

บทที่ 3

ผลและการอภิปรายผล

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองและการอภิปรายผล ประกอบด้วย ผลวิเคราะห์องค์ประกอบเคมีของโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075-T651 ที่ใช้ในการวิจัย ผลการทดสอบความแข็ง การทดสอบแรงดึง การทดสอบการคืบและผลการตรวจโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมก่อนและหลังการทดสอบการคืบ มีรายละเอียด ดังนี้

3.1 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบเคมีของตัวอย่างอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075-T651

ผลการวิเคราะห์แผ่นโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075-T651 ตามสภาพเดิมที่รับมา (As-Received Plate) ดังแสดงในตารางที่ 3.1 จะเห็นได้ว่าตัวอย่างอะลูมิเนียมผสมที่ใช้ในการวิจัยนี้ ประกอบด้วยธาตุหลักคือ 5.9wt.%Zn, 2.6wt.%Mg, 1.7wt.%Cu และมีธาตุเจือรองคือ Si, Fe, Cr, Mn, Ti, Ni, Zr และ V เมื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานจาก ASM Handbook [Davis, 1993] พบว่าทั้งปริมาณธาตุหลักและธาตุเจือรองมีปริมาณอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานทุกองค์ประกอบธาตุ

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบเคมีของแผ่นโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075-T651 ที่ใช้ในการวิจัย
เปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานจาก ASM Handbook [Davis, 1993]

ธาตุองค์ประกอบ	ตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัย (wt.%)	ASM Handbook
Si	0.075	Max. 0.40
Fe	0.190	Max. 0.50
Cu	1.703	1.2-2.0
Mn	0.038	Max. 0.30
Mg	2.644	2.1-2.9
Cr	0.186	0.18-0.28
Zn	5.923	5.1-6.1

ตารางที่ 3.1 (ต่อ)

ธาตุองค์ประกอบ	ตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัย (wt.%)	ASM Handbook
Ti	0.023	Max. 0.20
Ni	0.012	Max. 0.05
Zr	0.006	Max. 0.05
V	0.010	Max. 0.05
Balance	Al	Al

3.2 ผลการทดสอบความแข็ง

ตารางที่ 3.2 แสดงผลการทดสอบความแข็งของแผ่นโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075-T651 ตามสภาพเดิมที่รับมา (As-Received Plate) ด้วยวิธี Vickers' Microhardness พบว่าค่าความแข็งด้านข้าง ด้านบนและด้านหน้า ของแผ่นโลหะผสมมีค่าความแข็งโดยเฉลี่ยเท่ากับ $191.8 \pm 4.9\text{HV}$, $189.0 \pm 4.3\text{HV}$ และ $189.2 \pm 5.8\text{HV}$ ตามลำดับ เมื่อเฉลี่ยค่าความแข็งทั้ง 3 ด้านมีค่าเท่ากับ $190 \pm 5\text{HV}$

ตารางที่ 3.2 ผลการทดสอบความแข็งของแผ่นโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075-T651

ครั้งที่	ด้านข้าง (HV)	ด้านบน (HV)	ด้านหน้า (HV)
1	196.4	192.3	194.0
2	187.6	193.2	178.5
3	193.8	178.7	192.3
4	195.6	189.5	186.5
5	190.7	191.1	196.4
6	182.1	191.1	192.1
7	190.7	186.9	186.1

ตารางที่ 3.2 (ต่อ)

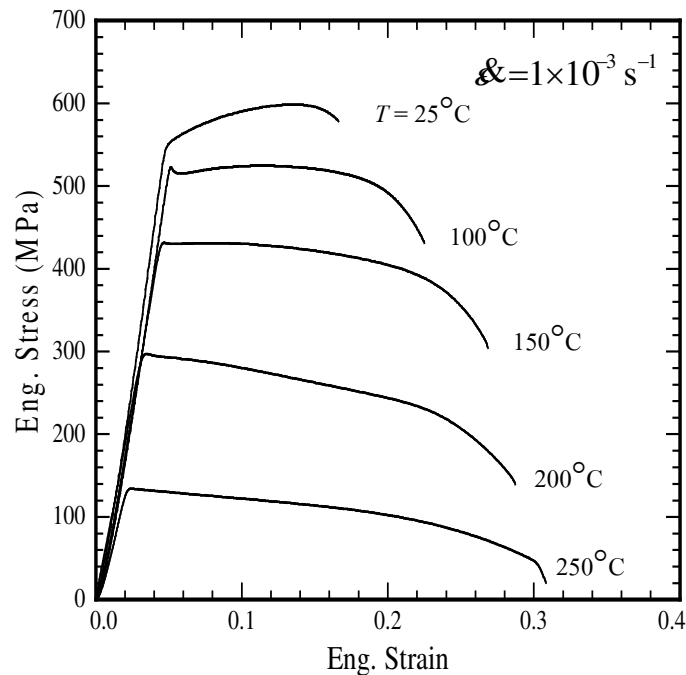
ครั้งที่	ด้านข้าง (HV)	ด้านบน (HV)	ด้านหน้า (HV)
8	192.6	187.4	195.2
9	199.1	187.3	188.8
10	189.2	192.3	182.3
ค่าความแข็งเฉลี่ย HV \pm SD	191.8 \pm 4.9	189.0 \pm 4.3	189.2 \pm 5.8
ค่าความแข็งเฉลี่ยทั้ง 3 ด้าน = 190 \pm 5 HV			

3.3 ผลการทดสอบแรงดึง

ผลการทดสอบแรงดึงของโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075-T651 ดังแสดงในตารางที่ 3.3-3.4 และรูปที่ 3.1-3.2

ตารางที่ 3.3 สมบัติเชิงกลของโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075-T651 จากการทดสอบแรงดึงที่อัตราความเครียด (Strain Rate) คงที่ $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ และที่อุณหภูมิต่างๆ

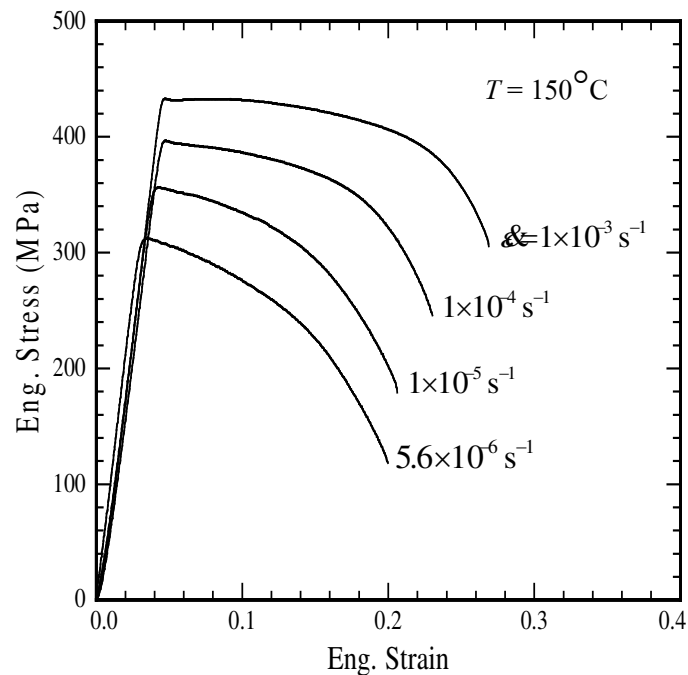
T ($^{\circ}\text{C}$)	σ_y (MPa)	σ_{UTS} (MPa)	ϵ_f (%)
25	544.7	598.4	16.6
100	508.8	524.7	22.5
150	419.6	431.5	26.9
200	295.0	297.1	28.7
250	131.1	134.1	30.8



รูปที่ 3.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดวิศวกรรม ของโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075-T651 ทดสอบแรงดึงที่ Strain Rate ($\dot{\epsilon}$) คงที่ $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ และที่อุณหภูมิต่างๆ

กราฟรูปที่ 3.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดวิศวกรรม (Engineering Stress-Strain) ของโลหะอะลูมิเนียมผสม จากการทดสอบแรงดึงที่อัตราการดึงคงที่ (Constant Crosshead Speed) เท่ากับ 1.8 มม./นาที หรือเทียบเท่ากับค่า Strain Rate ($\dot{\epsilon}$) เท่ากับ $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ และทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตดสอบตั้งแต่ 25 (อุณหภูมิห้อง) 100, 150, 200 และ 250°C ผลการทดลอง พบว่าลักษณะของเส้นกราฟที่อุณหภูมิ 25 และ 100°C เมื่อเลยจุดครากไปแล้วมีลักษณะเป็นแบบ Work Hardening หรือ Strain Hardening เมื่อโลหะถูกแรงกระทำ และเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบพลาสติก จะมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น เพราะในเกรนหนึ่ง การเกิดดิสโลเคชันมีขอบเขตจำกัด และไปสิ้นสุดที่ขอบเกรน เมื่อโลหะถูกแรงกระทำมากขึ้นเกรนแต่ละเกรน เลื่อนตัวไปขัดกันเองตามบริเวณขอบเกรน การเลื่อนตัวก็จะเกิดขึ้นได้ยาก การเปลี่ยนแปลงก็น้อยลง เท่ากับทำให้วัสดุแข็งแรงขึ้น [เล็ก สีคง, 2540] แต่เส้นกราฟที่อุณหภูมิ 150, 200 และ 250°C มีลักษณะเป็นแบบ Strain Softening ค่าความเครียด ณ จุดแตกหัก (Elongation at Break, ϵ_b) ของชิ้นทดสอบ ที่อุณหภูมิ 25, 100, 150, 200 และ 250°C มีค่าเท่ากับ 16.6, 22.5, 26.9, 28.7 และ 30.8 % ตามลำดับ (ตารางที่ 3.3) จะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าความเครียด ณ จุดแตกหักจะเพิ่มสูงขึ้น ในทางกลับ

กันค่าความเค้นสูงสุด (Ultimate Tensile Strength, σ_{UTS}) และค่าความเค้นคราก (Yield Strength) จะมีค่าลดลง ที่อุณหภูมิ 25°C ชิ้นงานมีค่า σ_{UTS} สูงสุดเท่ากับ 598.4 MPa ซึ่งสูงกว่าค่า $\sigma_{UTS} = 538\text{ MPa}$ จาก ASM Handbook [Davis, 1993] ประมาณ 10%



