

อิทธิพลของอุณหภูมิกับการแปรเปลี่ยนค่าคุณสมบัติทางกลของวัสดุ Effect of Temperature on Mechanical Properties of Materials

ปกรณ์ แดงละม้าย¹ วิรัตน์ จอมขัว²

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ถนนพหลโยธิน เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800

โทร 02-9515417 โทรสาร 02-9675507 Email: mme48015@kmitnb.ac.th¹, vrc@kmitnb.ac.th²

Pakorn Danglamai* Virat Chomkwha*

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok,

Bangkok, 10800, Thailand

Tel. 02-9515417 Fax. 02-9675507 Email: mme48015@kmitnb.ac.th¹, vrc@kmitnb.ac.th²

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองเพื่อหาค่าคุณสมบัติทางกลของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงค่าไปตามอุณหภูมิอันได้แก่ ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น, ค่าความแข็งแรงที่จุดครากตัว, ค่าความแข็งแรงสูงสุด และ ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ของวัสดุ 4 ชนิดที่หาได้ภายในประเทศได้แก่ อลูมิเนียมเกรด 1100, อลูมิเนียมอัลลอยด์เกรด 6063, เหล็กเกรดเอสที 37 และ เหล็กเกรดเอสที 60 โดยอ้างอิงวิธีการทดลองตามมาตรฐาน ASTM ซึ่งการทดลองจะกระทำที่อุณหภูมิ 3 จุดคือ 25 °C, 100 °C และ 200 °C จากผลการทดลองพบว่าอูมิเนียมเกรด 1100, อลูมิเนียมอัลลอยด์เกรด 6063, เหล็กเกรดเอสที 37 และ เหล็กเกรดเอสที 60 จะมีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น (GPa.) ดังนี้ (70.88, 65.54, 54.68), (72.55, 70.20, 61.75), (227.64, 209.82, 192.50), (224.22, 215.34, 200.78) ค่าความแข็งแรงที่จุดครากตัว (MPa.) ดังนี้ (105.28, 99.51, 73.88), (167.13, 166.03, 140.55), (299.93, 278.35, 249.90), (760.76, 735.06, 687.55) และค่าความแข็งแรงสูงสุด (MPa.) ดังนี้ (114.54, 103.73, 77.66), (201.47, 190.67, 146.71), (381.62, 360.19, 330.45), (1106.46, 1083.04, 1035.26) ที่อุณหภูมิ (25 °C, 100 °C, 200 °C) สำหรับผลการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวอันเนื่องมาจากอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงของอูมิเนียมเกรด 1100 ได้เท่ากับ 2.320×10^{-5} mm/mm.°C, อลูมิเนียมอัลลอยด์เกรด 6063 ได้เท่ากับ 2.287×10^{-5} mm/mm.°C, เหล็กเกรด ST-37 ได้เท่ากับ 1.329×10^{-5} mm/mm.°C และ เหล็กเกรด ST-60 ได้เท่ากับ 1.323×10^{-5} mm/mm.°C ท้ายสุดของการทำงานวิจัยนี้ได้นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาทำการคำนวณตัวอย่างเชิงไฟไนต์อีลิเมนต์ เพื่อคำนวณหาค่าความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้นบนแผ่นเพลทอูมิเนียม 1100 จากสภาวะอุณหภูมิเริ่มต้น 200 °C ซึ่งผลปรากฏว่าค่าความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 1.8732 MPa.

Abstract

This research is aim to do experiments to explore the dependent-temperature mechanical properties of materials i.e. modulus of elasticity, yield strength, tensile strength and the thermal expansion coefficients of aluminum grade 1100, aluminum alloy grade 6063, steel ST-37 and steel ST-60 due to the ASTM standard. The works are done on the temperature at 25 °C, 100 °C and 200 °C. The results show that aluminum grade 1100, aluminum alloy grade 6063, steel ST-37 and steel ST-60 have modulus of elasticity (GPa) at (70.88, 65.54, 54.68), (72.55, 70.20, 61.75), (227.64, 209.82, 192.50), (224.22, 215.34, 200.78) : Yield strength (MPa) at (105.28, 99.51, 73.88), (167.13, 166.03, 140.55), (299.93, 278.35, 249.90), (760.76, 735.06, 687.55) : Tensile strength (MPa) at (114.54, 103.73, 77.66), (201.47, 190.67, 146.71), (381.62, 360.19, 330.45), (1106.46, 1083.04, 1035.26) at temperature (25 °C, 100 °C, 200 °C) respectively. The thermal expansion coefficient is relatively constant for four types of materials i.e. aluminum grade 1100 , aluminum alloy grade 6063 ,steel ST-37 and steel ST-60 are at 2.320×10^{-5} , 2.287×10^{-5} , 1.329×10^{-5} and 1.323×10^{-5} (mm/mm.°C) respectively. At the end of this paper shows that if the output from this experiment is to be used with ABAQUS finite element program to calculate the residual stress on aluminum grade 1100 form cooling state of Initial temperature 200 °C the residual stress is at 1.8732 MPa.

