



การทำแบบจำลองของวัสดุแมงกานีสอะลูมิเนียมบรอนซ์ภายใต้การกดขึ้นรูปที่อุณหภูมิสูง

นางสาวอัจฉริยา อังศุศิริพงษ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีการขึ้นรูปวัสดุและนวัตกรรมการผลิต
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ปีการศึกษา 2557

การทำแบบจำลองของวัสดุเมกานีสอะลูมิเนียมบรอนซ์ภายใต้การกดขึ้นรูปที่อุณหภูมิสูง

นางสาวอัจฉริยา อังสุศิริพงศ์ วท.บ. (ฟิสิกส์)

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีการขึ้นรูปวัสดุและนวัตกรรมการผลิต

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ปีการศึกษา 2557

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ดร.พงษ์ศักดิ์ ถึงสุข)

..... กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

(รศ. ดร.สุรศักดิ์ สุรนันทชัย)

..... กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์(ร่วม)

(ผศ. ดร.วิฑูร อุทัยแสงสุข)

..... กรรมการ

(นาวาโท ดร.พินัย มุ่งสันติสุข)

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การทำแบบจำลองของวัสดุแมงกานีสอะลูมิเนียมบรอนซ์ภายใต้การกดขึ้นรูปที่อุณหภูมิสูง
หน่วยกิต	18
ผู้เขียน	นางสาวอัจฉริยา อังศุศิริพงษ์
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ. ดร.สุรศักดิ์ สุรนันทชัย ผศ. ดร.วิฑูร อุทัยแสงสุข
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	เทคโนโลยีการขึ้นรูปวัสดุและนวัตกรรมการผลิต
ภาควิชา	วิศวกรรมเครื่องมือและวัสดุ
คณะ	วิศวกรรมศาสตร์
ปีการศึกษา	2557

บทคัดย่อ

แมงกานีสอะลูมิเนียมบรอนซ์หรือโลหะผสม MAB เป็นโลหะที่มีส่วนผสมหลักคือ ทองแดงถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในชิ้นส่วนต่างๆของเรือเนื่องจากเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงสูงและมีความต้านทานการกัดกร่อนที่ดี วัตถุประสงค์ของงานนี้คือศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปของโลหะผสม MAB ภายใต้เงื่อนไขการกดขึ้นรูปร้อนที่อุณหภูมิ 700, 750, 800 และ 850 องศาเซลเซียสและที่อัตราความเครียด 0.01, 0.1, 1 และ 10 ต่อวินาที ผลการทดลองที่ได้คือกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นจริง-ความเครียดจริงที่สภาวะต่างๆ จากผลดังกล่าวพบว่าเกิดการคืนตัวแบบพลศาสตร์และการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ในวัสดุ ที่สภาวะอัตราความเครียดสูงและอุณหภูมิต่ำอย่างชัดเจน กราฟความเค้น-ความเครียดของโลหะผสม MAB ที่ทุกอุณหภูมิและทุกอัตราความเครียดแสดงค่าความเค้นสูงสุดเพียงค่าเดียวซึ่งแสดงถึงการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ นอกจากนี้ยังได้ทำนายความเค้นไหลของโลหะผสม MAB ที่อุณหภูมิสูงโดยอาศัยแบบจำลองของวัสดุที่พิจารณาทั้งกลไกการแข็งตัวและกลไกการอ่อนตัวโดยการประยุกต์ใช้สมการของฮาร์รี่เนิสซึ่งในสมการดังกล่าวจะใช้ตัวแปรซีเนอร์ไฮโลมอนด์ในรูปแบบฟังก์ชันไฮเพอร์โบลิกซายด์เพื่อกำหนดค่าความเค้นไหลของวัสดุที่สัมพันธ์กับอุณหภูมิ ความเครียด และอัตราความเครียด จากผลของแบบจำลองจะได้ค่าพลังงานกระตุ้น

(activation energy) ของโลหะผสม MAB อยู่ที่ประมาณ 194 กิโลจูล/โมล และเมื่อนำผลการทดลองมาเปรียบเทียบกับผลการทำนายจากแบบจำลอง จากนั้นจึงนำค่าคงที่ของวัสดุในสมการซีเนอร์ไฮโลมอนต์ใช้ในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ในการจำลองเทียบกับผลการทดลองและนำผลมาคำนวณรวมทั้งหาค่าความผิดพลาดเฉลี่ย นอกจากนี้ยังได้ใช้แบบจำลอง Dynamic Material Model (DMM) มาทำนายพฤติกรรมความเสถียรภาพในการขึ้นรูปของวัสดุในระหว่างการขึ้นรูปร้อน โดยอาศัยข้อมูลจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดจริงของโลหะผสม MAB ในการเปลี่ยนรูปแบบถาวรจะเกิดพลังงานความร้อนขึ้นเมื่ออัตราการขึ้นรูปสูง ส่งผลให้เกิดพฤติกรรมการอ่อนตัวของวัสดุ และทำให้เกิดข้อจำกัดในการขึ้นรูปวัสดุได้

คำสำคัญ: สมการฮาร์รีเนียส / การเปลี่ยนรูปโดยการอัด/ แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์/ เมงกานีส อะลูมิเนียมบรอนซ์/ พฤติกรรมการไหล/ สมการซีเนอร์ไฮโลมอนต์

Thesis Title	Modeling of Manganese Aluminum Bronze Under Compression at High Temperatures
Thesis Credits	18
Candidate	Miss Auchariya Aungsusiripong
Thesis Advisors	Assoc. Prof. Dr. Surasak Suranuntchai Asst. Prof. Dr. Vitoon Uthaisangsuk
Program	Master of Engineering
Field of Study	Materials Processing Technology and Manufacturing Innovation
Department	Tool and Materials Engineering
Faculty	Engineering
Academic Year	2014

Abstract

Manganese aluminum bronze or MAB alloy is a copper-based alloy, which is commonly applied in marine applications for its high strength and good corrosion resistance. The aim of this study was to investigate the plastic flow behavior of an as-cast MAB alloy under various compressive deformation conditions. The forming temperatures of 700, 750, 800 and 850°C and strain rates of 0.01, 0.1, 1.0 and 10 s⁻¹ were examined. The higher strain rates and lower temperatures obviously led to increasing flow stresses. The resultant true stress-true strain curves exhibited dynamic recovery (DRV) and dynamic recrystallization (DRX). All of the stress-strain responses showed a single peak stress, which was an indication of that DRX occurred during hot deformation. The deformation behavior was described using a material models incorporating both work hardening and softening mechanisms. The applied constitutive equation was based on an Arrhenius model, for which the Zener-Hollomon parameter, in a hyperbolic-sine function, was incorporated. By this manner, the relationships between flow stress, temperature, strain and strain rate could be established. The model was used for FE simulations of the compression tests. An activation energy of 194 kJ/mol was used for the MAB alloy. The predicted force-displacement curves were

compared with those from the experiments and the average relative error (ARE) were calculated. Moreover, the dynamic material model (DMM) was used to predict deformation behavior of material during hot deforming based on true stress-strain curves which temperature and strain rate of MAB alloy. In plastic deformation, resulting adiabatic heating increase MAB alloy with high strain rate as affect to softening mechanism and limited forming materials.

Keywords: Arrhenius equation / Compressive deformation / FE simulation / Manganese Aluminum Bronze / Flow behavior / Zener-Hollomon parameters

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รศ.ดร.สุรศักดิ์ สุรนนท์ชัย อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์และผศ.ดร.วิฑูร อุทัยแสงสุข อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ได้ให้ความรู้ทางด้านวิชาการ แนวคิด คำปรึกษาและคำแนะนำในการดำเนินงานวิจัยสำหรับการแก้ไขปัญหาอุปสรรคต่างๆ เป็นอย่างดี รวมทั้งขอขอบคุณดร. พงษ์ศักดิ์ ถึงสุข อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีที่เป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้ความรู้เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยและให้คำแนะนำในการตรวจสอบและแก้ไขวิทยานิพนธ์ และ นาวาโทดร. พิณัย มุ่งสันติสุข คณะวิศวกรรมศาสตร์นานาชาติสิรินธรไทย-เยอรมัน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่กรุณาให้เกียรติเป็นคณะกรรมการที่ให้คำแนะนำ ข้อเสนอแนะ ปรับปรุงวิทยานิพนธ์และแก้ไขวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์ และผู้วิจัยขอขอบพระคุณนาวาโทบพิท ทศเทพพิทักษ์ ที่ให้คำปรึกษา ความรู้เกี่ยวกับวัสดุเมกานีสอลูมิเนียมบรอนซ์ ถ่ายทอดประสบการณ์และแนวคิดการทำงานวิจัย จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วง

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณนาวาโทดร. เสวียง เตือนบุญ โรงเรียนนายเรือที่กรุณาอนุเคราะห์ห้องสำนักงานทดสอบให้กับผู้วิจัยทำให้งานวิจัยนี้เสร็จสมบูรณ์ลุล่วงไปด้วยดี และที่สำคัญขอขอบคุณสถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย ที่ให้ความอนุเคราะห์สำหรับการทดสอบไดลาโตมิเตอร์ นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณรุ่นพี่ รุ่นน้องและเพื่อนๆในกลุ่ม Metal forming and material modeling คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ช่วยเหลืองานด้านต่างๆ ในงานวิจัย สุดท้ายนี้เห็นสิ่งอื่นใดขอขอบพระคุณ บิดา มารดาและครอบครัว ที่เป็นกำลังใจในการทำงานและสนับสนุนผู้วิจัยตลอดมา ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้ง ขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	๗
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	๘
กิตติกรรมประกาศ	๑๑
สารบัญ	๑๒
รายการตาราง	๑๓
รายการรูปประกอบ	๑๔
รายการสัญลักษณ์	๑๕
ประมวลศัพท์และคำย่อ	๑๖

บทที่

1. บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.5 การดำเนินงาน	3
2. ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 แมงกานีสอะลูมิเนียมบรอนซ์	4
2.1.1 ตัวอย่างการใช้งานโลหะผสม MAB เกรดต่างๆ	5
2.2 กระบวนการขึ้นรูปวัสดุก่อนที่อุณหภูมิสูง	7
2.2.1 ประเภทการทอบขึ้นรูปแบ่งตามอุณหภูมิการขึ้นรูป	8
2.2.2 ประเภทการทอบขึ้นรูปแบ่งตามลักษณะของแม่พิมพ์	9
2.3 พฤติกรรมการเปลี่ยนรูปของวัสดุ	11

2.3.1	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดทางวิศวกรรม	14
2.3.2	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดจริง	17
2.4	การคืนตัวและการเกิดผลึกใหม่	20
2.4.1	การคืนตัว	20
2.4.2	การเกิดผลึกใหม่	21
2.4.3	การโตของเกรน	22
2.5	การทำแบบจำลองวัสดุภายใต้สภาวะการขึ้นรูปร้อน	25
2.5.1	การทำนายพฤติกรรมความเค้น-ความเครียดของวัสดุโดยใช้ สมการซีเนอร์โฮโลมอนด์	25
2.5.2	การทำนายพฤติกรรมความเค้น-ความเครียดของวัสดุโดยใช้สมการซิงกาล่า	27
2.5.3	การทำนายพฤติกรรมความเค้น-ความเครียดของวัสดุโดยใช้สมการอาลามี่	27
2.5.4	การหาค่าความเค้นสูงสุดและค่าความเค้นวิกฤต	28
2.6	ความเสถียรภาพการขึ้นรูป	29
2.7	แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการขึ้นรูปโลหะก่อน	30
2.8	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	34
2.8.1	งานวิจัยเกี่ยวกับสมการแบบจำลองของวัสดุ	34
2.8.1.1	สมการซีเนอร์โฮโลมอนด์	34
2.8.1.2	สมการซิงกาล่าและสมการอาลามี่	35
2.8.2	งานวิจัยที่ใช้ในแบบจำลองทางพลศาสตร์ของวัสดุ	36
3.	การดำเนินงานวิธีวิจัย	37
3.1	วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย	37
3.1.1	วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย	37
3.1.2	เครื่องไดลาโตมิเตอร์	38
3.2	การเตรียมชิ้นงานทดสอบ	41
3.3	ขั้นตอนการทดสอบการกดขึ้นรูปร้อน	41

4. ผลการดำเนินงานวิจัย	43
4.1 พฤติกรรมการเปลี่ยนรูปของวัสดุในการทดสอบกดขึ้นรูปร้อน	43
4.1.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดจริง	43
4.1.2 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม MAB แบบหล่อที่ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนเซชัน	45
4.2 ทำนายพฤติกรรมการไหลของวัสดุที่อุณหภูมิสูง	45
4.2.1 การสร้างแบบจำลองเพื่อทำนายพฤติกรรมการไหลของวัสดุโดยใช้สมการซีเนอร์โฮโลมอนด์	45
4.3 การเปรียบเทียบระหว่างกราฟความเค้น-ความเครียดจริงของผลการทดลองและการทำนายด้วยสมการซีเนอร์โฮโลมอนด์	52
4.4 ผลการจำลองด้วยโปรแกรม DEFORM 3D	56
4.4.1 ผลจากการทดสอบที่ได้จากการทดสอบด้วยไดลาโตมิเตอร์	57
4.5 ผลการจำลองพฤติกรรมวัสดุในการกดขึ้นรูปที่อุณหภูมิสูง	58
4.5.1 การเปรียบเทียบระหว่างผลการทดสอบกับผลของแบบจำลองเส้นโค้งไหล	58
4.5.2 การเปรียบเทียบระหว่างผลของแบบจำลองโดยใช้ค่าคงที่ของทุกๆความเครียดแบ่งเป็นช่วงๆ ละ 0.05 ระหว่าง 0.05-0.8	59
4.5.3 การเปรียบเทียบระหว่างผลของแบบจำลองโดยใช้ค่าคงที่ของความเค้นสูงสุด	60
4.6 ผลการเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองกับผลการจำลองโดยใช้วิธีความผิดพลาดสัมพัทธ์เฉลี่ย	60
4.6.1 ผลเปรียบเทียบค่า ARE ที่ได้จากการทดสอบกับ FEM ที่ใช้สมบัติวัสดุที่มาจากกราฟความเค้น-ความเครียดจริง	61
4.6.2 ผลเปรียบเทียบค่า ARE ที่ได้จากการทดสอบกับ FEM ที่ใช้สมบัติวัสดุที่มาจากกราฟความเค้น-ความเครียดจริงโดยใช้ค่าคงที่ของทุกๆความเครียด แบ่งเป็นช่วงๆ ละ 0.05 ระหว่าง 0.05-0.8	63
4.6.3 ผลเปรียบเทียบค่า ARE ที่ได้จากการทดสอบกับ FEM ที่ใช้สมบัติวัสดุที่มาจากกราฟความเค้น-ความเครียดจริงโดยใช้ค่าคงที่ของความเค้นสูงสุด	65

5. ผลการทำแบบจำลองวัสดุในสภาวะการกดขึ้นรูปร้อน	68
5.1 ผลการสร้างแบบจำลองทำนายพฤติกรรมการไหลโดยใช้สมการซิงก่าล่า	68
5.1.1 อัตราความเครียดแข็ง	68
5.1.2 อัตราการอ่อนตัว	70
5.1.3 สมการซิงก่าล่า	74
5.2 ผลการสร้างแบบจำลองเพื่อทำนายพฤติกรรมของการไหลของวัสดุโดยใช้สมการอาลามี่	76
5.3 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคและสัดส่วนปริมาตรของการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์	79
5.4 การเปรียบเทียบกราฟความเค้น-ความเครียดจริงจากผลการทดลองและการทำนายของสมการซิงก่าล่าและสมการอาลามี่	80
5.5 ผลการทำนายเสถียรภาพการขึ้นรูปของโลหะผสม MAB ในระหว่างการกดขึ้นรูปร้อน	83
6. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	89
6.1 สรุปผลการทำนายพฤติกรรมการไหลที่อุณหภูมิสูง	89
6.2 สรุปผลการจำลองการตีขึ้นเทียบกับการทดสอบที่อุณหภูมิสูงด้วยโปรแกรมDEFORM 3D	90
6.3 ข้อเสนอแนะ	91
เอกสารอ้างอิง	92
ภาคผนวก	
ก โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์	101
ข ผลการสร้างแบบจำลองทำนายพฤติกรรมของการไหลของวัสดุโดยใช้สมการซิงก่าล่า	108

ประวัติผู้วิจัย

รายการตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 คุณสมบัติทางกลและสมบัติทางกายภาพต่างๆ ของโลหะผสม MAB	5
3.1 ส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสม MAB ที่ใช้ในงานวิจัย	37
3.2 คุณสมบัติของเครื่องไคลาโตมิเตอร์รุ่น 805A/D	39
4.1 ค่าคงที่ต่างๆ ของฟังก์ชันระหว่างพารามิเตอร์ n_2 , β , α , Q และ $\ln A$ และ ความเครียดที่หาโดยวิธี fitting ด้วยพหุนามลำดับที่ 3 ของโลหะผสม MAB ที่ศึกษา	51
5.1 จากสมการที่เกี่ยวข้องกับอัตราความเครียดแข็งและอัตราการอ่อนตัวคำนวณที่ อัตราความเครียด 0.01 ต่อวินาที	72
5.2 จากสมการที่เกี่ยวข้องกับอัตราความเครียดแข็งและอัตราการอ่อนตัวคำนวณที่ อัตราความเครียด 0.1 ต่อวินาที	72
5.3 จากสมการที่เกี่ยวข้องกับอัตราความเครียดแข็งและอัตราการอ่อนตัวคำนวณที่ อัตราความเครียด 1 ต่อวินาที	73
5.4 จากสมการที่เกี่ยวข้องกับอัตราความเครียดแข็งและอัตราการอ่อนตัวคำนวณที่ อัตราความเครียด 10 ต่อวินาที	73
5.5 ค่าคงที่ C ที่หาได้สำหรับสมการซึ่งค่าที่อุณหภูมิและอัตราความเครียดต่างๆ	75
5.6 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ทางสถิติ (R) เปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	82
5.7 สรุปขอบเขตของแต่ละเกณฑ์เสถียรภาพในทุกช่วงอุณหภูมิและอัตราความเครียด ในการวิเคราะห์เสถียรภาพการกคขึ้นรูปร้อนของโลหะผสม MAB	88

รายการรูปประกอบ

รูป		หน้า
2.1	ลักษณะ โครงสร้างทางจุลภาคของ โลหะผสม MAB	4
2.2	ตัวอย่างชิ้นงานที่ทำด้วยวัสดุโลหะผสมเกรด C95800	6
2.3	ตัวอย่างชิ้นงานที่ทำด้วยวัสดุโลหะผสมเกรด C95400	6
2.4	ตัวอย่างชิ้นงานที่ทำด้วยวัสดุโลหะผสมเกรด C95800	7
2.5	ตัวอย่างชิ้นงานที่ผ่านการผลิตด้วยการทุบขึ้นรูปร้อน	9
2.6	การทุบขึ้นรูปแบบแม่พิมพ์เปิด	9
2.7	กรรมวิธีการทุบขึ้นรูปร้อน	10
2.8	บริเวณต่างๆของการเปลี่ยนรูปของวัสดุในการตีขึ้นรูป	10
2.9	พฤติกรรมความเค้น-ความเครียดในการเปลี่ยนรูปของวัสดุ	11
2.10	การหาค่ามอดูลัสสภาพยืดหยุ่น	12
2.11	ลักษณะการหาอัตราส่วนปัวส์ซอง	13
2.12	ลักษณะความเค้นแรงดึง	14
2.13	ลักษณะความเค้นแรงเฉือน	15
2.14	ลักษณะความเค้นแรงอัด	15
2.15	ลักษณะความเครียดแรงดึง	16
2.16	ลักษณะความเครียดแรงเฉือน	17
2.17	การเปรียบเทียบกราฟความเค้น-ความเครียดกับความเค้น-ความเครียดจริง	18
2.18	ลักษณะพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นของวัสดุ	20
2.19	อิทธิพลของการคืนตัว การเกิดผลึกใหม่ และการเติบโตของผลึก	22
2.20	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดจริงของวัสดุโลหะผสมอลูมิเนียม 7075 ที่อัตราความเครียดและอุณหภูมิที่แตกต่างกัน (ก) ที่อัตราความเครียด 0.01 ต่อวินาที (ข) ที่อัตราความเครียด 0.1 ต่อวินาที (ค) ที่อัตราความเครียด 1 ต่อวินาที (ง) ที่อัตราความเครียด 10 ต่อวินาที	23

รูป	หน้า
2.21 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดจริงของวัสดุโลหะผสมแมกนีเซียม AZ80 ที่อัตราความเครียดและอุณหภูมิที่แตกต่างกัน (ก) ที่อัตราความเครียด 0.01 ต่อวินาที (ข) ที่อัตราความเครียด 0.1 ต่อวินาที (ค) ที่อัตราความเครียด 1 ต่อวินาที (ง) ที่อัตราความเครียด 10 ต่อวินาที	24
2.22 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการขึ้นรูปโลหะก้อน	31
2.23 ขั้นตอนการใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์	32
2.24 แบบจำลองของชิ้นงาน	32
2.25 แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์	33
2.26 กำหนดให้การเคลื่อนที่ในแกน Z เท่ากับ 0	33
2.27 การแสดงผลของโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์	34
3.1 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม MAB ดั้งเดิมที่ผลิตด้วยการหล่อด้วย (ก) ก้อนจุลทรรศน์แบบแสง (ข) ก้อนจุลทรรศน์แบบส่องกราด โหมด BSE	38
3.2 เครื่องไคลาโตมิเตอร์	40
3.3 ระบบให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ	41
3.4 ขนาดชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบการกดขึ้นรูปร้อนด้วยเครื่องไคลาโตมิเตอร์	41
3.5 ขนาดชิ้นงานที่ได้เตรียมบ่าทั้งสองข้างเพื่อใส่สารหล่อลื่น	42
3.6 กระบวนการทดสอบการเปลี่ยนรูปร้อน	42
4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดจริงของชิ้นงานทดสอบโลหะผสม MAB เมื่อถูกกดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 700, 750, 800 และ 850 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราความเครียด 0.01, 0.1, 1 และ 10 ต่อวินาที	44
4.2 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม MAB ที่ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนเซชัน ที่ถ่ายด้วย (ก) ก้อนจุลทรรศน์แบบแสง (ข) ก้อนจุลทรรศน์แบบส่องกราด โหมด BSE	45
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง (ก) $\ln \dot{\epsilon}$ และ $\ln \sigma$ (ข) $\ln \dot{\epsilon}$ และ σ สำหรับการหาค่าพารามิเตอร์ n_1 และ β	47
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	48