รูปที่ 3.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดวิศวกรรม ของโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075-T651 ทดสอบที่อุณหภูมิกงที่ 150°C และค่า Strain Rate ($\dot{\epsilon}$) ต่างๆ ระหว่าง 5.6×10^{-6} และ $1 \times 10^{-3}\text{ s}^{-1}$

รูปที่ 3.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดวิศวกรรม ของโลหะอะลูมิเนียมผสม โดยทำการทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิ 150°C และทำการเปลี่ยนแปลงค่า Strain Rate เป็น 4 ระดับคือ 1×10^{-3} , 1×10^{-4} , 1×10^{-5} และ $5.6 \times 10^{-6}\text{ s}^{-1}$ ผลการทดลองพบว่าลักษณะของเส้นกราฟแรงดึงมีลักษณะเป็นแบบ Strain Softening ในทุกค่า Strain Rate ค่าความเค้นครากและค่าความเครียด ณ จุดแตกหักมีค่าลดลงเมื่อค่า Strain Rate ลดลง

ตารางที่ 3.4 สมบัติเชิงกลโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075-T651 จากการทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิ 150°C และ Strain Rate ($\dot{\epsilon}$) ต่างๆ

$\dot{\epsilon}$ (s ⁻¹)	σ_y (MPa)	σ_{UTS} (MPa)	ϵ_f (%)
1×10^{-3}	419.6	431.5	26.9
1×10^{-4}	365.2	396.6	23.0
1×10^{-5}	344.0	356.3	20.6
5.6×10^{-6}	308.1	312.7	20.0

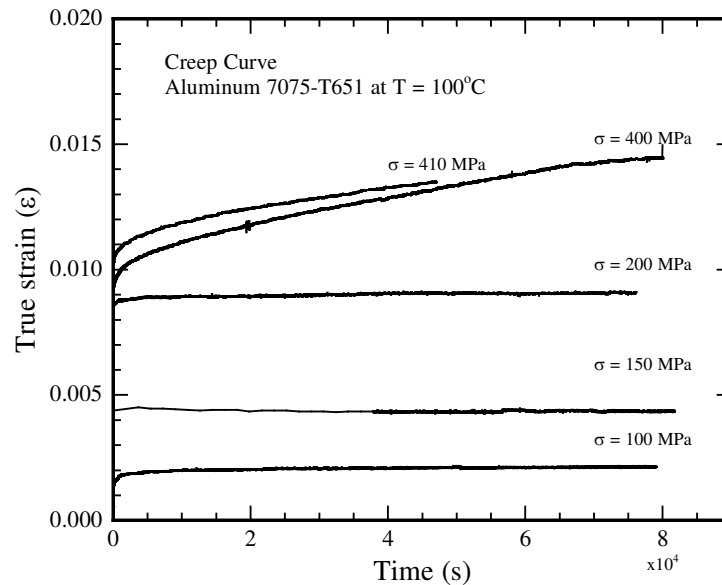
3.4 ผลการทดสอบการคืบ

3.4.1 เส้นโค้งการคืบ (Creep Curve)

ผลการทดลองการคืบของโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075-T651 โดยกำหนดให้ภาระแรงดึงคงที่ (Constant Tension Load) และอุณหภูมิคงที่ (Constant Temperature) ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ถึงรูปที่ 3.6 เส้นโค้งการคืบเป็นการพล็อตค่าความเครียดของการคืบ (Creep Strain, ϵ) บนแกน y ต่อเวลาบนแกน x ที่อุณหภูมิ 100, 150, 200 และ 250°C

3.4.1.1 เส้นโค้งการคืบ ทดสอบที่อุณหภูมิ 100°C

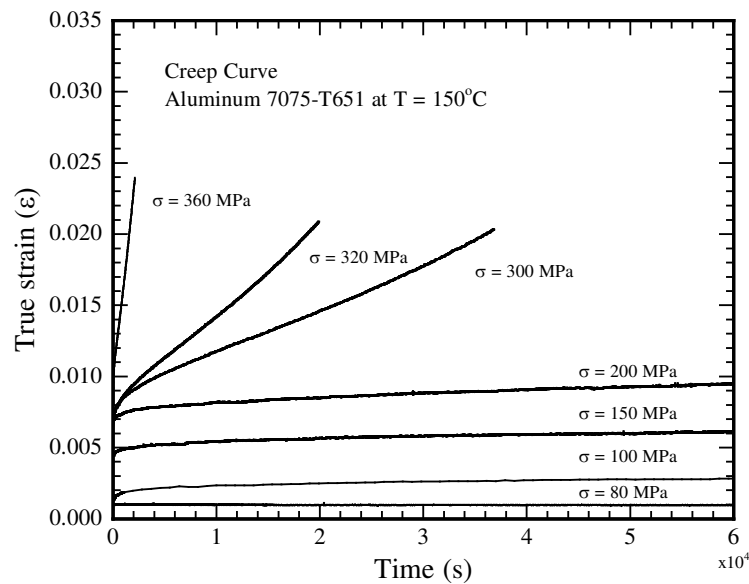
รูปที่ 3.3 เป็นผลการทดลองการคืบที่อุณหภูมิ 100°C ที่ความเค้น 100, 150, 200, 400 และ 410 MPa เส้นโค้งการคืบทุกระดับค่าความเค้นแสดงพฤติกรรมการคืบระยะแรก (Primary Creep) และระยะที่สอง (Secondary Creep) ค่า Minimum Creep Rate ($\dot{\epsilon}_{ss}$) คำนวณจากระยะที่สองของเส้นโค้งการคืบมีค่าเท่ากับ 3.67×10^{-10} , 8.60×10^{-10} , 3.50×10^{-9} , 4.96×10^{-8} และ 6.89×10^{-8} s⁻¹ ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มความเค้นการคืบสูงขึ้นจะทำให้ค่า Minimum Creep Rate สูงขึ้นตามไปด้วย จากสมการที่ (1.2) Minimum Creep Rate จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเค้นการคืบ



รูปที่ 3.3 เส้นโค้งการคืบทดสอบที่อุณหภูมิ 100°C ที่ค่าความเค้น 100, 150, 200, 400 และ 410 MPa

3.4.1.2 เส้นโค้งการคืบ ทดสอบที่อุณหภูมิ 150°C

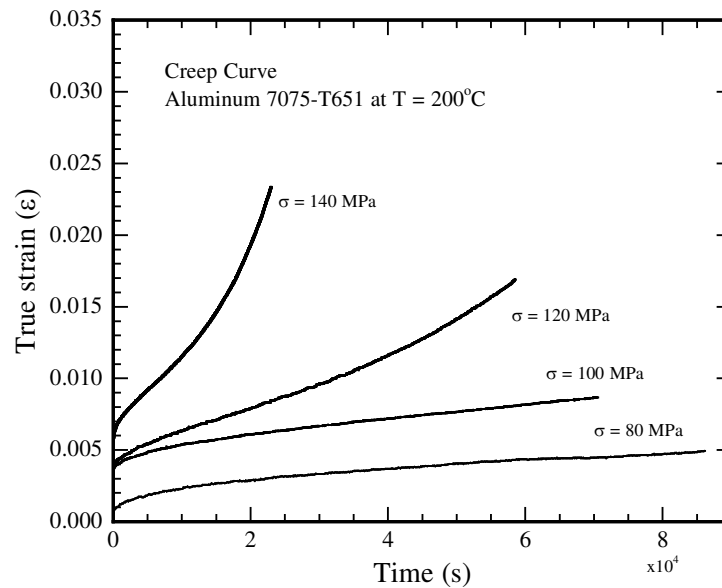
ผลการทดลองการคืบที่อุณหภูมิ 150°C ที่ความเค้น 80, 100, 150, 200, 300, 320 และ 360 MPa ดังแสดงในรูปที่ 3.4 ลักษณะของเส้นโค้งการคืบ ที่ความเค้น 80, 100, 150 และ 200 MPa แสดงพฤติกรรมการคืบระยะแรก และระยะที่สอง แต่ที่ความเค้น 300, 320 และ 360 MPa เส้นโค้งการคืบแสดงพฤติกรรมการคืบทั้ง 3 ระยะคือ ระยะแรก ระยะที่สอง และระยะที่สาม (Tertiary Creep) Minimum Creep Rate มีค่าเท่ากับ 1.14×10^{-9} , 3.58×10^{-9} , 1.03×10^{-8} , 2.10×10^{-8} , 2.89×10^{-7} , 5.75×10^{-7} และ $6.0 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มความเค้นการคืบสูงขึ้นจะทำให้ค่า Minimum Creep Rate สูงขึ้นตามไปด้วยเช่นเดียวกับการทดสอบที่อุณหภูมิ 100°C ที่ความเค้นการคืบเท่ากับหรือน้อยกว่า 200 MPa จะไม่ปรากฏ Tertiary Creep



รูปที่ 3.4 เส้นโค้งการคืบทดสอบที่อุณหภูมิ 150°C ที่ค่าความเค้น 80, 100, 150, 200, 300, 320 และ 360 MPa

