

บทที่ 4 ผลการดำเนินงานวิจัย

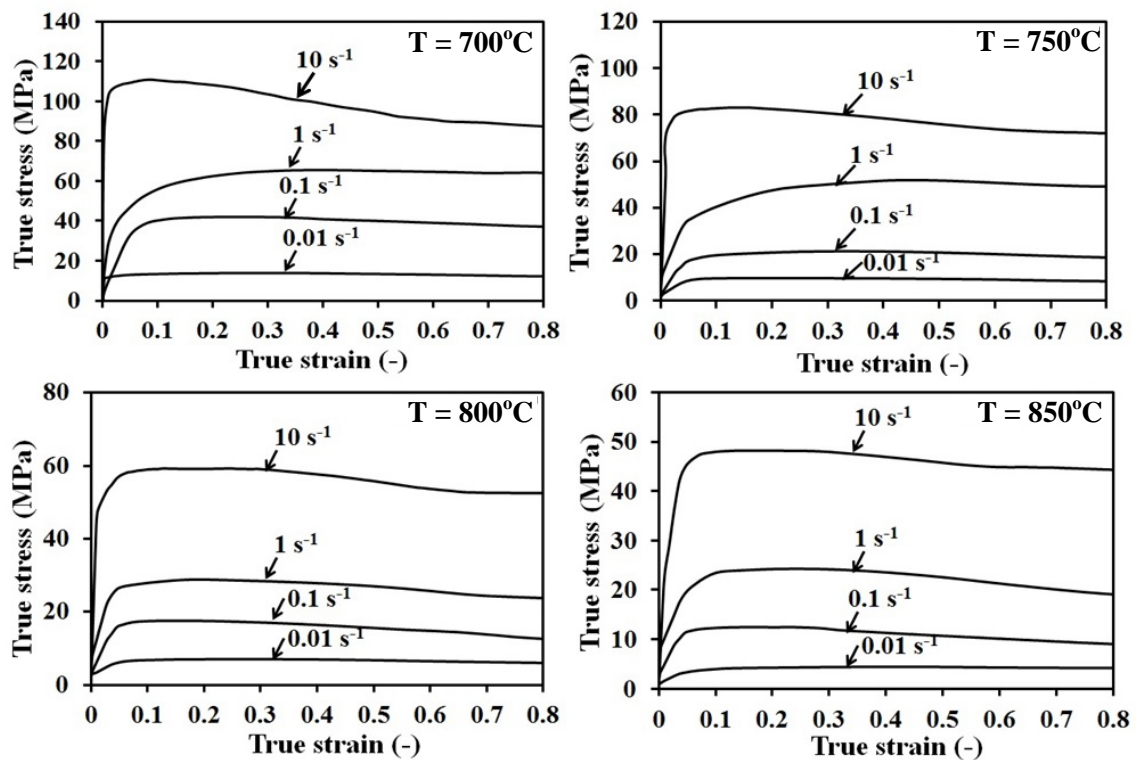
ในงานวิจัยนี้ ได้ใช้โปรแกรม DEFORM 3D ในการจำลองการขึ้นรูปรีดขึ้นงาน โดยกำหนดค่าคงที่ของวัสดุที่จำเป็นต้องใช้ในการจำลอง โดยอาศัยสมการซีเนอร์โฮโลมอนด์ ซึ่งเป็นสมการที่แสดงพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปของวัสดุที่คำนวณ ได้ขึ้นอยู่กับค่าคงที่ของวัสดุ (Material constant) ผลการคำนวณจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลจากการทดลอง เพื่อยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองที่ใช้วิธีการคำนวณทางคณิตศาสตร์ ไปทำนายการเปลี่ยนรูปที่อุณหภูมิสูงของโลหะผสม MAB เพื่อนำค่าดังกล่าวมาใส่ในโปรแกรม ก่อนที่จะทำการจำลองจำเป็นที่ต้องทำการตรวจสอบความเชื่อถือและความแม่นยำของโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ในการทำแบบจำลองขึ้นอยู่กับสมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ว่าเหมาะสมหรือไม่ ในขณะที่ตลาดเคลื่อนมากหรือน้อยขึ้นกับเทคนิคกระบวนการของไฟไนต์เอลิเมนต์

4.1 พฤติกรรมการเปลี่ยนรูปของวัสดุในการทดสอบกดขึ้นรูปรีด

4.1.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดจริง

ในการทดสอบโลหะผสม MAB ด้วยการกดขึ้นรูปรีดได้กำหนดอัตราความเครียดไว้ที่ 0.01, 0.1, 1 และ 10 ต่อวินาที และทดสอบภายใต้อุณหภูมิ 700, 750, 800 และ 850 องศาเซลเซียส จะแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดจริงในรูปที่ 4.1 พบว่าพฤติกรรมเส้นโค้งความเค้นไหลของวัสดุมีลักษณะใกล้เคียงกันในแต่ละอัตราความเครียด ซึ่งเป็นไปตามลักษณะเส้นโค้งความเค้นไหล (Flow curves) จะพบว่าเส้นโค้งความเค้นไหลจะลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและลดอัตราความเครียด กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดจริงของโลหะผสม MAB แสดงลักษณะกราฟที่มีความเค้นสูงสุดเพียงจุดเดียวที่ทุกอัตราความเครียดและทุกอุณหภูมิของเงื่อนไขการทดสอบ ผลทดสอบการกดขึ้นรูปรีดที่แสดงในรูปที่ 4.1 แสดงถึงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียด ภายใต้อุณหภูมิและอัตราความเครียดที่แตกต่างกัน จากผลการทดลอง พบว่าโลหะผสม MAB จากนั้นความเค้นจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนกระทั่งเข้าสู่ช่วงพลาสติก (Plastic) ซึ่งในช่วงนี้ ขึ้นทดสอบจะเกิดการเสียรูปแบบถาวร หลังจากจุดนี้ไปความเค้นจะเพิ่มขึ้นแต่จะเพิ่มขึ้นในอัตราที่ช้าลง เพราะจะเกิดความเครียดแข็ง (Strain hardening) ขึ้นภายในวัสดุด้วย จนกระทั่งความเค้นมีค่าสูงสุด

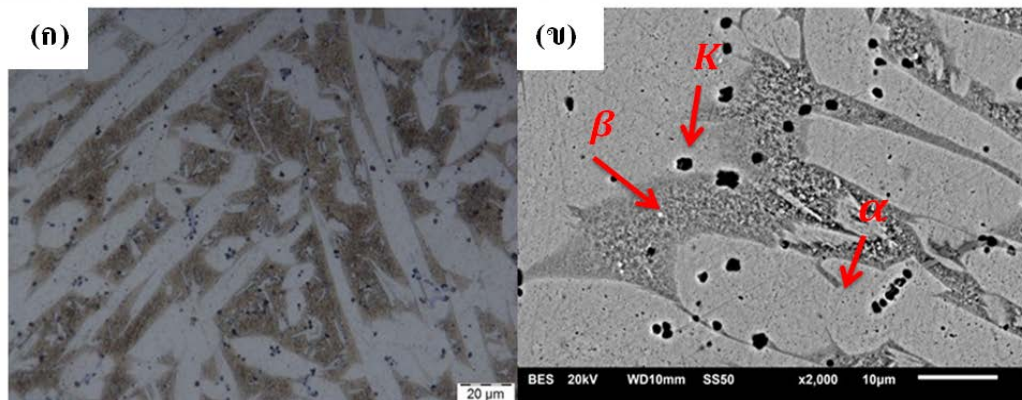
หลังจากนั้นความเค้นจะเริ่มลดลงเนื่องจากการอ่อนตัวของวัสดุ (Softening) ซึ่งเป็นผลมาจากการที่วัสดุได้รับความร้อน โดยการลดลงของความเค้นในช่วงนี้ แสดงให้เห็นอัตราการอ่อนตัวมีค่าสูงกว่าอัตราความเครียดแข็ง (Hardening rate) ของวัสดุ สังเกตได้จากความเค้นลดลงในขณะที่ความเครียดเพิ่มขึ้นจนกระทั่งความเค้นเข้าสู่สภาวะอิ่มตัว (Saturate) หรือสภาวะคงตัว (Steady state) จะเรียกพฤติกรรมลักษณะนี้ว่า การตกผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ ซึ่งสังเกตได้จากลักษณะกราฟความเค้น-ความเครียดจริงจะมีความเค้นสูงสุดแบบจุดเดียว ส่วนการคืนตัวแบบพลศาสตร์ (DRV) จะเกิดหลังจากความเค้นถึงจุดสูงสุดและในขณะที่ความเครียดยังคงเพิ่มขึ้นความเค้นจะค่อนข้างคงที่ ซึ่งจะมีผลให้อัตราการอ่อนตัวมีค่าใกล้เคียงกับอัตราการแข็งตัวและเข้าสู่สภาวะคงตัวในที่สุด ซึ่งพบว่าโลหะผสม MAB แสดงพฤติกรรมทั้งแบบการคืนตัวแบบพลศาสตร์ และการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ชนิดความเค้นสูงสุดแบบจุดเดียว



รูปที่ 4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดจริงของชิ้นงานทดสอบโลหะผสม MAB เมื่อถูกกดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 700, 750, 800 และ 850 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราความเครียด 0.01, 0.1, 1 และ 10 ต่อวินาที

4.1.2 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม MAB แบบหล่อที่ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนเซชัน

โลหะผสม MAB ที่ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนเซชัน พบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคขึ้น โดยโครงสร้างที่ได้ประกอบไปด้วยเฟสที่ได้มี α β และ K จะแสดงในรูปที่ 4.2 (ก) แสดงโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม MAB ที่ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนเซชัน ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง และรูปที่ 4.2 (ข) แสดงภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม MAB ที่ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนเซชัน ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด โหมด BSE ซึ่งแสดงรายละเอียดโครงสร้างจุลภาคได้ชัดเจน



รูปที่ 4.2 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม MAB ที่ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนเซชัน ที่ถ่ายด้วย (ก) กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (ข) กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดโหมด BSE

4.2 ทำนายพฤติกรรมการไหลของวัสดุที่อุณหภูมิสูง

4.2.1 การสร้างแบบจำลองเพื่อทำนายพฤติกรรมการไหลของวัสดุที่ใช้สมการซีเนอร์โฮโลมอนต์

จากผลกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดจริงที่ได้จากการทดสอบการกดขึ้นรูปร้อน (Compression test) ของโลหะผสม MAB แสดงให้เห็นถึงการเกิดกลไกการแข็งตัวและกลไกการอ่อนตัวของวัสดุ ดังนั้นสมการคอนสทิทิวทิฟที่ใช้จะตั้งอยู่บนพื้นฐานของแบบจำลองของฮาร์วีเนียส (Arrhenius model) ซึ่งสามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นไหล อัตราความเครียดและอุณหภูมิได้ ด้วยเหตุนี้การทำแบบจำลองจะเริ่มต้นโดยการอธิบายอิทธิพลของอุณหภูมิและอัตราความเครียดที่มีต่อพฤติกรรมการไหลด้วยสมการซีเนอร์โฮโลมอนต์ ดังแสดงในสมการที่ 2.10 และ 2.11 ทั้งนี้ในการหาแต่ละค่าคงที่ของวัสดุ (Material constant) สามารถหาได้จากการประยุกต์ของ

ความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้ง 3 ตัวแปร ได้แก่ อัตราความเครียด ความเค้น และอุณหภูมิขึ้นรูปจากข้อมูลการทดลองการกดขึ้นรูปร้อน สมการฮาร์นีย์สนิยมใช้สมการ 3 รูปแบบคือ กฎพาวเวอร์ (Power law) ดังในสมการที่ 2.12 ซึ่งไม่เหมาะสมกับการนำไปใช้อธิบายที่สภาวะค่าความเค้นสูง ($\alpha\sigma > 0.8$) ฟังก์ชันที่สองคือกฎเลขชี้กำลัง (Exponential law) ดังในสมการที่ 2.13 ซึ่งก็จะไม่เหมาะสมกับการอธิบายพฤติกรรมของวัสดุที่ค่าความเค้นต่ำ ($\alpha\sigma < 1.2$) และฟังก์ชันที่สามคือ กฎไฮเพอร์โบลิกซายด์ (Hyperbolic-sine law) ดังในสมการที่ 2.14 จะใช้ได้สำหรับทุกช่วงความเค้น [49-52] ในการศึกษางานวิจัยสมการประเภทไฮเพอร์โบลิกซายด์จะประยุกต์ใช้ในแบบจำลองฮาร์นีย์สนิยมสำหรับอธิบายความเค้นไหลของวัสดุที่ใช้สมการซีเนอร์โฮโลมอนด์ดังสมการที่ 2.10-2.14

การหาค่าตัวแปรต่างๆ ของสมการ

ในแบบจำลองฮาร์นีย์สนิยมจะใช้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นไหล อุณหภูมิและ อัตราความเครียดที่อุณหภูมิสูงโดยมีค่าคงที่ของวัสดุ n Q และ A ตามกฎไฮเพอร์โบลิกซายด์ ในงานวิจัยนี้การหาค่าความเค้นทั้งหมดจะพิจารณาที่ค่าทุกๆความเครียด แบ่งเป็นช่วงๆละ 0.05 ระหว่าง 0.05-0.8

(ก) การหาค่า α

อันดับแรก ตัวแปร n_1 และ β จะหามาจากสมการที่ 2.12 และ 2.13 โดยการใส่ลอการิทึมธรรมชาติทั้ง 2 ข้างของสมการ หลังจากนั้นจะได้สมการที่ 4.1 และ 4.2 ดังต่อไปนี้

$$\ln \dot{\epsilon} = n_1 \ln \sigma + \ln A - \frac{Q}{RT} \quad (4.1)$$

$$\ln \dot{\epsilon} = \beta \sigma + \ln A - \frac{Q}{RT} \quad (4.2)$$

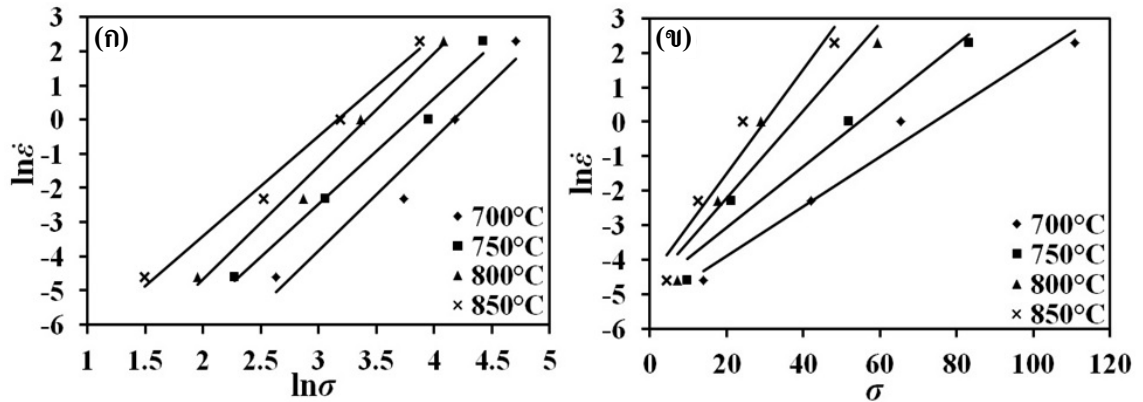
พิจารณาที่อุณหภูมิการขึ้นรูปคงที่ใดๆในระหว่างการกดขึ้นรูปร้อน อนุพันธ์ย่อย (Partial Differentiation) ของสมการ 4.1 และ 4.2 เทียบกับความเครียดระหว่าง 0.05-0.8 สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\left[\frac{\partial \ln \dot{\epsilon}}{\partial \ln \sigma} \right]_T = n_1 \quad (4.8)$$

$$\left[\frac{\partial \ln \dot{\epsilon}}{\partial \sigma} \right]_T = \beta \quad (4.9)$$

จากสมการดังกล่าวนี้ค่าคงที่ของวัสดุ n_1 และ β จะสามารถหาได้โดยวิธีการถดถอยเชิงเส้น (linear regression method) ของความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \dot{\epsilon}$ กับ $\ln \sigma$ และ $\ln \dot{\epsilon}$ กับ σ ในแต่ละอุณหภูมิการเสียรูป ดังแสดงในรูปที่ 4.3 (ก) และ 4.3 (ข) ค่าเฉลี่ยรวมของ n_1 และ β สำหรับอุณหภูมิที่พิจารณา

ทั้งหมดคำนวณได้เป็น 2.92 และ 0.12 ตามลำดับ จาก $\alpha = \beta/n_1$ จะได้ α มีค่าเท่ากับ 0.04 ที่สำหรับโลหะผสม MAB ที่ใช้ในงานวิจัย



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง (ก) $\ln \dot{\epsilon}$ และ $\ln \sigma$ (ข) $\ln \dot{\epsilon}$ และ σ สำหรับการหาค่าพารามิเตอร์ n_1 และ β

(ข) การหาค่า n_2

ค่าคงที่วัสดุ n_2 จะได้จากสมการที่ 2.14 โดยการใส่ลอการิทึมธรรมชาติทั้งสองข้างของสมการซึ่งจะแสดงเป็นสมการที่ 4.5 ดังต่อไปนี้

$$\ln \dot{\epsilon} = n_2 \ln[\sinh(\alpha\sigma)] + \ln A - \frac{Q}{RT} \tag{4.5}$$

พิจารณาการทดสอบการถดถอยรูปที่อุณหภูมิคงที่อนุพันธ์ย่อยของสมการที่ 4.5 เทียบกับความเค้นจะได้อเป็น

$$\left[\frac{\partial \ln \dot{\epsilon}}{\partial \ln[\sinh(\alpha\sigma)]} \right]_T = n_2 \tag{4.6}$$

จากหัวข้อที่แล้วเมื่อทราบค่าตัวแปร α แล้วตัวแปร n_2 จึงสามารถหาค่าได้จากวิธีถดถอยแบบเชิงเส้น จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \dot{\epsilon}$ กับ $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ ที่แต่ละอุณหภูมิ ดังแสดงในรูป 4.4(ก) ได้ค่าเฉลี่ยรวมของตัวแปร n_2 สำหรับอุณหภูมิในการทดลองทั้งหมดได้เป็น 1.98

(ค) การหาค่า Q

โดยทั่วไป ค่าพลังงานการกระตุ้น (Q) ของวัสดุที่อุณหภูมิสูงจะหาได้จากการสมการที่ 4.5 ซึ่งสามารถจัดรูปใหม่ได้เป็น

$$\ln[\sinh(\alpha\sigma)] = \frac{Q}{n_2 R T} + \frac{1}{n_2} \ln \dot{\epsilon} - \frac{1}{n_2} \ln A \tag{4.7}$$

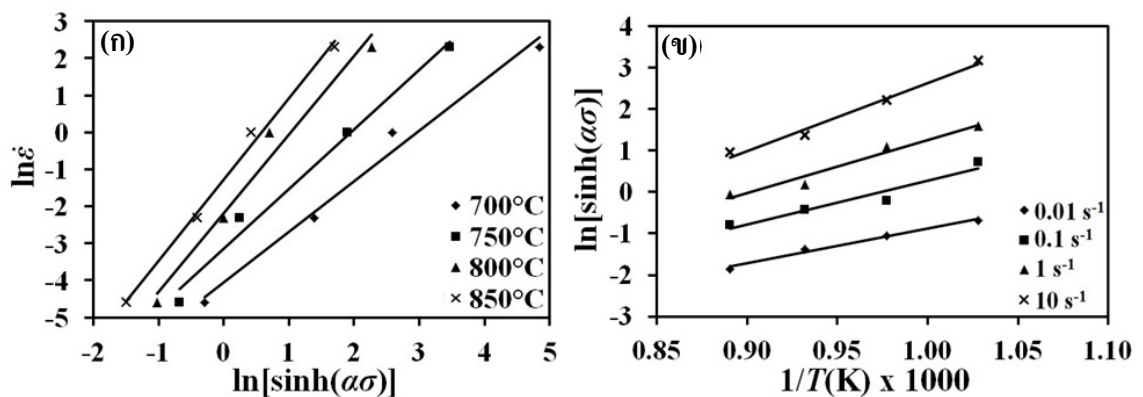
พิจารณาการขึ้นรูปร้อนที่อุณหภูมิคงที่ อนุพันธ์ย่อยของสมการที่ 4.7 เทียบกับอุณหภูมิการเสียรูป ($1/T$) จะแสดงได้เป็น

$$\left[\frac{\partial \ln\{\sinh(\alpha\sigma)\}}{\partial(1/T)} \right]_{\dot{\epsilon}} = \frac{Q}{n_2 R} \tag{4.8}$$