รูป	หน้า
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln Z$ และ $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$	49
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร (ก) n_2 (ข) β (ค) α (ง) Q (จ) $\ln A$ และความเครียดจริงของชิ้นงานทดสอบโลหะผสม MAB ที่ผ่านการกดขึ้นรูปร้อน	50
4.7 การเปรียบเทียบกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดจริงที่อุณหภูมิ 700, 750, 800 และ 850 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราความเครียด 0.01, 0.1, 1 และ 10 ต่อวินาทีที่ได้จากการทำนายด้วยสมการซีเนอร์โฮโลมอนด์และผลการทดลองของโลหะผสม MAB	53
4.8 กราฟเปรียบเทียบผลการทดลองและการทำนายโดยสมการซีเนอร์โฮโลมอนด์	54
4.9 การกระจายค่าความเครียดบนชิ้นงานที่ผ่านการกดขึ้นรูปร้อนที่ค่าการลดลงของความสูงแตกต่างกัน	56
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะกดของการกดขึ้นรูปร้อนของโลหะผสม MAB ที่ได้จากการทดลอง	57
4.11 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะทางที่ได้จากการทดลองและการทำนายด้วย FEM โดยใช้สมบัติวัสดุที่ได้จากการทดลองจริงของโลหะผสม MAB	58
4.12 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะทางที่ได้จากการทดลองและการทำนายด้วย FEM โดยใช้สมบัติวัสดุที่มาจากแบบจำลองที่ใช้ค่าคงที่ของทุกๆ ความเครียดแบ่งเป็นช่วงๆ ละ 0.05 ระหว่าง 0.05-0.8 ของโลหะผสม MAB	59
4.13 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะทางที่ได้จากการทดลองและการทำนายด้วย FEM ที่ใช้สมบัติวัสดุที่พิจารณาจากค่ามาจากแบบจำลองความเค้นสูงสุดของโลหะผสม MAB	60
4.14 การเปรียบเทียบของเปอร์เซ็นต์ของความผิดพลาดสัมพันธ์เฉลี่ยระหว่างผลการทดลองกับ FEM ที่ใช้สมบัติวัสดุที่มาจากกราฟความเค้น-ความเครียดจริง	61
4.15 การเปรียบเทียบของเปอร์เซ็นต์ของความผิดพลาดสัมพันธ์เฉลี่ยระหว่างผลการทดลองกับ FEM ที่ใช้สมบัติวัสดุที่มาจากกราฟความเค้น-ความเครียดจริงโดยใช้ค่าคงที่ของทุกๆ ความเครียด แบ่งเป็นช่วงๆ ละ 0.05 ระหว่าง 0.05-0.8	63

รูป	หน้า
4.16 การเปรียบเทียบของเปอร์เซ็นต์ของความผิดพลาดสัมพัทธ์เฉลี่ยระหว่างผลการทดลองกับ FEM ที่ใช้สมบัติวัสดุที่มาจากกราฟความเค้น-ความเครียดจริง โดยใช้ค่าคงที่ของความเค้นสูงสุด	65
5.1 การเปลี่ยนความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดจริงเทียบกับค่าความเค้น	68
5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความเครียดแข็งกับความเค้นจริงที่อุณหภูมิ 700, 750, 800 และ 850 องศาเซลเซียสและอัตราความเครียด 0.01, 0.1, 1 และ 10 ต่อวินาทีของการกดขึ้นรูปร้อนของโลหะผสม MAB	69
5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอ่อนตัว ($\theta = d\sigma/d\varepsilon$) กับความเครียด (σ) ที่ 750 องศาเซลเซียส และอัตราความเครียด 0.1 ต่อวินาทีของโลหะผสม MAB ที่ผ่านการทอบขึ้นรูปร้อน	70
5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอ่อนตัวกับความเค้นจริงที่อุณหภูมิ 700, 750, 800 และ 850 องศาเซลเซียสและอัตราความเครียด 0.01, 0.1, 1 และ 10 ต่อวินาทีของการกดขึ้นรูปร้อนของโลหะผสม MAB	71
5.5 พล็อตหาค่าคงที่ C ของสมการซิงก่าล่าที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสด้วยอัตราความเครียด 1 ต่อวินาที	74
5.6 การเปรียบเทียบกราฟความเค้น-ความเครียดจริงที่ได้จากการทำนายด้วยสมการซิงก่าล่าและผลการทดลองที่อุณหภูมิ 700, 750, 800 และ 850 องศาเซลเซียสและอัตราความเครียด 0.01, 0.1, 1 และ 10 ต่อวินาที	75
5.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln[\ln(1/(1-X_d))]$ และ $\ln[(\varepsilon - \varepsilon_c)/\varepsilon_p]$ ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส	77
อัตราความเครียด 0.01 ต่อวินาทีของการกดขึ้นรูปร้อนของโลหะผสม MAB	
5.8 สัดส่วนปริมาณของการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ที่ อุณหภูมิ 700, 750, 800 และ 850 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราความเครียด 0.01, 0.1, 1 และ 10 ต่อวินาทีที่ทำนายด้วยสมการอาลามี่	77

รูป		หน้า
5.9	โครงสร้างทางจุลภาคที่อัตราความเครียด 1 ต่อวินาที (ก) ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส (ข) ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส	80
5.10	การเปรียบเทียบกราฟความเค้น-ความเครียดที่ได้การทำนายโดยใช้สมการซิงกิล่า สมการอาลามี่และผลการทดลองของชิ้นงานทดสอบ MAB ที่เกิดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 700, 750, 800 และ 850 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราความเครียด 0.01, 0.1, 1 และ 10 ต่อวินาที	81
5.11	ความสัมพันธ์ระหว่างผลการทดลองและการทำนายโดยสมการซิงกิล่ากับสมการอาลามี่	82
5.12	กราฟระหว่าง $\log \sigma_p$ เทียบกับ $\log \dot{\epsilon}$ สำหรับค่านวนค่า m	84
5.13	กราฟระหว่าง $\log \sigma$ เทียบกับ $1/T$ สำหรับค่านวนค่า S	85
5.14	กราฟระหว่าง m เทียบกับ $\log \dot{\epsilon}$ ที่แต่ละอุณหภูมิ	86
5.15	กราฟระหว่าง s เทียบกับ $\log \dot{\epsilon}$ ที่แต่ละอุณหภูมิ	87

รายการสัญลักษณ์

A	=	ค่าคงที่วัสดุ A
$AARE$	=	ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดสัมพัทธ์
C	=	ค่าเฉลี่ยของคงที่ของวัสดุ C
E	=	ข้อมูลการทดลอง
\bar{E}	=	ค่าเฉลี่ยของ E
k	=	ค่าคงที่ของวัสดุ k
m	=	ความสามารถในการตอบสนองต่ออัตราความเครียด
\dot{m}	=	$\partial m / \partial \log \dot{\epsilon}$
n	=	ค่าคงที่วัสดุ n ของการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์
n_1	=	ค่าคงที่วัสดุ n_1
n_2	=	ค่าคงที่วัสดุ n_2
Q	=	พลังงานกระตุ้น
R	=	ค่าคงที่ของแก๊ส
R	=	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์
S	=	ความสามารถในการตอบสนองต่ออุณหภูมิ
S	=	ค่าการทำนายจากแบบจำลอง
\dot{s}	=	$\partial s / \partial \log \dot{\epsilon}$
\bar{S}	=	ค่าเฉลี่ยของ S
X_d	=	สัดส่วนปริมาตรของการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์
Z	=	ซีเนอร์-โฮโลมอนด์
γ	=	เฟสแกมมา
β	=	เฟสเบต้า
α	=	เฟสแอลฟา
κ	=	เฟสแคปป่า
σ	=	ความเค้นจริง
σ_p	=	ความเค้นสูงสุด

σ_c	=	ความเค้นวิกฤต
ϵ	=	ความเครียดจริง
ϵ_p	=	ความเครียดสูงสุด
ϵ_c	=	ความเครียดวิกฤต
σ_{ss}	=	ความเค้นสภาวะคงตัว
$\dot{\epsilon}$	=	อัตราความเครียด
ϵ^*	=	อัตราการอ่อนตัวสูงสุด
β	=	ค่าคงที่วัสดุ β
α	=	ค่าคงที่วัสดุ

ประมวลศัพท์และคำย่อ

Activation Energy	=	พลังงานกระตุ้น
Adiabatic heating	=	ความร้อนอะเดียแบติก
Al	=	อะลูมิเนียม
Alloy	=	โลหะผสม
Aluminum bronze	=	อะลูมิเนียมบรอนซ์
Annihilation	=	การหักล้าง
Arrhenius Equation	=	สมการอาร์เรเนียส
Avrami equation	=	สมการอาลามี
Boundary	=	ขอบเขต
Chemical composition	=	ส่วนผสมทางเคมี
Cingara equation	=	สมการซิงกาล่า
Climb	=	การปีนข้าม
Cooling rate	=	อัตราการเย็นตัว
Constitutive equation	=	สมการคอนสทิทิวทีฟ
Cross slip	=	แบบปีนข้าม
Compression test	=	การทดสอบการกดอัด
Copper-base alloy	=	โลหะผสมที่มีทองแดงเป็นพื้นฐาน
Cu	=	ทองแดง
Deformation	=	การเปลี่ยนรูป
Deformation mechanism	=	กลไกในการเปลี่ยนรูป
Dilatometer	=	เครื่องทดสอบไดลาโตมิเตอร์
Dislocation	=	ดิสโลเคชัน
Dynamic material modeling	=	แบบจำลองทางพลศาสตร์ของวัสดุ
Dynamic recovery	=	การคืนตัวแบบพลศาสตร์
Dynamic recrystallized	=	พฤติกรรมที่เกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์
Dynamic softening mechanism	=	กลไกการอ่อนตัวแบบพลศาสตร์

Elongation	=	ค่าการยืดตัว
Exponential-sine law	=	กฎเลขชี้กำลัง
Flow stress	=	ความเค้น
Formability	=	สภาพการขึ้นรูป
Flow localization	=	การเปลี่ยนรูปเฉพาะจุด
Flow stability	=	เสถียรภาพการเปลี่ยนรูป
Flow softening	=	การอ่อนตัวขณะเปลี่ยนรูป
Glide	=	แบบเลื่อนไถล
Grains	=	เกรน
Grain boundary	=	ขอบเกรน
Grain growth	=	การเติบโตของเกรน
Hardening mechanism	=	กลไกการแข็งตัว
High angle grain boundary	=	ขอบเขตเกรนในมุมสูง
Hot compression test	=	ทดสอบการกดขึ้นรูปร้อน
Hot forming	=	กระบวนการขึ้นรูปร้อน
Hot forging	=	กระบวนการทุบขึ้นรูปร้อน
Hyperbolic-sine law	=	กฎไฮเพอร์โบลิกซายด์
Instability	=	การเสียเสถียรภาพ
Irreversible process	=	กระบวนการที่ผันกลับไม่ได้
Linear regression	=	วิธีการถดถอยแบบเชิงเส้น
Localised deformation	=	การเปลี่ยนรูปเฉพาะจุด
MAB	=	แมงกานีสอะลูมิเนียมบรอนซ์
Manganese bronze	=	โลหะผสมแมงกานีส
Material constant	=	ค่าคงที่วัสดุ
Material hardening rate	=	อัตราความแข็งตัวของวัสดุ
Material parameter	=	ตัวแปรของวัสดุ
Microstructure	=	โครงสร้างจุลภาค
Mn	=	แมงกานีส

Model equation	=	สมการแบบจำลอง
Morphology	=	ลักษณะวิทยา
Natural logarithmic	=	ลอการิทึมธรรมชาติ
Necking	=	คอคอด
Net entropy production	=	อัตราการเกิดเอนโทรปีสุทธิ
Nucleation	=	การเกิดนิวเคลียสผลึก
Optical emission spectrometer	=	เครื่องออฟติคอลอีมิสชันสเปกโตรมิเตอร์
Optical microscope	=	กล้องจุลทรรศน์แบบสะท้อนแสง
Plastic deformation	=	การเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก
Power law	=	กฎพาวเวอร์
Peak stress	=	ความเค้นสูงสุด
Quenching	=	การชุบแข็ง โดยทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว
Recrystallization	=	กระบวนการเกิดผลึกใหม่
Restoration	=	การคืนสู่สภาพ
Satisfied	=	ความพึงพอใจ
Saturate	=	สถานะอิ่มตัว
Scanning electron microscope	=	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง
Single peak stress	=	ความเค้นสูงสุดเพียงยอดเดียว
Softening mechanism	=	กลไกการอ่อนตัว
Softening rate	=	อัตราการอ่อนตัว
Stacking fault energy	=	พลังงานการเข้ากลุ่มผิดพลาดของระนาบอะตอม
Stability	=	เสถียรภาพ
Steady state	=	สถานะคงตัว
Steady state flow	=	สถานะการไหลแบบคงที่
Strain	=	ความเครียด
Strain localization	=	สถานะความเครียดเฉพาะจุด
Strain rate	=	อัตราความเครียด

Strain rate sensitivity	=	ความสามารถในการตอบสนองต่ออัตรา ความเครียด
Strength	=	ความแข็งแรง
Stress-Strain curve	=	กราฟความเค้น-ความเครียด
Stress fields	=	สนามความเค้น
Temperature sensitivity	=	ความสามารถในการตอบสนองต่ออุณหภูมิ
Thermo-mechanical process	=	กระบวนการเชิงความร้อนและเชิงกล
True stress-strain	=	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดจริง
Unsatisfied	=	ไม่พึงพอใจ
Upsetting	=	การตีขึ้น
Volume fraction	=	สัดส่วนปริมาตร
Work hardening	=	ความเครียดแข็ง
Zener-Hollomon equation	=	สมการซีเนอร์โฮโลมอนด์

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

แมงกานีสอะลูมิเนียมบรอนซ์ (Manganese Aluminum Bronze; MAB) หรือโลหะผสม MAB (MAB alloy) เป็นโลหะผสมทองแดง (Cu) โดยทั่วไปจะผลิตด้วยการหล่อ สมบัติที่ดีของโลหะผสม MAB คือมีความแข็งแรงสูง ความเหนียวที่ดี และทนทานต่อการแตกหักสูง มีความต้านทานต่อการกัดกร่อนที่ดีและ ไม่มีความเป็นแม่เหล็ก ดังนั้นจึงเป็นหนึ่งในวัสดุที่นิยมใช้ในน้ำทะเล เช่น ใช้เป็นใบพัดเรือ รวมถึงชิ้นส่วนทางวิศวกรรมต่างๆของเรือ ในปัจจุบันอุตสาหกรรมพาณิชย์นำวิในประเทศไทยยังต้องนำเข้าใบพัดเรือที่ผลิตจากโลหะผสม MAB จากต่างประเทศเป็นหลัก

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปของโลหะผสม MAB ในระหว่างการทดสอบการกดขึ้นรูปร้อน ผลจากการทดลองที่ได้รับสามารถเปรียบเทียบได้กับการทอบขึ้นรูปร้อน กราฟความเค้นจริง-ความเครียดจริงที่ได้จากการทดลอง สามารถนำมาหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ ความเค้น และอัตราความเครียด ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ให้เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานจำเป็นต้องศึกษาและเข้าใจอย่างลึกซึ้งในพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปที่อุณหภูมิสูงแบบพลาสติก (Plastic deformation) รวมถึงกลไกการแข็งตัว (Work hardening mechanism) และกลไกการอ่อนตัว (Softening mechanism) ของโลหะผสม MAB โดยอาศัยเส้นโค้งความเค้น-ไหลด ซึ่งกราฟความเค้นการไหล มีความสำคัญอย่างมากต่อความเข้าใจกลไกการเปลี่ยนรูปของวัสดุที่ได้จากการศึกษาจะ ช่วยเพิ่มความสามารถในการทำนายให้มีความแม่นยำ

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 ศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปของโลหะผสม MAB ในสภาวะการทอบขึ้นรูปที่อุณหภูมิสูงโดยการวิเคราะห์กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นจริง-ความเครียดจริง
- 1.2.2 ทำแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นจริง-ความเครียดจริงของโลหะผสม MAB โดยอาศัยสมการคอนสทิทิวทีฟที่พิจารณาถึงพฤติกรรมการคืนตัวแบบพลศาสตร์และการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ของวัสดุ

- 1.2.3 พิสูจน์ความแม่นยำของแบบจำลองวัสดุ โดยการเปรียบเทียบผลการทดสอบ (Experiment) กับผลการจำลอง (FE Simulation) ด้วยโปรแกรม DEFORM 3D ในการกดขึ้นรูปที่อุณหภูมิสูง (Hot compression) ของโลหะผสม MAB

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.3.1 เข้าใจพฤติกรรมของการเปลี่ยนรูปแบบถาวรของโลหะผสม MAB ที่อุณหภูมิสูง
- 1.3.2 สามารถนำผลความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดจริงไปหาค่าคงที่ของวัสดุและใช้สร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อวิเคราะห์และออกแบบเงื่อนไขการทอบขึ้นรูปร้อนสำหรับการผลิตชิ้นส่วนทางอุตสาหกรรมได้

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.4.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยคือ โลหะผสม MAB ที่ได้รับความอนุเคราะห์จากกรมอุตสาหการเรือ
- 1.4.2 ทดสอบกดขึ้นรูปร้อนด้วยเครื่องไดลาโตมิเตอร์ที่อุณหภูมิ 700, 750, 800 และ 850 องศาเซลเซียสและที่อัตราความเครียด 0.01, 0.1, 1 และ 10 ต่อวินาที
- 1.4.3 ใช้สมการซีเนอร์ไฮโลมอนด์ สมการซิงกาล่า สมการอาลามี่เพื่อทำนายกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นจริง-ความเครียดจริงแล้วนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบเพื่อหาสมการวัสดุที่เหมาะสมสำหรับอธิบายพฤติกรรมของโลหะผสม MAB ภายใต้การกดขึ้นรูปที่อุณหภูมิสูง
- 1.4.4 ใช้สมการซีเนอร์ไฮโลมอนด์สำหรับกำหนดค่าสมบัติของวัสดุในแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อวิเคราะห์การกดขึ้นรูปร้อน
- 1.4.5 โปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้คือ DEFORM 3D
- 1.4.6 ใช้แบบจำลอง Dynamic Material Model (DMM) เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปแบบถาวรและเสถียรภาพ (Stability) ของการเปลี่ยนรูป

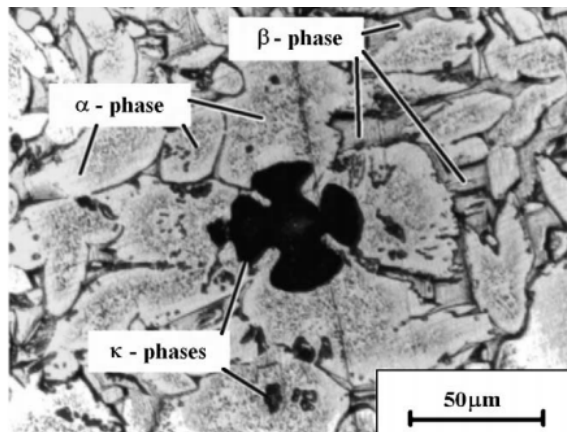
1.5 การดำเนินงานวิจัย

- 1.5.1 ศึกษาทฤษฎี ข้อมูล และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง กับโลหะผสม MAB และแบบจำลองพฤติกรรมวัสดุที่อุณหภูมิสูง
- 1.5.2 ทดสอบสมบัติทางกลที่อุณหภูมิห้องของโลหะผสม MAB
- 1.5.3 ศึกษาการใช้โปรแกรม DEFORM 3D
- 1.5.4 ทดสอบการกดขึ้นรูปร้อนด้วยเครื่องไดลาโตมิเตอร์ที่อุณหภูมิ 700, 750, 800 และ 850 องศาเซลเซียส และอัตราความเครียด 0.01, 0.1, 1 และ 10 ต่อวินาที
- 1.5.5 นำผลการทดสอบการกดขึ้นรูปร้อนมาคำนวณหาค่าคงที่ต่างๆ ในสมการซีเนอร์โฮโลมอนด์
- 1.5.6 นำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องไดลาโตมิเตอร์และค่าคงที่ต่างๆของวัสดุ (Material constant) ไปจำลองการกดขึ้นรูปที่อุณหภูมิสูงโดยใช้โปรแกรม DEFORM 3D
- 1.5.7 เปรียบเทียบระหว่างผลการทดสอบและผลการจำลองโดยใช้โปรแกรม DEFORM 3D
- 1.5.8 เปรียบเทียบระหว่างผลการคำนวณ (Calculation) ด้วยสมการซีเนอร์โฮโลมอนด์กับผลการทดสอบ
- 1.5.9 ศึกษาพฤติกรรมการคืนตัวแบบพลศาสตร์และการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ของการกดขึ้นรูปร้อนที่อุณหภูมิสูงโดยทำอาศัยแบบจำลองบนพื้นฐานของสมการซิงกาล่า (Cingara equation) และสมการอาลามี่ (Avrami equation)
- 1.5.10 เปรียบเทียบระหว่างผลการคำนวณด้วยสมการซิงกาล่าและสมการอาลามี่กับผลการทดสอบ
- 1.5.11 วิเคราะห์ความเสถียรภาพการเปลี่ยนรูปแบบถาวรที่อุณหภูมิสูงของโลหะผสม MAB โดยอาศัยแบบจำลอง DMM
- 1.5.12 สรุปผลการดำเนินการของงานวิจัย

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แมงกานีสอะลูมิเนียมบรอนซ์ (MAB alloy)

แมงกานีสอะลูมิเนียมบรอนซ์หรือโลหะผสม MAB เป็นวัสดุที่ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับการทำใบพัดเรือขนาดใหญ่ที่ใช้ในน้ำทะเล โลหะผสม MAB มีส่วนประกอบของธาตุทองแดง (Cu) อะลูมิเนียม (Al) และแมงกานีส (Mn) เป็นหลัก และมีการเติมธาตุผสมอื่นๆ เพิ่มเติมอีกเล็กน้อย เช่น เหล็ก (Fe) นิกเกิล (Ni) ซิลิคอน (Si) และ ตะกั่ว (Pb) โลหะผสม MAB มีสมบัติที่เด่นคือมีความแข็งแรงสูงและความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนที่ดี โลหะผสม MAB โดยทั่วไปจะผ่านการผลิตด้วยกระบวนการหล่อหรือทุบขึ้นรูป โลหะผสม MAB มีโครงสร้างทางจุลภาคที่ประกอบด้วย เฟสอัลฟา (α) เฟสเบต้า (β) และเฟสแคปป่า (κ) แสดงดังรูปที่ 2.1 [1]



รูปที่ 2.1 ลักษณะ โครงสร้างทางจุลภาคของโลหะผสม MAB

เฟสอัลฟา (α) มีโครงสร้างแบบ Face Centered Cubic (FCC) และประกอบไปด้วยธาตุทองแดง (Cu) ที่มีสถานะเป็นสารละลายของแข็ง (Cu-rich solid solution) โดยจะเห็นเป็นบริเวณพื้นสีขาว ในภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคส่วน เฟสเบต้า (β) มีโครงสร้างแบบ Body Centered Cubic (BCC) โดยที่เฟส β จะมีแนวโน้มที่จะเกิดการกัดกร่อนแบบสูญเสียธาตุผสม (Dealloying) คือการสูญเสียธาตุอะลูมิเนียม (Al) จากโลหะผสมหรือที่เรียกว่า Dealuminifization เนื่องจากเฟส β มีค่าศักย์ไฟฟ้าที่มากกว่าเฟสต่างๆ จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้เฟส β มีความไวต่อปฏิกิริยาการกัดกร่อนมากกว่า และเฟสแคปป่า