3.4.1.3 เส้นโค้งการคืบ ทดสอบที่อุณหภูมิ 200°C

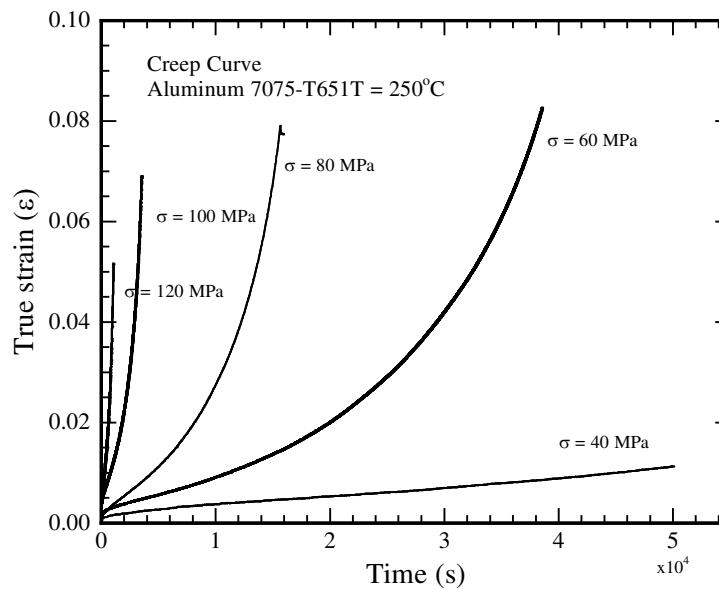
ผลการทดสอบการคืบที่อุณหภูมิ 200°C ที่ความเค้น 80, 100, 120 และ 140 MPa ดังแสดงในรูปที่ 3.5 ลักษณะของเส้นโค้งการคืบที่ความเค้น 80 และ 100 MPa แสดงพฤติกรรมการคืบระยะแรกและระยะที่สอง ส่วนที่ความเค้น 120 และ 140 MPa เส้นโค้งการคืบแสดงพฤติกรรมการคืบทั้ง 3 ระยะ ค่า Minimum Creep Rate ที่อุณหภูมิ 200°C ในช่วงความเค้นการคืบ 80-140 MPa มีค่าระหว่าง $3.0 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}$ - $7.20 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มความเค้นการคืบสูงขึ้นจะทำให้ค่า Minimum Creep Rate สูงขึ้นตามไปด้วย จากสมการที่ (1.2) Minimum Creep Rate จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเค้นการคืบ เมื่อความเค้นการคืบเท่ากับหรือน้อยกว่า 100 MPa จะไม่ปรากฏ Tertiary Creep



รูปที่ 3.5 เส้นโค้งการคืบทดสอบที่อุณหภูมิ 200°C ที่ค่าความเค้น 80, 100, 120 และ 140 MPa

3.4.1.4 เส้นโค้งการคืบทดสอบที่อุณหภูมิ 250°C

ผลการทดสอบการคืบที่อุณหภูมิ 250°C ความเค้น 40, 60, 80, 100, และ 120 MPa ดังแสดงในรูปที่ 3.6 ลักษณะของเส้นโค้งการคืบ ที่ความเค้น 40 MPa แสดงพฤติกรรมการคืบระยะแรกและระยะที่สอง ส่วนที่ความเค้น 60, 80, 100 และ 120 MPa เส้นโค้งการคืบปรากฏพฤติกรรมการคืบทั้ง 3 ระยะ ค่า Minimum Creep Rate ที่อุณหภูมิ 250°C ในช่วงความเค้นการคืบระหว่าง 40-120 MPa มีค่าระหว่าง $1.57 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ - $2.37 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มความเค้นการคืบสูงขึ้นจะทำให้ค่า Minimum Creep Rate สูงเร็วมาก จากสมการที่ (1.2) Minimum Creep Rate จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเค้นการคืบ ความเค้นที่ไม่ทำให้เกิดค่า Tertiary Creep จะน้อยกว่า 40 MPa



รูปที่ 3.6 เส้นโค้งการคืบทดสอบที่อุณหภูมิ 250°C ที่ค่าความเค้น 40, 60, 80, 100 และ 120 MPa

3.4.2 ค่ายกกำลังของความเค้น (Stress Exponent, n)

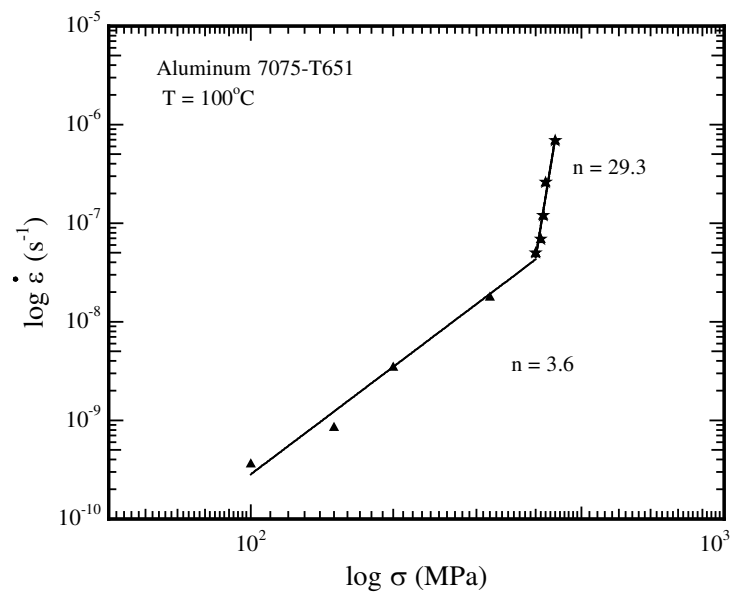
ผลการทดสอบการคืบของโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075-T651 ที่อุณหภูมิ 100, 150, 200 และ 250°C ที่ความเค้นต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.5-3.8 และรูปที่ 3.7-3.11

3.4.2.1 ค่ายกกำลังของความเค้นทดสอบที่อุณหภูมิ 100°C

ผลการทดสอบการคืบที่อุณหภูมิกงที่ 100°C ที่ความเค้นการคืบในช่วง 100-440 MPa ดังแสดงในตารางที่ 3.5 เมื่อนำค่า Minimum Creep Rate ($\dot{\epsilon}_{ss}$) และค่าความเค้นการคืบ (σ) พล็อตบนสเกล \log จะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง $\log \dot{\epsilon}_{ss}$ และ $\log \sigma$ ดังแสดงในรูปที่ 3.7 ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างค่า $\log \dot{\epsilon}_{ss}$ และค่า $\log \sigma$ หรือค่าความชันของเส้นกราฟในรูปที่ 3.7 คือค่ายกกำลังของความเค้น (Stress Exponent, n) จะเห็นได้ว่าการทดสอบการคืบที่อุณหภูมิ 100°C ค่าความชันของเส้นกราฟสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ช่วง คือช่วงความเค้น 100-400 MPa และช่วงความเค้นมากกว่า 400 MPa ซึ่งมีค่า n เท่ากับ 3.6 และ 29.3 ตามลำดับ โดยปกติแล้วค่า n จะมีค่าประมาณ 4-5 สำหรับโลหะบริสุทธิ์ และโลหะผสมชนิด M ซึ่งมีพฤติกรรมการคืบเช่นเดียวกับโลหะบริสุทธิ์ [Spigarelli, 1999] ซึ่งพฤติกรรมการคืบเป็นไปตาม กฎการคืบแบบ Power-Law Creep

ตารางที่ 3.5 ค่า Minimum Creep Rate ($\dot{\epsilon}_{ss}$) จากการทดสอบการคืบที่อุณหภูมิ 100°C ที่ระดับความเค้นการคืบระหว่าง 100-440 MPa

อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	ความเค้นการคืบ, σ (MPa)	Minimum Creep Rate, $\dot{\epsilon}_{ss}$ (s^{-1})
100	100	3.67×10^{-10}
	150	8.60×10^{-10}
	200	3.48×10^{-9}
	320	1.81×10^{-8}
	400	4.97×10^{-8}
	410	6.90×10^{-8}
	415	1.22×10^{-7}
	420	2.60×10^{-7}
	440	6.89×10^{-7}



รูปที่ 3.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\log \dot{\epsilon}_{ss}$ และค่า $\log \sigma$ ที่อุณหภูมิ 100°C

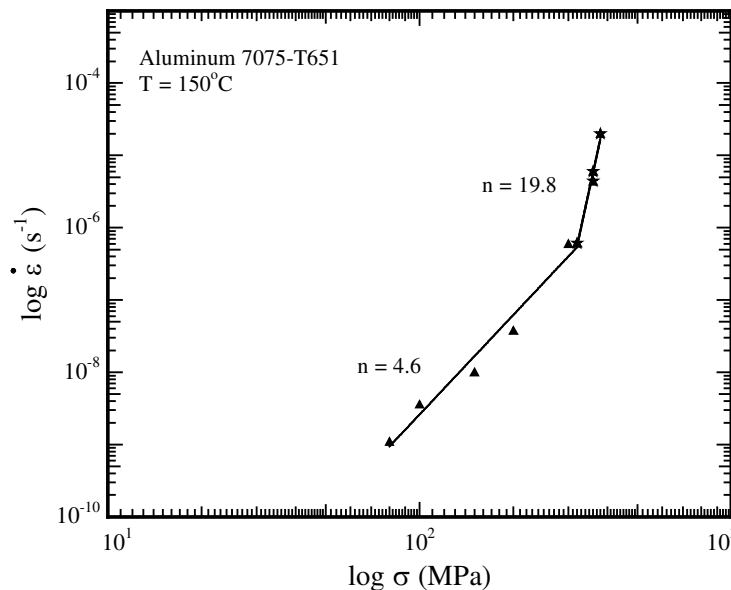
เมื่อค่า $n \geq 7-8$ จะเป็นช่วงที่ไม่สามารถอธิบายได้ด้วยกฎ Power-Law Creep หรือจัดอยู่ในช่วงที่เรียกว่า Power-Law Breakdown [Spigarelli, 1999] การทดสอบการคืบที่อุณหภูมิ 100°C ความเค้นช่วงการเปลี่ยนแปลงจากการคืบแบบ Power-Law Creep ไปสู่ Power-Law Breakdown ซึ่งมี Transition Stress อยู่ที่ความเค้นประมาณ 400 MPa