1. คำนำ

ปัญหาทางกลที่เกี่ยวข้องอุณหภูมินั้นมีจำนวนไม่น้อย ซึ่งค่าคุณสมบัติต่าง ๆ เป็นสิ่งที่วิศวกรต้องการเป็นข้อมูลพื้นฐานในการคำนวณ

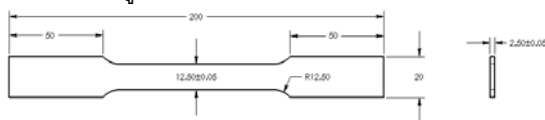
เพื่อแก้ปัญหา สำหรับปัญหาที่เกี่ยวข้องและต้องการข้อมูลพื้นฐานต่าง ๆ เหล่านี้ได้แก่ การวิเคราะห์ความเค้นอันเกิดขึ้นเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิไม่ว่าจะเป็น การวิเคราะห์หาค่าความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้นจากการเย็นตัวอย่างรวดเร็วของวัสดุ หรือการวิเคราะห์หาค่าความเค้นตกค้างในการเชื่อมโลหะ

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าจะสังเกตได้ว่าผู้วิจัยส่วนมากได้นำค่าคุณสมบัติทางกลของวัสดุมาจากการวิจัยของประเทศที่มีอยู่ก่อนหน้า และมีการสมมติว่าค่าคุณสมบัติของวัสดุนั้นคงที่ โดยอ้างอิงค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุ ณ. อุณหภูมิห้อง ซึ่งผู้วิจัยได้ตั้งข้อสมมติฐานว่าค่าคุณสมบัติของวัสดุภายในประเทศมีความแตกต่างกัน กับค่าคุณสมบัติของวัสดุที่ผลิตขึ้นจากต่างประเทศ เนื่องด้วยมาตรฐานและกรรมวิธีการผลิตที่แตกต่างกัน บทความของงานวิจัยในครั้งนี้เป็นเพียงส่วนหนึ่งของงานวิจัยเรื่อง การวิเคราะห์หาค่าความเค้นตกค้างอันเนื่องมาจากการเย็นตัวอย่างรวดเร็วของวัสดุ : วัสดุมีคุณสมบัติแบบหลายค่าเชิงเส้น ด้วยเหตุนี้เองจึงได้มีการทดสอบหาค่าคุณสมบัติของวัสดุที่แปรเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิขึ้น เพื่อนำไปใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการคำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ สำหรับวิเคราะห์หาค่าความเค้นตกค้างต่อไป สำหรับค่าคุณสมบัติที่ทำการทดลองในงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วย ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น, ค่าความแข็งแรงที่จุดครากตัว, ค่าความแข็งแรงสูงสุด และค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวอันเนื่องมาจากอุณหภูมิเปลี่ยนแปลง โดยอ้างอิงมาตรฐานการทดสอบวัสดุ ASTM ซึ่งรายละเอียดจะกล่าวในส่วนต่อไป

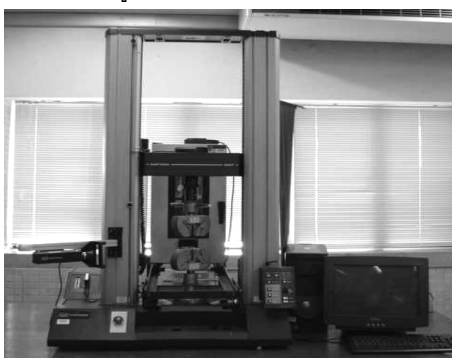
2. มาตรฐานการทดสอบค่าคุณสมบัติทางกล

มาตรฐานการทดสอบค่าคุณสมบัติทางกลของวัสดุจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ ๆ คือ