ดังนั้น ค่าของพลังงานการกระตุ้น (Q) สามารถหาได้จาก

$$Q = R n_2 \left[\frac{\partial \ln \{\sinh(\alpha\sigma)\}}{\partial(1/T)} \right]_{\dot{\epsilon}} \tag{4.9}$$

ค่าของเทอม $[\partial \ln\{\sinh(\alpha\sigma)\}/\partial(1/T)]_{\dot{\epsilon}}$ จะถูกหาโดยวิธีการถดถอยเชิงเส้นของความสัมพันธ์ระหว่างความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ และ $(1000/T)$ สำหรับค่าอัตราความเครียดแต่ละค่า ดังแสดงในรูปที่ 4.4 (ข) ด้วยวิธีนี้ค่าจะได้พลังงานการกระตุ้น Q ของวัสดุสำหรับแต่ละอัตราความเครียดและอุณหภูมิโดยค่าเฉลี่ยรวมของ Q ที่ได้มีค่าเท่ากับ 194 kJ/mol



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง (ก) $\ln \dot{\epsilon}$ และ $\ln [\sinh(\alpha\sigma)]$ (ข) $\ln [\sinh(\alpha\sigma)]$ และ $(1000/T)$ สำหรับการหาค่าพารามิเตอร์ n_2 และ Q

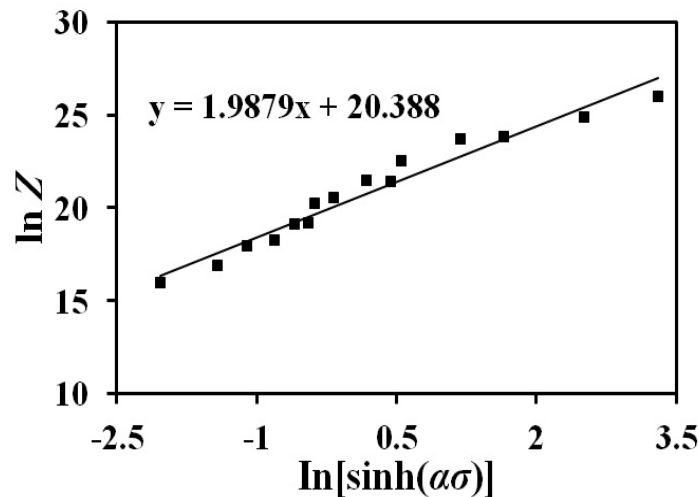
สุดท้ายสำหรับทุกๆค่าความเค้นสมการ 2.10 สามารถเขียนใหม่ได้เป็นสมการ 4.10 ดังนี้

$$Z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) = A[\sinh(\alpha\sigma)]^{n_2} \quad (4.10)$$

ใส่ลอการิทึมธรรมชาติทั้งสองข้างของสมการ 4.10 จะได้เป็นสมการที่ 4.11

$$\ln Z = \ln A + n_2 \ln[\sinh(\alpha\sigma)] \quad (4.11)$$

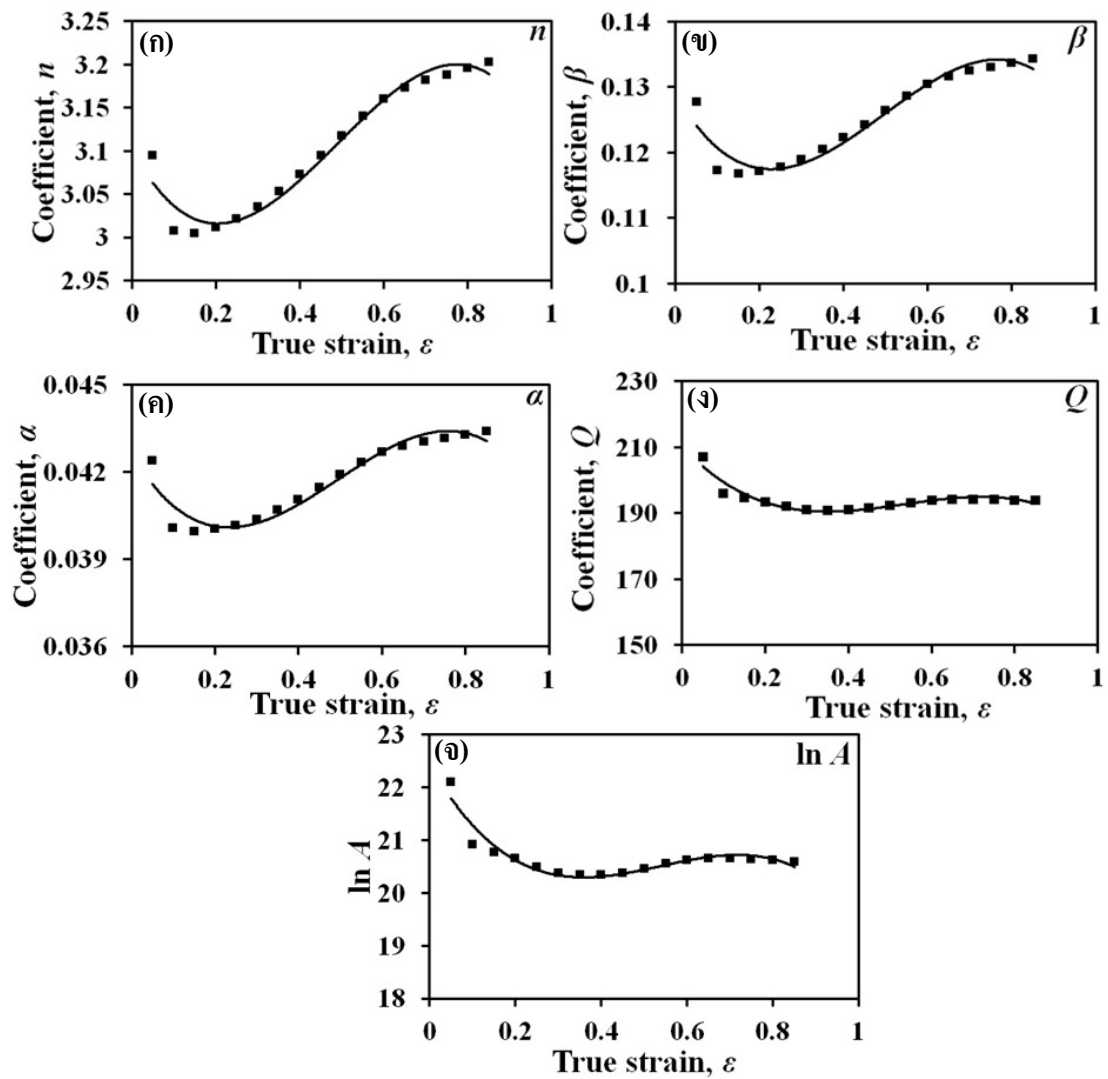
จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln Z$ และ $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ ซึ่งได้จากการใช้วิธีการถดถอยเชิงเส้น ดังแสดงในรูปที่ 4.5 สามารถนำมาหาค่า $\ln A$ ได้โดยการตัดแกน y (Y-Intercept) โดยค่าของ A ที่ได้ของโลหะผสม MAB คือ $1.1 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln Z$ และ $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$

ทุกๆค่าคงที่ของวัสดุ Q A β n_1 n_2 และ α ในสมการคอนสทิทิวทีฟที่คำนวณได้สำหรับค่าความเครียดต่างๆในช่วงระหว่าง 0.05-0.8 โดยคิดให้แต่ละช่วงห่างกันเป็น 0.05 สำหรับโลหะผสมของ MAB ที่ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร Q A β n_1 n_2 และ α และค่าความเครียดจริงแสดงในรูปที่ 4.6 และอธิบายโดยฟังก์ชันพหุนามที่ 3 ดังในสมการที่ 4.12 ที่หาโดยวิธี Fitting (Linear regression) โดยได้ค่าคงที่ต่างๆดังแสดงในตารางที่ 4.1

$$\begin{aligned}
 n_2 &= B_0 + B_1\varepsilon + B_2\varepsilon^2 + B_3\varepsilon^3 \\
 \beta &= C_0 + C_1\varepsilon + C_2\varepsilon^2 + C_3\varepsilon^3 \\
 \alpha &= D_0 + D_1\varepsilon + D_2\varepsilon^2 + D_3\varepsilon^3 \\
 (4.12) \quad Q &= E_0 + E_1\varepsilon + E_2\varepsilon^2 + E_3\varepsilon^3 \\
 \ln A &= F_0 + F_1\varepsilon + F_2\varepsilon^2 + F_3\varepsilon^3
 \end{aligned}$$



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร (ก) n_2 (ข) β (ค) α (ง) Q (จ) $\ln A$ และความเคียวจริงของชิ้นงานทดสอบโลหะผสม MAB ที่ผ่านการกดขึ้นรูปร้อน

ตารางที่ 4.1 ค่าคงที่ต่างๆของฟังก์ชันระหว่างพารามิเตอร์ n_2 β α Q และ $\ln A$ และความเครียดที่หาโดยวิธี Fitting ด้วยพหุนามลำดับที่ 3 ของโลหะผสม MAB ที่ศึกษา

n_2	β	α	Q	$\ln A$
B_0 3.1032	C_0 0.1290	D_0 0.0426	E_0 210.19	F_0 22.44
B_1 -0.9391	C_1 -0.1125	D_1 -0.0242	E_1 -134.17	F_1 -14.315
B_2 2.9125	C_2 0.3211	D_2 0.0679	E_2 284.71	F_2 29.934
B_3 -1.9866	C_3 -0.2159	D_3 -0.0457	E_3 -177.41	F_3 -18.558