3.4.2.2 ค่ายกกำลังของความเค้นทดสอบที่อุณหภูมิ 150°C

ผลการทดสอบการคืบที่อุณหภูมิ 150°C ที่ระดับความเค้นการคืบระหว่าง $80-380\text{ MPa}$ ดังแสดงในตารางที่ 3.6 และกราฟรูปที่ 3.8 พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\log \dot{\epsilon}_{ss}$ กับค่า $\log \sigma$ สามารถแบ่งออกเป็น 2 ช่วง เช่นเดียวกับการทดสอบการคืบที่อุณหภูมิ 100°C ในช่วงความเค้นการคืบระหว่าง $80-300\text{ MPa}$ และค่าความเค้นการคืบ $320-380\text{ MPa}$ จะมีค่ายกกำลังของความเค้น (Stress Exponent, n) เท่ากับ 4.6 และ 19.8 ตามลำดับ เมื่อความเค้นมากกว่า 320 MPa จะทำให้พฤติกรรมการคืบเปลี่ยนจาก Power-Law Creep ($n = 4.6$) ไปสู่ พฤติกรรมการคืบแบบ Power-Law Breakdown ($n = 19.8$) และมีค่า Transition Stress อยู่ที่ความเค้นประมาณ 300 MPa

ตารางที่ 3.6 ค่า Minimum Creep Rate ($\dot{\epsilon}_{ss}$) จากการทดสอบการคืบที่อุณหภูมิ 150°C ที่ระดับความเค้นการคืบระหว่าง $80-380\text{ MPa}$

อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	ความเค้นการคืบ, σ (MPa)	Minimum Creep Rate, $\dot{\epsilon}_{ss}$ (s^{-1})
150	80	1.14×10^{-9}
	100	3.58×10^{-9}
	150	1.03×10^{-8}
	200	3.81×10^{-8}
	300	6.00×10^{-7}
	320	6.14×10^{-7}
	360	4.36×10^{-6}
	380	2.03×10^{-5}



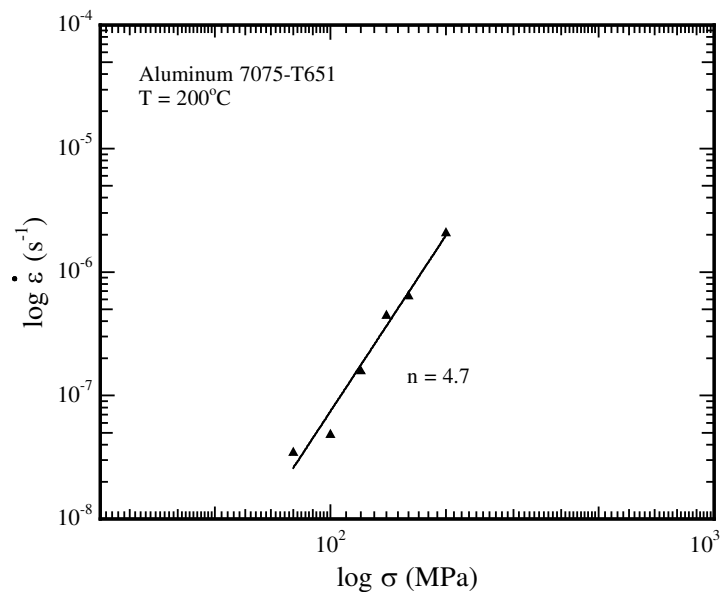
รูปที่ 3.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\log \dot{\epsilon}_{ss}$ และค่า $\log \sigma$ ที่อุณหภูมิ 150°C

3.4.2.3 ค่ายกกำลังของความเค้นทดสอบที่อุณหภูมิ 200°C

ผลการทดสอบการคืบที่อุณหภูมิ 200°C ที่ความเค้นการคืบระหว่าง 80-200 MPa ดังแสดงในตารางที่ 3.7 เมื่อพล็อตค่า $\log \dot{\epsilon}_{ss}$ กับ $\log \sigma$ (รูปที่ 3.9)

ตารางที่ 3.7 ค่า Minimum Creep Rate ($\dot{\epsilon}_{ss}$) จากการทดสอบการคืบที่อุณหภูมิ 200°C ที่ระดับความเค้นการคืบระหว่าง 80-200 MPa

อุณหภูมิ (°C)	ความเค้นการคืบ, σ (MPa)	Minimum Creep Rate, $\dot{\epsilon}_{ss}$ (s ⁻¹)
200	80	3.50×10^{-8}
	100	4.87×10^{-8}
	120	1.59×10^{-7}
	140	4.53×10^{-7}
	160	6.45×10^{-7}
	200	2.14×10^{-6}



รูปที่ 3.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\log \dot{\epsilon}$ และค่า $\log \sigma$ ที่อุณหภูมิ 200°C

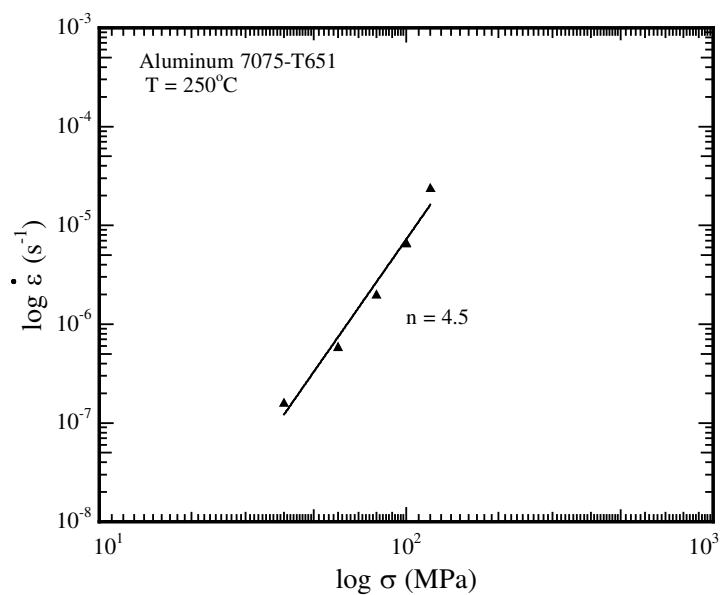
พบว่าความสัมพันธ์เชิงเส้น ความชันของกราฟ (n) มีค่าเท่ากับ 4.7 ซึ่งใกล้เคียงกับค่า n ที่อุณหภูมิที่ 150°C พฤติกรรมการคืบที่อุณหภูมิ 200°C และในช่วงความเค้น 80-200 MPa เป็นแบบ Power-Law Creep และในช่วงความเค้นดังกล่าวไม่ปรากฏพฤติกรรมแบบ Power-Law Breakdown อย่างเช่นที่พบในการทดสอบการคืบที่อุณหภูมิ 100 และ 150°C

3.4.2.4 ค่ายกกำลังของความเค้นทดสอบที่อุณหภูมิ 250°C

ผลการทดสอบการคืบที่อุณหภูมิ 250°C ที่ความเค้นการคืบ 40-120 MPa ดังแสดงในตารางที่ 3.8 และกราฟรูปที่ 3.10 พฤติกรรมการคืบที่อุณหภูมิ 250°C และช่วงความเค้น 40-120 MPa เป็นแบบ Power-Law Creep มีค่ายกกำลังของความเค้น (n) เท่ากับ 4.5 และในช่วงความเค้นดังกล่าวไม่พบปรากฏการณ์ Power-Law Breakdown

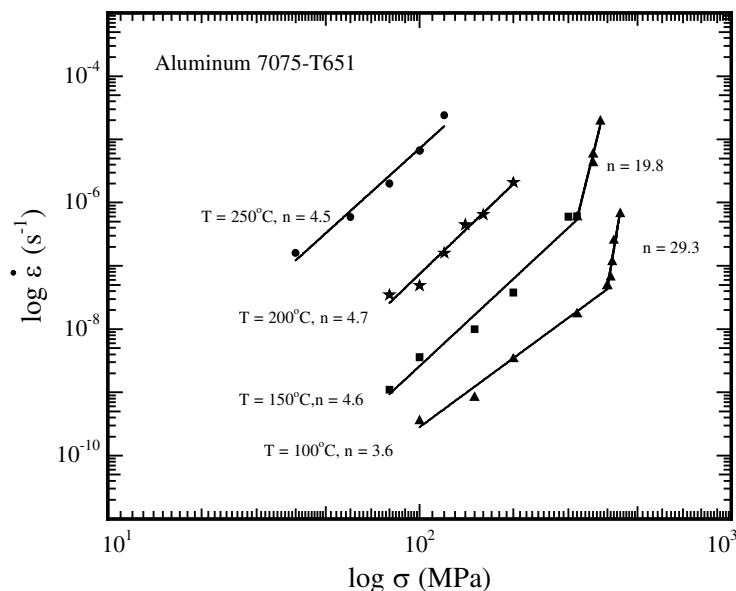
ตารางที่ 3.8 ค่า Minimum Creep Rate ($\dot{\epsilon}_{ss}$) จากการทดสอบการคืบที่อุณหภูมิ 250°C ที่ระดับความเค้นการคืบระหว่าง 40-120 MPa

อุณหภูมิ (°C)	ความเค้นการคืบ, σ (MPa)	Minimum Creep Rate, $\dot{\epsilon}_{ss}$ (s ⁻¹)
250	40	1.57×10^{-7}
	60	5.88×10^{-7}
	80	1.96×10^{-6}
	100	6.63×10^{-6}
	120	2.37×10^{-5}



รูปที่ 3.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\log \dot{\epsilon}_{ss}$ และค่า $\log \sigma$ ที่อุณหภูมิ 250°C

3.4.2.5 เปรียบเทียบค่ายกกำลังของความเค้น ทดสอบที่อุณหภูมิ 100, 150, 200 และ 250°C



รูปที่ 3.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\log \dot{\epsilon}_{ss}$ และค่า $\log \sigma$ ที่อุณหภูมิ 100, 150, 200 และ 250°C

ผลการทดลองการคืบที่อุณหภูมิระหว่าง 100-250°C ที่ความเค้นการคืบระหว่าง 40 – 440 MPa เมื่อนำกราฟเส้นตรงมีค่าความชันแต่ละอุณหภูมิมาเขียนในกราฟเดียวกันดังแสดงในรูปที่ 3.11 พบว่าที่อุณหภูมิ 100, 150, 200 และ 250 °C มีค่า n เท่ากับ 3.6, 4.6, 4.7 และ 4.5 ตามลำดับ แต่ที่อุณหภูมิ 100 และ 150°C ค่าความชันเพิ่มขึ้นในช่วงความเค้นสูงๆ ค่า n สูงขึ้นเป็น 29.3 และ 19.8 ตามลำดับ ซึ่งเป็นช่วงการเปลี่ยนแปลงจากพฤติกรรมกรคืบแบบ Power-Law Creep ($n = 4-5$) ไปสู่ Power-Law Breakdown ($n > 7-8$)

