มีขนาด $80 \times 4 \times 0.75 \text{ mm}^3$ หลังผ่านการรีดเย็นในทิศทาง rolling จนถึง 80 %Reduction จะเห็นว่าค่า TEP ลดลงเมื่อ %Reduction เพิ่มขึ้นเนื่องมาจากปริมาณ dislocation ที่เพิ่มขึ้นเมื่อ %Reduction เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.14



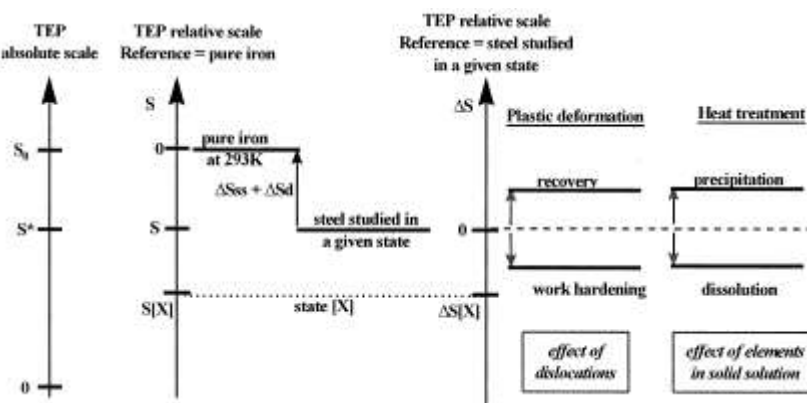
รูปที่ 2.13 การเปลี่ยนแปลงของ TEP ของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำเมื่อ (a) อบที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส และทำให้เกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว (b) นำตัวอย่าง a มาบ่มแข็งเป็นเวลา 50 ชั่วโมง [7]



รูปที่ 2.14 การเปลี่ยนแปลงของ TEP ของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำเทียบกับเปอร์เซ็นต์การลดขนาดที่เปลี่ยนไปจากการรีดเย็น [7]

Lavaire และคณะ [8] ได้ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของ TEP จากปรากฏการณ์ strain aging ในเหล็กกล้าที่มีคาร์บอนผสมอยู่ในปริมาณที่ต่ำมากๆ ปรากฏการณ์ strain aging เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่อโลหะที่มีส่วนผสมของคาร์บอนและไนโตรเจนผ่านกระบวนการแปรรูปเย็น โดยที่อะตอมของคาร์บอนและไนโตรเจนจะแพร่ซึมผ่านได้รวดเร็วกว่าการเคลื่อนที่ของ dislocation และจะช่วยยึด dislocation ไว้หลังจากได้รับความเค้นสูงกว่า yield point ซึ่งปรากฏการณ์นี้จะมีผลต่อกระบวนการ deep draw เป็นอย่างมาก

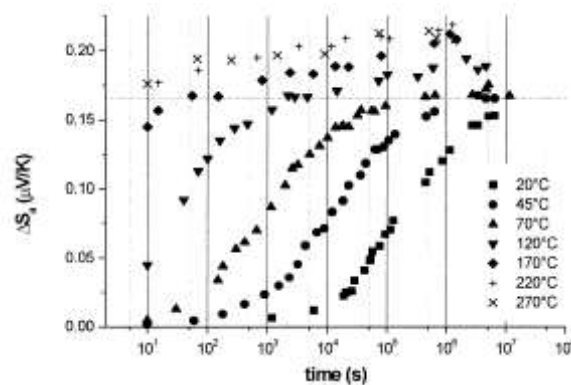
Lavaire และคณะ [8] ได้ทำการวัด TEP ในตัวอย่างโดยแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ได้แก่ตัวอย่างเริ่มต้น ตัวอย่างหลังผ่านการรีดเย็นและตัวอย่างหลังจากการบ่มแข็ง โดยในการทดลองนี้ใช้เหล็กกล้าซึ่งมีคาร์บอนเป็นส่วนผสม 0.004 wt% ผ่านการรีดเย็นจนมีความหนาลดลง 50 % และบ่มแข็งที่อุณหภูมิต่างๆ ดังแผนผังในรูปที่ 2.15



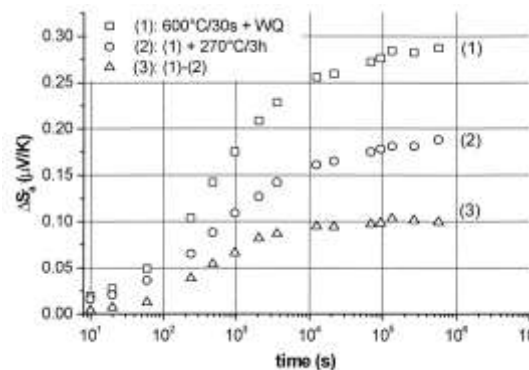
รูปที่ 2.15 การเปลี่ยนแปลงค่า TEP ของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำมากเนื่องจากปรากฏการณ์ต่างๆ [8]