(K) มีส่วนประกอบของธาตุหลักคือ ธาตุแมงกานีส (Mn) เหล็ก (Fe) ที่สูงและมักจะกระจายตัวอยู่ในเฟส α

ตารางที่ 2.1 แสดงถึงสมบัติทางกลและสมบัติทางกายภาพต่างๆของโลหะผสม MAB เกรด C95800 ซึ่งเป็นเกรดที่ทางกรมอุทหากรเรือใช้เป็นมาตรฐานในการทำวัสดุทางเรือ [2]

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางกลและสมบัติทางกายภาพต่างๆ ของโลหะผสม MAB

สมบัติทางกล	MAB (C95800)
ความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength)	655 MPa
ความต้านทานแรงดึงที่จุดคลาก (Yield Strength)	311 MPa
ความแข็งแบบบริเนล (Brinell Hardness)	3000 kg load
ความยาวที่เปลี่ยนแปลงใน 50 มิลลิเมตร (ระยะ gage length in 50 mm)	26 %
ความหนาแน่น (Density)	$7.53 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
อุณหภูมิที่เปลี่ยนเป็นของเหลว (Liquidus Temperature)	990°C
อุณหภูมิที่เปลี่ยนเป็นของแข็ง (Solidus Temperature)	950°C

ในหัวข้อต่อไปจะกล่าวถึงตัวอย่างการใช้งานทั่วไปของวัสดุอะลูมิเนียมบรอนซ์ที่มีวัสดุทองแดงที่มีธาตุผสมหลักเป็น Al bronze (Copper-base alloy) สำหรับโลหะผสมอะลูมิเนียมบรอนซ์ที่ใช้ในเชิงพาณิชย์มีหลากหลายเกรด (Grade) ขึ้นอยู่กับส่วนผสมของธาตุเจือปน

2.1.1 ตัวอย่างการใช้งานโลหะผสม MAB เกรดต่างๆ

โลหะผสมประเภทอะลูมิเนียมบรอนซ์มีส่วนผสมทางเคมีที่ประกอบไปด้วยทองแดง (Cu) และอะลูมิเนียม (Al) เป็นหลัก ซึ่งจะมีการเติมธาตุผสมอื่นๆ เพิ่มเติมเพื่อให้มีสมบัติทางกายภาพที่หลากหลายขึ้น เช่น ค่าความแข็งแรง ความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อน และความสามารถในการหล่อขึ้นรูป โดยการใช้งานโลหะผสม MAB แต่ละประเภทจะต้องมีการพิจารณาอย่างรอบคอบ และได้รับคำแนะนำจากผู้เชี่ยวชาญ [3]

รูปที่ 2.2 แสดงชิ้นงานที่ทำด้วยวัสดุอะลูมิเนียมบรอนซ์เกรด C95800 ที่ผ่านการผลิตทำด้วยการหล่อขึ้นรูปใช้สำหรับรับแรงดันสูงในระบบการขับเคลื่อนใต้ทะเล โลหะผสม C95800 เป็นวัสดุที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้สำหรับรับความเค้นวิกฤต และสามารถทนต่อการกัดกร่อนในน้ำทะเลได้ดี



รูปที่ 2.2 ตัวอย่างชิ้นงานที่ทำด้วยวัสดุโลหะผสมเกรด C95800

รูปที่ 2.3 แสดงคลัช (Clutch) ซึ่งเป็นชิ้นส่วนของกวนเรือ (Shipboard winch) ทำด้วยวัสดุ निकเกิล อะลูมิเนียมบรอนซ์เกรด C95400 ซึ่งเป็นวัสดุ MAB เกรดที่เหมาะสมในการผลิตโดยใช้การหล่อแบบ ต่อเนื่องซึ่งเป็นเทคนิคใหม่ในการยืดอายุขององค์ประกอบของคลัชได้ถึง 20 เท่าและได้รูปร่างหลัง การหล่อที่เที่ยงตรงลดค่าใช้จ่ายการกลึงหลังการหล่อได้



รูปที่ 2.3 ตัวอย่างชิ้นงานที่ทำด้วยวัสดุโลหะผสมเกรด C95400

รูปที่ 2.4 แสดงซีลของเพลาใบพัดแบบหล่อ (Propeller shaft seal) ที่นำโลหะผสม निकเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ เกรด C95800 มาประยุกต์ใช้เพื่อต้านทานการกัดกร่อนของน้ำทะเล คุณสมบัติอื่นๆที่น่าสนใจคือไม่นำไฟฟ้าและแม่เหล็ก ต้านทานการขูดขีดได้ดี



รูปที่ 2.4 ตัวอย่างชิ้นงานที่ทำด้วยวัสดุโลหะผสมเกรด C95800

เมื่อทราบถึงสมบัติทางกลและโครงสร้างทางจุลภาคของโลหะผสม MAB แล้วต่อไปจะกล่าวถึงกระบวนการผลิตต่างๆ ในอุตสาหกรรมโดย ในงานนี้จะพูดถึง กระบวนการขึ้นรูปวัสดุแบบก้อน (Hot bulk forming process) ที่อุณหภูมิสูงเป็นหลัก เนื่องจากกระบวนการนี้จะทำให้ได้ชิ้นงานที่มีความแข็งแรงและความเหนียวสูงดีภายหลังจากการขึ้นรูปและสามารถนำมาใช้ผลิตชิ้นส่วนที่ทำด้วยวัสดุ MAB ได้

2.2 กระบวนการขึ้นรูปวัสดุก้อนที่อุณหภูมิสูง (Hot bulk forming process)

การขึ้นรูปวัสดุก้อน (Bulk metal forming) เป็นกรรมวิธีการขึ้นรูปชิ้นงานสามมิติ (Three-Dimension) โดยชิ้นงานจะเกิดการเสียรูปร่างอย่างถาวร (Plastic deformation) ภายใต้อิทธิพลของแม่พิมพ์ ลักษณะชิ้นงานก่อนการขึ้นรูปอาจมีลักษณะเป็นแท่งกลม แท่งสี่เหลี่ยม หรือโลหะแผ่นหนา สามารถขึ้นรูปได้ทั้งที่อุณหภูมิต่ำ (Cold working) หรือที่อุณหภูมิสูงปานกลาง (Warming working) และที่อุณหภูมิสูง (Hot working) ซึ่งในงานนี้จะกล่าวถึงกรรมวิธีการขึ้นรูปหรือการทุบขึ้นรูปร้อน (Hot forging) เป็นหลัก ในกระบวนการผลิตที่ใช้วิธีการทุบขึ้นร้อนจะสามารถผลิตชิ้นงานได้อย่างรวดเร็ว กำลังการผลิตสูง อีกทั้งกระบวนการผลิตแบบทุบขึ้นร้อนนี้ยังช่วยประหยัดพลังงานที่ใช้ในการผลิตได้อีกด้วย ชิ้นงานที่ผ่านการทุบขึ้นรูปแล้วจะนำมาผ่านการปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกรรมวิธีทางความร้อน (Heat treatment) เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีสมบัติตามที่ต้องการ [4]

2.2.1 ประเภทการชุบขึ้นรูปแบ่งตามอุณหภูมิการขึ้นรูป

การชุบขึ้นรูปเป็นกรรมวิธีการขึ้นรูปชิ้นงานก่อนภายในแม่พิมพ์ด้วยแรงอัดจากเครื่องอัด (Press) หรือค้อนตี (Hammer) การชุบขึ้นรูปวัสดุในสมัยแรกๆ ถูกนำมาใช้ในการขึ้นรูปเครื่องประดับ อวูร์ที่ใช้ในการต่อสู้ เหยียด และเครื่องใช้ต่างๆ โดยใช้ค้อนตีขึ้นรูป

การชุบขึ้นรูปสามารถแบ่งประเภทตามอุณหภูมิการขึ้นรูปได้ 3 รูปแบบดังนี้

1. **การชุบขึ้นรูปเย็น** เป็นการชุบขึ้นรูปวัสดุ ที่อุณหภูมิห้อง (Room temperature) เหมาะสำหรับการชุบขึ้นรูปวัสดุที่มีความเหนียวสูง เนื่องจากต้องใช้แรงในการชุบขึ้นรูปที่สูง ข้อดีสำหรับการชุบขึ้นรูปเย็นคือ ได้ผิวสำเร็จของชิ้นงานที่ดี สภาพการทำงานปลอดภัยและสามารถควบคุมขนาดของชิ้นงานได้ง่าย
2. **การชุบขึ้นรูปอุ่น** การชุบขึ้นรูปวัสดุ ที่อุณหภูมิระหว่างการชุบขึ้นรูปเย็นและการชุบขึ้นรูปร้อน เหมาะสำหรับวัสดุที่มีความแข็งแรงไม่มากนัก ข้อดีสำหรับการชุบขึ้นรูปอุ่นคือ สามารถลดความเค้นตกค้างภายในชิ้นงานหลังการขึ้นรูปได้และสามารถขึ้นรูปชิ้นงานที่ซับซ้อนและใช้แรงในการตีขึ้นรูปที่ต่ำ
3. **การชุบขึ้นรูปร้อน** เป็นการตีขึ้นรูปวัสดุ ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิการเกิดผลึกใหม่ (Recrystallization temperature) ของวัสดุ เหมาะสำหรับวัสดุที่มีความแข็งแรง และต้องการขึ้นรูปชิ้นงานที่ซับซ้อน ข้อดีสำหรับการชุบขึ้นรูปร้อนคือ ใช้แรงในการตีขึ้นรูปที่ต่ำ ไม่มีความเค้นตกค้างในชิ้นงานหลังขึ้นรูปและสามารถปรับปรุงสมบัติทางกลได้ แต่มีข้อเสียเรื่องคุณภาพผิวชิ้นงานที่ไม่ดีและควบคุมขนาดของชิ้นงานได้ยาก

ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ผ่านผลิตด้วยการชุบขึ้นรูปวัสดุ เช่น เกียร์ (Gears) เหล็กหมุด (Rivets) เพลากังหัน (Shafts for turbines) เครื่องมือต่างๆ (Hand tools) และชิ้นส่วน โครงสร้างเครื่องจักรกล

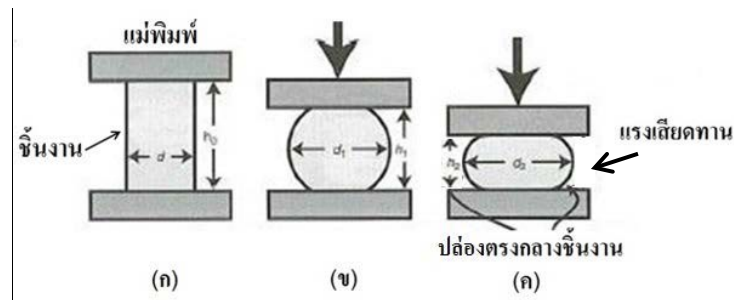


รูปที่ 2.5 ตัวอย่างชิ้นงานที่ผ่านการผลิตด้วยการทุบขึ้นรูปร้อน [5]

2.2.2 ประเภทการทุบขึ้นรูปแบ่งตามลักษณะของแม่พิมพ์

การทุบขึ้นรูปโลหะแบบแม่พิมพ์เปิด (open-die forging)

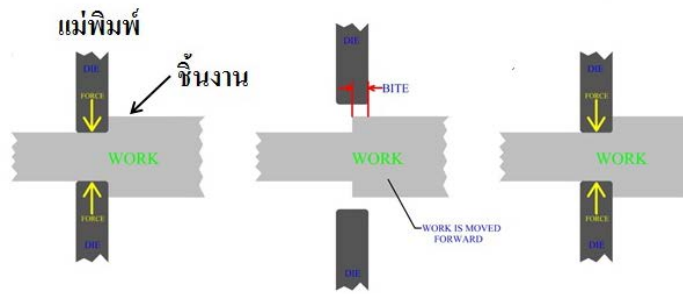
การทุบขึ้นรูปวัสดุแบบแม่พิมพ์เปิดเป็นกรรมวิธีการทุบขึ้นรูปวัสดุอย่างง่าย โดยทั่วไปแม่พิมพ์แบบเปิดจะมีน้ำหนักชิ้นงานอยู่ระหว่าง 15-500 กิโลกรัม หลักการตีขึ้นรูปแบบนี้คือ การนำชิ้นงานมาวางลงระหว่างแม่พิมพ์ จากนั้นจึงทุบขึ้นรูปลดความสูงของชิ้นงานด้วยแรงอัด หรืออาจเรียกกรรมวิธีนี้ว่าการทุบขึ้นรูปแบบอัด (Upsetting) ก็ได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การทุบขึ้นรูปแบบแม่พิมพ์เปิด [6]

รูปที่ 2.6 แสดงให้เห็นว่าเกิดการป่องตรงกลางชิ้นงานหรือเรียกว่า Barrelling ซึ่งเกิดจากแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสของชิ้นงานกับแม่พิมพ์ สามารถลดปัญหานี้ได้โดยการใช้สารหล่อลื่น Barrelling อาจเกิดขึ้นได้เมื่อขึ้นรูปร้อนในระหว่างที่แม่พิมพ์เย็นตัวลงแล้ว เป็นเหตุให้ผิวชิ้นงานที่สัมผัสกับผิวแม่พิมพ์เย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว และเกิดการต้านทานการเสียรูปหรือต้องใช้แรงสูงกว่าที่อุณหภูมิสูง ในขณะที่ส่วนอื่นๆยังคงร้อนอยู่ ทำให้จุดตรงกลางของชิ้นงานยังคงเกิดการเสียรูปได้มากอยู่ สาเหตุนี้สามารถแก้ไขได้โดยการให้ความร้อนแก่แม่พิมพ์ขณะทุบขึ้นรูป

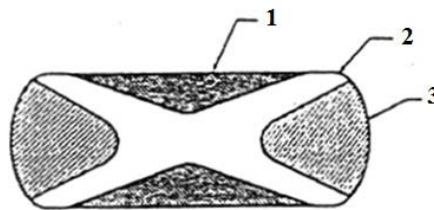
การทุบขึ้นรูปวัสดุเพื่อลดความหนาชิ้นงานเรียกว่า Cogging หรือ Drawing out เป็นกรรมวิธีการทุบขึ้นรูปวัสดุหลายๆครั้งต่อเนื่องกันด้วยแม่พิมพ์แบบเปิด ดังแสดงในรูป 2.7



รูปที่ 2.7 กรรมวิธีการทุบขึ้นรูปร้อน [7]

การตีขึ้นรูป (upsetting)

ประเภทของการตีขึ้นรูปแบบตีขึ้นรูป (Upsetting) ในรูปแบบของการตีขึ้นรูปงานก้อน (Bulk forging) ในลักษณะการตีขึ้นรูปแบบงานเย็น (Cold forging) โดยใช้ประเภทลักษณะของแม่พิมพ์ที่ใช้เป็นแบบเปิด (Open-Die forging) จะทำการทดลองจริงด้วยการกดขึ้นงาน หรือที่เรียกว่าการตีขึ้นรูป ซึ่งในอุตสาหกรรมการตีขึ้นรูป เป็นอุตสาหกรรมที่มีผลิตภัณฑ์อยู่มากมาย และในกระบวนการผลิตก็จะมีปัญหาการแตกหักของชิ้นงานเกิดขึ้นมากมาย ในระหว่างการกดขึ้นงานในการตีขึ้นรูปจะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของชิ้นงานตามบริเวณต่างๆ ดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.8 บริเวณต่างๆของการเปลี่ยนรูปของวัสดุในการตีขึ้นรูป [8]

บริเวณที่ 1

คือผิวบนและล่างของชิ้นทดสอบที่สัมผัสกับแม่พิมพ์กด เรียกบริเวณนี้ว่า Dead Metal Zone (DMZ)

บริเวณที่ 2

คือบริเวณที่เกิดการเปลี่ยนรูปมากที่สุดโดยจะมีบริเวณแถบรอยเฉือน (Shear band) เกิดขึ้นที่ผิวด้านนอกของ Dead Metal Zone ใกล้ผิวสัมผัส (Contact surface)

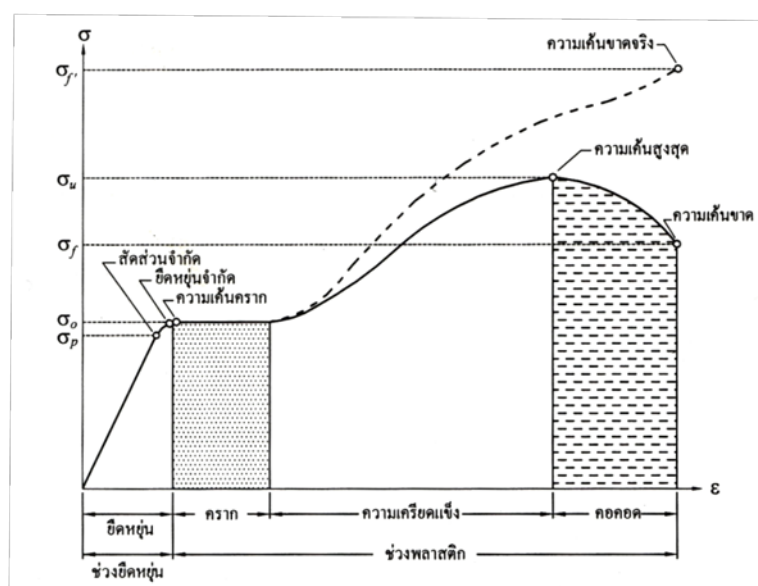
บริเวณที่ 3

คือส่วนนอกของชิ้นทดสอบ อยู่ใกล้ผิวด้านนอกของการเปลี่ยนรูปเนื่องมาจากการกด ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นบริเวณการเกิดการป่องที่ผิว (Bulge surface) ซึ่งเกิดจากแรงเสียดทาน

ในการศึกษาสมบัติทางกลของชิ้นงานหลังจากการทอบขึ้นรูปก่อน เป็นสิ่งสำคัญและเป็นคำตอบให้กับความเหมาะสมของวัสดุ แต่การได้มาซึ่งสมบัติทางกลต้องมีความเข้าใจในกระบวนการขึ้นรูป และในหัวข้อนี้จะต้องทราบถึงพฤติกรรมของวัสดุในระหว่างการเปลี่ยนรูปรีด รวมถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดเพื่ออธิบายการเปลี่ยนรูปของวัสดุในช่วงต่างๆ

2.3 พฤติกรรมของการเปลี่ยนรูปของวัสดุ

การศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปของโลหะผสม MAB จะเกี่ยวข้องกับความเข้าใจความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดของโลหะผสม MAB เมื่อวัสดุได้รับแรงกระทำจะทำให้ความเค้นเพิ่มขึ้นและความเครียด ก็จะเพิ่มขึ้นด้วย ในกรณีที่เมื่อวัสดุได้รับแรงดึงจะทำให้วัสดุเกิดการยืดตัวออกโดยสามารถแบ่งพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปออกได้เป็น 2 ช่วง คือ การเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่น (Elastic deformation) และการเปลี่ยนรูปแบบถาวร (Plastic deformation) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียด ในรูปที่ 2.9 มีอยู่ 2 แบบด้วยกันคือ ความเค้นและความเครียดวิศวกรรม (Engineering stress-strain) และ ความเค้นและความเครียดจริง (True stress-strain curve) สำหรับในงานขึ้นรูปโลหะจะใช้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจริงในการนิยามสมบัติวัสดุ โดยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุสามารถหาได้จากการทดสอบแรงดึง (Tension test) หรือการทดสอบการกด (Compression test)



รูปที่ 2.9 พฤติกรรมความเค้น-ความเครียดในการเปลี่ยนรูปของวัสดุ [9]

การเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่น (Elastic deformation) [4]

การเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่นคือ ความสามารถของวัสดุในการเปลี่ยนรูปแบบคืนรูปอย่างสมบูรณ์โดยไม่ปรากฏการเปลี่ยนรูปแบบถาวรเมื่อนำแรงที่กระทำออก เป็นการเปลี่ยนรูปเมื่อให้แรงกระทำต่อวัตถุ น้อย และแรงนั้น ไม่มากพอที่จะทำให้โลหะยืดตัวออกจนเกินกว่าจุดครากตัว (Yield point) ลักษณะการเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่นแบบนี้จะเกิดเพียงชั่วคราว เมื่อปล่อยแรงที่กระทำกับวัตถุ วัสดุนั้นก็จะกลับคืนสู่รูปร่างเดิมก่อนให้แรง ดังนั้นจึงเรียกการเปลี่ยนรูปนี้ว่าการเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่นหรือการเปลี่ยนรูปแบบอีลาสติก

มอดูลัสของสภาพความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity)

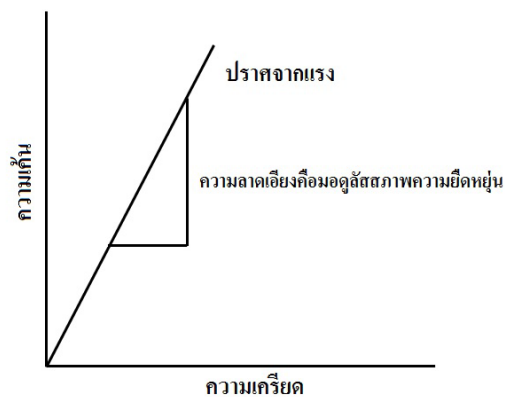
มอดูลัสของสภาพความยืดหยุ่น คืออัตราส่วนของความเค้นกับความเครียดในช่วงการเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่น (Elastic deformation) ตามกฎของฮุค (Hooke's Law)

อัตราส่วนความเค้นต่อความเครียดจะเป็นสัดส่วนแบบเชิงเส้นถึงจนกระทั่งจุดหนึ่งจากนั้นก็จะเป็นเปลี่ยนเป็นแบบไม่เป็นเชิงเส้น (วัสดุจะเริ่มเข้าสู่การเปลี่ยนรูปแบบถาวรและเสียหาย) วัสดุที่เป็นโลหะจะมีความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นต่อความเครียดในช่วงอีลาสติกเป็นค่าคงที่ค่าหนึ่งดังรูปที่ 2.10 โดยวัสดุแต่ละชนิดจะมีค่ามอดูลัสของสภาพความยืดหยุ่นนี้ไม่เท่ากัน แสดงดังสมการ

$$\sigma = E\varepsilon \quad (2.1)$$

เมื่อ E คือมอดูลัสของสภาพความยืดหยุ่น (Modulus of elasticity) σ คือความเค้น (Stress) และ ε คือความเครียด (Strain)

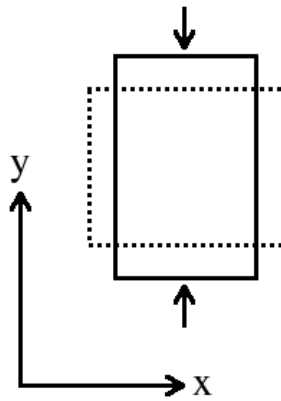
สำหรับวัสดุ Maximum elastic deformation มักจะมีน้อยกว่า 0.5% โดยทั่วไปโลหะและโลหะผสมจะแสดงความสัมพันธ์เป็นแบบเส้นตรงระหว่างความเค้น-ความเครียดในช่วงยืดหยุ่น