ต่อไปจะอธิบายเกี่ยวกับค่าพลังงานกระตุ้น (Q) ของวัสดุที่ศึกษาเทียบกับ โลหะเกรดอื่นๆที่มีส่วนผสมของอะลูมิเนียมบรอนซ์ โดยที่พลังงานกระตุ้นเป็นค่าคงที่ทางกายภาพ (Physical parameter) ที่สามารถใช้เป็นดัชนีบ่งบอกถึงระดับความสามารถในการขึ้นรูป (Index of deformation) ความหนาแน่นของดิสโลเคชันเกิดจากปริมาณของพลังงานกระตุ้นที่เพิ่มขึ้นในระหว่างการเปลี่ยนรูปมีผลทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน อย่างไรก็ตามความหนาแน่นของดิสโลเคชันที่เพิ่มขึ้นจากค่าความเครียดจะส่งผลให้เกิดการเพิ่มขึ้นของค่าพลังงานกระตุ้นของการเปลี่ยนรูป [53] ซึ่งจะเห็นได้ชัดว่าพลังงานกระตุ้นที่แตกต่างกันที่ของวัสดุในการขึ้นรูปร้อนที่อุณหภูมิและอัตราความเครียดต่างๆจะมีค่าที่แตกต่างกัน ค่าเฉลี่ยรวมของพลังงานกระตุ้น (Q) ที่คำนวณได้สำหรับโลหะผสม MAB ที่ศึกษามีค่าเท่ากับ 194 กิโลจูลต่อโมล ค่านี้ค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับกว่าโลหะผสมอื่นๆที่มีส่วนผสมที่คล้ายคลึงกันยกตัวอย่าง เช่น โลหะผสม Al-1.1Mn-0.3Mg-0.25RE มีค่า Q เท่ากับ 186.48 กิโลจูลต่อโมล [54] โลหะผสม Mg-Zn-Mn-Ce ที่ได้ผลิตขึ้นจากการหล่อ มีค่าเท่ากับ 161 กิโลจูลต่อโมล [55] โลหะผสมอลูมิเนียม 3003 มีค่าเท่ากับ 164.8 กิโลจูลต่อโมล [56] และ โลหะผสม Al-1Mn มีค่าเท่ากับ 152 กิโลจูลต่อโมล [57]

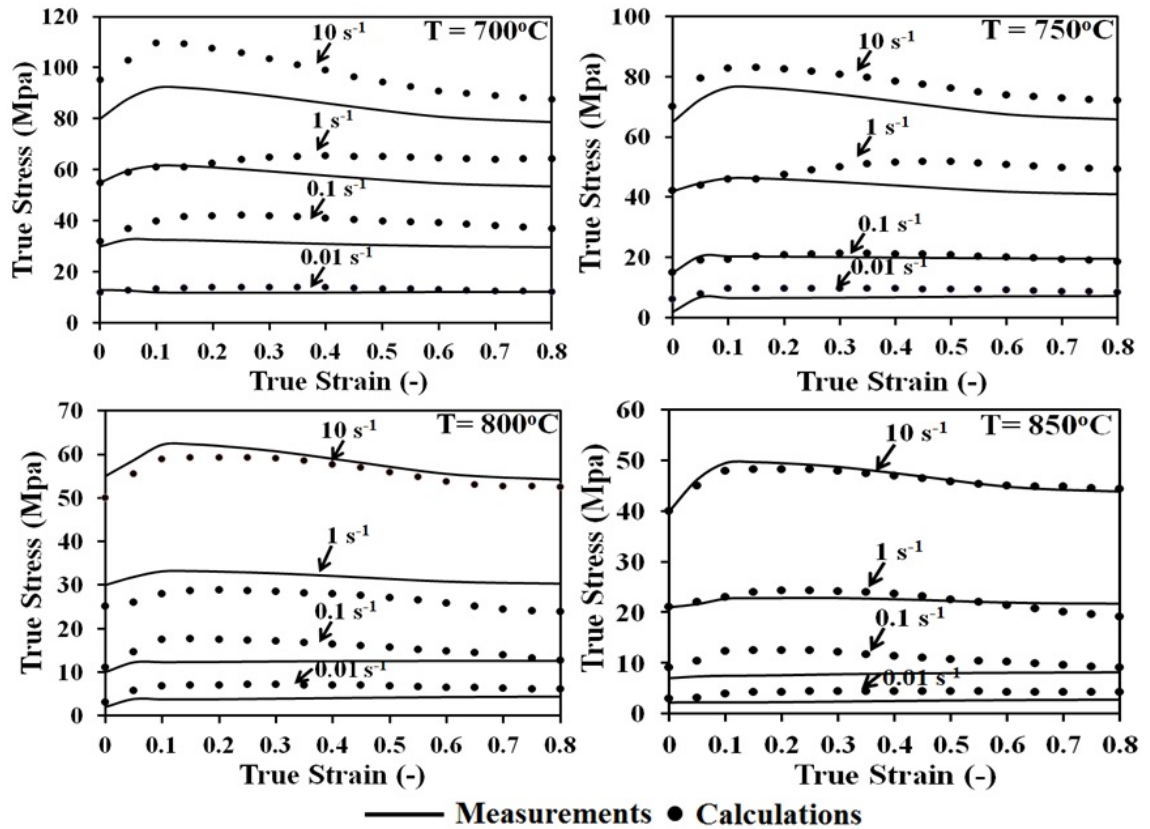
4.3 การเปรียบเทียบระหว่างกราฟความเค้น-ความเครียดจริงของผลการทดลองและการทำนายด้วยสมการซีเนอร์โฮโลมอนด์

ผลจากการคำนวณทำให้ทราบค่าคงที่ของโลหะผสม MAB และสามารถอธิบายพฤติกรรมกรรมการเปลี่ยนรูปของโลหะผสม MAB ที่อุณหภูมิสูง ดังนั้น เพื่อเป็นการตรวจสอบค่าคงที่ของโลหะผสม MAB ที่ได้จากการคำนวณ คือการนำผลที่ได้จากการคำนวณเปรียบเทียบกับผลการทดสอบเพื่อทำนายค่าต่างๆ ความเครียด แบ่งเป็นช่วงๆละ 0.05 ระหว่าง 0.05-0.8 และเพื่อเป็นการยืนยันผลจากการคำนวณ ดังนั้นจากสมการที่ 4.10 ที่อุณหภูมิและอัตราความเครียดคงที่ จัดสมการใหม่ในรูปแบบของความเค้น ได้สมการที่ 4.13 ดังนี้

$$\sigma = \frac{1}{\alpha} \ln \left\{ \left(\frac{Z}{A} \right)^{1/n} + \left[\left(\frac{Z}{A} \right)^{2/n} + 1 \right]^{1/2} \right\} \quad (4.13)$$

เมื่อหาค่าคงที่หรือตัวแปรของวัสดุทั้งหมดแล้วจึงนำไปแทนค่าในสมการที่ 4.13 จะสามารถนำสมการที่ได้มาใช้ในการทำนายกราฟความเค้นจริง-ความเครียดจริงของวัสดุภายใต้การเปลี่ยนรูปของวัสดุที่อุณหภูมิสูงของโลหะผสม MAB เมื่อนำผลการทำนายและผลการทดลองมาเปรียบเทียบกัน ในเทอมของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดจริงดังรูปที่ 4.7 จะเห็นได้ว่าความเค้นไหลจากการคำนวณมีค่าค่อนข้างสูงกว่าจากผลการทดลอง

เพื่อยืนยันว่าผลการทำนายของสมการซีเนอร์โฮโลมอนด์ของโลหะผสม MAB มีความแม่นยำมากหรือน้อยโดยเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองดังรูปที่ 4.7 หลังจากที่ได้เปรียบเทียบกันจะเห็นได้ว่า ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสด้วยอัตราความเครียด 10 ต่อวินาที มีลักษณะที่มีความกว้างกว่าอัตราความเครียดและอุณหภูมิอื่นๆเมื่อเทียบระหว่างผลการทดลองกับผลการทำนาย



รูปที่ 4.7 การเปรียบเทียบกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดจริงที่อุณหภูมิ 700, 750, 800 และ 850 องศาเซลเซียส และอัตราความเครียด 0.01, 0.1, 1 และ 10 ต่อวินาทีที่ได้จากการทำนายด้วยสมการซีเนอร์โฮโลมอนด์และจากผลการทดลองของโลหะผสม MAB

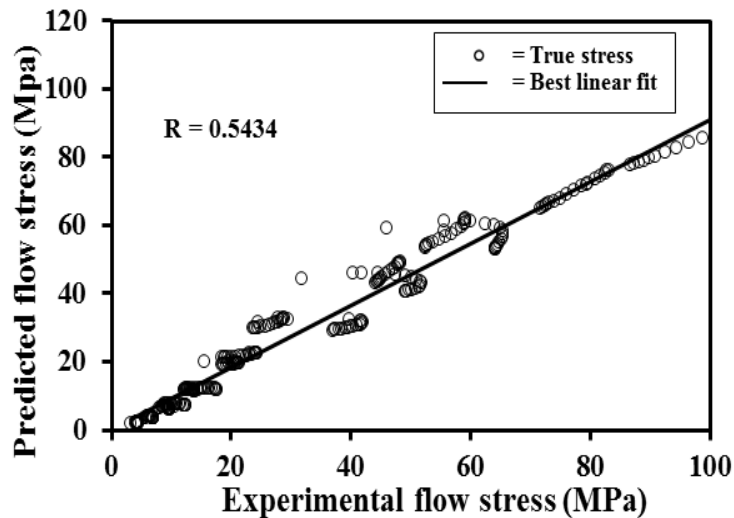
ดังนั้นเพื่อเป็นการตรวจสอบค่าคงที่ของโลหะผสม MAB เมื่อเกิดขึ้นรูปที่อุณหภูมิสูง ผลที่ได้จากการทำนายได้นำไปเปรียบเทียบกับผลการทดลอง เพื่อทำนายเส้นโค้งไหลและเป็นการยืนยันผลการคำนวณ พบว่าเส้นโค้งความเค้นไหลที่ได้จากการทำนายจากแบบจำลองอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้จากผลของการทดลองสามารถที่จะทำนาย ซึ่งในการทำนายของแบบจำลองคอนสทิทิวทิฟเป็นการคำนวณโดยใช้ค่า Standard Statistical Parameter ซึ่งใช้ตัวแปรสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R) สมการที่ 4.19 และการเฉลี่ยค่าผิดพลาดแน่นอน (AARE) ดังสมการที่ 4.15 [29,50]

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})(E_i - \bar{E})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2 \sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})^2}} \tag{4.14}$$

$$AARE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{S_i - P_i}{E_i} \right| \times 100 \tag{4.15}$$

S คือค่าการทำนายจากแบบจำลอง E คือข้อมูลจากการทดลอง \bar{P} และ \bar{E} เป็นค่าเฉลี่ยของ E และ P จะเห็นได้จากรูปที่ 4.8 เพื่อหาค่าการทำนายมาเปรียบเทียบกับผลการทดลอง สำหรับทุกอุณหภูมิและ อัตราความเครียดของการเปลี่ยนรูปที่พบว่าได้ค่า R และ AARRE เป็น 0.5434 และ 22.46% พบว่า สมการซีเนอร์ไฮโลมอนด์มีความไม่เหมาะสมกับวัสดุโลหะผสม MAB