3.4.3 พลังงานกระตุ้นสำหรับการคืบ (Activation Energy for Creep, Q_c)

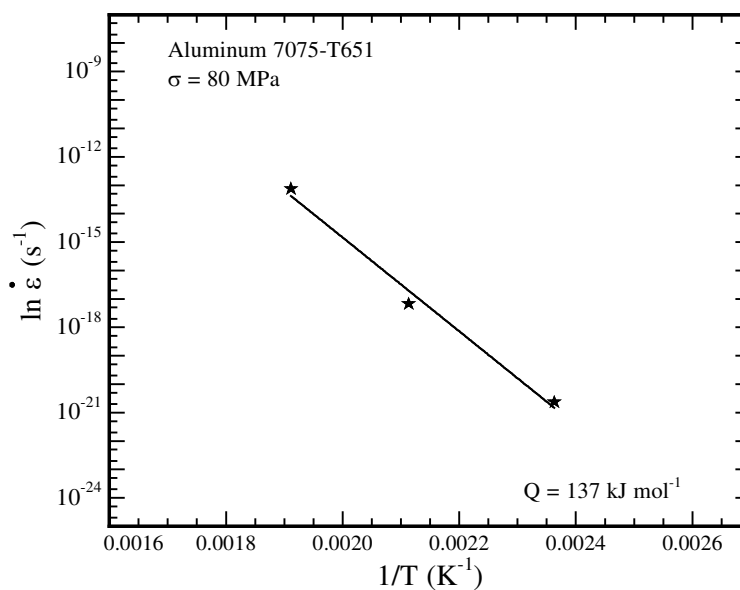
ผลการทดสอบการคืบที่ค่าความเค้นคงที่และที่อุณหภูมิการคืบต่างๆ เมื่อนำค่า $\ln \dot{\epsilon}_{ss}$ และค่า $\frac{1}{T}$ พล็อตบน Semi-Log Scale ดังแสดงในรูปที่ 3.12-3.14 ความสัมพันธ์เชิงเส้น ระหว่างค่า $\ln \dot{\epsilon}_{ss}$ และค่า $\frac{1}{T}$ ความชันของเส้นกราฟจะมีค่าเท่ากับ $(-\frac{Q_c}{R})$ เมื่อ Q_c คือพลังงานกระตุ้นสำหรับการคืบ และ R คือค่าคงที่ของแก๊สสากล (Universal Gas Constant)

3.4.3.1 พลังงานกระตุ้นสำหรับการคืบ ทดสอบที่ความเค้น 80 MPa

ผลการทดสอบการคืบที่ความเค้นคงที่ 80 MPa และอุณหภูมิ 423, 473 และ 523 K ดังแสดงในตารางที่ 3.9 และกราฟรูปที่ 3.12 พบว่าที่ความเค้นการคืบ 80 MPa และอุณหภูมิ 423-523 K พลังงานกระตุ้นสำหรับการคืบ (Q_c) มีค่าเท่ากับ 137 kJ mol^{-1}

ตารางที่ 3.9 ค่า Minimum Creep Rate ($\dot{\epsilon}_{ss}$) จากการทดสอบการคืบที่ความเค้นการคืบ 80 MPa และที่อุณหภูมิต่างๆ

ความเค้นการคืบ, σ (MPa)	อุณหภูมิ, T (K)	Minimum Creep Rate, $\dot{\epsilon}_{ss}$ (s^{-1})
80	423	1.14×10^{-9}
	473	3.50×10^{-8}
	523	2.00×10^{-6}



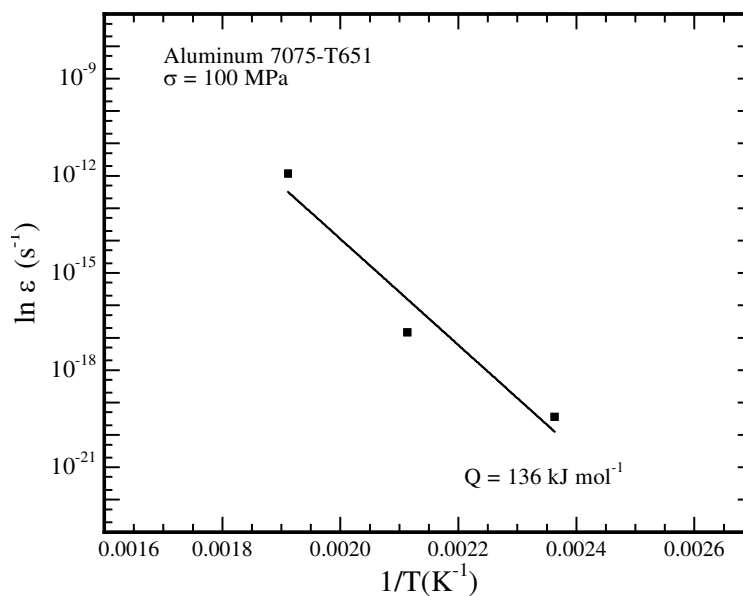
รูปที่ 3.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln \dot{\epsilon}_{ss}$ และค่า $\frac{1}{T}$ ทดสอบที่ความเค้น 80 MPa

3.4.3.2 พลังงานกระตุ้นสำหรับการคืบ ทดสอบที่ความเค้น 100 MPa

ผลการทดสอบการคืบ ที่ความเค้นการคืบ 100 MPa และอุณหภูมิ ระหว่าง 423-523 K ดังแสดงในตารางที่ 3.10 และรูปที่ 3.13

ตารางที่ 3.10 ค่า Minimum Creep Rate ($\dot{\epsilon}_{ss}$) จากการทดสอบการคืบที่ความเค้นการคืบคงที่ 100 MPa และที่อุณหภูมิต่างๆ

ความเค้นการคืบ, σ (MPa)	อุณหภูมิ, T (K)	Minimum Creep Rate, $\dot{\epsilon}_{ss}$ (s^{-1})
100	423	3.58×10^{-9}
	473	4.87×10^{-8}
	523	6.23×10^{-6}



รูปที่ 3.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln \dot{\epsilon}_{ss}$ และค่า $\frac{1}{T}$ ทดสอบที่ความเค้น 100 MPa

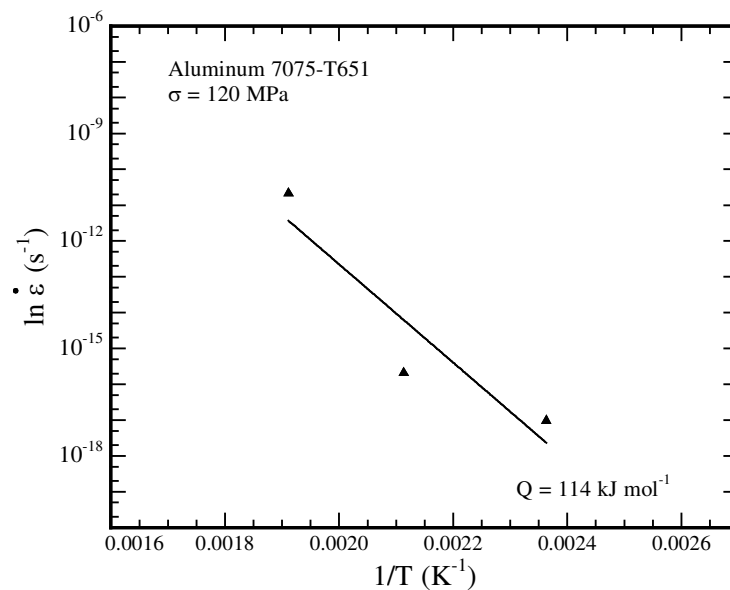
ที่ความเค้นการคืบ 100 MPa และช่วงอุณหภูมิ 423-523 K พบว่าพลังงานกระตุ้น สำหรับการคืบ (Q_c) มีค่าเท่ากับ 136 kJ mol $^{-1}$ ซึ่งใกล้เคียงกับการทดสอบที่ความเค้น 80 MPa

3.4.3.3 พลังงานกระตุ้นสำหรับการคืบ ทดสอบที่ความเค้น 120 MPa

ผลการทดสอบการคืบที่ความเค้นการคืบ 120 MPa และอุณหภูมิระหว่าง 423-523 K ดังแสดงในตารางที่ 3.11 และรูปที่ 3.14

ตารางที่ 3.11 ค่า Minimum Creep Rate ($\dot{\epsilon}_{ss}$) ความเค้นการคืบคงที่ 120 MPa และที่อุณหภูมิต่างๆ

ความเค้นการคืบ, σ (MPa)	อุณหภูมิ, T (K)	Minimum Creep Rate, $\dot{\epsilon}_{ss}$ (s^{-1})
120	423	4.22×10^{-8}
	473	1.57×10^{-7}
	523	2.37×10^{-5}

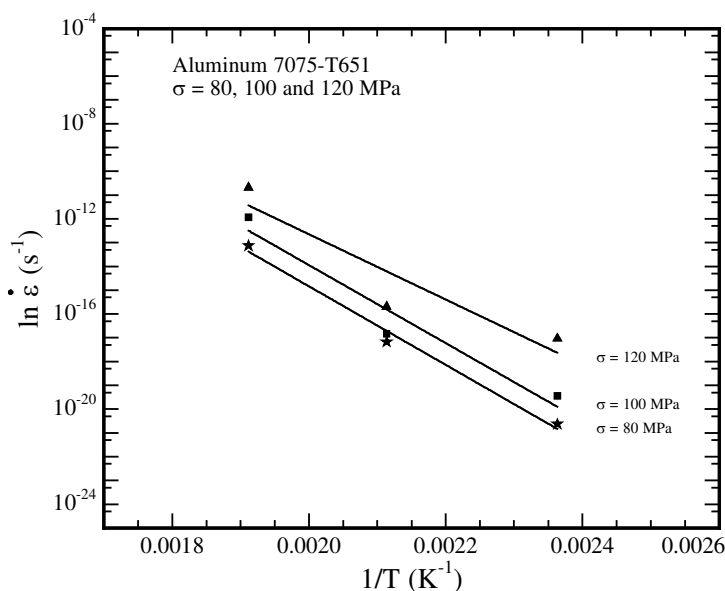


รูปที่ 3.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln \dot{\epsilon}_{ss}$ และค่า $\frac{1}{T}$ ทดสอบที่ความเค้น 120 MPa