2.1 มาตรฐานการทดสอบวัสดุทางด้านความแข็งแรงซึ่งจะกล่าวถึงการทดสอบเพื่อหาค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น, ค่าความแข็งแรงที่จุดครากตัวและค่าความแข็งแรงสูงสุด ซึ่งมาตรฐาน ASTM ที่เกี่ยวข้องในส่วนนี้ได้แก่ ASTM E8M-01 [1], ASTM E83-00 [2], ASTM E4 [3], ASTM A370 [4] และ ASTM E21-92 [5] โดยขั้นตอนทดสอบที่นำมาทำการทดสอบมีขนาดดังรูปที่ 1 ซึ่งอ้างอิงมาจาก ASTM E8M-01 [1]



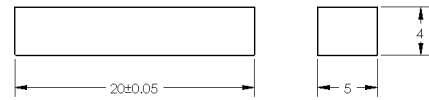
รูปที่ 1. ขั้นตอนทดสอบแรงดึง



รูปที่ 2. เครื่องทดสอบแรงดึงอินสตรอน 5567

ในรูปที่ 2 ได้แสดงเครื่องทดสอบแรงดึงอินสตรอน 5567 ซึ่งถูกใช้เป็นเครื่องทดสอบเครื่องหนึ่งในการทำงานวิจัยในครั้งนี้

2.2 มาตรฐานการทดสอบวัสดุทางด้านการเคลื่อนตัวเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง ซึ่งจะกล่าวถึงการทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นอันเนื่องมาจากอุณหภูมิเปลี่ยนแปลง ซึ่งมาตรฐาน ASTM ที่เกี่ยวข้องในส่วนนี้ได้แก่ ASTM B95-39 [6] โดยขั้นตอนทดสอบที่นำมาทำการทดสอบมีขนาดดังรูปที่ 3



รูปที่ 3. ขั้นตอนทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวอันเนื่องมาจากอุณหภูมิเปลี่ยนแปลง

ในรูปที่ 4 เป็นเครื่องทดสอบไดลาโตมิเตอร์ (Dilatometer) ที่ใช้ในการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นอันเนื่องมาจากอุณหภูมิเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 4. เครื่องทดสอบไดลาโตมิเตอร์ (Dilatometer)

3. วิธีการคำนวณหาค่าคุณสมบัติจากข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

ข้อมูลที่ได้จากเครื่องทดสอบแรงดึงจะออกมาในรูปแบบของค่าความเค้นวิศวกรรมเทียบกับเปอร์เซ็นต์ความเครียดวิศวกรรม และเช่นเดียวกับข้อมูลที่ได้จากเครื่องทดสอบไดลาโตมิเตอร์ ข้อมูลที่ได้นั้นจะออกมาในรูปแบบของการเคลื่อนตัวเทียบกับอุณหภูมิ ซึ่งหากต้องการได้ค่าคุณสมบัติตามที่ต้องการ ข้อมูลต่าง ๆ ที่ได้จากเครื่องทดสอบจะต้องถูกนำมาทำการคำนวณใหม่ตามทฤษฎีดังนี้

3.1 การคำนวณหาค่าความเค้นจริง (True Stress) และความเครียดจริง (True Strain)

การคำนวณหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจริงของวัสดุเป็นไปตามสมการที่ (1), (2) และ (3) ตามทฤษฎีที่ว่าด้วยเรื่องของพฤติกรรมของวัสดุของ Norman E. Dowling [7]

$$\text{เมื่อ } \sigma \leq 2\sigma_Y^0$$

$$\tilde{\sigma} = \sigma \quad (1)$$

เมื่อ $2\sigma_Y^0 < \sigma \leq$ ปรากฏการณ์คอคอด (Necking Starts) เกิดขึ้น

$$\tilde{\sigma} = \sigma(1 + \epsilon) \quad (2)$$

เมื่อ $0 < \varepsilon \leq$ ปรากฏการณ์คอคอต (Necking Starts) เกิดขึ้น

$$\tilde{\varepsilon} = \ln(1 + \varepsilon) \quad (3)$$

เมื่อ σ = ความเค้นวิศวกรรม (Engineering Stress)

ε = ความเครียดวิศวกรรม (Engineering Strain)

$\bar{\sigma}$ = ความเค้นจริง (True Stress)

$\bar{\varepsilon}$ = ความเครียดจริง (True Strain)

สำหรับการคำนวณหาค่าความสัมพันธ์ในช่วงพลาสติกจะพิจารณาภายหลังจากวัสดุนั้นเกิดการครากตัวไปแล้ว (Yielding) โดยจะกล่าวไว้ในหัวข้อต่อไป

3.2 การคำนวณหาค่าความแข็งแรงที่จุดครากตัว (Yielding Strength)