จึงสรุปได้ว่าสำหรับโลหะผสม MAB ที่ใช้งานวิจัยนี้สามารถใช้สมการซีเนอร์ไฮโลมอนด์มาทำนายพฤติกรรมการไหลของวัสดุได้แต่เนื่องจากการคำนวณค่าคงที่ของวัสดุต่างๆเป็นการคำนวณแบบหาค่าเฉลี่ยไม่ได้มีการคำนวณสำหรับแต่ละเงื่อนไขทำให้เกิดความผิดพลาดในการหาค่าคงที่ได้ และแบบจำลองนี้ใช้ไฮเพอร์โบลิกชาดส์ ซึ่งไม่ได้มีการอ้างอิงถึงพฤติกรรมของความเค้นไหลที่เกิดขึ้นจริงคือ พิจารณาถึงการคืนตัวแบบพลศาสตร์และการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ ซึ่งเป็นเพียงแบบจำลองอย่างง่ายเพื่อทำนายพฤติกรรมของเส้นโค้งไหลของวัสดุ จึงต้องหาสมการวัสดุที่เหมาะสมต่อไป โดยในการทำนายพฤติกรรมการไหลของโลหะผสม MAB จะใช้สมการซิงก่าล่าที่แทนในช่วงเริ่มต้นจนถึงความเค้นสูงสุดหลังจากความเครียดสูงสุดจะใช้สมการอาลามี่ ซึ่งแสดงการคำนวณเพื่อที่จะเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองกับผลการทำนายของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จะกล่าวถึงในบทที่ 5



รูปที่ 4.8 กราฟเปรียบเทียบผลการทดลองและการทำนายโดยสมการซีเนอร์ไฮโลมอนด์

เมื่อทราบค่าคงที่ต่างๆของสมการซีเนอร์ไฮโลมอนด์แล้วจะนำไปใช้ในแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์และเปรียบเทียบผลกับผลการทดสอบด้วยเครื่องไคลาโตมิเตอร์เพื่อศึกษาความแม่นยำของ

โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วย DEFORM 3D ซึ่งได้กำหนดค่าคงที่และเงื่อนไขในการทำแบบจำลองให้เหมือนจริงมากที่สุด

การแทนค่าคงที่ต่างๆ ที่ทำได้ในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (FE simulation)

แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของการทดสอบการกดขึ้นรูปร้อนของโลหะผสม MAB ที่อุณหภูมิ 700, 750, 800 และ 850 องศาเซลเซียสด้วยอัตราความเครียด 0.01, 0.1 และ 1 องศาเซลเซียส ในการทดลองจริงทำเพื่ออธิบายพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปแบบถาวรของโลหะผสม MAB ขั้นตอนแรกของการทำแบบจำลองจะหาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดจริงจากการทดลองจริง ขั้นที่สองนำข้อมูลที่ได้มาทำแบบจำลองโดยใช้สมการซีเนอร์โฮโลมอนด์ จากนั้นจึงหาค่าคงที่ของวัสดุของสมการแล้วนำไปไว้ในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ หลังจากนั้นจะหากราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะทาง (Load-Displacement) จากแต่ละเงื่อนไขการทดสอบ และนำมาเปรียบเทียบกับกราฟดังกล่าวที่ได้จากผลการทดลอง

ในการทำแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้สมการซีเนอร์โฮโลมอนด์ได้แบ่งค่าคงที่ (parameter) ของโลหะผสม MAB เป็น 2 ชุดคือ ส่วนแรกคือการหาค่าคงที่ที่จุดความเค้นสูงสุดเพียงอย่างเดียว (Peak stress) ส่วนที่สองคือหาค่าคงที่ที่ทุกๆ ความเครียด แบ่งเป็นช่วงๆ ละ 0.05 ระหว่าง 0.05-0.8 (Strain 0.05-0.8) โดยวิธีการทำโปรแกรม DEFORM 3D จะแสดงในภาคผนวก ก

ในการศึกษาโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ใช้สมการซีเนอร์โฮโลมอนด์ ดังสมการที่ 4.16

$$\dot{\epsilon} = A[\sinh(\alpha\bar{\sigma})]^n \exp[-\Delta H/RT_{abs}] \quad (4.16)$$

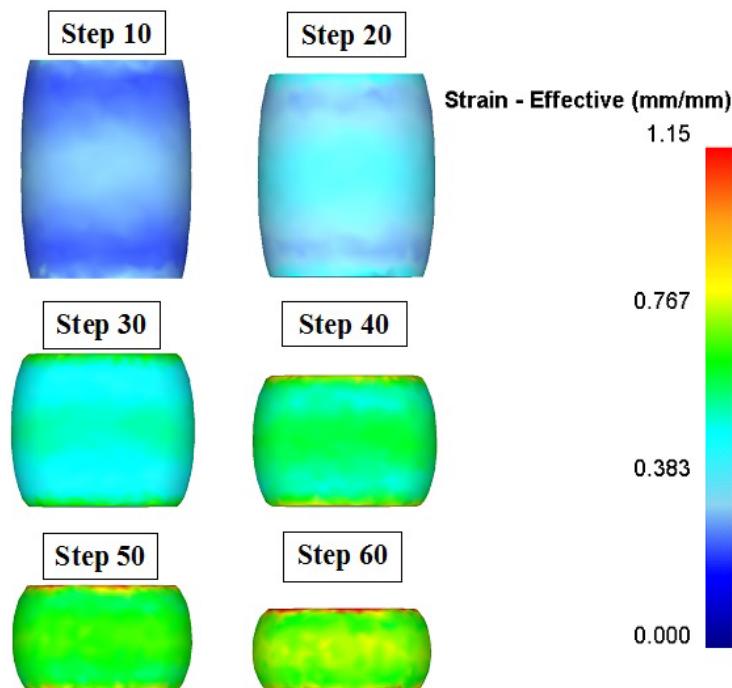
n และ A คือค่าคงตัวของวัสดุ α คือความเค้น $\bar{\sigma}$ คือความเค้นไหล (MPa) ΔH คือ พลังงานกระตุ้นของการเปลี่ยนรูปร้อน (kJ/mol) R คือค่าคงที่ในอุดมคติแก๊ส (8.314 J/molK) และ T คืออุณหภูมิการเปลี่ยนรูป ($^{\circ}\text{C}$)

โดยส่วนแรก (การหาค่าคงที่ที่จุดความเค้นสูงสุดเพียงอย่างเดียว) ได้คำนวณค่าคงที่ดังนี้คือ α มีค่าเท่ากับ 0.04 n มีค่าเท่ากับ 1.8 ΔH มีค่าเท่ากับ 231 A มีค่าเท่ากับ 6.014×10^{11} และ R มีค่าเท่ากับ 0.0831

ในส่วนที่สอง (หาค่าคงที่ที่ทุกๆ ความเครียด แบ่งเป็นช่วงๆ ละ 0.05 ระหว่าง 0.05-0.8) ได้คำนวณค่าคงที่ดังนี้คือ α เท่ากับ 0.04 n เท่ากับ 1.98 ΔH เท่ากับ 194 A เท่ากับ 1.1×10^9 และ R เท่ากับ 0.0831 ผลที่ได้จากการหาค่าคงที่ทั้ง 2 ส่วน ได้นำไปสู่กระบวนการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วย DEFORM 3D เพื่อใช้ในการหาความแม่นยำระหว่างผลการคำนวณและผลการทำแบบจำลอง

4.4 ผลการจำลองด้วยโปรแกรม DEFORM 3D

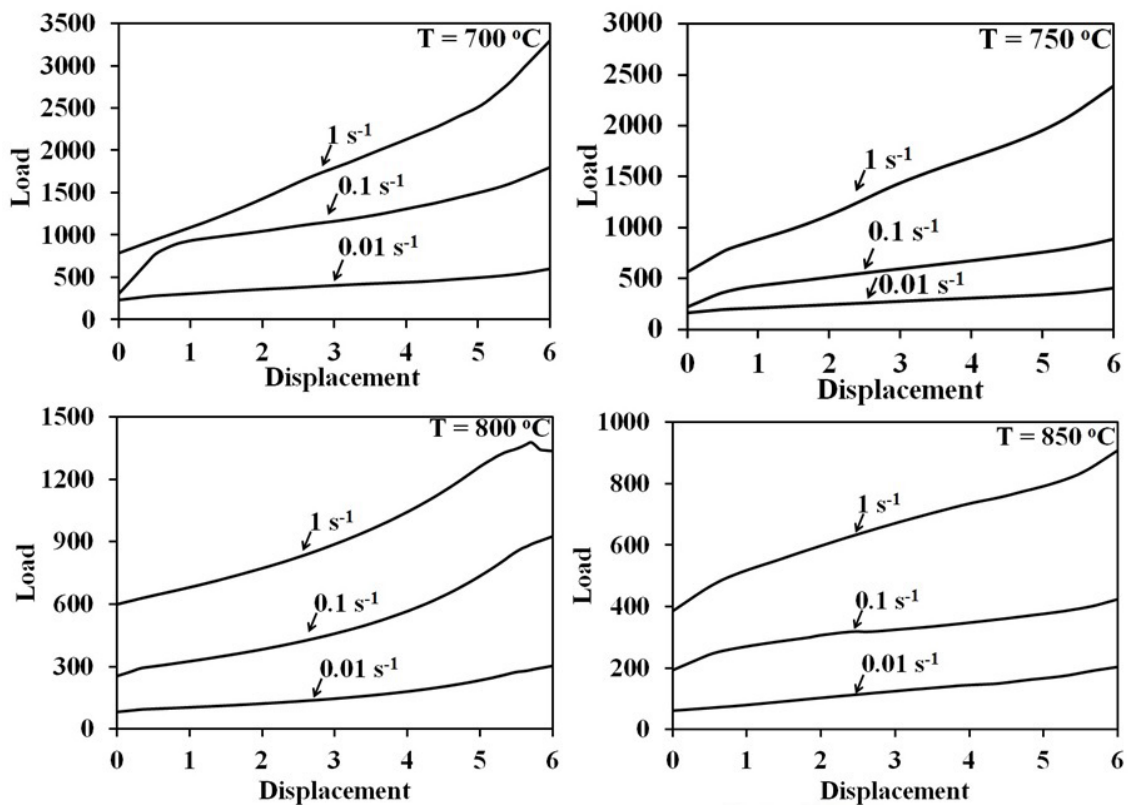
เมื่อทำแบบจำลองทางโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม DEFORM 3D จะแสดงผลการทำแบบจำลองที่ได้คือ ประสิทธิภาพความเครียด (Strain-Effective) ดังรูปที่ 4.9 จะแสดงการทดสอบการกดขึ้นรูปรีด โดยแรงที่ใช้ในการกดจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องพร้อมกับการเปลี่ยนรูปตามแนวการกดจะพบว่าแรงกระทำสูงสุดประมาณ 3200 นิวตัน ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสด้วยอัตราความเครียด 1 ต่อวินาที โดยแรงในการกดขึ้นรูปที่เพิ่มขึ้นด้วยการเพิ่มอัตราความเครียดและการลดลงของอุณหภูมิ ผลที่ได้จากทำแบบจำลองจะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะทาง



รูปที่ 4.9 การกระจายค่าความเครียดบนชิ้นงานที่ผ่านการกดขึ้นรูปรีดที่ค่าการลดลงของความสูงที่แตกต่างกัน

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรง-ระยะทางที่ได้จากการทดสอบจากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดจริงที่ได้จากการทำนายผลโดยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิจัยนี้ จะแบ่งออกมาเป็น 3 แบบ คือ การเปรียบเทียบระหว่างผลการทดสอบกับผลของแบบจำลองเส้นโค้งไหล การเปรียบเทียบระหว่างผลของแบบจำลองโดยใช้ค่าคงที่ของทุกๆ ความเครียด แบ่งเป็นช่วงๆ ละ 0.05 ระหว่าง 0.05-0.8 และการเปรียบเทียบระหว่างผลของแบบจำลองโดยใช้ค่าคงที่ของความเค้นสูงสุด แสดงดังต่อไปนี้

4.4.1 ผลจากการทดสอบที่ได้จากการทดสอบด้วยไดลาโตมิเตอร์ (Experiment)

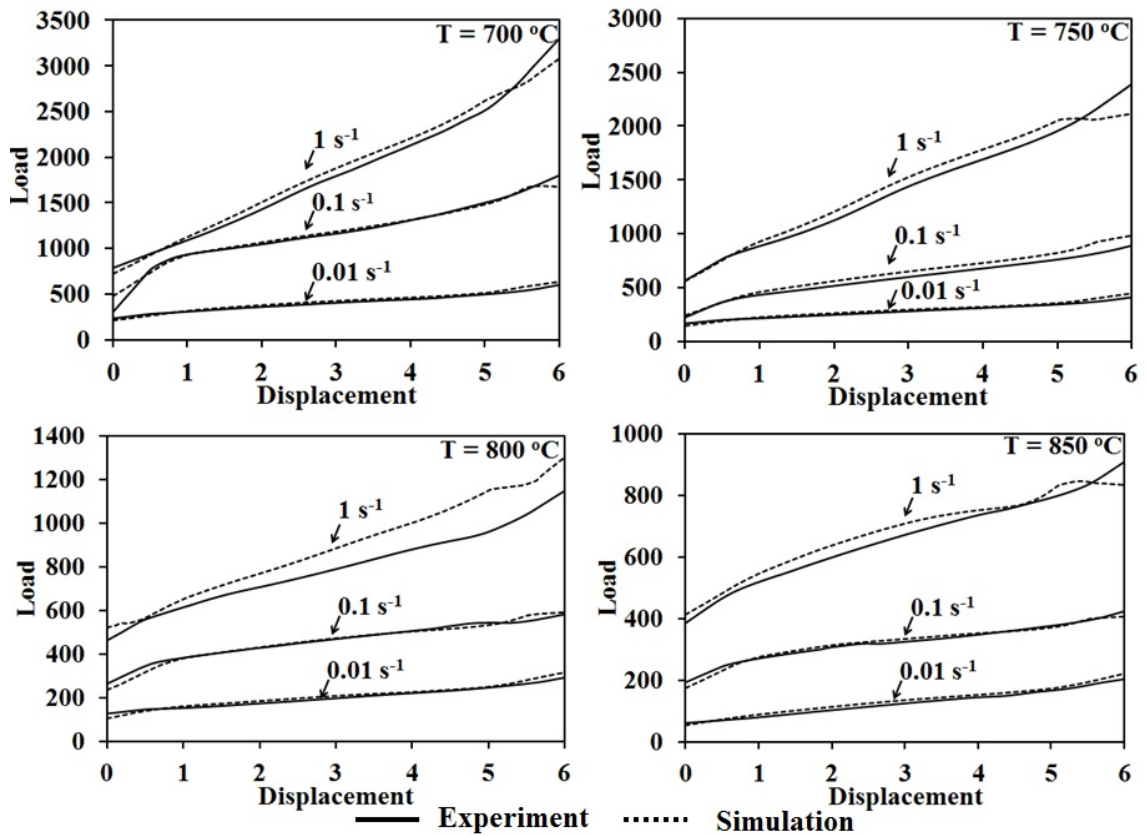


รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะกคของการกคขึ้นรูปร้อนของโลหะผสม MAB ที่ได้จากการทดลอง

4.5 ผลการจำลองพฤติกรรมวัสดุในการกดขึ้นรูปที่อุณหภูมิสูง

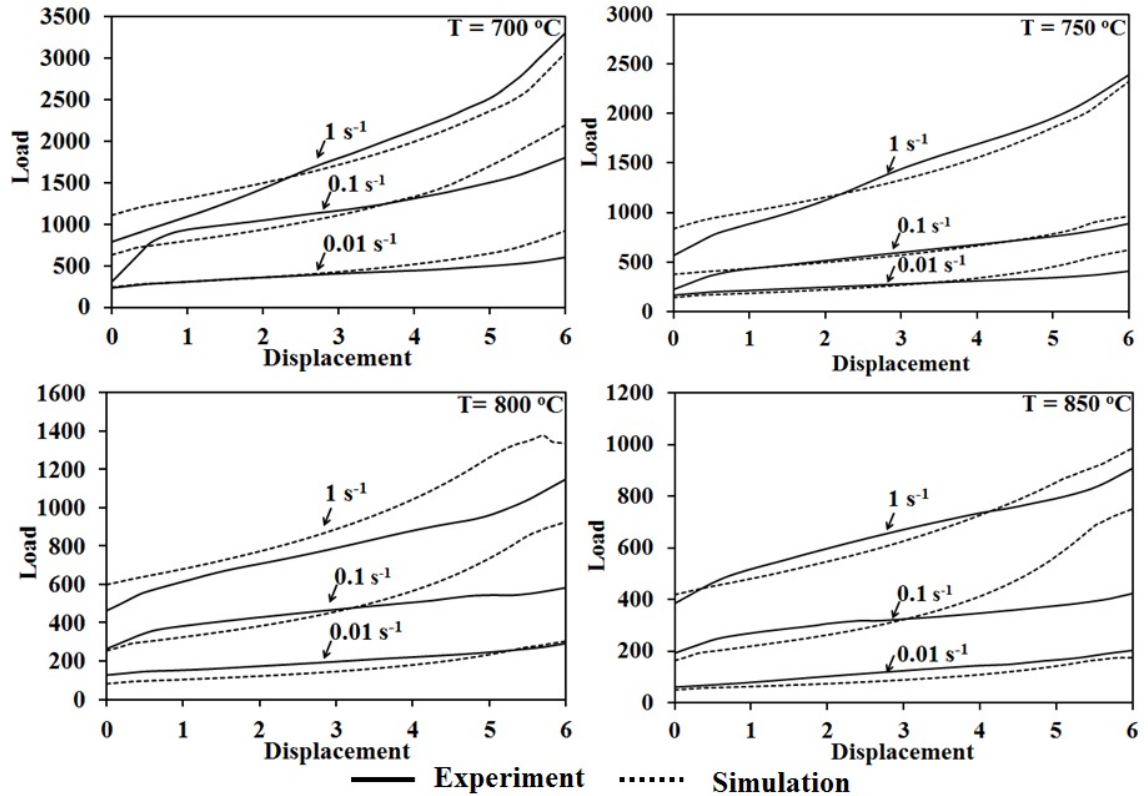
การวิเคราะห์ผลความแม่นยำที่ได้จากการทำนายผลโดยใช้ FEM จะทำการเปรียบเทียบ กราฟ ความสัมพันธ์ระหว่างแรง-ระยะทาง แสดงในรูปดังนี้

4.5.1 การเปรียบเทียบระหว่างผลการทดสอบกับผลของแบบจำลองเส้นโค้งไหล



รูปที่ 4.11 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะทางที่ได้จากการทดลองและการทำนายด้วย FEM โดยใช้สมมติวัสดุที่ได้จากการทดลองจริงของโลหะผสม MAB

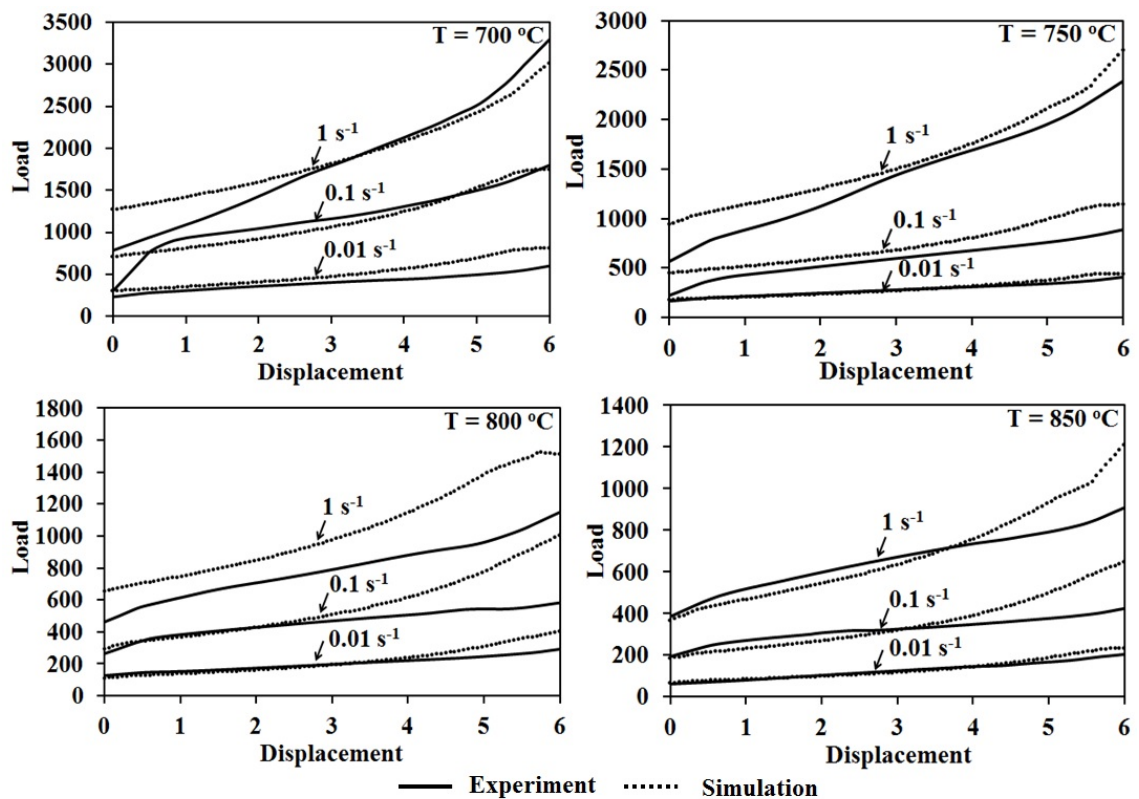
4.5.2 การเปรียบเทียบระหว่างผลของแบบจำลองโดยใช้ค่าคงที่ของทุกๆ ความเครียด แบ่งเป็นช่วงๆ ละ 0.05 ระหว่าง 0.05-0.8