จากผลการทดลองจะสามารถแบ่งการเปลี่ยนแปลงได้เป็นสองช่วงคือที่อุณหภูมิต่ำกว่า 170 องศาเซลเซียส และสูงกว่า 170 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 170 องศาเซลเซียส ค่า TEP เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเนื่องจากคาร์บอนอิสระแพร่ไปอยู่ที่ dislocation และในช่วงอุณหภูมิสูงกว่า 170 องศาเซลเซียส ค่า TEP จะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ (รูปที่ 2.16) นอกจากนี้ Lavaire และคณะยังได้ทำการทดลองเพิ่มเติมดังในรูปที่ 2.17 โดยทำการอบชิ้นงานที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 วินาที ทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วในน้ำ แล้วจึงทำการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นจึงทำการวัดค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็คโดยจะได้กราฟหมายเลข 1 ซึ่งเป็นผลมาจากการแยกตัวของคาร์บอนออกจากสารละลายของแข็งไปสู่ dislocation และกระบวนการ recovery ตัวอย่างหลังจากทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วในน้ำในกรณีแรกผ่านการอบชุบที่อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมงซึ่งเมื่อพิจารณาในรูปที่ 2.16 จะพบว่าไม่มีขั้นตอนการแยกตัวของคาร์บอนอยู่เลย เมื่อทำการบ่มแข็งชิ้นงานนี้ที่อุณหภูมิ 70 องศา

เซลเซียส แล้ววัดค่าสัมประสิทธิ์ซีบีคจะได้กราฟหมายเลข 2 สุดท้ายทำการลบกราฟหมายเลข 1 ด้วยกราฟหมายเลข 2 ซึ่งจะได้กราฟหมายเลข 3 ซึ่งเป็นผลมาจากการแยกตัวของคาร์บอนออกมาจากสารละลายของแข็งเพียงอย่างเดียว



รูปที่ 2.16 ผลการวัด TEP ของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำมากหลังจากการรีดเย็นและอบที่อุณหภูมิต่างๆ [8]



รูปที่ 2.17 การเปลี่ยนแปลง TEP ของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่ถูกบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส หลังจากผ่านการลดขนาด 50% ด้วยการรีดเย็น [8]

Khelifaoui และคณะ [9] ศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ซีบีคของโลหะผสม Ti-Ni ขนาด $66 \times 4 \times 1 \text{ mm}^3$ ที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 870 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมงแล้วทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นนำไปรีดเย็นที่ 40% cold work และทำการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 265-465 องศาเซลเซียส ได้ผลดังในรูปที่ 2.18 แกน y เป็นอัตราส่วนของสัมประสิทธิ์ซีบีคที่วัดได้เมื่อเทียบกับสัมประสิทธิ์ซีบีคของตัวอย่างที่อบอ่อนอย่างสมบูรณ์หรือ $\Delta S_{\text{normalized}}$ โดยมีความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$\Delta S_{\text{normalized}} = (\Delta S_t - \Delta S_0) / (\Delta S_{\text{an}} - \Delta S_0) \quad (2.4)$$

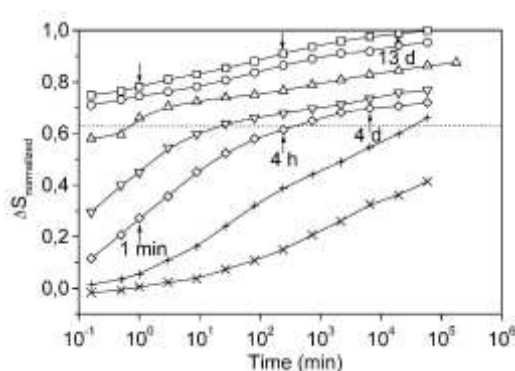
โดยที่ $\Delta S_{\text{normalized}}$ = อัตราส่วนของสัมประสิทธิ์ซีเบ็คที่วัดได้เมื่อเทียบกับสัมประสิทธิ์ซีเบ็คของตัวอย่างที่อบอ่อนอย่างสมบูรณ์ (ไม่มีหน่วย)

ΔS_0 = สัมประสิทธิ์ซีเบ็คของตัวอย่างที่ถูกแปรรูปแต่ยังไม่รับการอบชุบ ($\mu\text{V/K}$)