การคำนวณหาค่าความแข็งแรงที่จุดครากตัวจะใช้วิธีออฟเซต (Offset Method) ดังที่ได้กล่าวไว้ในมาตรฐาน ASTM E8M-01 [1] โดยจะกำหนดค่าเปอร์เซ็นต์ของออฟเซตไว้เท่ากับ 0.2 % ความเครียดหรือสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการได้ดังสมการที่ (4)

$$\sigma_Y^0 = \sigma(\text{Offset } 0.2\% \text{ Strain}) \quad (4)$$

เมื่อ σ_Y^0 = ค่าความแข็งแรงที่จุดครากตัว

3.3 การคำนวณค่าความเค้นจริง (True Stress) และความเครียดจริง (True Strain) ในช่วงพลาสติก

การคำนวณหาค่าความเค้นและความเครียดจริงในช่วงพลาสติกจะพิจารณาภายหลังจากวัสดุนั้นเกิดการครากตัวไปแล้ว จากทฤษฎีที่กล่าวถึงเรื่องของพฤติกรรมของวัสดุ ทำให้ทราบว่าค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในช่วงพลาสติกนั้นจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนด้วยกันคือ ค่าความเครียดในช่วงพลาสติกและค่าความเครียดในช่วงอีลาสติกดังแสดงในสมการที่ (5) ถึงสมการที่ (7) ตามทฤษฎีที่ว่าด้วยเรื่องของพฤติกรรมของวัสดุของ Norman E. Dowling [7]

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_p \quad (5)$$

$$\tilde{\varepsilon} = \tilde{\varepsilon}_e + \tilde{\varepsilon}_p \quad (6)$$

เมื่อตัวห้อยท้าย e หมายถึง ความสัมพันธ์ในช่วงอีลาสติกและตัวห้อยท้าย p หมายถึง ความสัมพันธ์ในช่วงพลาสติก

เมื่อเป็นเช่นนี้เพื่อความสะดวกในการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ความแข็งแรง (Hardening Parameter) ซึ่งจะต้องถูกนำไปใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการคำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดในช่วงพลาสติก ดังนั้นจึงสามารถคำนวณหาค่าความเครียดในช่วงพลาสติกได้ดังแสดงในสมการที่ (7)

$$\tilde{\varepsilon}_p = \tilde{\varepsilon} - \tilde{\varepsilon}_e \quad (7)$$

3.4 การคำนวณหาโมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity)

ในการคำนวณหาโมดูลัสความยืดหยุ่นจะพิจารณาค่าความชันของกราฟในช่วงอีลาสติกเพียงอย่างเดียวซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (8) ตามทฤษฎีที่ว่าด้วยเรื่องของพฤติกรรมของวัสดุของ Norman E. Dowling [7]

$$E = \frac{\sigma_e}{\varepsilon_e} \quad (8)$$

3.5 การคำนวณค่าความแข็งแรงสูงสุด (Tensile Strength)

การคำนวณหาค่าความแข็งแรงสูงสุดนั้นจะพิจารณาจากค่าความเค้นจริงสูงสุดที่เกิดขึ้นจากการทดลอง ซึ่งสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ตามทฤษฎีที่ว่าด้วยเรื่องของพฤติกรรมของวัสดุของ Norman E. Dowling [7]

$$\sigma_u = \sigma_{\max} \quad (9)$$

เมื่อ σ_u = ค่าความแข็งแรงสูงสุด (Tensile Strength)

$\sigma_{\max}$ = ค่าความเค้นสูงสุดที่ได้จากการทดลอง

3.5 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวอันเนื่องมาจากอุณหภูมิเปลี่ยนแปลง

การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวอันเนื่องมาจากอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงนั้นสามารถคำนวณได้จาก วิธีการใช้สมการเส้นตรงในการอธิบายค่าความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวและอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปหลังจากที่ได้สมการเส้นตรงแล้ว ค่าความชันของสมการก็คือค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวอันเนื่องมาจากอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงนั่นเอง ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังสมการที่ (10)

$$\alpha = \frac{\Delta \delta}{\Delta T} \quad (10)$$

เมื่อ α = ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวอันเนื่องมาจากอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงมีหน่วยเป็น (mm./mm. °C)

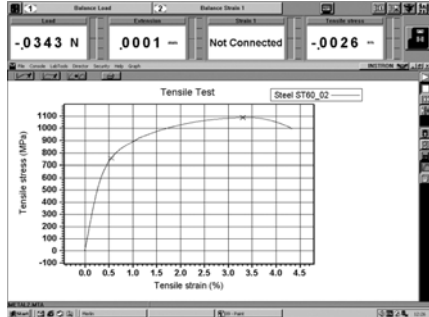
$\Delta \delta$ = ช่วงระยะการเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้น