รูปที่ 2.10 การหาค่ามอดูลัสสภาพความยืดหยุ่น

อัตราส่วนปัวซอง (Poisson's Ratio)

เมื่อตัวอย่างวัสดุถูกดึงในทิศหนึ่งวัสดุในอีกสองทิศจะมีขนาดลดลง อัตราส่วนปัวซอง (ν) ซึ่งเป็นชื่อหลังของนายซีเมียง ปัวซอง เป็นค่าที่ระบุจากการลดขนาดลงนี้ อัตราส่วนปัวซองเป็นอัตราส่วนการหดตัวสัมพัทธ์ คือ ความเครียดตามขวาง (ตั้งฉากกับแรงที่กระทำ) หารด้วยความเครียดที่ขยายออกสัมพัทธ์ (ในทิศเดียวกับแรงที่กระทำ) สำหรับวัสดุแบบ Perfectly Incompressible อัตราส่วนของปัวซองจะมีค่าเท่ากับ 0.5 พอดี ส่วนวัสดุทางวิศวกรรมในทางปฏิบัติส่วนใหญ่จะมีค่า ν อยู่ระหว่าง 0 ถึง 0.5 จะมีค่าใกล้ 0 ส่วนเหล็กส่วนใหญ่จะมีค่า ν อยู่ที่ประมาณ 0.3 และยางมีค่าเกือบ 0.5 ในบางวัสดุ เช่น โฟมพอลิเมอร์ส่วนใหญ่ จะมีค่าอัตราส่วนปัวซองเป็นลบ เมื่อวัสดุเหล่านี้ถูกดึงในทิศหนึ่ง วัสดุจะขยายขนาดขึ้นในทิศที่ตั้งฉากด้วย ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ลักษณะการหาอัตราส่วนปัวซอง [10]

อัตราส่วนพอยส์สัน คืออัตราส่วนความเครียดตามขวาง หรือด้านข้าง ต่อความเครียดตามแนวแรง อัตราส่วนพอยส์สันที่ได้จะเป็นค่าติดลบ ทั้งนี้เนื่องจากว่า ความเครียดด้านข้าง และความเครียดตามแนวแกนมีผลตรงกันข้ามกัน ดังสมการนี้

$$\nu_{xy} = -\frac{\epsilon_x}{\epsilon_y} \quad (2.2)$$

เมื่อ ν_{xy} คือค่าอัตราส่วนของปัวซอง ϵ_x คือความเครียดตามขวาง และ ϵ_y คือความเครียดตามแกนของแรง xy

การเปลี่ยนรูปแบบถาวร (Plastic Deformation)

ความสามารถในการเปลี่ยนรูปของวัสดุที่เลยช่วงการเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่นหรือการเปลี่ยนรูปในช่วงพลาสติก วัสดุจะไม่สามารถคืนรูปเดิมได้เมื่อปล่อยแรงกระทำออก

2.3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดทางวิศวกรรม (Engineering Stress-Strain)

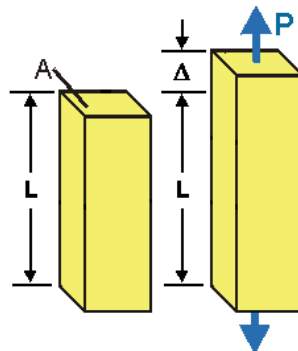
ความเค้น (Stress)

การเปลี่ยนรูปของวัสดุเกิดขึ้นจากการให้แรงของแม่พิมพ์ต่อชิ้นงาน ทำให้ภายในชิ้นงาน เกิดความเค้น (State of stresses) ขึ้น ซึ่งสามารถเกิดได้ 2 รูปแบบคือ ความเค้นแรงดึง (Tensile Stress; σ) และความเค้นแรงเฉือน (Shear Stress; τ)

ความเค้นหรือความเค้นเชิงวิศวกรรม (Engineering stress) หมายถึง แรงต้านทานภายในเนื้อวัสดุที่มีต่อแรงภายนอกที่มากระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่

ความเค้นแรงดึง (Tensile stress; σ) เกิดขึ้นเมื่อมีแรงดึงมากระทำตั้งฉากกับพื้นที่ภาคตัดขวางหรือคือแรงภายนอกต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ใช้สัญลักษณ์ว่า σ (sigma) ดังสมการที่ 2.3

รูปที่ 2.12 เมื่อวัตถุอยู่ในสภาวะสมดุล แรงภายนอกที่มากระทำบนวัตถุจะต้องมีแรงภายในด้าน ขนาดรวมแล้วเท่ากับแรงภายนอกของวัตถุที่ถูกกระทำ



รูปที่ 2.12 ลักษณะความเค้นแรงดึง[11]

$$\sigma = \frac{F_t}{A_0} \quad (2.3)$$

เมื่อ σ คือความเค้นแรงดึง (N/m^2)

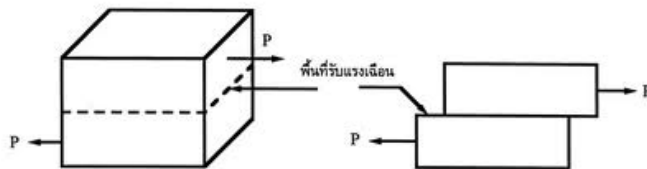
F_t คือแรงกระทำต่อวัสดุ (N)

A_0 คือพื้นที่หน้าตัดเริ่มต้นของวัสดุ (m^2)

ความเค้นแรงเฉือน (Shear Stress; τ) ใช้สัญลักษณ์ τ เป็นแรงภายนอกที่มากระทำต่อ วัตถุนั้นโดยพยายามทำให้วัตถุเกิดการขาดจากกันตามแนวระนาบที่ขนานกับทิศทางของแรงนั้น ดังรูปที่ 2.13 จากสมการที่ 2.4 ความเค้นแรงเฉือนมีค่าเท่ากับแรงเฉือน (Shear Force) หารด้วยพื้นที่ภาคตัดขวาง A_0 ซึ่งขนานกับทิศทางของแรงเฉือน

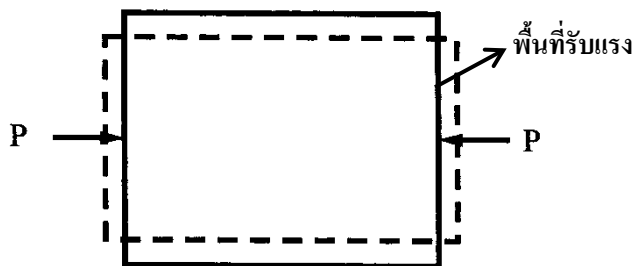
$$\tau = \frac{F_S}{A_0} \tag{2.4}$$

- เมื่อ τ คือความเค้นแรงเฉือน (N/m^2)
- F_S คือแรงกระทำต่อวัสดุ (N)
- A_0 คือพื้นที่หน้าตัดเริ่มต้นของวัสดุ (m^2)



รูปที่ 2.13 ลักษณะความเค้นแรงเฉือน [12]

ความเค้นแรงอัด (Compressive Stress) เกิดขึ้นเมื่อมีแรงกดมากระทำตั้งฉากกับพื้นที่ภาคตัดขวางเพื่ออัดให้วัสดุมีขนาดสั้นลง ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 ลักษณะความเค้นแรงอัด

ความเครียด (Strain)

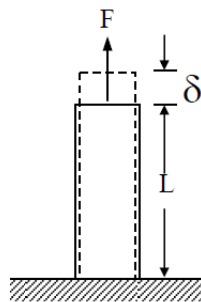
เมื่อมีแรงกระทำต่อวัสดุทำให้วัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง จะทำให้เกิดความเครียดขึ้นกับชิ้นงาน ความเครียดเชิงวิศวกรรม (Engineering strain) คือ การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุ (Deformation) เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำ การเปลี่ยนรูปของวัสดุนี้เป็นผลมาจากการเคลื่อนที่ภายในเนื้อวัสดุเป็นการขยายตาม ซึ่งลักษณะของความเครียดสามารถแบ่งเป็น 2 ชนิดใหญ่ ๆ คือ

1. การเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่นหรือความเครียดแบบคืนรูป (Elastic Deformation or Elastic Strain) เป็นการเสียรูปในลักษณะที่เมื่อปลดแรงกระทำ อะตอมซึ่งเคลื่อนไหวยังคงกลับสู่ตำแหน่งเดิม ทำให้วัสดุคงรูปร่างเดิมไว้ได้ ตัวอย่างได้แก่ ยางยืด สปริง ถ้าดึงวัสดุแล้วปล่อยวัสดุก็จะกลับไปมีขนาดเท่าเดิม
2. การเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกหรือความเครียดแบบคงรูป (Plastic Deformation or Plastic Strain) เป็นการเสียรูปที่ถึงแม้ว่าจะปลดแรงกระทำออกแล้ววัสดุก็ยังคงรูปร่างตามเดิมไว้ได้ โดยอะตอมที่เคลื่อนที่ไปแล้วจะไม่กลับสู่ตำแหน่งเดิม

ความเครียดแรงดึง (Tensile strain; ϵ) คือเมื่อวัสดุถูกกระทำด้วยแรงดึงตามแนวแกนและเพิ่มแรงดึงขึ้นอย่างช้า ๆ ท่อนวัสดุนี้ก็จะเกิดการยืดออกทีละน้อยตามขนาดของแรง ดึงที่เพิ่มขึ้นของแรง ทำให้ท่อนวัสดุยืดออกเท่ากับ Δl ดังรูปที่ 2.15 ขณะที่ท่อนวัสดุยืด ออกก็จะเกิดการหดตามแนวตั้งของท่อนวัสดุนั้น ดังสมการ

$$\epsilon = \frac{l_i - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \tag{2.5}$$

- เมื่อ ϵ คือความเครียดแรงดึง (-)
- l_0 คือความยาวเริ่มต้นของวัสดุ (mm)
- l_i คือความยาวสุดท้ายของวัสดุ (mm)
- Δl คือความยาวที่เปลี่ยนของวัสดุไป (mm)



รูปที่ 2.15 ลักษณะความเครียดแรงดึง [13]

ความเครียดแรงเฉือน (Shear Strain; γ) เมื่อมีแรงเฉือนกระทำ จะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือเกิดความเครียดขึ้นมา ความเครียดที่เกิดขึ้นนี้ เรียกว่า ความเครียดเฉือน ดังสมการ

$$\gamma = \frac{\delta}{L}$$

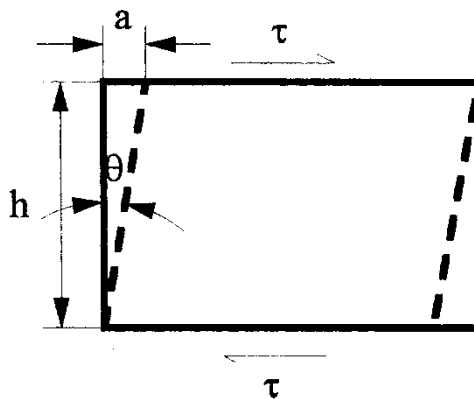
$$\text{แต่ } \tan \theta = \frac{\delta}{L}$$

$$\gamma = \tan \theta \tag{2.6}$$

เมื่อ θ เป็นมุมที่เฉไป แต่มุม θ นี้จะเล็กมาก ดังนั้น $\tan \theta \approx \theta$
 ดังนั้นความเครียดแรงเฉือนจึงเป็นการวัดมุมที่เฉไป มีหน่วยเป็นเรเดียน (rad)

เมื่อ γ คือความเครียดเฉือน

θ คือมุมการเฉือน



รูปที่ 2.16 ลักษณะความเครียดแรงเฉือน [14]

2.3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดจริง (True Stress-Strain)

ความเค้นจริง (True stress) เป็นอัตราส่วนระหว่างแรงที่กระทำบนชิ้นงานทดสอบต่อพื้นที่หน้าตัดขณะรับแรงกระทำขณะนั้น ดังเขียนเป็นสูตรทั่วไปได้ดังนี้

$$\sigma_t = \frac{F}{A_i} \tag{2.7}$$

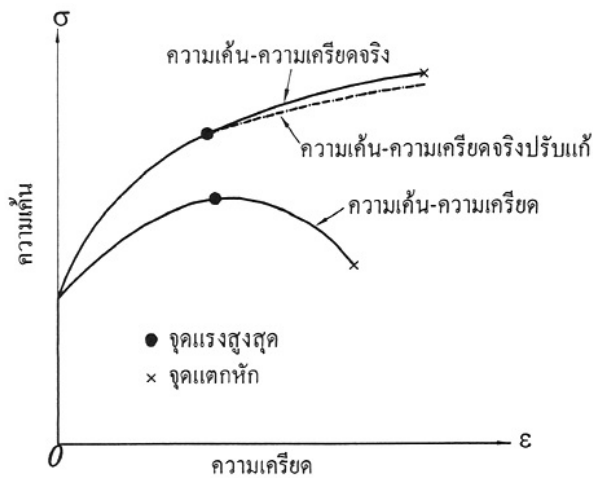
ความเครียดจริง (True strain) เป็นผลรวมของอัตราส่วนระหว่างการเปลี่ยนแปลงความยาวต่อความยาวเดิม โดยรวมตั้งแต่ความเครียดของวัสดุก่อนรับแรงจนถึงความเครียดขณะทดสอบ ดังสมการ

$$\epsilon_t = \frac{dl}{l} = \ln \frac{l_i}{l_0} \tag{2.8}$$

ซึ่งค่า l_0 เป็นความยาวของ gauge ตอนเริ่มต้น และ l_i เป็นความยาวของ gauge ขณะที่กำลังทดสอบ และถ้าเราสมมุติว่าปริมาตรของช่วง gauge มีค่าคงที่แล้วจะได้ความสัมพันธ์ว่า $l_0 A_0 = l_i A_i$ หรือ

$$\frac{l_i}{l_0} = \frac{A_0}{A_i} = \epsilon_t = \ln \frac{l_i}{l_0} = \ln \frac{A_0}{A_i} \tag{2.9}$$

จากรูปที่ 2.17 จะแสดงการเปรียบเทียบของกราฟความเค้น-ความเครียดในรูปแบบที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมของวัสดุจะเห็นถึงความแตกต่างระหว่างกราฟความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียด จะเห็นว่าเมื่อเลขจุดที่ขึ้นทดสอบได้รับแรงสูงสุด กราฟความเค้น-ความเครียดจะมีความชันเป็นลบ ส่วนความเค้นจริง-ความเครียดจริง มีค่าความชันเป็นบวก และมีแนวโน้มจะเป็นเส้นตรงในขณะที่ความเครียดมีค่ามากขึ้น เกณฑ์การคราก (Yield criterion) เป็นเกณฑ์ที่ใช้อธิบายถึงการเปลี่ยนแปลงของวัสดุจากสภาพยืดหยุ่นไปเป็นสภาพพลาสติก ทฤษฎีที่นิยมใช้ในการทำนายการครากตัวของโลหะผสม MAB



รูปที่ 2.17 การเปรียบเทียบกราฟความเค้น-ความเครียดกับความเค้น-ความเครียดจริง [15]

กราฟสามารถแบ่งพฤติกรรมของวัสดุออกได้เป็น 4 ช่วงคือ

ช่วงยืดหยุ่น (Elastic)

ในช่วงนี้วัสดุที่ใช้ทดสอบจะตอบสนองต่อ แรงกระทำ แบบยืดหยุ่น (Elastic) หรือคือเมื่อนำแรงที่กระทำออกจากชิ้นงานทดสอบแล้ววัสดุจะคืนตัวกลับไปสู่รูปร่าง และความยาวเริ่มต้น ซึ่งจะเห็นได้ว่าในช่วงนี้แรงกระทำ (Stress) จะแปรผันโดยตรงกับความเครียด (Strain) จนถึงค่าของแรงกระทำค่าหนึ่งซึ่งถูกเรียกว่า Proportional limit หรือ σ_{pl} และเมื่อค่าแรงกระทำมีค่ามากกว่าค่าของ σ_{pl} แล้ววัสดุนั้นจะยังคงมีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่น อยู่โดยที่จุดสุดท้าย ที่วัสดุยังคงมีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่น นี้คือจุด Elastic limit

ช่วงคลาก (Yielding)

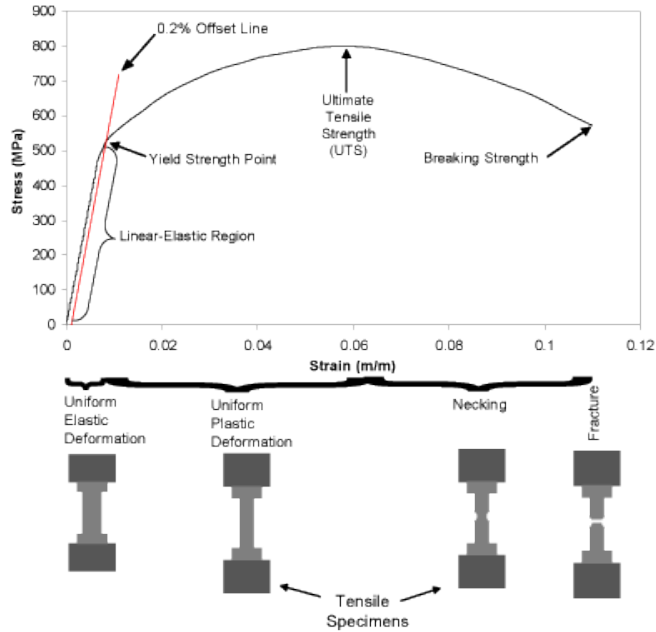
ช่วงคลากจะเริ่มเมื่อค่าของแรงกระทำต่อชิ้นงานทดสอบมีค่าเท่ากับค่า Yielding stress (σ_y) หลังจากผ่านจุดนี้ไปแล้วชิ้นงานทดสอบจะเกิดการยืดอย่างต่อเนื่องโดยไม่ใช้แรงกระทำต่อวัสดุที่เพิ่มขึ้น ซึ่งพฤติกรรมของวัสดุแบบนี้เรียกว่าพฤติกรรมแบบ Perfectly plastic

ช่วงความเครียดแข็ง (Strain Hardening)

เมื่อเลยจุดการคลากของวัสดุชิ้นงานทดสอบจะมีความสามารถในการต้านทานแรงเพิ่มขึ้น อีกครั้งหนึ่ง สามารถสังเกตได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดเริ่มที่มีความชันเพิ่มขึ้นอีกครั้งหนึ่ง ดังรูปที่ 2.18 แต่ความชันของเส้นโค้งนี้จะมีค่าลดลงเรื่อยๆ เมื่อค่าของแรงกระทำมีค่าเพิ่มขึ้น และสุดท้ายความชันของเส้นโค้งนี้จะมีค่าเป็นศูนย์ที่จุดค่าความเค้น Ultimate Stress หรือ σ_u ซึ่งเป็นจุดที่วัสดุมีความสามารถในการรับแรงกระทำที่มีค่าสูงสุด ซึ่งมักจะเรียกพฤติกรรมของวัสดุในช่วงนี้ว่าความเครียดแข็ง (Strain Hardening)

ช่วงคอคอด (Necking)

หลังจากที่ค่าของแรงกระทำต่อชิ้นงานทดสอบมีค่าเท่ากับ σ_u แล้ว พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานทดสอบในบริเวณ Gauge length จะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว หรือที่เรียกกันว่าการเกิด Necking ดังรูปที่ 2.18 ค่าความชันของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดมีค่าลดลงตามไปด้วย จนกระทั่งถึงจุดที่วัสดุเกิดการแตกหักขึ้น ค่าของความเค้นของวัสดุที่จุดนี้จะเรียกว่าค่า fracture stress (σ_f)



รูปที่ 2.18 ลักษณะพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นของวัสดุ [16]

2.4 การคืนตัวและการเกิดผลึกใหม่ (Recovery and Recrystallization)

จากการศึกษาจะใช้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดจริงระหว่างกระบวนการทอบขึ้นรูปร้อนของโลหะผสม MAB ซึ่งสำหรับกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดจริงที่ได้จะแสดงพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปร้อนซึ่งพฤติกรรมนี้จะมีอิทธิพลต่อกลไกการแข็งตัว (Hardening Mechanism) และการอ่อนตัวของโลหะผสม MAB โดยกลไกการอ่อนตัว (Softening Mechanism) คือ การคืนตัว (Recovery) และการเกิดผลึกใหม่ (Recrystallization) ระหว่างกระบวนการขึ้นรูปร้อน

2.4.1 การคืนตัว (Recovery)

เมื่อนำโลหะที่ผ่านการขึ้นรูปที่อุณหภูมิห้อง (Cold work) มาทำให้ร้อนขึ้นจนถึงช่วงอุณหภูมิการคืนตัวซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่ต่ำ อุณหภูมิการตกผลึกใหม่เล็กน้อย ความเค้นภายในจะลดลงระหว่างการคืนตัวของวัสดุพลังงานจากความร้อนที่จะทำให้ดิสโลเคชันเกิดการเปลี่ยนแปลงไปเป็นโครงสร้างดิสโลเคชันที่มีพลังงานต่ำ การคืนตัวของการขึ้นรูปที่อุณหภูมิห้องเกิดเกรนเป็นจำนวนมากทำให้เกิดโครงสร้างเกรนย่อย (Sub-grain) เมื่อเกิดการคืนตัวแบบพลศาสตร์ความแข็งแรงของโลหะจะลดลงเล็กน้อยแต่ความเหนียวจะเพิ่มขึ้น

หลักการของการคืนตัวของวัสดุคือ เมื่อให้พลังงานหรือความร้อนในโลหะจะส่งผลให้ความเครียดในวัสดุลดลง การเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันมีอยู่ด้วยกัน 2 ลักษณะคือ

1. การเคลื่อนที่แบบหักล้าง (Annihilation)
2. การเคลื่อนที่แบบจัดเรียงใหม่ (Rearrangement)

ซึ่งการเคลื่อนที่ทั้ง 2 ลักษณะต้องอาศัยกลไกการคลาน (Glide) การปีน (Climb) และการเลื่อนข้ามระนาบ (Cross-Slip) ของดิสโลเคชันซึ่งเกิดการหักล้างโดยการคลานเข้าหากันระหว่างการเปลี่ยนรูปแบบถาวร ที่อุณหภูมิสูงวัสดุจะเกิดการลดลงของความหนาแน่นของดิสโลเคชันในระหว่างการเปลี่ยนรูป และนำไปสู่การคืนตัวแบบพลศาสตร์ (Dynamic Recovery) ซึ่งไม่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาคและคุณสมบัติทางกลที่เปลี่ยนไป

2.4.2 การเกิดผลึกใหม่ (Recrystallization)