จากการทดลองที่ความเค้นการคืบ 120 MPa และอุณหภูมิ 423-523 K พบว่าพลังงานกระตุ้นสำหรับการคืบ (Q_c) มีค่าเท่ากับ 114 kJ mol⁻¹

3.3.3.4 เปรียบเทียบค่าพลังงานกระตุ้นการคืบ ทดสอบที่ความเค้น 80, 100 และ 120 MPa

เมื่อนำผลการทดลองการคืบที่ความเค้น 80, 100 และ 120 MPa ในช่วงอุณหภูมิ 423-523 K มาพล็อตรวมกันดังแสดงในรูปที่ 3.15 จะเห็นได้ว่าเมื่อประเมินค่าพลังงานกระตุ้นสำหรับการคืบที่ความเค้นการคืบทั้ง 3 ระดับ พบว่าที่ระดับความเค้นการคืบ 80 และ 100 MPa ความชันของเส้นกราฟมีค่าใกล้เคียงกันคิดเทียบเป็นค่าพลังงานกระตุ้นการคืบ (Q_c) มีค่าประมาณ 136 kJ mol^{-1} แต่ที่ความเค้น 120 MPa มีความชันลดลงคิดเป็นค่า Q_c ประมาณ 114 kJ mol^{-1}



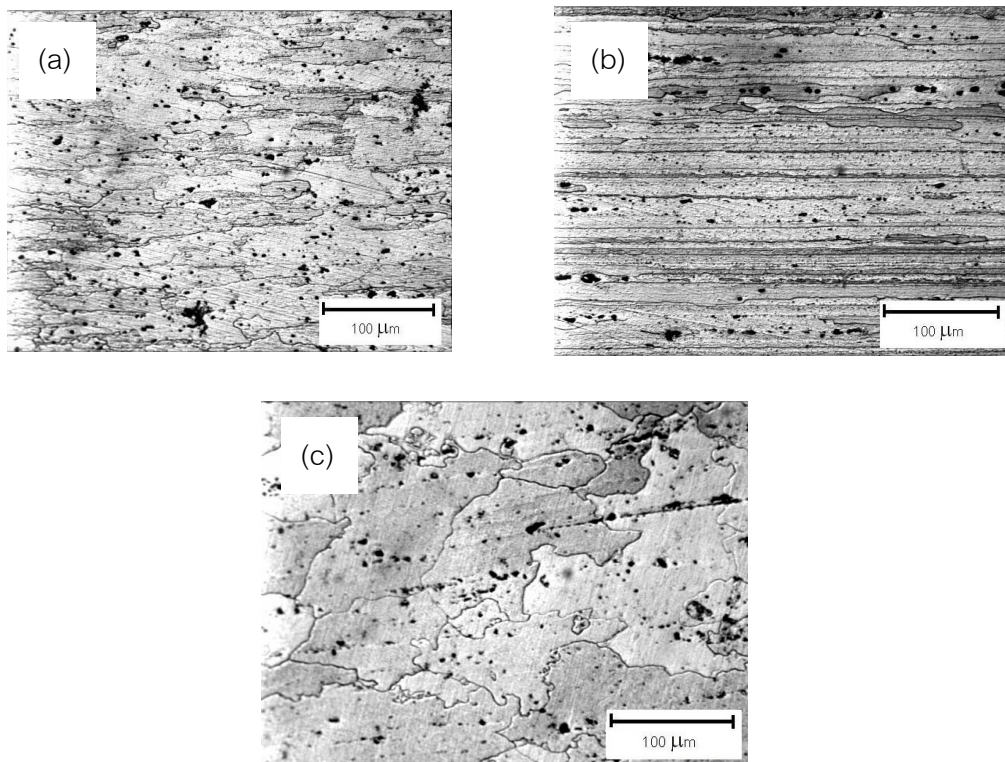
รูปที่ 3.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln \dot{\epsilon}_{ss}$ และค่า $\frac{1}{T}$ ทดสอบที่ความเค้นการคืบ 80, 100 และ 120 MPa

3.5 โครงสร้างจุลภาค (Microstructures)

ผลการตรวจโครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียม 7075-T651 แบ่งออกเป็น 3 กลุ่มย่อยคือ กลุ่มโครงสร้างจุลภาคของแผ่นโลหะอะลูมิเนียมผสมตามสภาพที่รับมา (As-Received Plate) กลุ่มโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการให้ความร้อน (Pre-Heated) ก่อนทำการทดสอบการคืบและกลุ่มโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบการคืบมาแล้ว รายละเอียดของโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมทั้ง 3 กลุ่มมีดังนี้

3.5.1 โครงสร้างจุลภาคของแผ่นโลหะอะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียมเกรด 7075-T651 ตามสภาพที่รับมา (As-Received Plate)

ผลการตรวจโครงสร้างจุลภาคของแผ่นโลหะอะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียมเกรด 7075-T651 ตามสภาพที่รับมา (As-Received Plate) ดังแสดงในรูปที่ 3.16

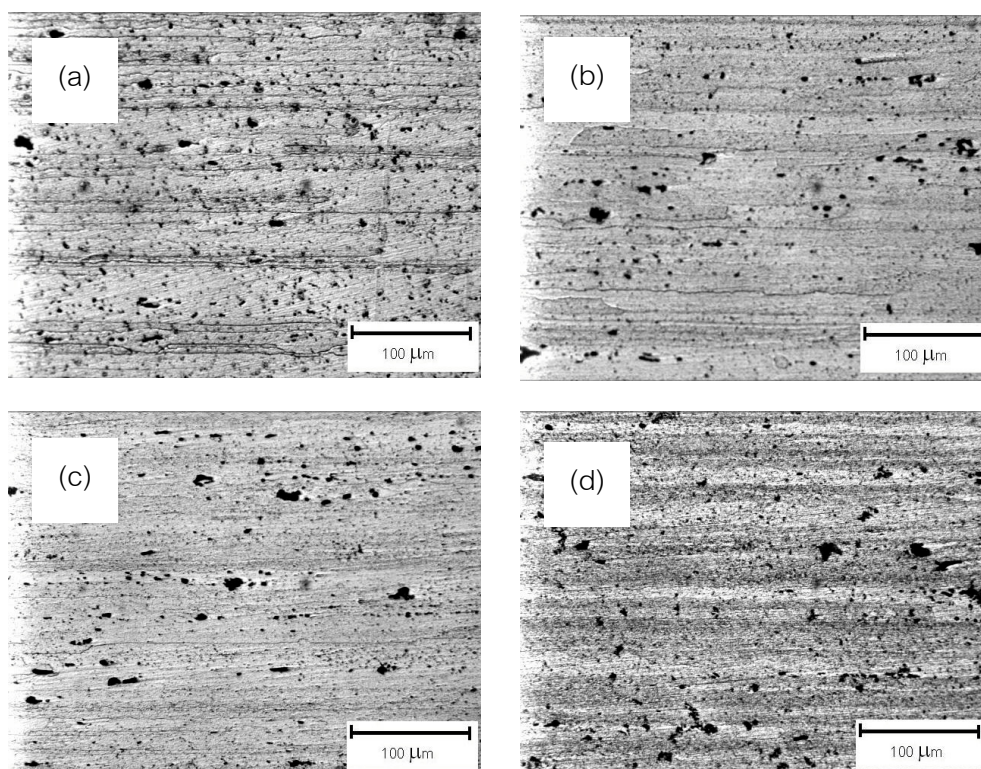


รูปที่ 3.16 โครงสร้างจุลภาคของแผ่นโลหะอะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียมเกรด 7075-T651 ตามสภาพที่รับมา (As-Received Plate) (a) ภาพด้านหน้า (b) ภาพด้านข้าง และ (c) ภาพด้านหลัง กัดด้วยสารละลาย 2.5 mL HNO₃, 1.5 mL HCl, 1.5 mL HF, 95 mL Water

ผลการตรวจโครงสร้างจุลภาคของแผ่นโลหะอะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียมเกรด 7075-T651 ตามสภาพที่รับมา (As-Received Plate) ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ด้าน คือภาพด้านหน้า ด้านข้าง และด้านหลัง ดังแสดงในรูปที่ 3.16 พบว่าลักษณะของเกรนมีลักษณะที่แตกต่างกันทั้ง 3 ด้าน คือโครงสร้างจุลภาคทางด้านหน้าของแผ่นโลหะอะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียมเกรด 7075-T651 เกรนจะมีรูปทรงแบนราบตามแนวความกว้างของแผ่น ส่วนโครงสร้างจุลภาคทางด้านข้าง เกรนจะมีรูปทรงแบนราบตามแนวการรีดของแผ่นและมีความหนาของเกรนน้อยกว่าเกรนทางด้านหน้า และโครงสร้างจุลภาคทางด้านบน

เกรนจะมีรูปร่างเป็นแผ่นแบน ขนาดของเกรนมีขนาดด้านกว้างและด้านยาวมากกว่าทั้งสองด้านที่กล่าวแล้ว

3.5.2 โครงสร้างจุลภาคของโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075-T651 ที่ผ่านการให้ความร้อน (Pre-Heated) ก่อนการทดสอบการคืบ