ΔS_t = สัมประสิทธิ์ซีเบ็คของตัวอย่างที่ถูกแปรรูปหลังจากได้รับการอบชุบเป็นระยะเวลา t ($\mu\text{V/K}$)

ΔS_{an} = สัมประสิทธิ์ซีเบ็คของตัวอย่างที่ถูกแปรรูปหลังจากได้รับการอบชุบโดยสมบูรณ์ ($\mu\text{V/K}$)

Khelifaoui และคณะได้แบ่งการเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์ซีเบ็คเป็นสองส่วน (รูปที่ 2.18) ที่ $\Delta S_{\text{normalized}}$ เท่ากับ 0.6 โดยส่วนแรกเกิดจากกระบวนการ recovery-reverse martensitic ซึ่งไม่สามารถเห็นการเปลี่ยนแปลงจากภาพถ่ายที่ได้จาก TEM ส่วนที่สองเกิดจากกระบวนการ crystallization และ grain growth ซึ่งสามารถเห็นได้ชัดเจนในภาพถ่ายที่ได้จาก TEM โดยมีขนาดเกรนในช่วง 50 ถึง 4000 นาโนเมตร



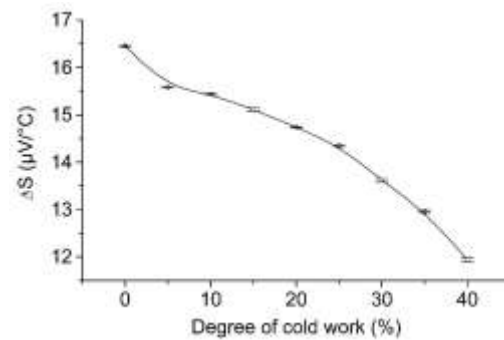
รูปที่ 2.18 การเปลี่ยนแปลงค่า TEP ของ Ti-Ni หลังจากการอบตัวอย่างที่อุณหภูมิต่างๆ

× 265 องศาเซลเซียส, + 305 องศาเซลเซียส, ◇ 348 องศาเซลเซียส,

▽ 385 องศาเซลเซียส, Δ 422 องศาเซลเซียส, o 465 องศาเซลเซียส,

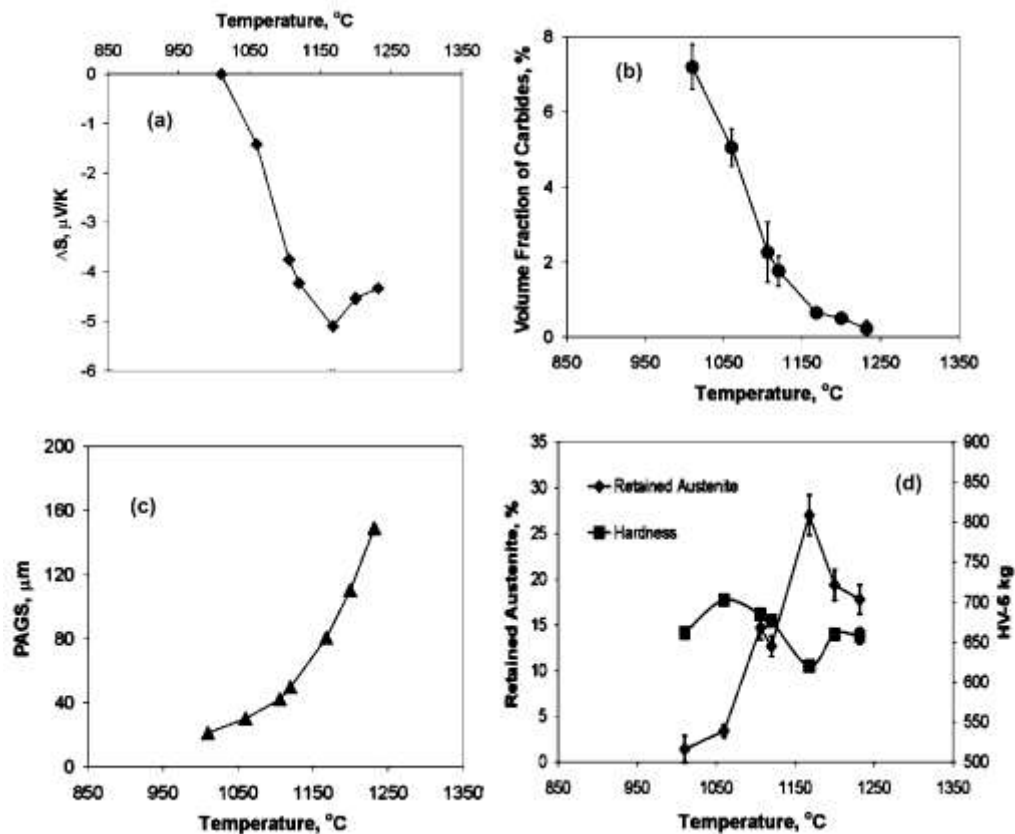
□ 505 องศาเซลเซียส [9]