ΔT = ช่วงของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง

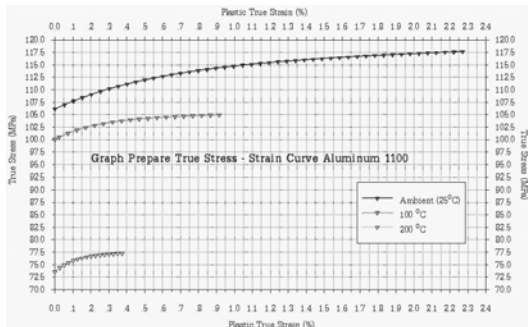
4. ผลการทดลอง

ในรูปที่ 5. แสดงตัวอย่างผลการทดสอบแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง Instron 5567 และโปรแกรม Merlin สำหรับรูปที่ 6. ถึง 12. คือ

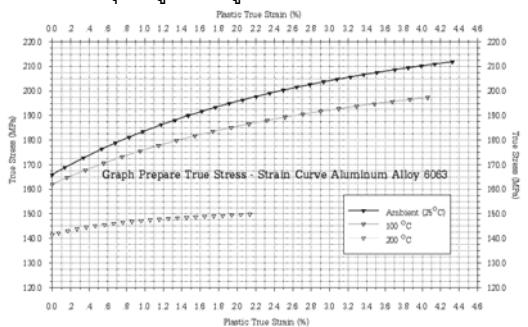
ผลการคำนวณหาค่าคุณสมบัติทางกลของวัสดุทั้ง 4 ชนิดจากข้อมูลดิบที่ได้จากเครื่องทดสอบแรงดึง Instron 5567 ซึ่งค่าคุณสมบัติที่ได้จากการคำนวณข้อมูลดิบนั้นประกอบไปด้วย ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นความเครียดในสภาวะพลาสติก, ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น, ค่าความแข็งแรงที่จุดครากตัวและค่าความแข็งแรงสูงสุด ที่แปรเปลี่ยนไปตามแต่ละอุณหภูมิ



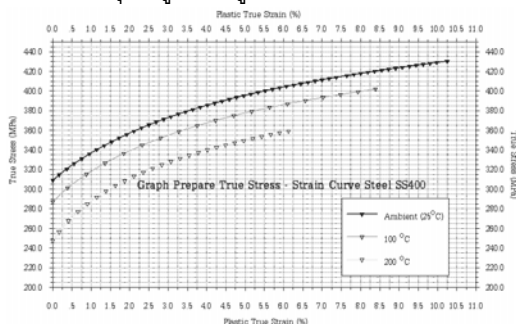
รูปที่ 5. ตัวอย่างผลการทดสอบแรงดึงจากเครื่อง Instron 5567 และโปรแกรม Merlin



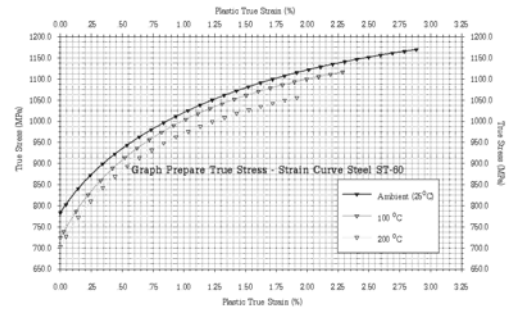
รูปที่ 6. ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้น ความเครียดช่วงพลาสติกเทียบกับอุณหภูมิของอลูมิเนียม 1100



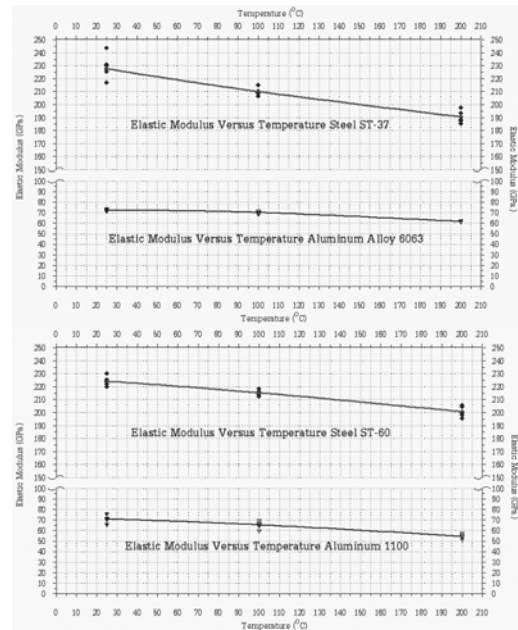
รูปที่ 7. ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้น ความเครียดช่วงพลาสติกเทียบกับอุณหภูมิของอลูมิเนียมอัลลอยด์ 6063