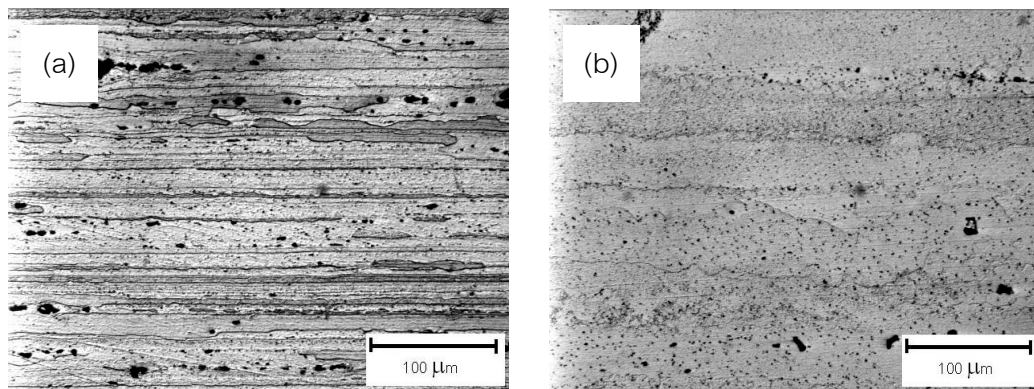


รูปที่ 3.17 โครงสร้างจุลภาคของโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075-T651 ที่ผ่านการให้ความร้อน (Pre-Heated) 30 นาที ที่อุณหภูมิ (a) 100, (b) 150, (c) 200 และ (d) 250°C กัดด้วย สารละลาย 2.5 mL HNO₃, 1.5 mL HCl, 1.5 mL HF, 95 mL Water

ผลการตรวจโครงสร้างจุลภาคของโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075-T651 ที่ผ่านการให้ความร้อน (Pre-Heated) ก่อนการทดสอบการคืบ ที่ช่วงอุณหภูมิระหว่าง 100-250°C โดยให้ความร้อน เป็นเวลา 30 นาที ก่อนการทดสอบการคืบ ดังแสดงในรูปที่ 3.17 พบว่ารูปร่างของเกรนมีลักษณะเป็นแผ่นแบน มีความยาวตามแนวการรีด เมื่อทดสอบที่อุณหภูมิสูงขึ้น ขอบเกรนจะค่อยๆ จางไปชิ้นงานจะมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น

3.5.3 โครงสร้างจุลภาคของโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075-T651 ภายหลังจากทดสอบการคืบที่อุณหภูมิ 150°C

ผลการตรวจโครงสร้างจุลภาคของโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075-T651 ก่อนและหลังการทดสอบการคืบที่อุณหภูมิ 150°C ดังแสดงในรูปที่ 3.18

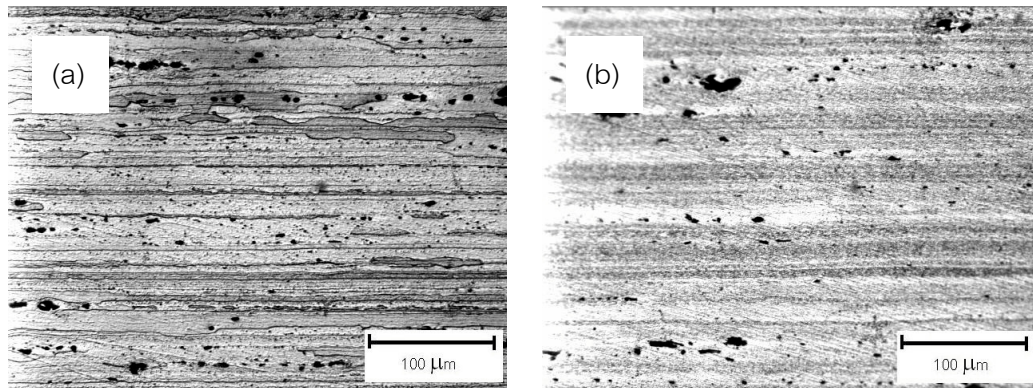


รูปที่ 3.18 เปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคของโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075-T651 (a) แผ่นตัวอย่างก่อนการทดสอบ (As-Received) (b) ตัวอย่างภายหลังจากทดสอบการคืบที่อุณหภูมิ 150°C ความเค้นการคืบ 100 MPa กัดด้วยสารละลาย 2.5 mL HNO₃, 1.5 mL HCl, 1.5 mL HF, 95 mL Water

ผลการตรวจโครงสร้างจุลภาค ดังแสดงในรูปที่ 3.18 พบว่าโครงสร้างจุลภาคของชิ้นทดสอบโดยเฉพาะบริเวณขอบเกรน เมื่อเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคระหว่าง (a) แผ่นตัวอย่างก่อนการทดสอบการคืบ (As-Received) และ (b) ชิ้นทดสอบภายหลังจากทดสอบการคืบอุณหภูมิ 150°C ที่ความเค้นการคืบ 100 MPa ขอบเกรนจะค่อยๆ เลื่อนหายไปเมื่ออุณหภูมิ 150°C ชิ้นงานจะมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น จากเส้นโค้งการคืบดังแสดงในรูปที่ 3.4 แสดงพฤติกรรมการคืบระยะแรก และระยะที่สอง โครงสร้างจุลภาคจะแสดงช่วงที่สองซึ่งเป็นระยะที่สมดุลระหว่างการเกิดสเตรนฮาร์ดเด้นิ่งกับการคลายตัวของโลหะ(เนื่องจากอุณหภูมิ)

3.5.4 โครงสร้างจุลภาคของแผ่นโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075-T651 ภายหลังจากการทดสอบการคืบที่อุณหภูมิ 200°C

ผลการตรวจโครงสร้างจุลภาคของโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075-T651 ก่อนและหลังการทดสอบการคืบที่อุณหภูมิ 200°C ดังแสดงในรูปที่ 3.19

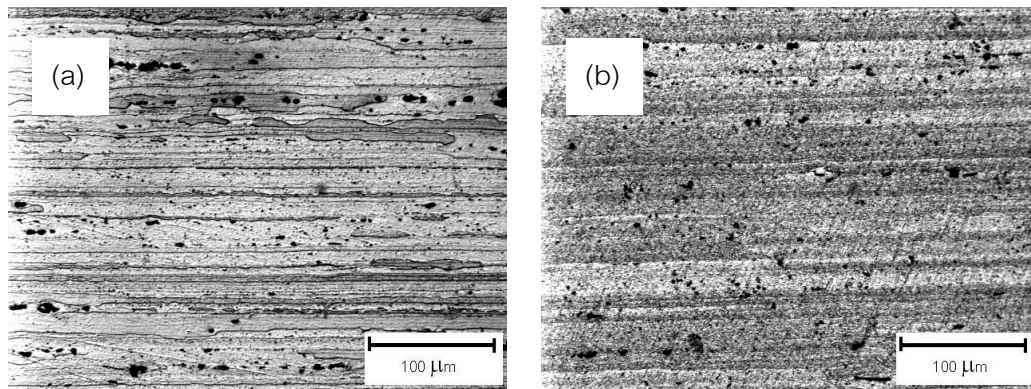


รูปที่ 3.19 เปรียบเทียบ โครงสร้างจุลภาคของโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075-T651 (a) แผ่นตัวอย่างก่อนการทดสอบ (As-Received) (b) ตัวอย่างภายหลังการทดสอบการคืบที่อุณหภูมิ 200°C ความเค้นการคืบ 100 MPa กัดด้วยสารละลาย 2.5 mL HNO_3 , 1.5 mL HCl , 1.5 mL HF , 95 mL Water

ผลการตรวจโครงสร้างจุลภาค ดังแสดงในรูปที่ 3.19 พบว่าโครงสร้างจุลภาคของชิ้นทดสอบโดยเฉพาะบริเวณขอบเกรน เมื่อเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคระหว่าง (a) แผ่นตัวอย่างก่อนการทดสอบการคืบ (As-Received) และ (b) ชิ้นทดสอบภายหลังการทดสอบการคืบอุณหภูมิ 200°C ที่ความเค้นการคืบ 100 MPa ขอบเกรนจะค่อยๆ เลื่อนหายไปเมื่ออุณหภูมิ 200°C ชิ้นงานจะมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น จากเส้นโค้งการคืบดังแสดงในรูปที่ 3.5 แสดงพฤติกรรมการคืบระยะแรก และระยะที่สอง โครงสร้างจุลภาคจะแสดงช่วงที่สองซึ่งเป็นระยะที่สมดุลระหว่างการเกิดสเตรนฮาร์ดเด้นิ่งกับการคลายตัวของโลหะ (เนื่องจากอุณหภูมิ)

3.5.5 โครงสร้างจุลภาคของโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075-T651 ภายหลังการทดสอบการคืบที่อุณหภูมิ 250°C

ผลการตรวจโครงสร้างจุลภาคของโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075-T651 ก่อนและหลังการทดสอบการคืบที่อุณหภูมิ 250°C ดังแสดงในรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 เปรียบเทียบ โครงสร้างจุลภาคของโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075-T651 (a) แผ่นตัวอย่างก่อนการทดสอบ (As-Received) (b) ตัวอย่างภายหลังการทดสอบการคืบที่อุณหภูมิ 250°C ความเค้นการคืบ 100 MPa กัดด้วยสารละลาย 2.5 mL HNO_3 , 1.5 mL HCl , 1.5 mL HF , 95 mL Water

ผลการตรวจโครงสร้างจุลภาค ดังแสดงในรูปที่ 3.20 พบว่าโครงสร้างจุลภาคของชิ้นทดสอบโดยเฉพาะบริเวณขอบเกรน เมื่อเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคระหว่าง (a) แผ่นตัวอย่างก่อนการทดสอบการคืบ (As-Received) และ (b) ชิ้นทดสอบภายหลังการทดสอบการคืบอุณหภูมิ 250°C ที่ความเค้นการคืบ 100 MPa ขอบเกรนจะค่อยๆ เลื่อนหายไปเมื่ออุณหภูมิ 250°C ชิ้นงานจะมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้นจากเส้นโค้งการคืบดังแสดงในรูปที่ 3.6 แสดงพฤติกรรมการคืบทั้งสามระยะ โครงสร้างจุลภาคจะแสดงช่วงที่สามซึ่งเป็นระยะที่สเตรนฮาร์ดคีนนิ่งอิ่มตัวแล้วและไม่เพิ่มอีกดังนั้นการคลายตัวของโลหะ(เนื่องจากอุณหภูมิ) มีอัตราการคืบสูงขึ้นโดยเร็ว