นอกจากนี้ Khelifaoui และคณะ ยังได้ทำการวัดสัมประสิทธิ์ซีเบ็คที่ %cold work ต่างๆ ซึ่งได้ผลดังรูปที่ 2.19 โดยสัมประสิทธิ์ซีเบ็คลดลงเมื่อ %cold work เพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.19 การเปลี่ยนแปลง TEP ของ Ti-Ni ในทิศทาง rolling หลังจากตัวอย่างผ่านการรีดเย็นที่ %cold work ต่างๆ [9]

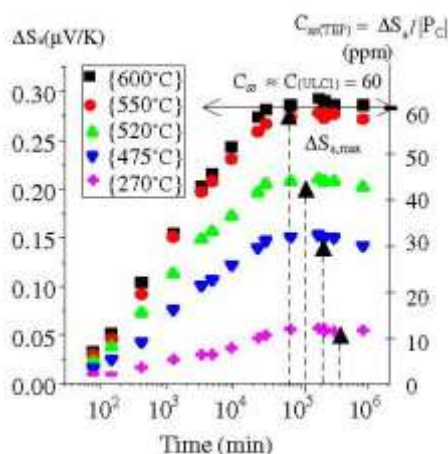
Caballero และคณะ [10] ได้ทำการศึกษาสัมประสิทธิ์ซีเบ็คของเหล็กกล้าไร้สนิม (0.45wt%C, 13.0wt%Cr, 0.38wt%Ni, 0.32wt%Si, 0.44wt%Mn, 0.03wt%P, 0.016wt%S) หลังจากการเผาที่อุณหภูมิสูงและทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว โดยได้ผลการทดลองตามรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 (a) การเปลี่ยนแปลงของ TEP ของเหล็กกล้าไร้สนิมที่อุณหภูมิต่างๆ (b) สัดส่วนปริมาตรของคาร์ไบด์ (c) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเกรนออสติไนท์ (d) สัดส่วนปริมาตรของเฟส ออสติไนท์ตกค้าง [10]

จากรูป 2.20(a) สามารถแบ่งการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์ซีบีคออกเป็น 2 ช่วง โดยตั้งแต่ 1100-1168 องศาเซลเซียส ค่า TEP ลดลงเนื่องจากการละลายของคาร์บอนจาก $M_{23}C_6$ กลับเข้าไปในเนื้อเหล็กเป็นสารละลายของแข็ง ทำให้ปริมาณคาร์ไบด์ลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นดังรูป 2.20(b) ในช่วงที่สองจากอุณหภูมิ 1168-1232 องศาเซลเซียส TEP มีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากเฟสออสติไนต์มีขนาดเกรนใหญ่ขึ้นดังรูป 2.20(c) ซึ่งการที่เกรนมีขนาดใหญ่ขึ้นจะมีผลทำให้อัตราส่วนของเนื้อเกรนต่อขอบเกรนมากขึ้น โดยที่ขอบเกรนเป็นส่วนที่ขัดขวางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนได้มากกว่าเนื้อเกรน ส่วนในรูป 2.20(d) Caballero และคณะได้คาดการณ์ว่า การลดลงของปริมาณเฟสออสติไนต์หลังจากอุณหภูมิสูงกว่า 1168 องศาเซลเซียส น่าจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของ TEP ที่อุณหภูมิสูงกว่า 1168 องศาเซลเซียส โดยสังเกตจากความชันของกราฟ (a) หลังจากอุณหภูมิ 1168 องศาเซลเซียส ที่มีค่าลดลง