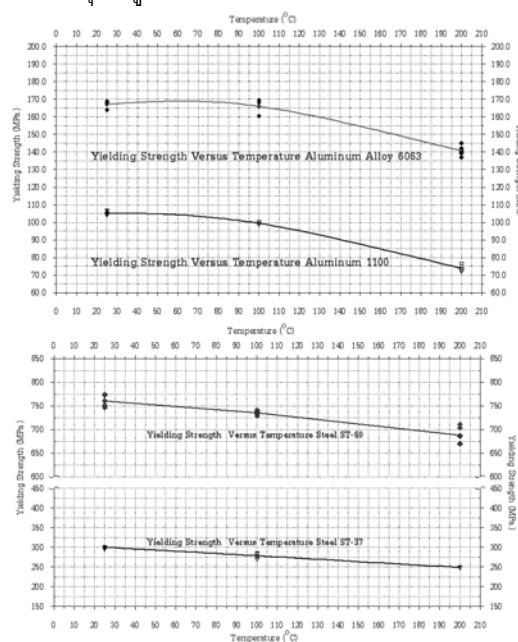
รูปที่ 8. ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้น ความเครียดช่วงพลาสติกเทียบกับอุณหภูมิของเหล็กเกรดเอสที 37



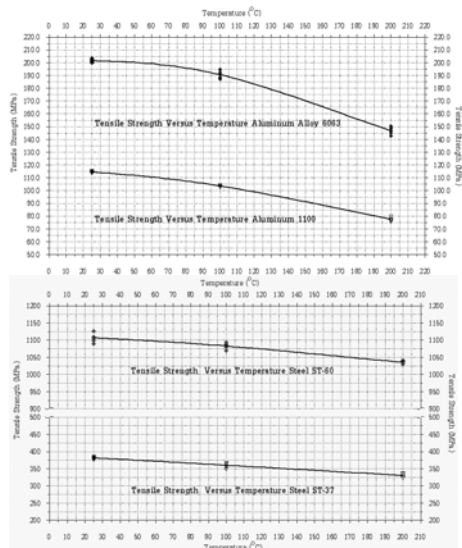
รูปที่ 9. ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้น ความเครียดช่วงพลาสติกเทียบกับอุณหภูมิของเหล็กเกรดเอสที 60



รูปที่ 10. ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นเทียบกับอุณหภูมิ

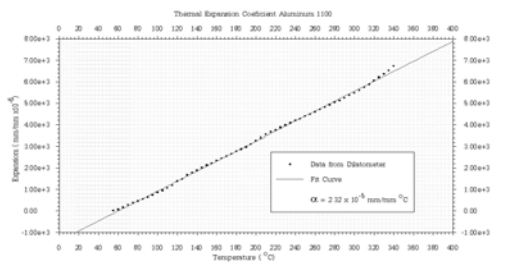


รูปที่ 11. ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงที่จุดครากตัวเทียบกับอุณหภูมิ

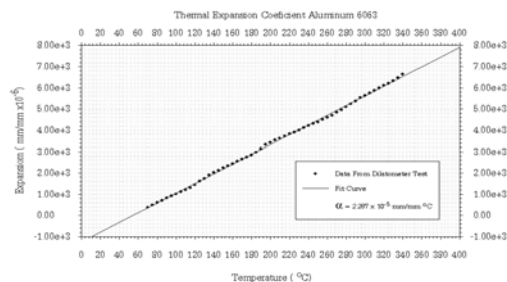


รูปที่ 12. ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงสูงสุดเทียบกับอุณหภูมิ

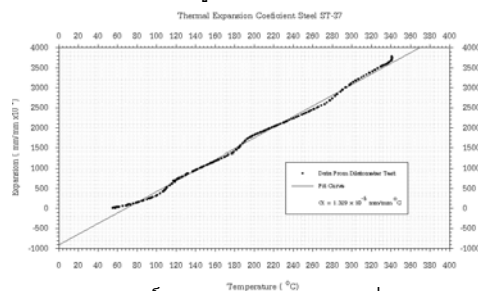
จากผลการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบไดลาโตมิเตอร์ (Dilatometer) สามารถคำนวณหาค่าคุณสมบัติทางกลคือ ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นอันเนื่องมาจากอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงของวัสดุทั้ง 4 ชนิดได้ดังนี้