รูปที่ 4.12 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะทางที่ได้จากการทดลองและการทำนายด้วย FEM ที่ใช้สมบัติวัสดุที่มาจากแบบจำลองที่ใช้ค่าคงที่ของทุกๆ ความเครียด แบ่งเป็นช่วงๆ ละ 0.05 ระหว่าง 0.05-0.8 ของโลหะผสม MAB

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะทาง ที่ได้แบบจำลอง FEM โดยใช้กราฟความเค้นจริง-ความเครียดจริง จากการทดสอบการกดขึ้นรูปร้อน นำมาเปรียบเทียบกับผลกราฟแรง-ระยะทางจากการทดลองจริง ในรูปที่ 4.14 นอกจากนี้กราฟความสัมพันธ์ของแรงและระยะทางที่ได้จากแบบจำลอง FEM ที่ใช้สมการซีเนอร์โฮโลมอนด์เปรียบเทียบกับกราฟจากการทดลองในรูปที่ 4.15 และ 4.16 มีความสัมพันธ์ระหว่างกราฟการทดลองและกราฟการทำนายเมื่อกราฟความเค้น-ความเครียดจริงจากการทดลองที่นำมาใช้โดยตรง จะทราบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานคงที่ ($\mu = 0.3$) ที่ได้จากการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ในความเป็นจริงแล้วค่าความเสียดทานระหว่างชิ้นงานและแม่พิมพ์จะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนรูปมากขึ้น เนื่องจากจะ Contact pressure ระหว่างชิ้นงานกับแม่พิมพ์ที่สูงขึ้น

4.5.3 การเปรียบเทียบระหว่างผลของแบบจำลองโดยใช้ค่าคงที่ของความเค้นสูงสุด



รูปที่ 4.13 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะทางที่ได้จากการทดลองและการทำนายด้วย FEM ที่ใช้สมบัติวัสดุที่พิจารณาจากค่ามาจากแบบจำลองความเค้นสูงสุดของโลหะผสม MAB

ผลจากการจำลองการกดขึ้นรูปร้อนของโลหะผสม MAB โดยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์โดยโปรแกรม DEFORM 3D แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนรูปที่อุณหภูมิสูงผลที่ได้จะแสดงให้เห็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะทางที่เกิดขึ้นภายในเนื้อวัสดุที่ถูกกดขึ้นรูปร้อนจะมีการเปลี่ยนรูปไปในทุกๆ ระยะการเพิ่มขึ้นของแรงอย่างรวดเร็ว

4.6 ผลการเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองกับผลการจำลองโดยใช้วิธีความผิดพลาดสัมพัทธ์เฉลี่ย (ARE)

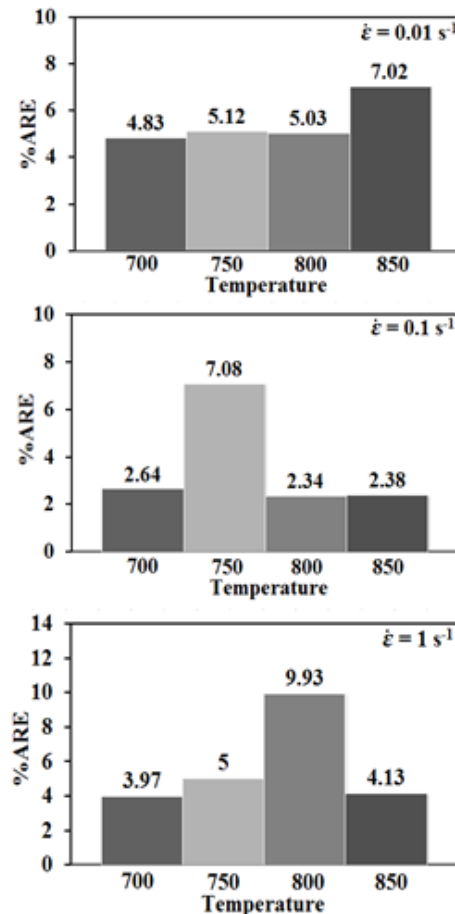
ความถูกต้องและความแม่นยำของผลการจำลองของไฟไนต์เอลิเมนต์ได้รับการวิเคราะห์โดยใช้ค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์เฉลี่ย (ARE) โดยเปอร์เซ็นต์ของความผิดพลาดสัมพัทธ์เฉลี่ยถูกคำนวณจากสมการดังนี้

$$\%ARE = \frac{1}{N} \sum \frac{|A_{Exp} - A_{Pred}|}{A_{Exp}} \times 100 \quad (4.17)$$

โดยที่ A_{Expt} เป็นข้อมูลจากการทดลอง และ A_{Pred} เป็นข้อมูลของการทำนาย

4.6.1 ผลเปรียบเทียบค่า ARE ที่ได้จากการทดสอบกับ FEM ที่ใช้สมบัติวัสดุที่มาจากกราฟความเค้น-ความเครียดจริง

การเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสัมพัทธ์เฉลี่ยระหว่างผลการทดลองและผลของการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ในกรณีที่ใช้กราฟความเค้น-ความเครียดจริงจากการทดลองเป็นสมบัติวัสดุของโลหะผสม MAB แสดงดังรูปที่ 4.14

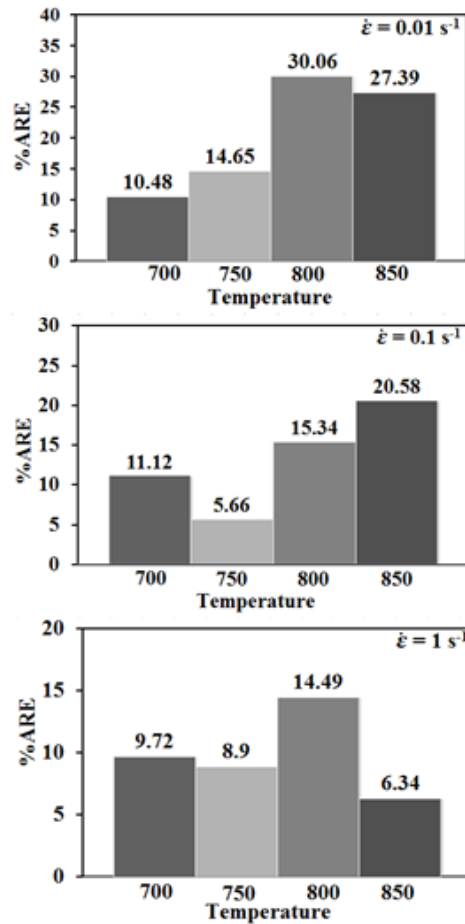


รูปที่ 4.14 การเปรียบเทียบของเปอร์เซ็นต์ของความผิดพลาดสัมพัทธ์เฉลี่ยระหว่างผลการทดลองกับ FEM ที่ใช้สมบัติวัสดุที่มาจากกราฟความเค้น-ความเครียดจริง

เมื่อนำเส้นโค้งไหลที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องไดลาโตมิเตอร์ไปใช้ในแบบจำลอง FEM ของการกดขึ้นรูปร้อน ผลที่ได้สรุปได้ดังนี้คือ

- กราฟในทุกๆ ช่วงของอุณหภูมิ มีแนวโน้มเดียวกันกับผลการทดลอง
- ค่าวิธีการผิดพลาดสัมพัทธ์เฉลี่ย (ARE) มีค่าโดยเฉลี่ยในทุกช่วงของอุณหภูมิ ไม่เกิน 10 %
- ที่อุณหภูมิการขึ้นรูป 700 องศาเซลเซียส อัตราความเครียด 0.1 ต่อวินาที มีค่า ARE ต่ำที่สุด คือ เท่ากับ 2.64 % รองลงมาคือ ที่อัตราความเครียด 1 และ 10 ต่อวินาที เท่ากับ 3.97% และ 4.83 % ตามลำดับ
- ที่อุณหภูมิการขึ้นรูป 750 องศาเซลเซียส อัตราความเครียด 1 ต่อวินาที มีค่า ARE ต่ำที่สุด คือ 5.0 % รองลงมาคือ ที่อัตราความเครียด 0.01 และ 0.1 ต่อวินาที เท่ากับ 5.12 % และ 7.08 % ตามลำดับ
- ที่อุณหภูมิการขึ้นรูป 800 องศาเซลเซียส อัตราความเครียด 0.1 ต่อวินาที มีค่า ARE ต่ำที่สุด คือ 2.34 % รองลงมาคือ ที่อัตราความเครียด 0.01 และ 0.1 ต่อวินาที เท่ากับ 5.03 % และ 9.93 % ตามลำดับ
- ที่อุณหภูมิการขึ้นรูป 850 องศาเซลเซียส อัตราความเครียด 0.1 ต่อวินาที มีค่า ARE ต่ำที่สุด คือ 2.38 % รองลงมาคือ ที่อัตราความเครียด 1 และ 0.01 ต่อวินาที เท่ากับ 4.13 % และ 7.02 % ตามลำดับ
- ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส อัตราความเครียด 0.1 ต่อวินาที มี ARE ต่ำสุด หมายความว่า ค่าความคลาดเคลื่อนต่ำสุด ส่วนที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ที่อัตราความเครียด 1 ต่อวินาทีมีค่า ARE สูงที่สุด