3.6 การอภิปรายผล

การอภิปรายผลการทดสอบการคืบของโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075-T651 ซึ่งประกอบด้วย ค่ายกกำลังของความเค้น (Stress Exponent, n) พลังงานกระตุ้นสำหรับการคืบ (Activation Energy for Creep, Q_c) และการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค มีรายละเอียดดังนี้

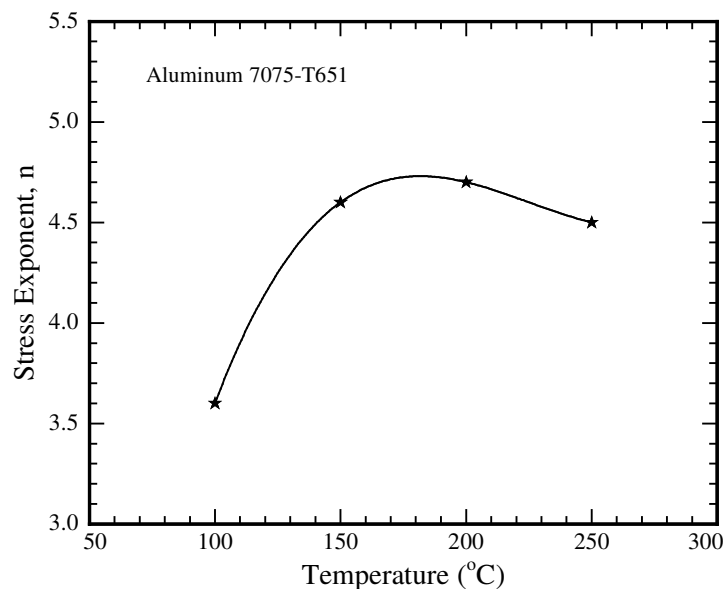
3.6.1 ค่ายกกำลังของความเค้น (Stress Exponent, n)

ผลการทดสอบการคืบของโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075-T651 ค่ายกกำลังของความเค้นทดสอบในช่วงอุณหภูมิระหว่าง $100\text{-}250^{\circ}\text{C}$ ดังแสดงในตารางที่ 3.12 และ รูปที่ 3.23

ตารางที่ 3.12 ค่ายกกำลังของความเค้น ทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 100, 150, 200 และ 250°C

อุณหภูมิ (°C)	(Stress Exponent, n)
100	$n = 29.3, n = 3.6$
150	$n = 19.8, n = 4.6$
200	$n = 4.7$
250	$n = 4.5$

ผลการทดลองการคืบของโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075-T651 ทำการพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอุณหภูมิ (°C) และค่ายกกำลังของความเค้น (Stress Exponent, n) ดังแสดงในรูปที่ 3.23 พิจารณาเฉพาะช่วง Minimum Creep Rate ค่ายกกำลังของความเค้นที่อุณหภูมิ 100°C ที่ช่วงความเค้นระหว่าง 100-400 MPa ที่อุณหภูมิ 150°C ที่ช่วงความเค้นระหว่าง 80-300 MPa ที่อุณหภูมิ 200°C ที่ช่วงความเค้นระหว่าง 80-200 MPa และที่อุณหภูมิ 250°C ที่ช่วงความเค้นระหว่าง 40-120 MPa



รูปที่ 3.21 ค่ายกกำลังของความเค้น ของโลหะอะลูมิเนียมผสม 7075-T651 ในช่วงอุณหภูมิ 100-250°C

พบว่าสามารถแบ่งค่ายกกำลังของความเค้น เป็นช่วงอุณหภูมิต่ำและอุณหภูมิสูง ซึ่งที่อุณหภูมิต่ำ 100°C ค่า n เท่ากับ 3.6 และช่วงอุณหภูมิสูง 150, 200 และ 250°C ค่า n เท่ากับ 4.6, 4.7 และ 4.5 ตามลำดับ ค่า n เหลือเท่ากับ 4.6 ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับผลการทดลองของ Kloc และคณะ [Kloc, *et a*, 1997] ซึ่งทำการทดลองที่อุณหภูมิ 250-330 $^{\circ}\text{C}$ ค่าความเค้น 25-50 MPa n มีค่าประมาณ 5 พฤติกรรมการคืบของโลหะอะลูมิเนียมผสมชนิดนี้สอดคล้องกับพฤติกรรมการคืบของโลหะผสมชนิด M ซึ่งกลไกของการคืบเกิดจากการไถลของดิสโลเคชันและถูกควบคุมโดยกระบวนการการป็นของดิสโลเคชัน (Dislocation Glide and Climb Control) [Spigarelli, 1999]

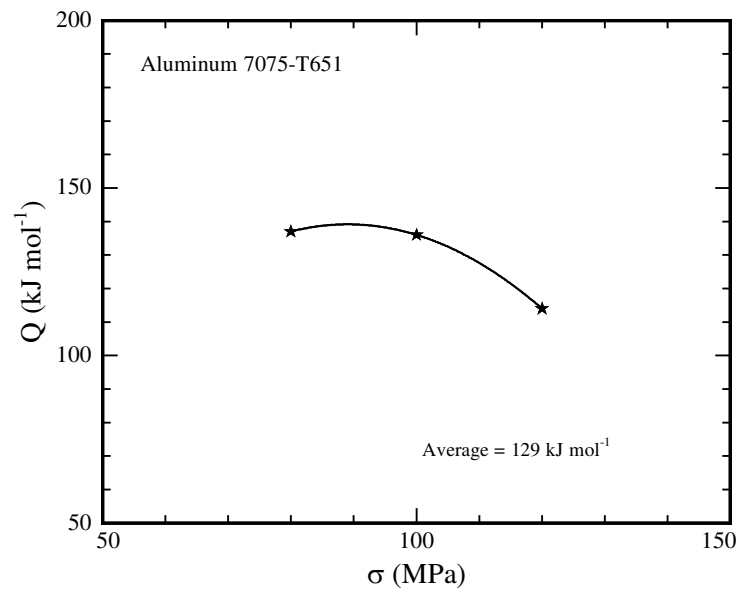
3.6.2 พลังงานกระตุ้นสำหรับการคืบ (Activation Energy for Creep, Q_c)

ผลการทดสอบการคืบของโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075-T651 พลังงานกระตุ้นสำหรับการคืบ (Activation Energy for Creep, Q_c) ทำการทดสอบในช่วงความเค้นคงที่ระหว่าง 80-120 MPa ดังแสดงในตารางที่ 3.13 และ รูปที่ 3.24

ตารางที่ 3.13 พลังงานกระตุ้นสำหรับการคืบ ทำการทดสอบที่ความเค้นคงที่ 80, 100 และ 120 MPa

ความเค้นการคืบ, σ (MPa)	(Activation Energy for Creep, Q_c) kJ mol^{-1}
80	137
100	136
120	114

ผลการทดลองการคืบของโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075-T651 ทำการพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นการคืบ, σ และพลังงานกระตุ้นสำหรับการคืบ, Q_c ดังแสดงในรูปที่ 3.24 ที่ความเค้น 80, 100 และ 120 MPa ค่า Q_c เท่ากับ 137, 136 และ 114 kJ mol^{-1} ตามลำดับ ค่าเฉลี่ยของ $Q_c = 129 \text{ kJ mol}^{-1}$ พบว่าพลังงานกระตุ้นสำหรับการคืบลดลงเมื่อค่าความเค้นการคืบเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Kloc, *et al.*, (1997) และของ Li, Nutt and Mohamed (1997)



รูปที่ 3.22 ค่าพลังงานกระตุ้นสำหรับการคืบ ของ โลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075-T651 ในช่วงความเค้นการคืบ 80-120 MPa

3.6.3 ตารางเปรียบเทียบค่า Q_c และค่า n

ผลทดสอบการคืบของโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075-T651 ค่าพลังงานกระตุ้นสำหรับการคืบ (Activation Energy for Creep, Q_c) และค่ายกกำลังของความเค้น (Stress Exponent, n) เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังแสดงในตารางที่ 3.14

ตารางที่ 3.14 เปรียบเทียบค่า Q_c และค่า n

Name	Stress (MPa)	n	Q_c (kJ mol ⁻¹)
Soliman and Mohamed (1983)	Very Low Stresses	1	-
	Low Stresses	4.5	
	Intermediate Stresses	3	
	High Stresses	5	
	0.02-4		
Kloc, <i>et al.</i> (1997)	25-50	5	$Q_c \approx Q_o$
Li, Nutt and Mohamed (1997)	5-40	5	142

ตารางที่ 3.14 (ต่อ)

Name	Stress (MPa)	n	Q_c (kJ mol ⁻¹)
Wang, Wu and Xia (1997)	-	12.5	152
Eddahbi, Carreno and Ruano (1998)	-	5	157
Spigarelli, <i>et al.</i> (2002)	-	4.4	$Q_c \approx Q_o$
Jones, <i>et al.</i> (2004)	Low Stresses High Stresses 1.8-6.3	1 5	147
Spigarelli, Evangelista and Cucchieri (2004)	Low Stresses High Stresses	4-5 >5	210
Xu and Langdon (2005)	-	7	-
This Study	40-400	4.6	$129 \approx Q_o$

3.6.4 โครงสร้างจุลภาค (Microstructures)

ผลจากการเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคโดยเปรียบเทียบทางด้านข้างขึ้น ตัวอย่าง ก่อนการทดสอบ (As-Received) ตัวอย่างผ่านการอบแช่ที่อุณหภูมิ 100, 150, 200 และ 250°C เป็นเวลา 30 นาที และ ตัวอย่างภายหลังการทดสอบการคืบที่อุณหภูมิ 150, 200 และ 250°C ที่ความเค้นการคืบคงที่ที่ 100 MPa พบว่าตัวอย่างก่อนการทดสอบ มีลักษณะเป็นแนวยาวตามแนวการรีดมีการกระจายอนุภาคเต็มบริเวณผิวของเกรน เมื่อให้อุณหภูมิสูงขึ้นและภายหลังการทดสอบการคืบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทดสอบขอบเกรนจะเลือนหายไป ผิวโครงสร้างจะมีลักษณะเรียบมากขึ้น