การขยายตัวของเกรนใหม่ที่เกิดขึ้นในระหว่างการตกผลึกใหม่จะนำไปสู่การลดลงของพลังงานที่เกิดขึ้นภายในวัสดุด้วยการแทนที่บริเวณที่เปลี่ยนแปลงด้วยเกรนที่ปราศจากความเครียด (Strain free) จะเกิดในช่วงอุณหภูมิที่สูงกว่าช่วงอุณหภูมิการคืนตัวของวัสดุซึ่งมีผลทำให้เกิดผลึกใหม่ การเกิดผลึกใหม่ที่เกิดขึ้นจะมีโครงสร้างผลึกเหมือนกับผลึกเดิมก่อนการเปลี่ยนรูป ผลึกใหม่จะเกิดขึ้นบริเวณที่เกรนมีการเปลี่ยนรูปสูงหรือเกิดขึ้นบริเวณที่มีความเครียดหรือพลังงานภายในสูงกว่าบริเวณอื่น ซึ่งปกติจะเกิดขึ้นบริเวณขอบเกรนและบริเวณที่มีความหนาแน่นของดิสโลเคชันสูง เกรนใหม่ที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะค่อนข้างสมมาตรและเป็นเกรนที่ไม่มีมีความเครียดตกค้าง (Strain free) และจะเริ่มขยายตัวขึ้นเรื่อยๆจนแทนที่เกรนเดิมที่มีความเครียดที่เกิดจากการขึ้นรูปจนถึงสิ้นสุดการเกิดผลึกใหม่ เมื่อโลหะเกิดเกรนใหม่แทนที่เกรนเดิมโดยสมบูรณ์

ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อกลไกการตกผลึกใหม่ในโลหะและโลหะผสม ได้แก่

1. ปริมาณการเปลี่ยนรูปของวัสดุ
2. อุณหภูมิ
3. เวลา
4. ขนาดของเกรนเริ่มต้น
5. ส่วนประกอบของโลหะหรือโลหะผสม

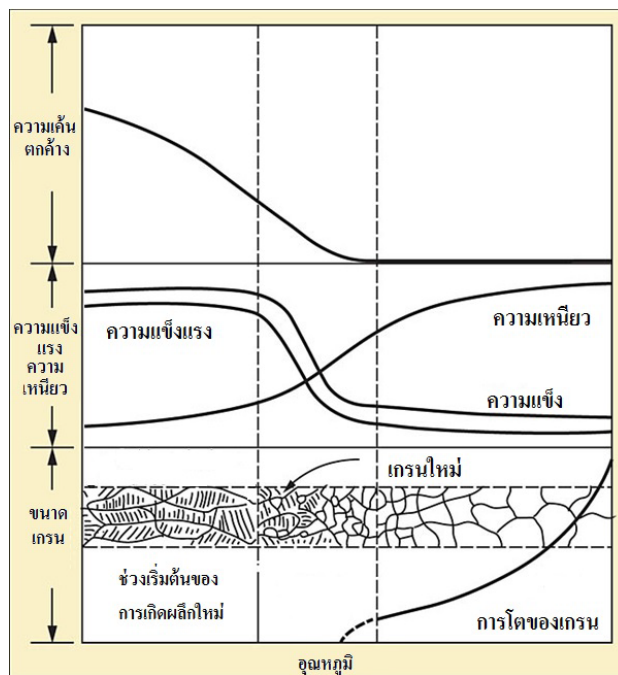
หลักการที่ใช้ในการตกผลึกใหม่ของวัสดุ

1. การตกผลึกใหม่ของวัสดุจะเกิดได้วัสดุจะต้องมีปริมาณของโลหะที่เปลี่ยนรูปต่ำ
2. ถ้าปริมาณการเปลี่ยนรูปต่ำ จะต้องใช้อุณหภูมิสูงขึ้นเพื่อให้เกิดการตกผลึกใหม่
3. ถ้าใช้อุณหภูมิที่ทำให้เกิดการตกผลึกใหม่ที่สูงขึ้นจะช่วยลดเวลาที่ใช้ให้น้อยลงเพื่อให้การตกผลึกสมบูรณ์

2.4.3 การโตของเกรน (Grain growth)

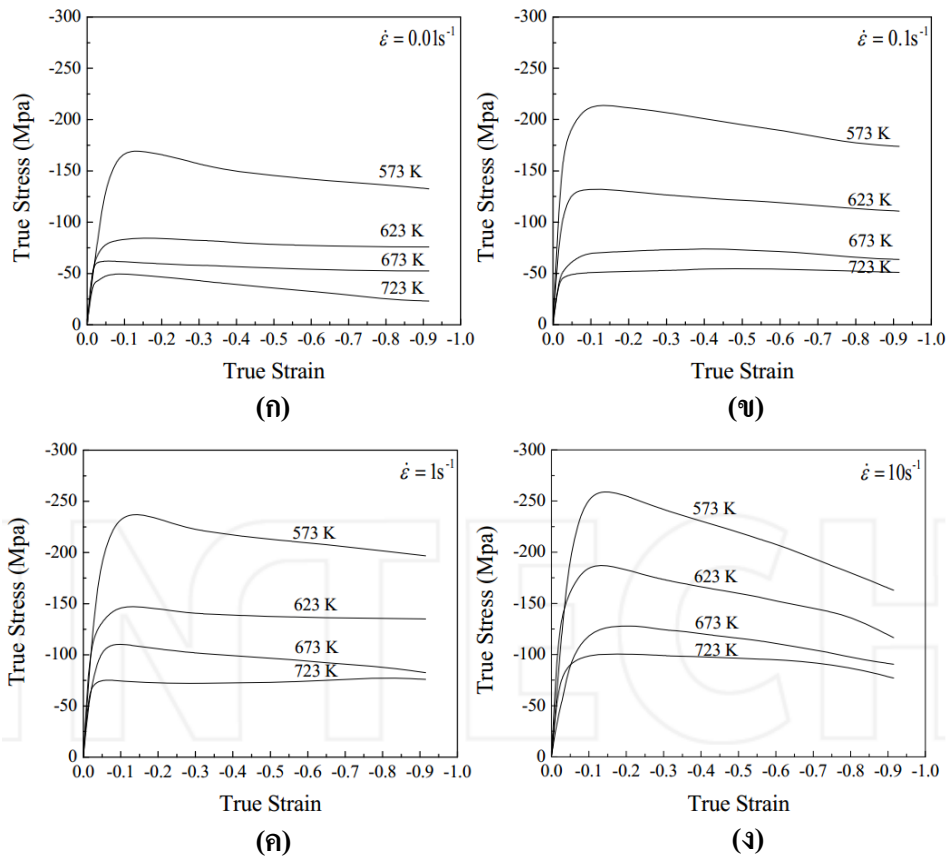
การโตของเกรนเป็นระยะที่เกรนใหม่เริ่มโตขึ้นในทุกทิศทาง หลังจากเกิดการตกผลึกใหม่อย่างสมบูรณ์แล้ว เกรนที่ปราศจากความเครียดจะมีขนาดใหญ่ขึ้นต่อไปได้ถ้าชิ้นงานโลหะยังคงอยู่ที่อุณหภูมิสูงเรียกว่าการโตของเกรน การโตของเกรนไม่จำเป็นต้องเกิดหลังการคืนตัวและการตกผลึกใหม่เท่านั้น อาจเกิดขึ้นได้ในวัสดุหลายผลึกทุกชนิดทั้งโลหะ เมื่อเกรนมีขนาดโตขึ้นทำให้พื้นที่ขอบเกรนโดยรวมลดลงและส่งผลให้พลังงานรวมของวัสดุลดลงและเป็นแรงขับเคลื่อนให้เกิดการโตของเกรน การโตของเกรนเกิดขึ้นโดยการขยับหรือการเคลื่อนที่ของขอบเกรน และไม่ใช่ทุกเกรนที่มีขนาดใหญ่ขึ้นแต่จะพบว่าเกรนเล็กเกิดการหดตัว

ซึ่งจากทฤษฎีของการคืนตัว การเกิดผลึกใหม่และการโตของเกรนจะแสดงดังรูปที่ 2.19 ดังนี้

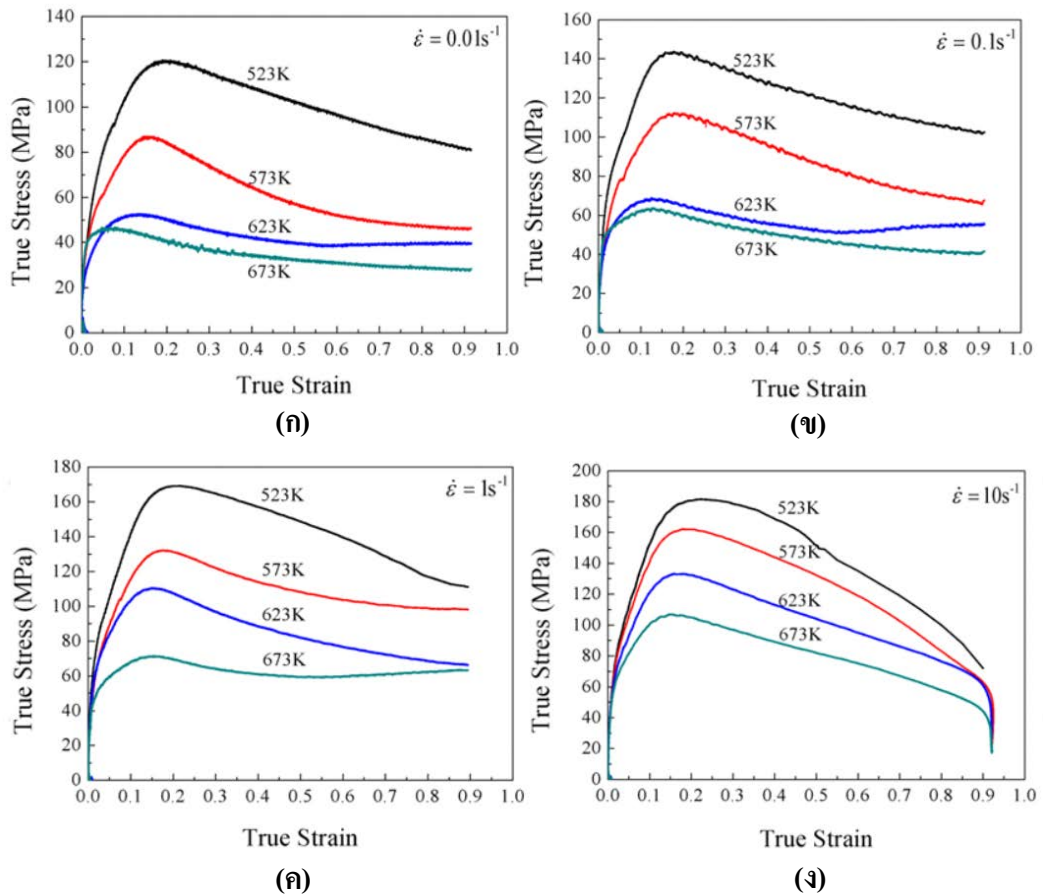


รูปที่ 2.19 อิทธิพลของการคืนตัว การเกิดผลึกใหม่ และการเติบโตของผลึก [17]

ตัวอย่างพฤติกรรมกรรมการเปลี่ยนรูปของวัสดุอื่น



รูปที่ 2.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดจริงของวัสดุโลหะผสมอลูมิเนียม 7075 ที่อัตราความเครียดและอุณหภูมิที่แตกต่างกัน (ก) ที่อัตราความเครียด 0.01 ต่อวินาที (ข) ที่อัตราความเครียด 0.1 ต่อวินาที (ค) ที่อัตราความเครียด 1 ต่อวินาที และ (ง) ที่อัตราความเครียด 10 ต่อวินาที



รูปที่ 2.21 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดจริงของวัสดุโลหะผสมแมกนีเซียม AZ80 ที่อัตราการความเครียดและอุณหภูมิที่แตกต่างกัน (ก) ที่อัตราการความเครียด 0.01 ต่อวินาที (ข) ที่อัตราการความเครียด 0.1 ต่อวินาที (ค) ที่อัตราการความเครียด 1 ต่อวินาที (ง) ที่อัตราการความเครียด 10 ต่อวินาที

รูปที่ 2.20 และ 2.21 แสดงตัวอย่างของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดจริงของวัสดุโลหะผสมอลูมิเนียม 7075 (7075 aluminum alloy) และโลหะผสมแมกนีเซียม AZ80 (Magnesium alloy) ตามลำดับ ซึ่งมีพฤติกรรมเปลี่ยนรูปลักษณ์คล้ายกับวัสดุโลหะผสม MAB และสามารถอธิบายพฤติกรรมไหลของวัสดุจากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดที่แบ่งออกได้ 3 ช่วงที่แตกต่างกันคือ ในช่วงแรกที่กลไกความเครียดแข็ง (WH) มีค่ามากกว่าความเค้นไหลจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงค่าวิกฤตสูงสุด (Critical value) ในช่วงที่สอง ค่าความเค้นไหลจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ต่ไปจนถึงจุดสูงสุด (Peak value) หรือจุดเกิดการหักเห (Inflection) ของอัตราการความเครียดแข็ง (Work hardening rate) ซึ่งเป็นจุดที่แสดงให้เห็นถึงกลไกการอ่อนตัวของวัสดุขึ้นเนื่องมาจากการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์และการคืนตัวแบบพลศาสตร์ที่เห็นได้อย่างชัดเจนมากขึ้น ช่วงที่สามสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะตามแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงความชันของเส้นแบบแรกคือมีการ

ลดลงของค่าความเค้นเรื่อยๆจนถึงสภาวะคงตัว (Steady state) ที่มีการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ สำหรับวัสดุโลหะผสมอลูมิเนียม 7075 ก็จะสังเกตเห็นพฤติกรรมความเค้น-ความเครียดดังกล่าวได้ที่ อุณหภูมิ 573-723 เคลวิน และอัตราความเครียด 0.01 ต่อวินาที ที่อุณหภูมิ 623-723 เคลวิน และอัตราความเครียด 0.1 ต่อวินาที ที่อุณหภูมิ 623-723 เคลวิน และอัตราความเครียด 1 ต่อวินาที ที่อุณหภูมิ 723 เคลวิน และอัตราความเครียด 10 ต่อวินาที ส่วนโลหะผสมแมกนีเซียม AZ80 จะพบพฤติกรรมดังกล่าวที่อุณหภูมิ 573-673 เคลวิน และอัตราความเครียด 0.01 ต่อวินาที ที่อุณหภูมิ 623-673 เคลวิน และอัตราความเครียด 0.1 ต่อวินาที ที่อุณหภูมิ 573 เคลวิน และอัตราความเครียด 1 ต่อวินาที ที่อุณหภูมิ 673 เคลวิน และอัตราความเครียด 1 ต่อวินาที และแบบที่สองคือค่าความเค้นมีการลดลงอย่างต่อเนื่องของการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ของวัสดุ วัสดุโลหะผสมอลูมิเนียม 7075 จะพบพฤติกรรมดังกล่าวที่อุณหภูมิ 573 เคลวิน และอัตราความเครียด 0.1 ต่อวินาทีที่อุณหภูมิ 573 เคลวิน และอัตราความเครียด 1 ต่อวินาที ที่อุณหภูมิ 573-623 เคลวิน และอัตราความเครียด 10 ต่อวินาที และโลหะผสมแมกนีเซียม AZ80 จะพบได้ที่อุณหภูมิ 523 เคลวิน และอัตราความเครียด 0.01 ต่อวินาที ที่อุณหภูมิ 523-573 เคลวิน และอัตราความเครียด 0.1 ต่อวินาที ที่อุณหภูมิ 523 เคลวิน และอัตราความเครียด 1 ต่อวินาที ที่อุณหภูมิ 623 เคลวิน และอัตราความเครียด ต่อวินาที ที่อุณหภูมิ 523-673 เคลวิน และอัตราความเครียด 10 ต่อวินาที ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่ารูปแบบโดยทั่วไปของเส้นโค้งไหลที่มีการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์เกิดจุดสูงสุดเพียงยอดเดียวด้วยการไหลในสภาวะคงตัวที่อุณหภูมิสูง [18]

2.5 แบบจำลองวัสดุภายใต้สภาวะการขึ้นรูปร้อน

2.5.1 การทำนายพฤติกรรมความเค้น-ความเครียดของวัสดุโดยใช้สมการซีเนอร์โฮ

โสมอนต์

ในงานวิจัยของ Sellars และ McTegart ได้นำเสนอสมการไฮเพอร์โบลิกไซน์โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความเครียด ความเค้นไหล และอุณหภูมิ มาทำนายพฤติกรรมการไหลของวัสดุ โดยสมการที่ 2.10 [19]

$$Z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \quad (2.10)$$

และมีการพิจารณาถึงอิทธิพลของอัตราการเปลี่ยนรูปและอุณหภูมิ สมการฮาร์นีย์สในสมการที่ 2.11 นิยมใช้ 3 รูปแบบ ได้แก่ กฎพาวเวอร์ (Power law) ดังแสดงในสมการที่ 2.12 กฎเลขชี้กำลัง (Exponential Law) ดังแสดงในสมการที่ 2.12 และกฎไฮเพอร์โบลิกซายด์ (Hyperbolic-sine law) ดังแสดงในสมการที่ 2.13

$$\dot{\epsilon} = AF(\sigma) \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (2.11)$$

โดยที่

$$\dot{\epsilon} = A\sigma^{n_1} \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (2.12)$$

$$\dot{\epsilon} = A \exp(\beta\sigma) \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (2.13)$$

$$\dot{\epsilon} = A(\sinh \alpha\sigma)^{n_2} \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (2.14)$$

โดย $\dot{\epsilon}$ คืออัตราความเครียด (s^{-1}) R คือค่าคงที่ของแก๊ส ($8.31 \text{ Jmol}^{-1}\text{k}^{-1}$) T คืออุณหภูมิสัมบูรณ์ (K) และ Q คือพลังงานกระตุ้น (kJmol^{-1})

สมการคอนสทิทิวทีฟของสมการซีเนอร์โฮโลมอนด์สามารถใช้ศึกษาพฤติกรรมการไหลของวัสดุพวกโลหะและโลหะผสมในขณะขึ้นรูปที่อุณหภูมิสูง ค่าคงที่ของวัสดุ (Material constant) ในสมการคอนสทิทิวทีฟดังกล่าวสามารถหาได้โดยตรงจากการทดสอบการกดขึ้นรูปร้อน โดยผลของอุณหภูมิ อัตราความเร็วในการขึ้นรูปร้อน จะแสดงพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปโดยค่าคงที่จากสมการซีเนอร์โฮโลมอนด์ เพื่อกำหนดค่าค่าคงที่ของซีเนอร์โฮโลมอนด์และค่าคงที่ของความเค้นไหลจากสมการเป็นตัวกำหนด “Softening Mechanism” ของวัสดุ

ค่าคงที่ของวัสดุ (Q , β , n และ α) ในสมการซีเนอร์โฮโลมอนด์จะกำหนดภายใต้ค่าความเครียดที่แตกต่างกันแต่ละความเครียดอยู่ในช่วง 0.05-0.8 โดยมีช่วงระยะ 0.05 ใช้ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Q , n และ α กำหนดค่า A ที่ค่าความแตกต่างของอัตราความเครียดและความเค้นจากสมการ $Z = A[\sinh(\alpha\sigma)]^{n_2}$ สมการใช้สำหรับกระบวนการของการจำลองในการหาความเค้นไหล ดังสมการที่ 2.15

$$\sigma = \frac{1}{\alpha} \ln \left\{ \left(\frac{Z}{A} \right)^{1/n} + \left[\left(\frac{Z}{A} \right)^{2/n} + 1 \right]^{1/2} \right\} \quad (2.15)$$

เพื่อจะทำนายความแม่นยำของสมการซีเนอร์โฮโลมอนด์ของโลหะผสม MAB ที่อุณหภูมิสูงซึ่งเปรียบเทียบระหว่างผลการทดสอบและผลการทำนายจากการคำนวณ

2.5.2 การทำนายพฤติกรรมความเค้น-ความเครียดของวัสดุโดยใช้สมการซิงกาล่า

แบบจำลองวัสดุของสมการซิงกาล่า ใช้เพื่อทำนายพฤติกรรมการไหลที่อุณหภูมิสูงในช่วงตั้งแต่เริ่มต้นจนกระทั่งถึงความเค้นสูงสุด ดังสมการที่ 2.16 [20]

$$\sigma = \sigma_p \left[\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_p} \exp \left(1 - \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_p} \right) \right) \right) \right]^C \quad (2.16)$$

โดย σ_p คือความเค้นสูงสุด ε_p คือความเครียดสูงสุด และ C คือค่าคงที่ เมื่อเราทราบค่าความเค้นสูงสุดและความเครียดสูงสุด จะสามารถหากราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(\sigma/\sigma_p)$ กับ $1-\varepsilon/\varepsilon_p + \ln(\varepsilon/\varepsilon_p)$ ในสมการที่ 2.17

$$\ln \left(\frac{\sigma}{\sigma_p} \right) = C \left[1 - \frac{\varepsilon}{\varepsilon_p} + \ln \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_p} \right) \right] \quad (2.17)$$

2.5.3 การทำนายพฤติกรรมความเค้น-ความเครียดของวัสดุโดยใช้สมการอาลามี่

จุดเริ่มต้นของการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ของวัสดุส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับอัตราการกระจายตัวและความหนาแน่นของดิสโลเคชันระหว่างกระบวนการเปลี่ยนรูป จะเห็นว่าการสร้างเส้นโค้งของสัดส่วนปริมาตร (Volume fraction) ของการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ใช้การสังเกตโครงสร้างทางจุลภาค โดย B. Yuzeng และคณะในงานวิจัย ได้ทำนายค่า X_d จากกราฟความเค้น-ความเครียด โดยใช้สมการที่ 2.18 [21]

$$X_d = 1 - \exp \left[(-k) \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_p}{\varepsilon_p} \right)^n \right] \quad (2.18)$$

ที่ $k n$ เป็นค่าคงที่ของวัสดุ ε คือ ความเครียด ε_c คือ ค่าความเครียดวิกฤต และ ε_p คือความเครียดสูงสุด

สมการที่ใช้เป็นรูปแบบของการคำนวณการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ซึ่งมีความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \ln(1/(1-X_d))$ และ $\ln((\varepsilon - \varepsilon_p)/\varepsilon_p)$ ภายใต้เงื่อนไขของการขึ้นรูปร้อนจะเป็นเส้นตรงจากสมการที่

2.18 สามารถเขียนใหม่เป็นลอการิทึมธรรมชาติดังสมการ 2.19 เพื่อหาค่า n k นำไปใช้คำนวณหาสัดส่วนปริมาณ

$$\ln \ln \left(\frac{1}{1-X_d} \right) = \ln k + n \ln \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_c}{\varepsilon_p} \right) \quad (2.19)$$

กราฟความเค้น-ความเครียดของโลหะผสม MAB สามารถอธิบายได้โดยการใช้ฟังก์ชันของสมการอาลามี่เกี่ยวข้องกับการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ ซึ่งแบบจำลองของการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ของโลหะผสม MAB สามารถพิสูจน์ได้ว่าสมการอาลามี่มีความแม่นยำจะเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองกับการทำนาย โดยใช้สมการที่ 2.20

$$\sigma = \sigma_p - (\sigma_p - \sigma_{ss}) X_{DRX} \quad (2.20)$$

ที่ σ_p คือความเค้นสูงสุด σ_{ss} คือความเค้นที่สภาวะคงตัว และ σ คือความเค้น

2.5.4 การหาค่าความเค้นสูงสุด (σ_p) และค่าความเค้นวิกฤต (σ_c)