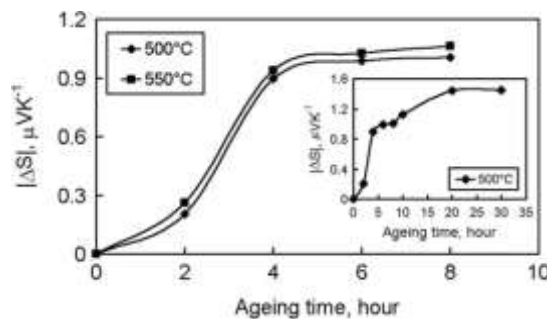
Massardier และคณะ [11] ได้ทำการทดลองวัดค่าสัมประสิทธิ์ซีบีคของเหล็กคาร์บอนต่ำมาก (Ultra-low Carbon Steel) ที่ผ่านการอบที่ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 วินาที และทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว ซึ่งจะทำให้คาร์บอนทั้งหมดละลายกลับเข้าไปในเนื้อเหล็กเป็นสารละลายของแข็ง หลังจากนั้นทำการอบที่อุณหภูมิ 270 ถึง 600 องศาเซลเซียส และทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว ผลการทดลองแสดงไว้ในรูป 2.21 จะเห็นว่าค่า TEP เพิ่มขึ้นเมื่อใช้เวลาอบนานขึ้น เนื่องจากคาร์บอนแยกตัวออกมาจากสารละลายของแข็งและตกผลึกที่ dislocation และค่า TEP จะคงที่เมื่ออบตัวอย่างไปจนถึงช่วงเวลาหนึ่ง ทั้งนี้เพราะปริมาณคาร์บอนที่ละลายในเหล็กเข้าสู่จุดสมดุล



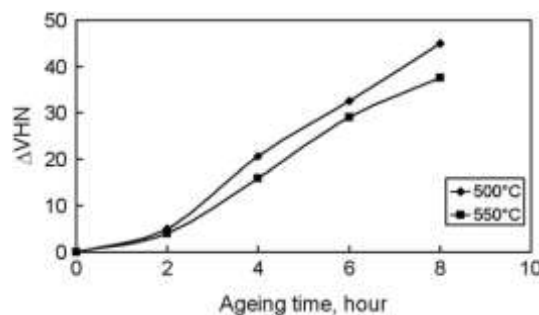
รูปที่ 2.21 การเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์ซีบีคหลังจากการอบเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำมากที่อุณหภูมิต่างๆ [11]

Rana และคณะ [12] ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์ซีบีคในเหล็กกล้าชนิด Interstitial-free ภายหลังการบ่มแข็งซึ่งจะทำให้เกิดการตกผลึกของทองแดง ผลที่ได้แสดงในรูปที่ 2.22 ซึ่งจะเห็น

ได้ว่าการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ทำให้ค่า TEP ของเหล็กสูงกว่าการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ถึงแม้ว่าที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ควรจะมีปริมาณทองแดงตกผลึกมากกว่าที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เนื่องจากความสามารถในการละลายของทองแดงที่ลดลง แต่มีความเป็นไปได้ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ทองแดงสามารถแพร่ได้เร็วกว่าจึงทำให้มีปริมาณทองแดงตกผลึกมากกว่า



รูปที่ 2.22 การเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ซีบีคของเหล็กกล้า Interstitial-free เมื่อเวลาบ่มแข็งเพิ่มขึ้น [12]



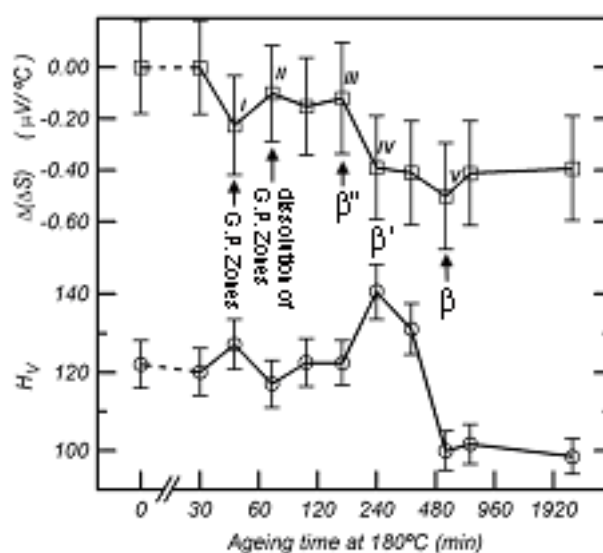
รูปที่ 2.23 การเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งของเหล็กกล้า Interstitial-free เมื่อเวลาบ่มแข็งเพิ่มขึ้น จะสังเกตได้ว่าที่เวลาบ่มแข็ง 4-8 ชั่วโมง ค่า TEP คงที่ในขณะที่ความแข็งมีค่าเพิ่มขึ้น [12]