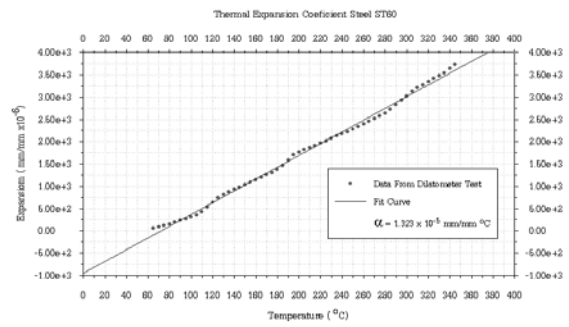
รูปที่ 13. ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นอันเนื่องมาจากอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงของอลูมิเนียม 1100



รูปที่ 14. ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นอันเนื่องมาจากอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงของอลูมิเนียมอัลลอยด์ 6063



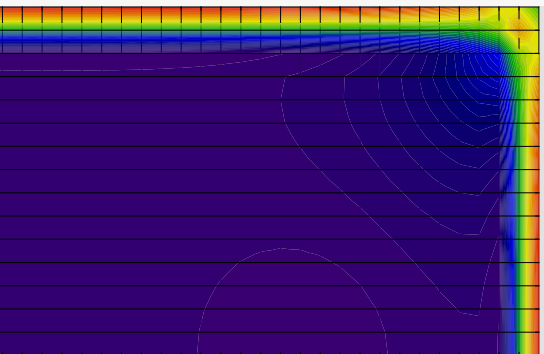
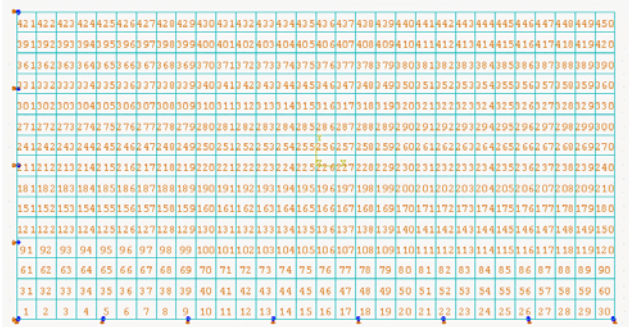
รูปที่ 15. ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นอันเนื่องมาจากอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงของเหล็กเกรดเอสที 37



รูปที่ 16. ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นอันเนื่องมาจากอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงของเหล็กเกรดเอสที 60

5. ตัวอย่างการคำนวณเชิงไฟไนต์เอลิเมนต์

จากข้อมูลที่ได้จากการทดลองถูกนำมาใช้ในตัวอย่างการคำนวณเชิงไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยสมมติปัญหาตัวอย่างเป็นระนาบความเค้นของแผ่นอลูมิเนียม 1100 ซึ่งกระทำด้วยกระบวนการทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วในน้ำอุณหภูมิ 25°C เป็นเวลา 6 นาที จากสภาวะอุณหภูมิเริ่มต้น 200°C นอกจากคุณสมบัติที่ได้ทำการทดลองมาแล้ว ข้อมูลอื่น ๆ ที่จำเป็นในการคำนวณหาค่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่นำมาใช้ได้แก่ ค่าความหนาแน่น 2,710 kg/m³, ค่าความจุความร้อนจำเพาะ 220 W/m-K และค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน 904 J/kg-K ผลปรากฏค่าความเค้นตกค้างสูงสุดที่บริเวณขอบของแผ่นเพลอลูมิเนียม 1100 ในเอลิเมนต์ที่ 426 จุดข้อที่ 3 โดยมีขนาดเท่ากับ 1.8732 MPa. ดังแสดงในรูปที่ 17.



รูปที่ 17. ระดับสีแสดงค่าความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้น

6.สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองสามารถสรุปผลค่าคุณสมบัติที่ได้จากการทดลองของวัสดุทั้ง 4 ชนิดได้ดังตารางที่ 1 ถึง 4

ตารางที่ 1 โมดูลัสความยืดหยุ่น (GPa.) เทียบกับอุณหภูมิ

ชนิดวัสดุ	25°C	100°C	200°C
อลูมิเนียม 1100	70.88	65.54	54.68
อลูมิเนียม อัลลอยด์ 6063	72.55	70.20	61.75
เหล็กเกรด เอสที 37	227.64	209.82	192.50
เหล็กเกรด เอสที 60	224.22	215.34	200.78