ค่าความเค้นสูงสุดและความเค้นวิกฤตสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความเครียดเชิงกับความเค้น ที่ได้มาจากการเปลี่ยนแปลงความชันของกราฟความเค้นและความเครียด ($\theta = d\sigma/d\varepsilon$) เทียบกับความเค้น สามารถบอกให้เห็นการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างที่เกิดขึ้นในวัสดุว่ามีการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์

ในการหาค่าความเค้นสูงสุดและค่าความเค้นวิกฤตซึ่งในงานวิจัยนี้จะคำนวณด้วยวิธีการของ Najafizadeh และ Jonas ซึ่งใช้สำหรับจุดเริ่มต้นของการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ เนื่องจากความเค้นวิกฤตหาได้จากจุดเปลี่ยนความโค้งของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดเชิงกับความเค้น โดยใช้ฟังก์ชันพหุนามที่ 3 จากสมการที่ 2.21 [22]

$$\theta = A\sigma^3 + B\sigma^2 + C\sigma + D \quad (2.21)$$

เมื่อ A, B, C และ D เป็นค่าคงที่มาจากพฤติกรรมของการเปลี่ยนรูปแบบถาวร การหาอนุพันธ์อันดับสองของสมการที่ 2.19 ได้ความสัมพันธ์ของความเค้นวิกฤตดังนี้

$$\frac{d^2\theta}{d\sigma^2} = 6A\sigma + 2B \quad (2.22)$$

ณ ตำแหน่งที่ความเค้นวิกฤตเงื่อนไข $\frac{d^2\theta}{d\sigma^2} = 0$ เป็นจริง ทำให้สามารถหาค่าความเค้นวิกฤตได้เป็น

$$\sigma_c = -\frac{2B}{6A} \quad (2.23)$$

2.6 ความเสถียรภาพการขึ้นรูป (Dynamic Material Model)

แบบจำลองทางพลศาสตร์ของวัสดุนำมาใช้ในการทำนายพฤติกรรมของการเปลี่ยนรูปในระหว่างการขึ้นรูปรีด โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดจริงเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ ความเครียด และอัตราความเครียด เพื่อคำนวณหาความสามารถในการตอบสนองต่ออัตราความเครียด (Strain rate sensitivity) และความสามารถในการตอบสนองต่ออุณหภูมิ (Temperature sensitivity) ในรูปแบบของแบบจำลองทางพลศาสตร์ในเรื่องการทำนายความสามารถในการขึ้นรูปของวัสดุ จะมีความสัมพันธ์ต่อการปลดปล่อยพลังงานของชิ้นงานในระหว่างการขึ้นรูปรีด [23]

ความสามารถในการตอบสนองต่ออัตราความเครียดสามารถหาได้จากสมการ

$$m = \left\{ \frac{\partial(\log \sigma_p)}{\partial(\log \dot{\epsilon})} \right\}_T \quad (2.24)$$

ความสามารถในการตอบสนองต่ออุณหภูมิ สามารถวิเคราะห์ในเทอมของตัวแปร s ดังสมการ 2.22

$$s = \frac{1}{T} \left\{ \frac{\partial(\ln \sigma_p)}{\partial\left(\frac{1}{T}\right)} \right\}_{\dot{\epsilon}} \quad (2.25)$$

จากความสัมพันธ์ของความสามารถในการตอบสนองต่ออัตราความเครียดและอุณหภูมิ ได้กำหนดเกณฑ์ในการพิจารณาของความเสถียรภาพการขึ้นรูปรีดเมื่อกระบวนการปลดปล่อยพลังงานของวัสดุในระหว่างกระบวนการขึ้นรูปรีดเข้าสู่สภาวะสมดุล ได้พิจารณาในขอบเขตเงื่อนไขที่กำหนดจะแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนรูปของโลหะผสม MAB เป็นเกณฑ์เสถียรภาพดังต่อไปนี้

$$0 < m < 1 \quad (2.26)$$

$$\frac{\partial m}{\partial(\log \dot{\epsilon})} \leq 0 \quad (2.27)$$

$$s > 1 \quad (2.28)$$

$$\frac{\partial s}{\partial(\log \epsilon)} \leq 0 \quad (2.29)$$

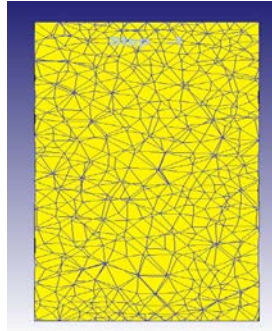
โดยทั่วไปการกำหนดอัตราความเครียดในกระบวนการขึ้นรูปร้อนจะทำให้หลีกเลี่ยงค่าที่สูงมากเกินไป เพื่อป้องกันการเกิดการแตกหักของชิ้นงาน นอกจากนี้เกณฑ์เสถียรภาพดังกล่าวจะนำไปสู่ความเค้นสม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นงาน ทำให้แนวโน้มของข้อจำกัดการเปลี่ยนรูปลดลง ซึ่งจะทำให้การขึ้นรูปมีเสถียรภาพมากขึ้น

2.7 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการขึ้นรูปโลหะก้อน (Finite Element Simulation for Bulk Metal Forming)

การวิเคราะห์ปัญหาทางด้านวิศวกรรมเพื่อหาผลเฉลยที่ถูกต้อง เทียบตรงและแม่นยำ สามารถทำได้หลายวิธีขึ้นอยู่กับลักษณะและความซับซ้อนของปัญหา ซึ่งวิธีที่นิยมใช้และสะดวกรวดเร็วในการหาผลเฉลย คือ วิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งเป็นวิธีที่ประมาณค่าผลเฉลยโดยการแก้ระบบสมการเชิงพีชคณิต โดยการวิเคราะห์แบบจำลองของชิ้นงานที่ถูกแบ่งออกเป็นชิ้นส่วนย่อยๆ ที่เรียกว่าเอลิเมนต์ (Element) ซึ่งรูปร่างของเอลิเมนต์จะถูกกำกับด้วยจุดต่อ (Node) ตั้งแต่ 2 จุดต่อขึ้นไป โดยแต่ละจุดต่อจะเป็นตัวกำหนดการเปลี่ยนตำแหน่งของเอลิเมนต์ ซึ่งการวิเคราะห์ปัญหาโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อที่จะทำนายปัญหาทางด้านวิศวกรรม

ผลเฉลยของแต่ละเอลิเมนต์นั้นจำเป็นต้องสอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ และเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดไว้ในปัญหานั้นๆ ซึ่งหมายความว่าหลักการของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ คือ การสร้างสมการสำหรับแต่ละเอลิเมนต์ที่ตั้งอยู่บนพื้นฐานที่ว่าสมการที่สร้างขึ้นมานั้นจำเป็นต้องสอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหาที่ทำอยู่นั้น จากนั้นจึงนำสมการของแต่ละเอลิเมนต์ที่สร้างขึ้นมาได้มาประกอบกันเข้าก่อให้เกิดระบบสมการชุดซึ่งในความหมายทางกายภาพคล้ายกับการนำทุกเอลิเมนต์มาประกอบเข้าด้วยกันก่อให้เกิดเป็นรูปร่างลักษณะทั้งหมดของปัญหาที่แท้จริง จากนั้นจึงทำการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่นำมาลงในระบบสมการชุดนี้แล้วจึงทำการแก้สมการดังกล่าว ซึ่งเกิดผลเฉลยโดยประมาณที่ต้องการ ณ ตำแหน่งต่างๆของปัญหานั้น

ซึ่งสมการที่ใช้ในงานวิจัยคือ สมการซีเนอร์โฮโลมอนต์ ในการคำนวณแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ มักจะนิยมใช้กับวัสดุที่เกิดการเสียรูปแบบถาวรเป็นสมการพื้นฐานที่มีความเกี่ยวข้องกับความสัมพันธ์ ความเครียดและอุณหภูมิ จะมีความเกี่ยวข้องในกระบวนการขึ้นรูปร้อน

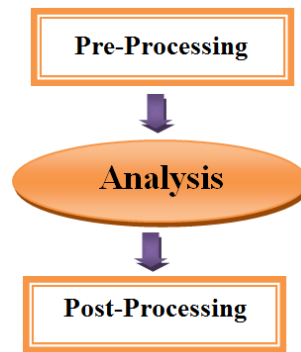


รูปที่ 2.22 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการขึ้นรูปโลหะก้อน

สำหรับระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) เป็นระเบียบวิธีการหาผลเฉลยโดยประมาณ (Approximate Solution) ซึ่งมีลำดับขั้นตอนดังนี้ [24]

1. หาสมการเชิงอนุพันธ์เริ่มต้นที่เหมาะสมกับปัญหา รวมทั้งเงื่อนไขขอบเขตและเงื่อนไขเริ่มต้นที่เหมาะสม
2. แบ่งรูปร่างลักษณะของชิ้นงานออกเป็นเอลิเมนต์
3. กำหนดค่าคงที่จากผลการทดลอง โดยการแทนฟังก์ชันโดยประมาณอย่างง่าย
4. ทำการพิจารณาทีละเอลิเมนต์ โดยการแทนฟังก์ชันนี้ในสมการเชิงอนุพันธ์เริ่มต้นและอาศัยคณิตศาสตร์ชั้นสูงช่วยจัดการสมการให้อยู่ในรูปแบบเมตริกซ์จนเป็นสมการสำหรับเอลิเมนต์ (Element Equation) ขึ้นมา
5. รวมสมการต่างๆ เข้าด้วยกัน (Assemble) เป็นสมการระบบรวม (System of Equation)

ในปัจจุบันมีโปรแกรมสำเร็จรูปทางไฟไนต์เอลิเมนต์หลายโปรแกรม แต่ละโปรแกรมต่างๆ มีความสามารถแตกต่างกัน ในงานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรมทางการค้าชื่อ “DEFORM 3D” โดยขั้นตอนในการใช้งานโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์มี 3 ขั้นตอน คือ Pre-Processor Analysis และ Post-Processor



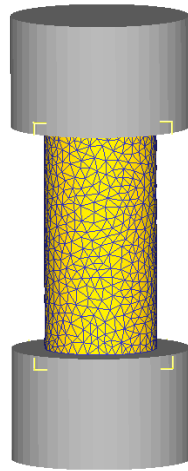
รูปที่ 2.23 ขั้นตอนการใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

1. Pre-Processor

Pre-Processor คือการจัดเตรียมข้อมูลเพื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยเริ่มจากการสร้างแบบจำลองของชิ้นงาน เพื่อจำลองรูปร่างของชิ้นงานที่ต้องการวิเคราะห์ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ดังรูปที่ 2.24 ในส่วนนี้สามารถสร้างจากโปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์เองได้ แต่ถ้าเป็นชิ้นงานที่มีรูปร่างที่ซับซ้อนควรสร้างจากโปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์ เช่น CAD (Computer-Aid-Design) แล้วนำเข้าไปยังโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์เมื่อได้แบบจำลองชิ้นงานแล้ว จากนั้นจึงสร้างรูปแบบไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Model) โดยแบ่งย่อยรูปร่างของแบบจำลองขนาดใหญ่ให้เป็นเอลิเมนต์ (Element) เอลิเมนต์ขนาดต่างๆ ตามที่เรากำหนด จะมีจุดมุมของแต่ละเอลิเมนต์ซึ่งเรียกว่าจุดต่อ (Node) จะเป็นจุดเชื่อมต่อของแต่ละเอลิเมนต์เข้าด้วยกัน กลายเป็นรูปร่างตามแบบจำลองที่เราต้องการวิเคราะห์ ดังรูปที่ 2.25

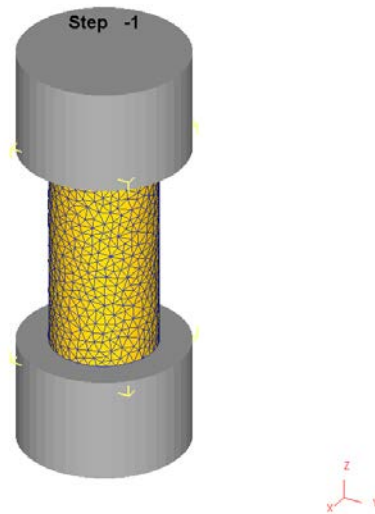


รูปที่ 2.24 แบบจำลองของชิ้นงาน



รูปที่ 2.25 แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของชิ้นงาน

จากนั้นจะต้องกำหนด Material Properties ของแต่ละชิ้นงาน นอกจากการเตรียมรูปแบบไฟไนต์เอลิเมนต์แล้ว ขั้นตอน Pre-Processor ยังรวมถึงการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของปัญหา (Boundary Conditions) เช่น ทิศทาง และระยะการเคลื่อนที่ การกำหนดขนาดและทิศทางของแรงกระทำ ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.26



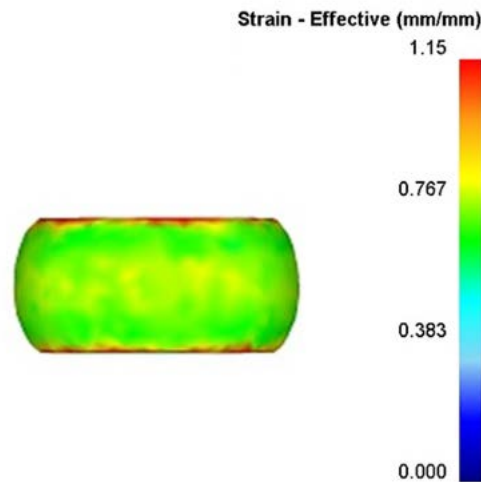
รูปที่ 2.26 กำหนดให้การเคลื่อนที่ในแกน

2. Analysis

Analysis คือ การวิเคราะห์และแก้สมการ โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) หรือ FEM เป็นวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขชนิดหนึ่งสำหรับแก้สมการเชิงอนุพันธ์

3. Post-Processor

Post-Processor เป็นขั้นตอนการแสดงผลการวิเคราะห์ ปัญหาที่ผ่านกระบวนการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยมากจะแสดงผลที่คำนวณได้เป็นแถบสี ดังรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.27 การแสดงผลของโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.8.1 งานวิจัยเกี่ยวกับสมการแบบจำลองของวัสดุ (Modeling Equation of Materials)

2.8.1.1 สมการซีเนอร์โฮโลมอนด์

จากความสัมพันธ์ของสมการคอนสทิทิวทีฟได้นำมาประยุกต์เพื่ออธิบายคุณสมบัติการไหลแบบถาวรของโลหะผสม โดยเส้นโค้งความเค้น-ไหลจะขึ้นอยู่กับผลการทดสอบ เพื่อดุลลักษณะพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปที่อุณหภูมิสูง ซึ่งการทำนายจากการทดสอบโดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นจริง-ความเครียดจริง โดยสมการคอนสทิทิวทีฟที่ใช้จะตั้งอยู่บนพื้นฐานของตัวแปรด้วยสมการซีเนอร์โฮโลมอนด์ที่ถูกนำมาพิจารณา จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองของสมการซีเนอร์โฮโลมอนด์สามารถนำมาประเมินความถูกต้องและแม่นยำของความเค้น-ไหลของโลหะผสมที่ใช้ในการทดสอบได้ [25,26] สำหรับงานวิจัยของ Lin และคณะ [27] ได้ศึกษาการกดขึ้นรูปร้อนของเหล็ก 42CrMo และผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นจริง-ความเครียดจริง โดยใช้ตัวแปรของสมการซีเนอร์โฮโลมอนด์ได้ Chen และคณะ[28] ได้พิจารณาลักษณะการเปลี่ยนรูปที่อุณหภูมิสูงของโลหะ 42CrMo และได้ศึกษาเส้นโค้งความเค้น-ไหลของสมการคอนสทิทิวทีฟ ซึ่งพิจารณาค่าความเครียดแข็ง (Work hardening) การคืนตัวแบบพลศาสตร์ (DRV) และ การเกิดผลึก

ใหม่แบบพลศาสตร์ (DRX) การทดสอบการกดขึ้นรูปร้อนที่อุณหภูมิและอัตราความเครียดที่แตกต่างกันสำหรับโลหะผสม Al-Cu-Mg โดย Banerjee และคณะ [29] การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นจริง-ความเครียดจริง โดยใช้ตัวแปรของสมการซีเนอร์โฮโลมอนด์ได้พิจารณาที่เส้นโค้งความเค้นไหลเพียงยอดเดียว และนำผลการทดสอบมาเปรียบเทียบกับผลการทดลอง Wanjara และคณะ [30] ได้ศึกษาจากสมการคอนสทิทิวทีฟอยู่บนพื้นฐานของความสัมพันธ์ฮาร์ริเนยส โดยใช้ไฮเพอร์โบลิกชาวด์สำหรับการทำนายความเค้นไหลของโลหะผสม IMI834 Zhang และคณะ [31] ได้กำหนดค่าของสมการคอนสทิทิวทีฟที่สามารถอธิบายความเค้นไหลของเหล็ก TWIP ที่มีแมกนีเซียมสูง นำเสนอผลการศึกษาที่ได้เปรียบเทียบกับระหว่างการทดลองและการคำนวณโดยใช้แบบจำลองคอนสทิทิวทีฟสมการคอนสทิทิวทีฟสำหรับการทำนายความเค้นไหลของโลหะผสม Ti-6Al-4V ที่อุณหภูมิที่พิจารณาได้นำเสนอโดย Cai และคณะ [32] Haghdad และคณะ [33] ได้นำเสนอแบบจำลองฮาร์ริเนยสสำหรับใช้อธิบายพฤติกรรมความเค้นไหลของโลหะผสมอลูมิเนียม A356 แบบหล่อ ความสัมพันธ์ของสมการคอนสทิทิวทีฟที่ใช้ในการประเมินและตรวจสอบผลกระทบของตัวแปรที่อุณหภูมิสูงของโลหะผสม 2099 จะคำนึงถึงผลกระทบของความเครียดได้นำเสนอโดย Zhang และคณะ [34]

2.8.1.2 สมการชิงกาล่าและสมการอาลามี่

Cingara และคณะ [35] ได้ศึกษาบริเวณความเครียดแข็งของการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์โดยใช้สมการเอมพิริคัล ซึ่งสามารถอธิบายพฤติกรรมการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ได้ Wang และคณะ [36] ได้พิจารณาเงื่อนไขของความเค้นวิกฤตในการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ของเหล็ก 20MnNiMo จากนั้นจะใช้การวิเคราะห์โดยได้คำนวณจากสัดส่วนปริมาตรของการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ (X_p) และค่าของการคำนวณของความสามารถในการตอบสนองต่ออัตราความเครียด (SRS) Jia และคณะ [37] ได้ศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปร้อนและการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ของโลหะผสม P/M Ti-22Al-25Nb พัฒนาสมการคอนสทิทิวทีฟเพื่อทำนายพฤติกรรมกลไกการอ่อนตัวของการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ Quan และคณะ [38] ได้ระบุความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดจริงแบบอัด (Extrude) ของเหล็ก 42CrMo ที่มีความแข็งแรงสูง ใช้ความสัมพันธ์ของสัดส่วนปริมาตรของการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์โดยใช้การคำนวณของสมการอาลามี่รวมทั้ง ϵ_0 , ϵ^* เป็นฟังก์ชันของ Z และทำนายโดยใช้การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค การศึกษาผลกระทบขององค์ประกอบไมโครอัลลอย เช่น Nb, V และ Ti ในพฤติกรรมความเค้นไหลของเหล็ก TWIP โดยการวิเคราะห์การคืนตัวแบบพลศาสตร์และการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์และโครงสร้างจุลภาคของการเปลี่ยนรูปร้อน นำเสนอ

โดย Reyes และคณะ [39] ความเค้นวิกฤตและความเครียดสำหรับจุดเริ่มต้นของการเกิดผลึกใหม่ พลศาสตร์ได้พิจารณาโดยใช้อัตราความเครียดเทียบกับความเค้น (Work hardening rate versus Stress) โดยใช้วิธีลอการิทึมแบบธรรมชาติของอัตราความเครียดกับความเค้นและสมการคอนสทิทิวทีฟโดย Mirzadeh และคณะ [40] Liu และคณะ [41] ได้นำเสนอเงื่อนไขการเปลี่ยนรูปร้อนในการกำหนดค่า ความเครียดวิกฤตสำหรับการเริ่มต้นของการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์เพื่อนำไปสู่การคำนวณ สัดส่วนปริมาตรของการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์โดยการคำนวณนี้ได้ใช้สมการอาลามี่ของโลหะ ผสม NO2028 Qin และคณะ [42] ได้ศึกษาแบบจำลองสำหรับใช้เป็นตัวแทนของความเค้นไหลของ โลหะผสมแมกนีเซียมที่สามารถใช้ในการอธิบายพฤติกรรมการไหลรวมถึงกลไกความเครียดแข็งของ การเกิดการคืนตัวแบบพลศาสตร์และตัวแปรของการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์

2.8.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางพลศาสตร์ของวัสดุ (DMM)

แบบจำลองทางพลศาสตร์ของวัสดุและแบบจำลองทางจลนศาสตร์สามารถประยุกต์ในการทำนาย โครงสร้างจุลภาคและการเปลี่ยนรูปที่มีความเสถียรภาพของโลหะผสม MAB ในการศึกษา Zhou และคณะ [43] ได้พิจารณาแผนภาพกระบวนการ (Processing map) ของโลหะผสม GH960 และได้ทำ แบบจำลอง DMM เพื่อดูพฤติกรรมการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ภายใต้การเปลี่ยนรูปร้อนที่ เหมาะสม Luo และคณะ [44] ได้แสดงแผนภาพกระบวนการในการกดขึ้นรูปภายใต้อุณหภูมิเดียวกัน ของโลหะผสมอะลูมิเนียม 7075 และโครงสร้างจุลภาคถูกใช้เพื่อทำนายกลไกการเปลี่ยนรูป (Deformation mechanism) เป็นกระบวนการที่ดีที่สุดจะใช้เพื่อออกแบบการทำงานรูปร้อน สำหรับ โลหะผสม AZ61 เพื่อศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปร้อนเกี่ยวกับโครงสร้างจุลภาคและนำเสนอ แผนภาพโดย Xu และคณะ [45] แสดงแผนภาพที่ได้คำนวณและวิเคราะห์ตามแบบจำลอง DMM ซึ่ง มี การเปลี่ยนแปลงที่มีประสิทธิภาพที่ดีของการกระจายพลังงานภายใต้ฟังก์ชันของอุณหภูมิและอัตรา ความเครียด การทำนายเสถียรภาพและการเสถียรภาพของการทอบขึ้นงานจะมีความแม่นยำเมื่อ เทียบกับโครงสร้างจุลภาคซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้การทอบขึ้นรูปร้อนเป็นแบบลักษณะเหมือนแพนเค้ก โดย วัสดุ Ti-6Al-4V นำเสนอโดย Park และคณะ [46] Venugopal และคณะ [47] ได้พิจารณาเพื่อระบุ บริเวณที่มีความเสถียรภาพสำหรับกระบวนการที่ปลอดภัยของไทเทเนียมบริสุทธิ์

บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย รวมทั้งเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ศึกษาการเปลี่ยนรูปภายใต้กระบวนการกดขึ้นรูปร้อน การเตรียมชิ้นงานและขั้นตอนของการทดสอบ