จากรูปที่ 2.22 และ 2.23 ค่า TEP มีค่าคงที่ในช่วงเวลา 4-8 ชั่วโมง ในขณะที่ความแข็งยังคงเพิ่มขึ้น ซึ่งในช่วงนี้เกิดจากการตกผลึกแบบ coherent โดยที่ผลึกของทองแดงซึ่งมีขนาดในช่วงนาโนเมตร มีโครงสร้างสัมพันธ์กับโครงสร้างเหล็ก หลังจากการบ่มแข็งเลย 8 ชั่วโมงไปแล้ว ค่า TEP เพิ่มขึ้นอีกครั้งหนึ่งในอัตราที่ช้ากว่าในช่วงแรก เนื่องจากการเหนี่ยวนำจากการตกผลึกแบบ coherent หดไป

Abdala และคณะ [13] ได้ทำการทดลองวัดสัมประสิทธิ์ซีบีคในโลหะอะลูมิเนียมผสม 6063 (Mg 0.97wt%, Si 0.76wt%, Cu 0.83wt%) ที่ผ่านการอบ solutioning ที่ 560 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

หลังจากนั้นทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว และบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลาต่างๆ โดยได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 2.24

จากผลการทดลองดังกล่าว Abdala และคณะ ได้แบ่งช่วงที่เกิดการเปลี่ยนแปลงออกเป็น 5 จุด จุดที่ 1 (45 นาที) เป็นช่วงที่เกิด G.P. zone จุดที่ 2 (70 นาที) เป็นช่วงของการสลายตัวของ G.P. zone จุดที่ 3 (160 นาที) เป็นช่วงเริ่มต้นของการเกิดเฟส β'' (coherent Mg_2Si) จุดที่ 4 (240 นาที) เป็นช่วงที่เกิดเฟส β'' เป็นจำนวนมาก จุดที่ 5 (540 นาที) เป็นช่วงของการเปลี่ยนเฟสจาก β'' เป็น β' จุดที่น่าสนใจจะอยู่ที่ช่วงที่เกิด β'' เป็นจำนวนมาก ซึ่งจะวัดความแข็งได้สูงที่สุด และสัมประสิทธิ์ซีเบ็คมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับค่าเริ่มต้น นอกจากนั้น Abdala และคณะ ยังได้เสนอว่าช่วงเวลาที่เกิด G.P. zone ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็คมีแนวโน้มที่จะมีค่าลดลง

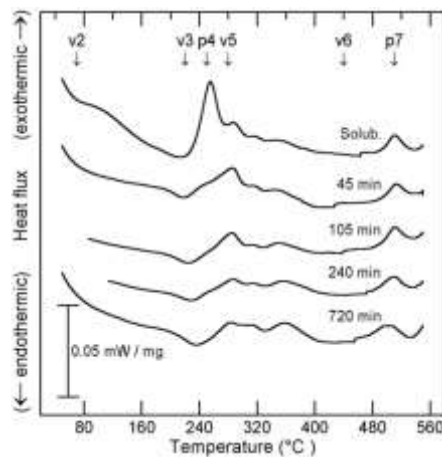


รูปที่ 2.24 ค่า TEP และความแข็งวิกเกอร์ที่เปลี่ยนแปลงขณะทำการบ่มแข็งอะลูมิเนียม 6013 [13]

จากการศึกษาดังกล่าว Abdala และคณะ ได้จัดลำดับของการเปลี่ยนเฟสของอะลูมิเนียม 6013 ไว้ดังต่อไปนี้

Super saturated solid solution $\rightarrow$ GP zones (sphere shaped) $\rightarrow$ β'' (needles) + Q' (laths)
 $\rightarrow$ β (square platelets : Mg_2Si) + Q (laths : $Al_4Cu_2Mg_8Si_7$)

นอกจากนี้ Abdala และคณะ ยังได้ทำการทดสอบตัวอย่างที่ผ่านการทำ solutioning และบ่มแข็ง ด้วยเครื่อง DSC เพื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของเฟส ณ ที่อุณหภูมิต่างๆ โดยได้ผลดังรูป 2.25



รูปที่ 2.25 ผลการทดสอบอะลูมิเนียม 6013 ด้วย DSC [13]