ตารางที่ 2 ความแข็งแรงที่จุดครากตัว (MPa.) เทียบกับอุณหภูมิ

ชนิดวัสดุ	25°C	100°C	200°C
อลูมิเนียม 1100	105.28	99.51	73.88
อลูมิเนียม อัลลอยด์ 6063	167.13	166.03	140.55
เหล็กเกรดเอสที 37	299.93	278.35	248.90
เหล็กเกรดเอสที 60	760.76	735.06	687.55

ตารางที่ 3 ค่าความแข็งแรงสูงสุด (MPa.) เทียบกับอุณหภูมิ

ชนิดวัสดุ	25°C	100°C	200°C
อลูมิเนียม 1100	114.54	103.73	77.66
อลูมิเนียม อัลลอยด์ 6063	201.47	190.67	146.71
เหล็กเกรดเอสที 37	381.62	360.19	330.45
เหล็กเกรดเอสที 60	1106.46	1083.04	1035.26

ตารางที่ 4 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัว (mm/mm.°C)

ชนิดวัสดุ	ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัว
อลูมิเนียม 1100	2.320×10^{-5}
อลูมิเนียม อัลลอยด์ 6063	2.287×10^{-5}
เหล็กเกรดเอสที 37	1.329×10^{-5}
เหล็กเกรดเอสที 60	1.323×10^{-5}

สำหรับค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นจริงและความเครียดจริง ในช่วงพลาสติก สามารถอธิบายโดยสมการเอกซ์โพเนนเชียล 5 พารามิเตอร์ดังแสดงในสมการที่ (11)

$$\bar{\sigma} = \bar{\sigma}_Y^0 + a(1 - e^{-b\bar{\epsilon}}) + c(1 - e^{-d\bar{\epsilon}}) \quad (11)$$

เมื่อ a , b , c , d คือค่าคงที่ไม่มีหน่วย และ e คือค่าคงที่เอกซ์โพเนนเชียลฟังก์ชัน พร้อมกับค่าความเค้นจริง, ความเครียดจริงมีหน่วยเป็น MPa. และ เปอร์เซนต์ความเครียดจริงตามลำดับ ซึ่งในแต่ละความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นจริงและความเครียดจริงในช่วงพลาสติกสามารถสรุปค่าพารามิเตอร์ทั้ง 4 ของแต่ละอุณหภูมิแต่ละวัสดุได้ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 พารามิเตอร์ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นจริง (MPa.) และความเครียดจริง (% strain) ในช่วงพลาสติก

ชนิดวัสดุ		Yielding Strength (MPa.)	a	b	c	d
อลูมิเนียม 1100	25 °C	105.28	8.9800	1.7260	53.080	0.0231
	100 °C	99.51	3.9110	4.7250	4.3770	0.3168
	200 °C	73.88	3.4510	9.3960	1.1400	1.0270
อลูมิเนียม อัลลอยด์ 6063	25 °C	167.13	37.290	0.4831	43.090	0.0845
	100 °C	166.03	27.310	0.5078	39.410	0.0844
	200 °C	140.55	4.7690	1.7950	17.010	0.1129
เหล็กเกรด เอสที 37	25 °C	299.93	52.450	0.4349	137.90	0.0678
	100 °C	278.35	18.500	0.9952	127.40	0.1664
	200 °C	248.90	24.380	1.3300	122.70	0.2022
เหล็กเกรด เอสที 60	25 °C	760.76	46.780	4.3620	401.20	0.6473
	100 °C	735.06	78.780	3.4390	381.70	0.7540
	200 °C	687.55	104.40	3.0670	341.20	0.6805

7.เอกสารอ้างอิง

- [1] ASTM : E8M-01. Standard Test Methods of Tension Testing of Metallic Materials.
- [2] ASTM : E83-00. Practice for Verification and Classification of Extensometers.
- [3] ASTM : E4. Practices for Force Verification of Testing Machines.
- [4] ASTM : A370. Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products.
- [5] ASTM : E21-92. Standard Test Methods for Elevated Temperature Tension Test of Metallic Materials.
- [6] ASTM : B95-39. Standard Test Method for Linear Expansion of Metals.
- [7] Norman E. Dowling. Mechanical Behavior of Materials. 2nd ed. New Jersey : Prentice Hall, c1999.
- [8] M. J. Fagan. Finite Element Analysis. 1st ed. Edinburgh : Addison Wesley Longman Limited, c1992.
- [9] D. Hutton. Fundamentals of finite element analysis. 1st ed. Boston : McGraw-Hill, c2004.
- [10] D. R. J. Owen and E. Hinton. Finite Element in Plasticity. 1st ed. London : Academic Press, c1987.