3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

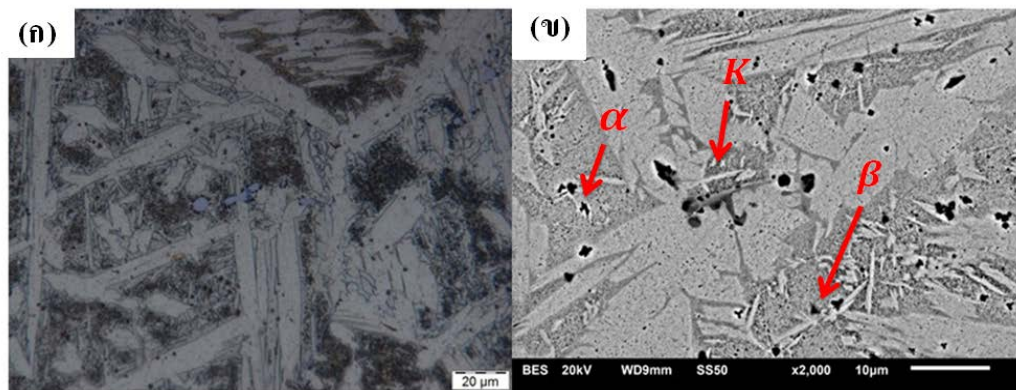
3.1.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

โลหะผสม MAB ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้รับความอนุเคราะห์มาจากกรมอุตสาหกรรรมหรือในรูปแบบชิ้นงานหล่อมีลักษณะเป็นก้อน (Ingot) ซึ่งมีน้ำหนักประมาณ 80 กิโลกรัม หลังจากนั้นนำมาอบที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 6 ชั่วโมงและปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ เพื่อที่จะให้ได้โครงสร้างจุลภาคที่เป็นเนื้อเดียวกัน องค์ประกอบทางเคมีของโลหะผสม MAB ที่ศึกษาได้ถูกตรวจสอบด้วยเครื่องออฟติคอลลิมิตชันสเปกโตรมิเตอร์ (OES) ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสม MAB ที่ใช้ในงานวิจัย

องค์ประกอบทางเคมีของโลหะผสม MAB คิดเป็น % โดยน้ำหนัก						
Cu	Al	Mn	Fe	Ni	Si	Pb
balanced	8.160	7.540	2.560	2.360	0.038	0.150

รูปที่ 3.1 (ก) แสดงภาพโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม MAB ตั้งต้นที่อยู่ในรูปของ ingot ที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง และรูปที่ 3.1 (ข) แสดงภาพโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม MAB ตั้งต้นที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด โหมด BSE ซึ่งจะเห็นรายละเอียดของโครงสร้างจุลภาคได้ชัดเจน



รูปที่ 3.1 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม MAB ตั้งต้นที่ผลิตด้วยการหล่อด้วย (ก) กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (ข) กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดโหมด BSE

3.1.2 เครื่อง ใดลาโตมิเตอร์ (Deformation Dilatometer) [48]

ดังรูปที่ 3.2 เครื่องใดลาโตมิเตอร์เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษากระบวนการเสีรูปร้อนโดยมีฟังก์ชันที่สามารถให้ความร้อนแก่ชิ้นตัวอย่างในสภาพบรรยากาศควบคุม หรือสุญญากาศ และสามารถทำการกดเปลี่ยนรูปร้อนขึ้นตัวอย่าง ตลอดจนควบคุมอัตราการเย็นตัวเมื่อเสร็จสิ้นการขึ้นรูป จึงสะดวกในการจำลองสถานะที่ใกล้เคียงกับกระบวนการผลิตจริง โดยใช้ชิ้นงานตัวอย่างในปริมาณน้อย นอกจากนี้ยังสามารถนำชิ้นตัวอย่างที่ผ่านการทดสอบไปศึกษาสมบัติต่างๆของวัสดุ เช่น ปริมาณเฟส (Phase constituent) ลักษณะและขนาดเกรน ตะกอนของธาตุผสม (Precipitate) และความแข็ง (Hardness) เป็นต้น

นอกจากนี้เครื่องใดลาโตมิเตอร์ยังสามารถใช้ศึกษาพฤติกรรมอื่นๆ ของโลหะได้อีกด้วย เช่น ความต้านทานการเสีรูปร (Deformation load) ที่อุณหภูมิ และอัตราการเสีรูปรที่แตกต่างกัน การเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ของโลหะระหว่างการเสีรูปรหรือหลังการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ (Dynamic Recrystallization or Static Recrystallization) เฟสของโลหะที่ผ่านการอบชุบความร้อนที่อุณหภูมิ เวลา และอัตราการเย็นตัวที่แตกต่างกัน โดยแสดงผลเป็นกราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงขนาดที่อัตราการเย็นตัวต่างๆของชิ้นงานทดสอบซึ่งสามารถนำมาสร้างกราฟ Time Temperature Transformation (TTT) Diagram และ Continuous Cooling Transformation (CCT) Diagram ได้ นอกจากนี้ยังสามารถจำลองลักษณะ โครงสร้างจุลภาคของโลหะที่ศึกษาก่อนทำการเย็นตัวได้ด้วย เช่น ขนาดเกรนตั้งต้นของเฟสอสเตนไนต์ ปริมาณความเครียดที่โลหะได้รับก่อนการเย็นตัว

เครื่องใดลาโตมิเตอร์สามารถวัดการเปลี่ยนแปลงความยาวของวัสดุเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไป ทำให้สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน และอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสได้ นอกจากนี้เมื่อ

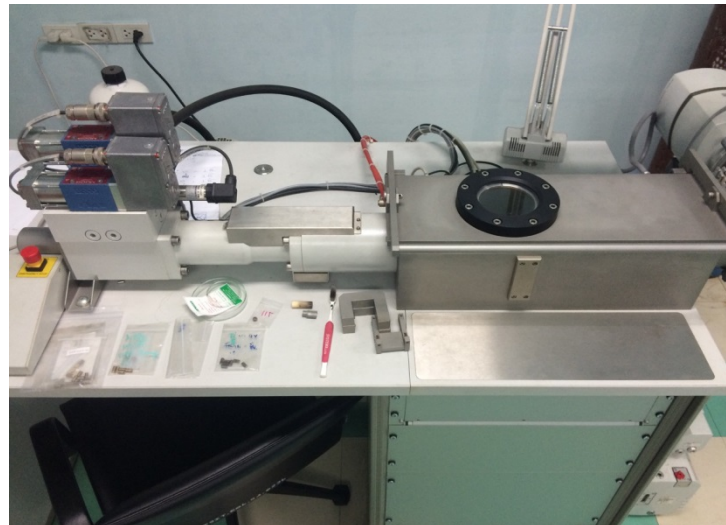
ประกอบกับการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นตัวอย่างหลังการทดสอบ เช่น ภายถ่ายจากกล้อง Microscope ก็จะสามารถให้ข้อมูลเกี่ยวกับการตกตะกอน (Precipitation) ที่สภาวะ Heat Treatment Conditions ต่างๆได้ สำหรับเครื่องไดลาโตมิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบเป็นรุ่น 805A/D โดยที่คุณสมบัติของเครื่องไดลาโตมิเตอร์จะแสดงในตารางที่ 3.2 จะสามารถให้ความร้อนแก่ชิ้นตัวอย่างด้วยอัตราสูงถึง 100 เคลวินต่อวินาที โดยขดลวดเหนี่ยวนำ และให้ความร้อนได้สูงสุดได้ที่อุณหภูมิถึง 1500 องศาเซลเซียสดังรูปที่ 3.3 ในบรรยากาศควบคุม หรือ สุญญากาศ (ระดับ 10^{-6} บาร์) สำหรับแรงการขึ้นรูปสูงสุดคือ 20 กิโลนิวตัน โดยสามารถทำการกดขึ้นรูปด้วยความเครียดจริง (True strain) สูงสุดถึง 1.2 และสามารถทำการขึ้นรูปได้หลายครั้งแบบต่อเนื่อง (Multi-step) เมื่อเสร็จสิ้นการเสียรูป สามารถทำให้ชิ้นตัวอย่างเย็นตัวลงโดยก๊าซอาร์กอน หรือ ฮีเลียมด้วยอัตราการเย็นตัวสูงสุดถึง 100 เคลวินต่อวินาที ลักษณะชิ้นงานสำหรับการทดสอบเครื่องไดลาโตมิเตอร์เป็นรูปทรงกระบอกขนาดเส้นศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร สูง 10 มิลลิเมตร

ลักษณะการใช้งาน จึงมักจะเป็นการนำข้อมูลการเปลี่ยนแปลงของวัสดุชนิดต่างๆ (แผนภาพการเย็นตัวอย่างต่อเนื่อง) และข้อมูลสมบัติทางกลของวัสดุที่อุณหภูมิสูง (กราฟความเค้น-ความเครียดที่อุณหภูมิและอัตราความเครียดต่างๆ) มาใช้ในการออกแบบกระบวนการผลิต การปรับปรุงพัฒนากระบวนการผลิต การกำหนดพารามิเตอร์ที่ใช้ในกระบวนการผลิตให้เหมาะสม (เช่น การกำหนดอุณหภูมิที่ใช้ในการเปลี่ยนรูป อัตราการเปลี่ยนรูป อุณหภูมิ อัตราการเย็นตัว ฯลฯ) ตลอดจนการศึกษาความเป็นไปได้ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ชนิดใหม่ๆ

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติของเครื่องไดลาโตมิเตอร์รุ่น 805A/D (Specification)

เกณฑ์ตัวดำเนินการ	คุณสมบัติของเครื่องไดลาโตมิเตอร์
อุณหภูมิใช้งานขึ้นอยู่กับลักษณะการทดสอบ - การทดสอบการเย็นตัว (Quenching) - การทดสอบเสียรูปทางกล (Deformation & Quenching)	20-1500 และ -150-1000 องศาเซลเซียส 20-1500 องศาเซลเซียส
ลักษณะการให้ความร้อน	ขดลวดความร้อน (Inductive)
ลักษณะของชิ้นงานทดสอบ	Electro-Conductive Solid
บรรยากาศที่ใช้ในการทดสอบ	อากาศ สุญญากาศและปกคลุมด้วยแก๊สเฉื่อย
ความละเอียดในการวัด	0.05 μm / 0.05 องศาเซลเซียส

เกณฑ์ตัวดำเนินการ	คุณสมบัติของเครื่องไดลาโตมิเตอร์	
	การทดสอบการเย็นตัว	การทดสอบเสียรูปทางกล
ลักษณะกายภาพของชิ้นทดสอบ	ทรงกระบอกตัน ทรงกระบอกกลวง เส้นผ่าศูนย์กลาง 4 mm. ยาว 10 mm.	ทรงกระบอกตัน เส้นผ่าศูนย์กลาง 5 mm. ยาว 10 mm.
อัตราการให้ความร้อนสูงสุด	4000 Ks ⁻¹	100 Ks ⁻¹
อัตราการเย็นตัวสูงสุด	2500 Ks ⁻¹	100 Ks ⁻¹
แรงที่ใช้ในการทำให้เสียรูป		สูงสุด 25 kN
ความเร็วที่ใช้ในการทำให้เสียรูป		0.01-125 mm s ⁻¹
อัตราความเครียด		0.001-12.5 s ⁻¹
ความเครียดจริง		0.05-1.2



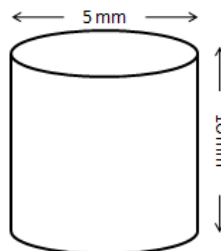
รูปที่ 3.2 เครื่องไดลาโตมิเตอร์



รูปที่ 3.3 ระบบให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ

3.2 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ

การเตรียมชิ้นงานเพื่อทำการทดสอบด้วยเครื่องไดลาโตมิเตอร์ทำโดยการตัดแบ่งชิ้นงานเพื่อให้ได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร สูง 10 มิลลิเมตรจากชิ้นงาน ingot ตั้งต้นดังแสดงในรูปที่ 3.4

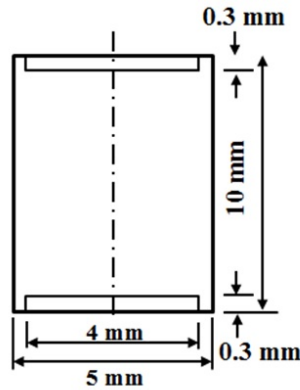


รูปที่ 3.4 ขนาดชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบการกดขึ้นรูปร้อนด้วยเครื่องไดลาโตมิเตอร์

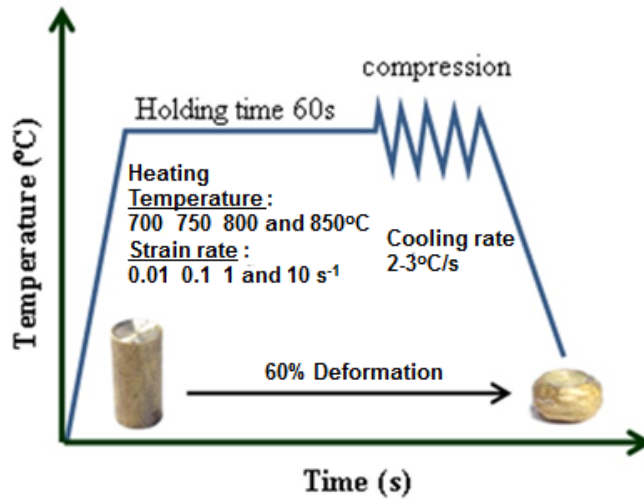
3.3 ขั้นตอนการทดสอบการกดขึ้นรูปร้อน

สำหรับการทดสอบการกดขึ้นรูปร้อน ชิ้นงานตั้งต้นเป็นทรงกระบอกมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร และมีความสูง 10 มิลลิเมตร ตัวอย่างในแต่ละชิ้นงานที่ได้ทำการทดสอบจะมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 มิลลิเมตรและมีความสูง 0.3 มิลลิเมตรที่ปลายทั้งสองด้านของชิ้นงานจะทำเป็นที่กักเก็บสารหล่อลื่นซึ่งใช้เพื่อลดแรงเสียดทานระหว่างการทดสอบดังรูปที่ 3.5 จะเริ่มต้นโดยให้อุณหภูมิกับชิ้นงานด้วยอัตราการให้ความร้อนที่ 10 องศาเซลเซียสต่อวินาที จนถึงอุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส

และให้อุณหภูมิกับชิ้นงานคงที่ต่อไปเป็นเวลานาน 1 นาที หลังจากนั้นจึงทำการเย็นตัวชิ้นงานลงถึงอุณหภูมิที่ต้องการการกดขึ้นรูปซึ่งในที่นี้ได้ทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 700 750 800 และ 850 องศาเซลเซียส เมื่อถึงอุณหภูมิที่ต้องการแล้วจะเริ่มทำการกดด้วยความเร็ว 0.01 0.1 1 และ 10 ต่อวินาที เพื่อทำการเปลี่ยนรูปวัสดุ โดยจะหยุดการกดขึ้นรูปเมื่อชิ้นงานมีความสูงเป็น 4 มิลลิเมตร (60 % ของความเคียว) จากนั้นจึงทำการเย็นตัวชิ้นงานลงอย่างรวดเร็ว ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.5 ขนาดชิ้นงานที่ได้เตรียมบ่าทั้งสองข้างเพื่อใส่สารหล่อลื่น



รูปที่ 3.6 กระบวนการทดสอบการเปลี่ยนรูปร้อน

บทที่ 4 ผลการดำเนินงานวิจัย

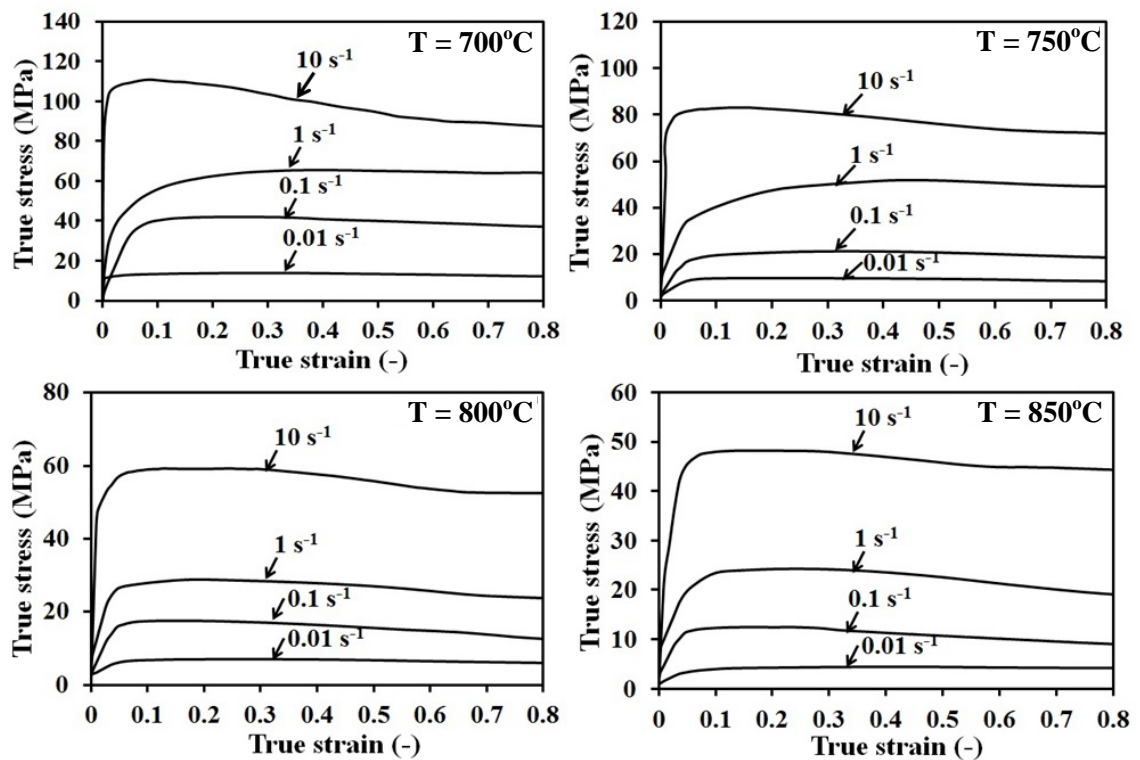
ในงานวิจัยนี้ ได้ใช้โปรแกรม DEFORM 3D ในการจำลองการขึ้นรูปร้อนชิ้นงาน โดยกำหนดค่าคงที่ของวัสดุที่จำเป็นต้องใช้ในการจำลอง โดยอาศัยสมการซีเนอร์โฮโลมอนด์ ซึ่งเป็นสมการที่แสดงพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปของวัสดุที่คำนวณ ได้ขึ้นอยู่กับค่าคงที่ของวัสดุ (Material constant) ผลการคำนวณจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลจากการทดลอง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

4.1 พฤติกรรมการเปลี่ยนรูปของวัสดุในการทดสอบกดขึ้นรูปร้อน

4.1.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดจริง

ในการทดสอบโลหะผสม MAB ด้วยการกดขึ้นรูปร้อนได้กำหนดอัตราความเครียดไว้ที่ 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 ผลทดสอบการกดขึ้นรูปร้อนที่แสดงในรูปที่ 4.1 แสดงถึงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียด ภายใต้อุณหภูมิและอัตราความเครียดที่แตกต่างกัน จากผลการทดลอง พบว่าโลหะผสม MAB จากนั้นความเค้นจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนกระทั่งเข้าสู่ช่วงพลาสติก (Plastic) ซึ่งในช่วงนี้ ชิ้นทดสอบจะเกิดการเสียรูปแบบถาวร หลังจากจุดนี้ไปความเค้นจะเพิ่มขึ้นแต่จะเพิ่มขึ้นในอัตราที่ช้าลง เพราะจะเกิดความเครียดแข็ง (Strain hardening) ขึ้นภายในวัสดุด้วย จนกระทั่งความเค้นมีค่าสูงสุด

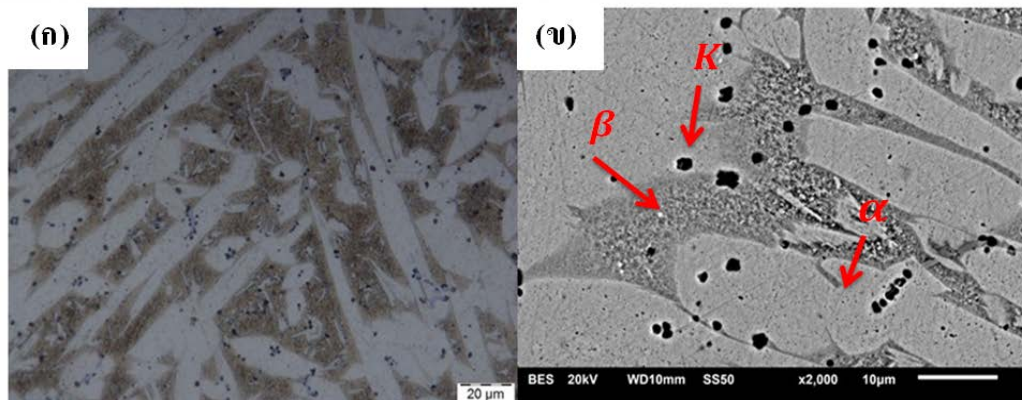
หลังจากนั้นความเค้นจะเริ่มลดลงเนื่องจากการอ่อนตัวของวัสดุ (Softening) ซึ่งเป็นผลมาจากการที่วัสดุได้รับความร้อน โดยการลดลงของความเค้นในช่วงนี้ แสดงให้เห็นอัตราการอ่อนตัวมีค่าสูงกว่าอัตราความเครียดแข็ง (Hardening rate) ของวัสดุ สังเกตได้จากความเค้นลดลงในขณะที่ความเครียดเพิ่มขึ้นจนกระทั่งความเค้นเข้าสู่สภาวะอิ่มตัว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



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 α 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

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

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

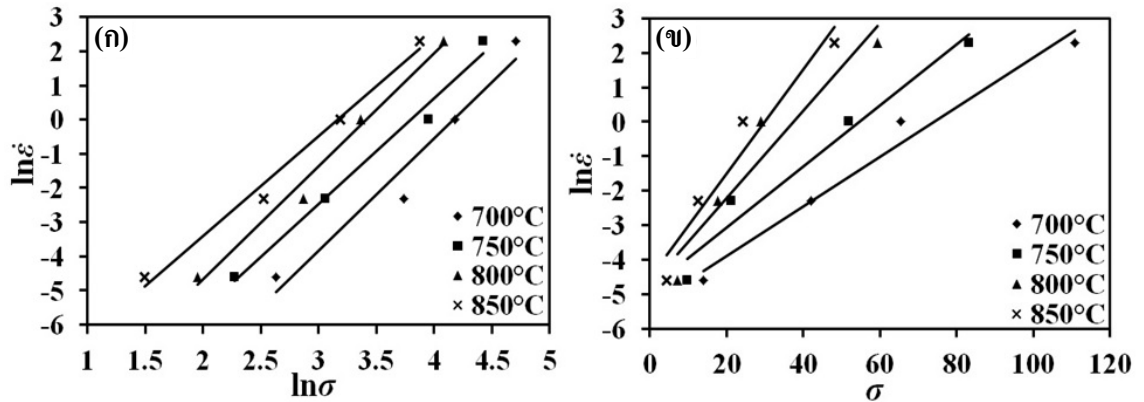
พิจารณาที่อุณหภูมิการขึ้นรูปคงที่ใดๆในระหว่างการกดขึ้นรูปร้อน อนุพันธ์ย่อย (Partial Differentiation) ของสมการ 4.1 และ 4.2 เทียบกับความเครียดระหว่าง 0.05-0.8 สามารถแสดงได้ดังนี้