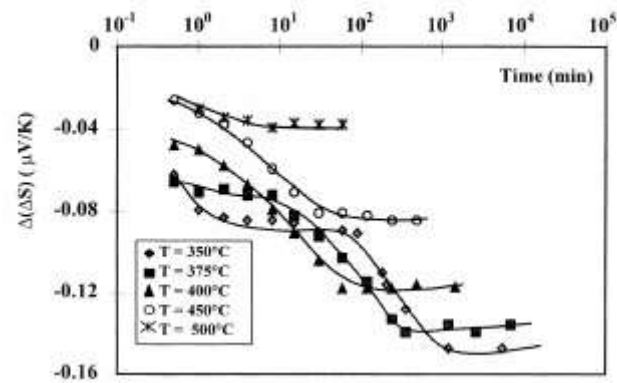
จากรูปที่ 2.25 G.P. zones เกิดขึ้นที่ตำแหน่ง v2 (อุณหภูมิประมาณ 70 องศาเซลเซียส) และสลายตัวที่ตำแหน่ง v3 (อุณหภูมิประมาณ 220 องศาเซลเซียส) โดยตกผลึกเป็นเฟส β'' และ Q' ที่ตำแหน่ง p4 (อุณหภูมิประมาณ 240 องศาเซลเซียส) และสลายตัวที่ตำแหน่ง v5 หลังจากนั้นจึงเกิดการตกผลึกเป็นเฟส β' และ Q (อุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียส) เฟสนี้สลายตัวที่ตำแหน่ง v6 (อุณหภูมิ 440 องศาเซลเซียส) และตกผลึกเป็นเฟส β ที่ตำแหน่ง p7 (อุณหภูมิ 520 องศาเซลเซียส)

Massardier และคณะ [14] ได้ทำการทดลองวัดการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์ซีเบ็คในอะลูมิเนียมผสมเกรด 6061 ภายหลังจากการบ่มแข็ง โดยได้แสดงผลกระทบของการเกิดสารละลายของแข็งกับโลหะชนิดต่างๆ ที่มีต่อสัมประสิทธิ์ซีเบ็คของอะลูมิเนียมดังแสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ผลกระทบของการเกิดสารละลายของแข็งกับโลหะชนิดต่างๆที่มีต่อสัมประสิทธิ์ซีเบ็คของอะลูมิเนียม [15]

Element	Mg	Cu	Si	Fe	Mn
ΔS_i	+2.4	+2.1	-0.74	-8	-6.8

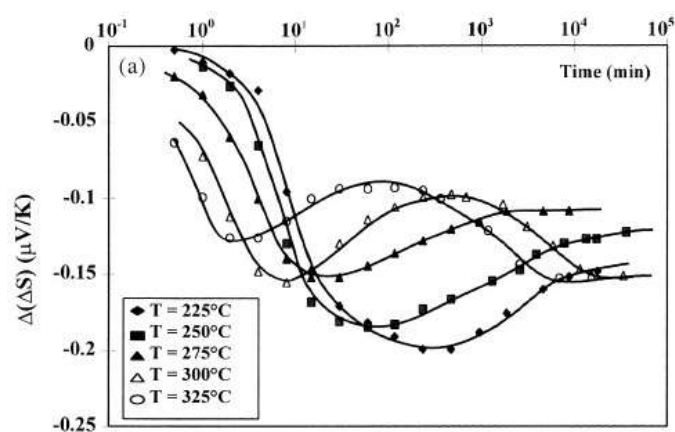
ในช่วงที่หนึ่งซึ่งทำการบ่มแข็งที่ช่วงอุณหภูมิ 350-500 องศาเซลเซียส ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 2.26



รูปที่ 2.26 การเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์ซีเบ็คจากการบ่มแข็งอะลูมิเนียมผสมแมกเนต 6061 ที่ช่วงอุณหภูมิ 350-500 องศาเซลเซียส [14]

การบ่มแข็งที่ 500 องศาเซลเซียสจะทำให้เกิดการเปลี่ยนเฟสอย่างรวดเร็วโดยจะได้เฟส β Mg_2Si ที่ตกผลึกโดยตรงจากสารละลายของแข็ง ส่วนที่อุณหภูมิ 350-450 องศาเซลเซียสจะได้เฟส metastable β_{II}' ซึ่งมีโครงสร้างผลึกเป็น hexagonal โดยที่ $a = 1.04$ nm และ $c = 0.405$ nm ซึ่งเฟสนี้เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการลดลงของสัมประสิทธิ์ซีเบ็คเป็น 2 ช่วง และเมื่อทำการบ่มแข็งไปนานๆ เฟส β_{II}' จะเปลี่ยนเป็น β Mg_2Si ในที่สุด การเปลี่ยนแปลงนี้ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็คไม่มีการเปลี่ยนแปลงอีกในช่วงสุดท้าย

ในช่วงที่สองเมื่อทำการบ่มแข็งที่ช่วงอุณหภูมิ 225-325 องศาเซลเซียส จะได้ผลดังแสดงในรูปที่ 2.27