4.6.2 ผลเปรียบเทียบค่า ARE ที่ได้จากการทดสอบกับ FEM ที่ใช้สมบัติวัสดุที่มาจากกราฟ
ความเค้น-ความเครียดจริงโดยใช้ค่าคงที่ของทุกๆ ความเครียด แบ่งเป็นช่วงๆ ละ
0.05 ระหว่าง 0.05-0.8

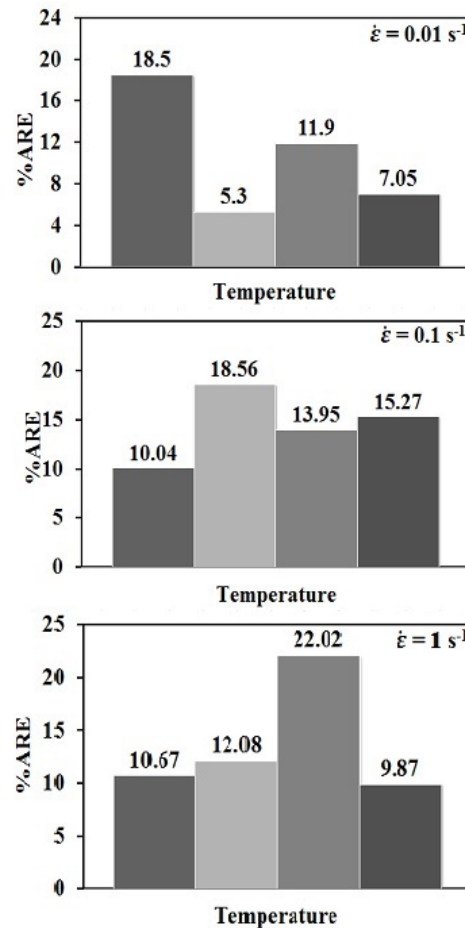


รูปที่ 4.15 การเปรียบเทียบของเปอร์เซ็นต์ของความผิดพลาดสัมพัทธ์เฉลี่ยระหว่างผลการทดลองกับ FEM ที่ใช้สมบัติวัสดุที่มาจากกราฟความเค้น-ความเครียดจริงโดยใช้ค่าคงที่ของทุกๆ ความเครียด แบ่งเป็นช่วงๆ ละ 0.05 ระหว่าง 0.05-0.8

เมื่อนำเส้นโค้งไหลที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องไดลาโตมิเตอร์ไปใช้ในแบบจำลอง FEM ของการกดขึ้นรูปร้อน ผลที่ได้สรุปได้ดังนี้คือ

- กราฟในทุก ๆ ช่วงของอุณหภูมิ มีแนวโน้มเดียวกันกับผลการทดลอง
- ค่าวิธีการผิดพลาดสัมพัทธ์เฉลี่ย (ARE) มีค่าโดยเฉลี่ยในทุกช่วงของอุณหภูมิ ไม่เกิน 30 %
- ที่อุณหภูมิการขึ้นรูป 700 องศาเซลเซียส อัตราความเครียด 1 ต่อวินาที มีค่า ARE ต่ำที่สุด คือ 9.72 % รองลงมาคือ ที่อัตราความเครียด 0.01 และ 0.1 ต่อวินาที เท่ากับ 10.48 % และ 11.12 % ตามลำดับ
- ที่อุณหภูมิการขึ้นรูป 750 องศาเซลเซียส อัตราความเครียด 0.1 ต่อวินาที มีค่า ARE ต่ำที่สุด คือ 5.66 % รองลงมาคือ ที่อัตราความเครียด 1 และ 0.01 ต่อวินาที เท่ากับ 8.9 % และ 14.65 % ตามลำดับ
- ที่อุณหภูมิการขึ้นรูป 800 องศาเซลเซียส อัตราความเครียด 1 ต่อวินาที มีค่า ARE ต่ำที่สุด คือ 14.49 % รองลงมาคือ ที่อัตราความเครียด 0.1 และ 0.01 ต่อวินาที เท่ากับ 15.34 % และ 30.06 % ตามลำดับ
- ที่อุณหภูมิการขึ้นรูป 850 องศาเซลเซียส อัตราความเครียด 1 ต่อวินาที มีค่า ARE ต่ำที่สุด คือ 6.34 % รองลงมาคือ ที่อัตราความเครียด 0.1 และ 0.01 ต่อวินาที เท่ากับ 20.58 % และ 27.39 % ตามลำดับ
- ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส อัตราความเครียด 1 ต่อวินาที มี ARE ต่ำสุด หมายความว่า ค่าความคลาดเคลื่อนต่ำสุด ส่วนที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ที่อัตราความเครียด 0.01 ต่อวินาที มีค่า ARE สูงที่สุด

4.6.3 ผลเปรียบเทียบค่า ARE ที่ได้จากการทดสอบกับ FEM ที่ใช้สมบัติวัสดุที่มาจากกราฟ ความเค้น-ความเครียดจริงโดยใช้ค่าคงที่ของความเค้นสูงสุด



รูปที่ 4.16 การเปรียบเทียบของเปอร์เซ็นต์ของความผิดพลาดสัมพัทธ์เฉลี่ยระหว่างผลการทดลองกับ FEM ที่ใช้สมบัติวัสดุที่มาจากกราฟความเค้น-ความเครียดจริงโดยใช้ค่าคงที่ของความเค้นสูงสุด

เมื่อนำเส้นโค้งไหลที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องไดลาโตมิเตอร์ไปใช้ในแบบจำลอง FEM ของการกดขึ้นรูปร้อน ผลที่ได้สรุปได้ดังนี้คือ

- กราฟในทุกๆ ช่วงของอุณหภูมิ มีแนวโน้มเดียวกับผลการทดลอง
- ค่าวิธีการผิดพลาดสัมพัทธ์เฉลี่ย (ARE) มีค่าโดยเฉลี่ยในทุกช่วงของอุณหภูมิ ไม่เกิน 25 %
- ที่อุณหภูมิการขึ้นรูป 700 องศาเซลเซียส อัตราความเครียด 0.1 ต่อวินาที มีค่า ARE ต่ำที่สุด คือ 10.04 % รองลงมาคือ ที่อัตราความเครียด 1 และ 10 ต่อวินาที เท่ากับ 10.67 % และ 18.5 % ตามลำดับ

- ที่อุณหภูมิการขึ้นรูป 750 องศาเซลเซียส อัตราความเครียด 0.01 ต่อวินาที มีค่า ARE ต่ำที่สุด คือ 5.3 % รองลงมาคือ ที่อัตราความเครียด 1 และ 0.1 ต่อวินาที เท่ากับ 12.08 % และ 18.56 % ตามลำดับ
- ที่อุณหภูมิการขึ้นรูป 800 องศาเซลเซียส อัตราความเครียด 1 ต่อวินาที มีค่า ARE ต่ำที่สุด คือ 22.02 % รองลงมาคือ ที่อัตราความเครียด 0.1 และ 0.01 ต่อวินาที เท่ากับ 13.95 % และ 11.9 % ตามลำดับ
- ที่อุณหภูมิการขึ้นรูป 850 องศาเซลเซียส อัตราความเครียด 0.1 ต่อวินาที มีค่า ARE ต่ำที่สุด คือ 15.27 % รองลงมาคือ ที่อัตราความเครียด 1 และ 0.01 ต่อวินาที เท่ากับ 9.84 % และ 7.05 % ตามลำดับ
- ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส อัตราความเครียด 0.01 ต่อวินาที มี ARE ต่ำสุด หมายความว่า ความคลาดเคลื่อนต่ำสุด ส่วนที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ที่อัตราความเครียด 1 ต่อวินาที มีค่า ARE สูงที่สุด

จากรูปที่ 4.14, 4.15 และ 4.16 แสดงให้เห็นการเปรียบเทียบของเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสัมพัทธ์เฉลี่ยระหว่างผลการทดลองและผลของการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ เมื่อใช้การกำหนดสมบัติวัสดุด้วยการใช้ค่าคงที่ซีเนอร์โฮโลมอนด์ของโลหะ MAB ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสัมพัทธ์เฉลี่ยที่คำนวณได้มีค่าความผิดพลาดน้อยที่สุดสำหรับวิธีการทั้งสามคือ การเปรียบเทียบระหว่างผลการทดสอบกับผลของแบบจำลองเส้นโค้งไหล การเปรียบเทียบระหว่างผลของแบบจำลองโดยใช้ค่าคงที่ของทุกๆ ความเครียด แบ่งเป็นช่วงๆ ละ 0.05 ระหว่าง 0.05-0.8 และการเปรียบเทียบระหว่างผลของแบบจำลองโดยใช้ค่าคงที่ของความเค้นสูงสุดอยู่ประมาณ 2.34 %, 5.66 % และ 5.3 % ตามลำดับ รูปที่ 4.15 ค่าความผิดพลาดมากที่สุดประมาณ 30.06 % ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสและอัตราความเครียด 0.01 ต่อวินาที ผลมาจากการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้ค่าคงที่ของสมการซีเนอร์โฮโลมอนด์ สรุปว่าผลการทำแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้กราฟความเค้น-ความเครียดจริงจากผลการทดลองโดยตรงมีความแม่นยำมากกว่าการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้ค่าคงที่ของสมการซีเนอร์โฮโลมอนด์ อย่างไรก็ตามในการทำนายระหว่างผลการทดลองกับผลการทำแบบจำลอง ผลที่ได้จากการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์คือความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะทาง ซึ่งจากผลที่ได้และเป็นที่ยอมรับมีค่าความผิดพลาดน้อยที่สุดคือแบบจำลองของเส้นโค้งไหลสามารถเป็นที่ยอมรับได้สำหรับ

โลหะผสม MAB นำไปใช้สำหรับการประยุกต์ใช้แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของกระบวนการขึ้นรูปรีออนสำหรับพฤติกรรมการไหลของโลหะผสม MAB

การทำแบบจำลองของโปรแกรมโดยการใช้สมการในการคำนวณที่เหมาะสม การกำหนดคุณสมบัติของวัสดุที่เหมาะสมและการกำหนดสภาวะขอบเขตที่เหมาะสมทำให้การวิเคราะห์ผลโดยการจำลองแบบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ให้ผลที่ใกล้เคียงการทดสอบจริงมากที่สุด ซึ่งจะเป็นประโยชน์อย่างมากในการพัฒนาและออกแบบชิ้นงาน และการเพิ่มประสิทธิภาพในกรรมวิธีการขึ้นรูปรีออนโลหะผสม MAB และลดต้นทุนในการลองผิดลองถูก