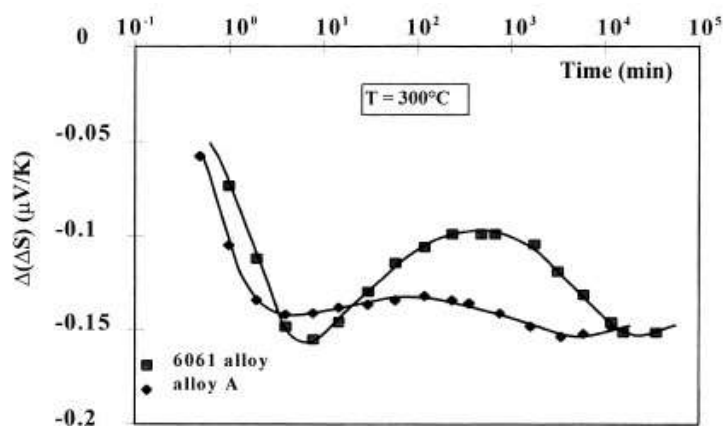


รูปที่ 2.27 การเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์ซีเบ็คจากการบ่มแข็งอะลูมิเนียมผสมแมกเนต 6061 ที่ช่วงอุณหภูมิ 225-325 องศาเซลเซียส [14]

การลดลงของสัมประสิทธิ์ซีเบ็คในช่วงแรกเกิดจากการตกผลึกของเฟส β_I' ซึ่งมีโครงสร้างผลึกเป็น hexagonal โดยที่ $a = 0.705$ nm และ $c = 0.405$ nm หลังจากนั้นสัมประสิทธิ์ซีเบ็คเพิ่มขึ้นจากจุดต่ำสุด

เนื่องจากเกิดเปลี่ยนเฟสจาก β_1' เป็น β_{II}' เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิ 300-325 องศาเซลเซียส จะไม่พบจุดต่ำสุดซึ่งมีสาเหตุมาจาก β_{II}' ตกผลึกโดยตรงจากสารละลายของแข็ง และทองแดง ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งขององค์ประกอบทางเคมีของเฟส β_{II}' จึงเกิดการแพร่อย่างรวดเร็วกว่าที่อุณหภูมิต่ำกว่า นอกจากนี้จะพบการเปลี่ยนแปลงช่วงที่สองที่เกิดจากการเปลี่ยนเฟส β_{II}' เป็น β โดยที่ทองแดงจะต้องแพร่ออกจากเฟส β_{II}' กลับเข้าสู่สารละลายของแข็งซึ่งจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็คเพิ่มขึ้น และแมกนีเซียมจะแพร่ออกจากสารละลายของแข็งเข้าไปสู่เฟส β ซึ่งจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็คลดลง

ในช่วงที่สามเมื่อทำการบ่มแข็งอะลูมิเนียมผสมเกรด 6061 และโลหะผสม A ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 2.28



รูปที่ 2.28 การเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์ซีเบ็คในอะลูมิเนียมผสม 6061 และโลหะผสม A ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส [14]

การเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์ซีเบ็คในโลหะ A ซึ่งไม่มีทองแดงเป็นส่วนผสมประกอบด้วยการตกผลึกจากสารละลายของแข็งเป็น β_1' ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็คลดลงในช่วงแรก การเพิ่มขึ้นและลดลงของสัมประสิทธิ์ซีเบ็คในช่วงถัดไปเกิดจากการสลายตัวของเฟส β_1' และการตกผลึกของเฟส β โดยมีสาเหตุมาจากเฟส β_1' ซึ่งเป็นเฟสที่เป็น semi-coherent กับอะลูมิเนียม จึงมีผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็คลดลง นอกจากนี้ยังเป็นผลจากอัตราส่วนอะตอม $[Mg]/[Si]$ ของเฟส β_1' ที่ต่ำกว่าอัตราส่วนอะตอม $[Mg]/[Si]$ ของเฟส β ด้วย

จากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นสามารถสรุปปรากฏการณ์ทางโลหะวิทยาที่มีผลต่อสัมประสิทธิ์ซีเบ็คได้ดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ผลของปรากฏการณ์ทางโลหะวิทยาต่อสมบัติที่ซีบีค

ปรากฏการณ์ทางโลหะวิทยา	การเปลี่ยนแปลงของสมบัติที่ซีบีค
Solid Solution	ขึ้นอยู่กับชนิดของธาตุ
Precipitation from solid solution	ขึ้นอยู่กับชนิดของธาตุ
Cold Work	ลดลงในทุกทิศทาง
Recovery	เพิ่มขึ้น
Coherent precipitation	ลดลง
Noncoherent precipitation	ไม่มีผล
Grain growth	เพิ่มขึ้น