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

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

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

$$\ln[\sinh(\alpha\sigma)] = \frac{Q}{n_2RT} + \frac{1}{n_2} \ln \dot{\epsilon} - \frac{1}{n_2} \ln A \tag{4.7}$$

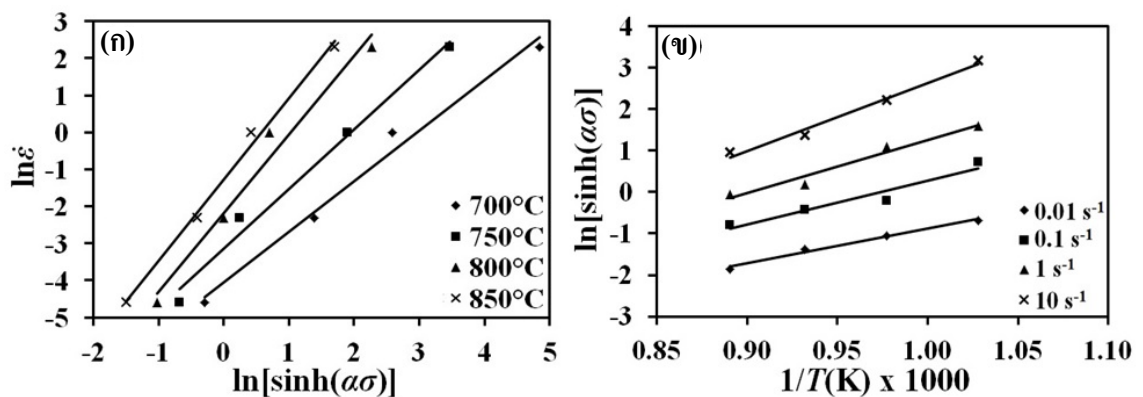
พิจารณาการขึ้นรูปร้อนที่อุณหภูมิคงที่ อนุพันธ์ย่อยของสมการที่ 4.7 เทียบกับอุณหภูมิการเสียรูป ($1/T$) จะแสดงได้เป็น

$$\left[\frac{\partial \ln\{\sinh(\alpha\sigma)\}}{\partial(1/T)} \right]_{\dot{\epsilon}} = \frac{Q}{n_2R} \tag{4.8}$$

ดังนั้น ค่าของพลังงานกระตุ้น (Q) สามารถหาได้จาก

$$Q = Rn_2 \left[\frac{\partial \ln \{\sinh(\alpha\sigma)\}}{\partial(1/T)} \right]_{\dot{\epsilon}} \tag{4.9}$$

ค่าของเทอม $[\partial \ln\{\sinh(\alpha\sigma)\}/\partial(1/T)]_{\dot{\epsilon}}$ จะถูกหาโดยวิธีการถดถอยเชิงเส้นของความสัมพันธ์ระหว่างความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ และ $(1000/T)$ สำหรับค่าอัตราความเครียดแต่ละค่า ดังแสดงในรูปที่ 4.4 (ข) ด้วยวิธีนี้ค่าจะได้พลังงานกระตุ้น 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

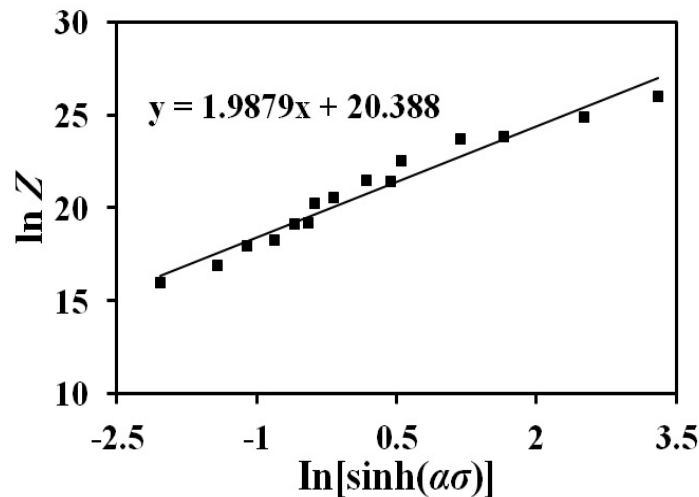
สุดท้ายสำหรับทุกๆค่าความเค้นสมการ 2.10 สามารถเขียนใหม่ได้เป็นสมการ 4.10 ดังนี้

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

ใส่ลอการิทึมธรรมชาติทั้งสองข้างของสมการ 4.10 จะได้เป็นสมการที่ 4.11

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

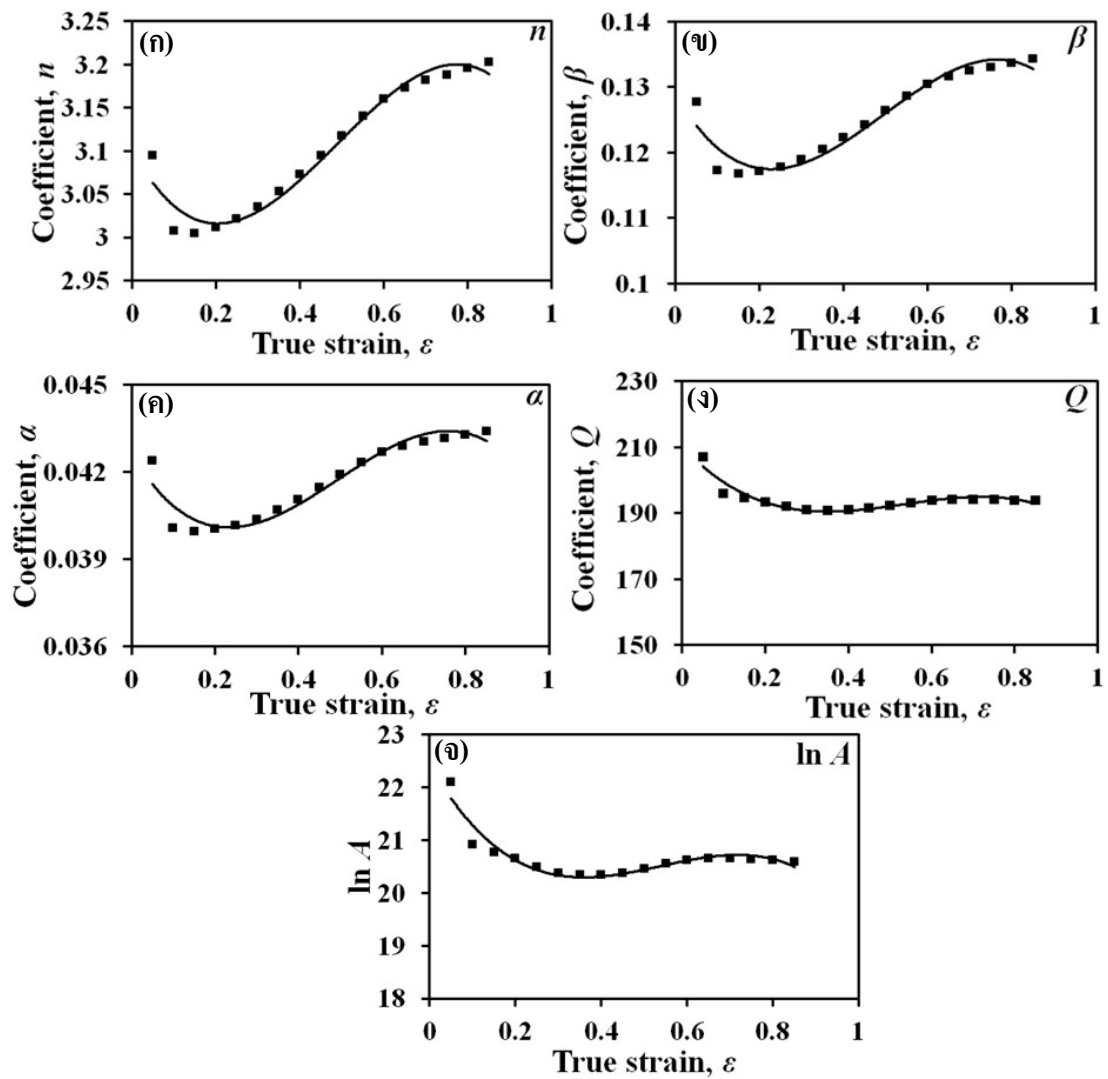
จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln Z$ และ $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ ซึ่งได้จากการใช้วิธีการถดถอยเชิงเส้น ดังแสดงในรูปที่ 4.5 สามารถนำมาหาค่า $\ln A$ ได้โดยการตัดแกน y (Y-Intercept) โดยค่าของ A ที่ได้ของโลหะผสม MAB คือ $1.1 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$



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]

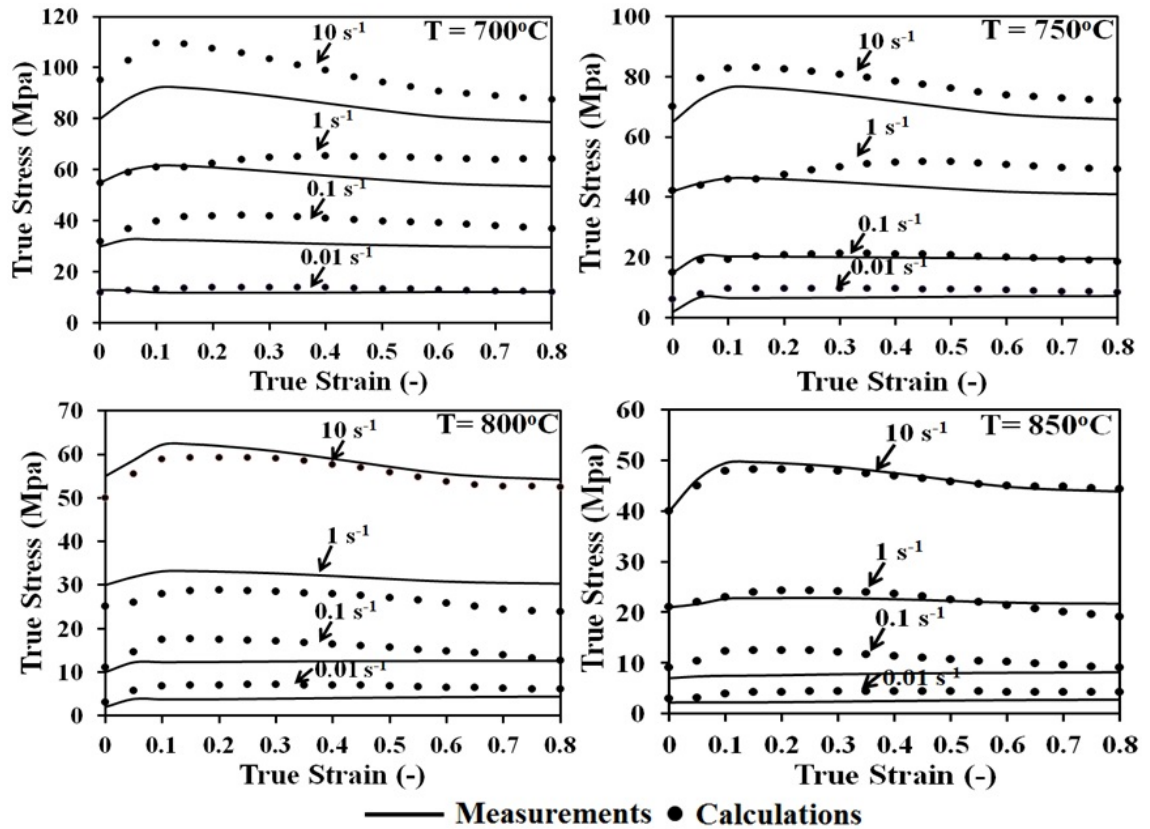
4.3 การเปรียบเทียบระหว่างกราฟความเค้น-ความเครียดจริงของผลการทดลองและการทำนายด้วยสมการซีเนอร์โฮโลมอนด์

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

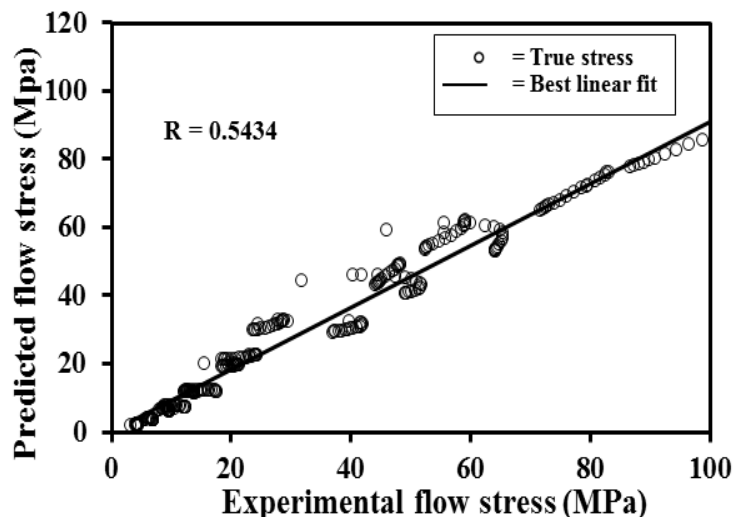
ดังนั้นเพื่อเป็นการตรวจสอบค่าคงที่ของโลหะผสม MAB เมื่อเกิดขึ้นรูปที่อุณหภูมิสูง ผลที่ได้จากการทำนายได้นำไปเปรียบเทียบกับผลการทดลอง เพื่อทำนายเส้นโค้งไหลและเป็นการยืนยันผลการคำนวณ พบว่าเส้นโค้งความเค้นไหลที่ได้จากการทำนายจากแบบจำลองอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้จากผลของการทดลองสามารถที่จะทำนาย ซึ่งในการทำนายของแบบจำลองคอนสทิทิวทิฟเป็นการคำนวณโดยใช้ค่า 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 และแบบจำลองนี้ใช้ไฮเพอร์โบลิกซายด์ 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 ขั้นที่สองนำข้อมูลที่ได้นำมาทำแบบจำลองโดยใช้สมการซีเนอร์โฮโลมอนด์ 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

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

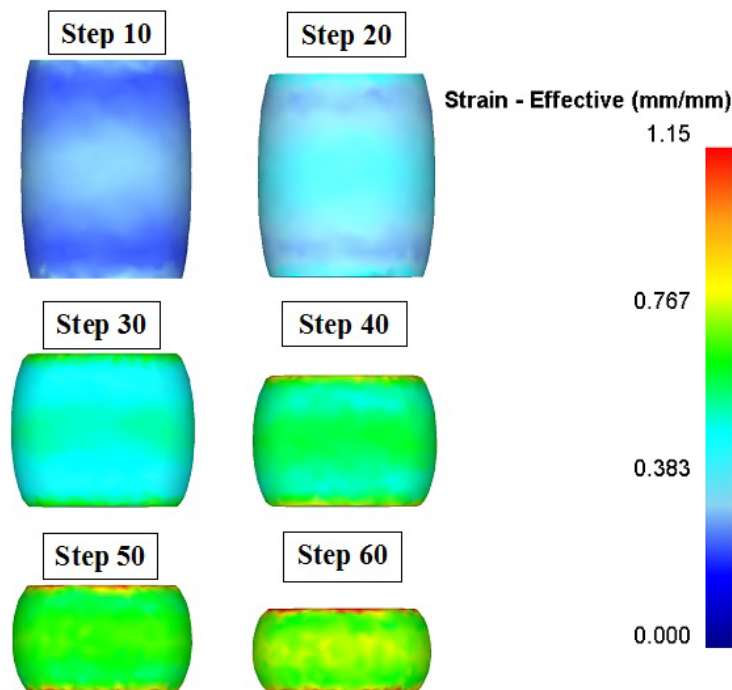
n และ A คือค่าคงตัวของวัสดุ α คือความเค้น $\bar{\sigma}$ คือความเค้นไหล (MPa) ΔH คือ พลังงานกระตุ้นของการเปลี่ยนรูปร้อน (kJ/mol) R คือค่าคงที่ในอุดมคติแก๊ส (8.314 J/molK) และ T คืออุณหภูมิการเปลี่ยนรูป ($^{\circ}\text{C}$)

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

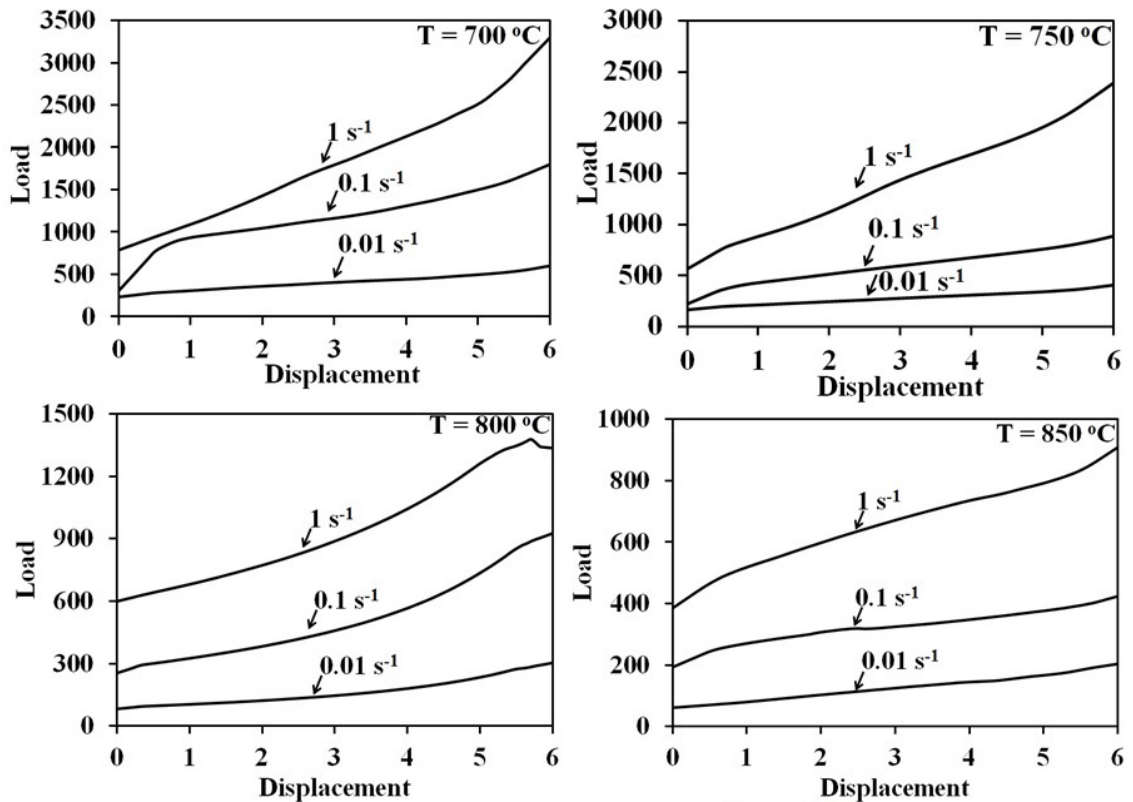
เมื่อทำแบบจำลองทางโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม DEFORM 3D จะแสดงผลการทำแบบจำลองที่ได้คือ ประสิทธิภาพความเครียด (Strain-Effective) ดังรูปที่ 4.9 จะแสดงการทดสอบการกดขึ้นรูปรีด โดยแรงที่ใช้ในการกดจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องพร้อมกับการเปลี่ยนรูปตามแนวการกดจะพบว่าแรงกระทำสูงสุดประมาณ 3200 นิวตัน ที่อุณหภูมิ 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)

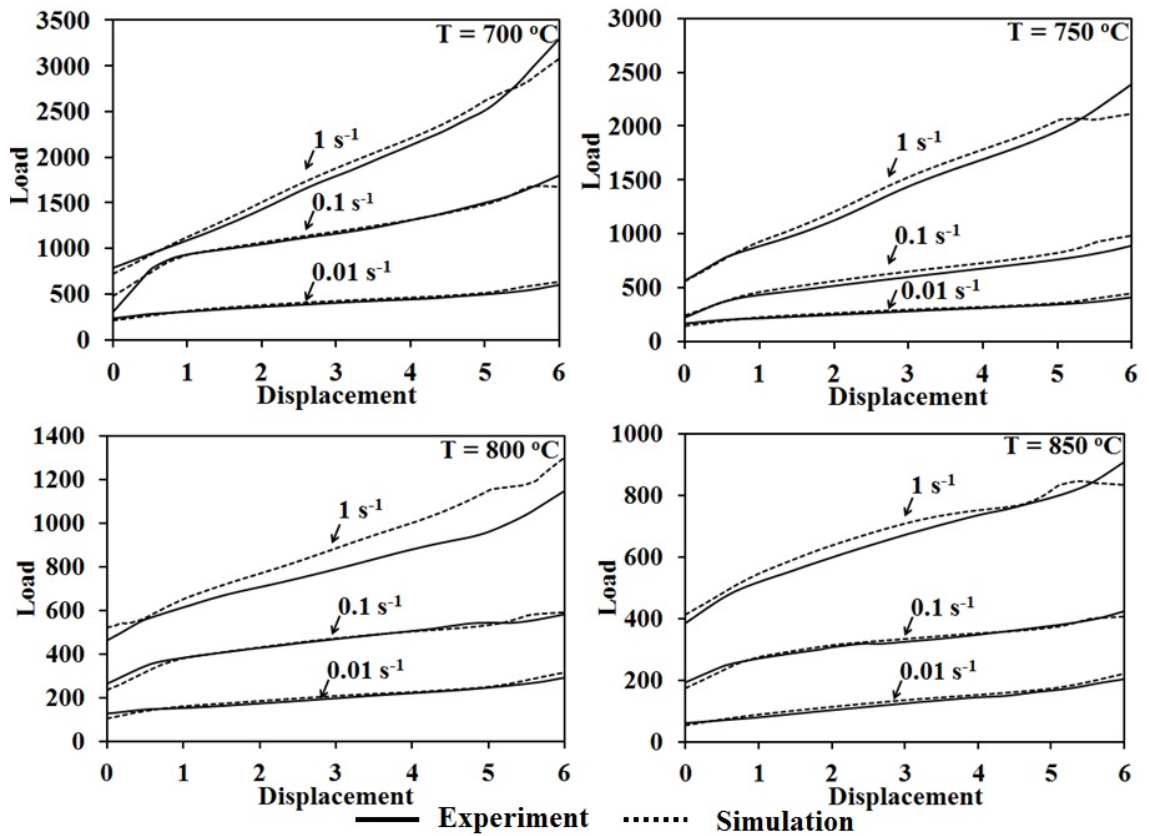


รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะกคของการกดขึ้นรูปร้อนของโลหะผสม MAB ที่ได้จากการทดลอง

4.5 ผลการจำลองพฤติกรรมวัสดุในการกดขึ้นรูปที่อุณหภูมิสูง

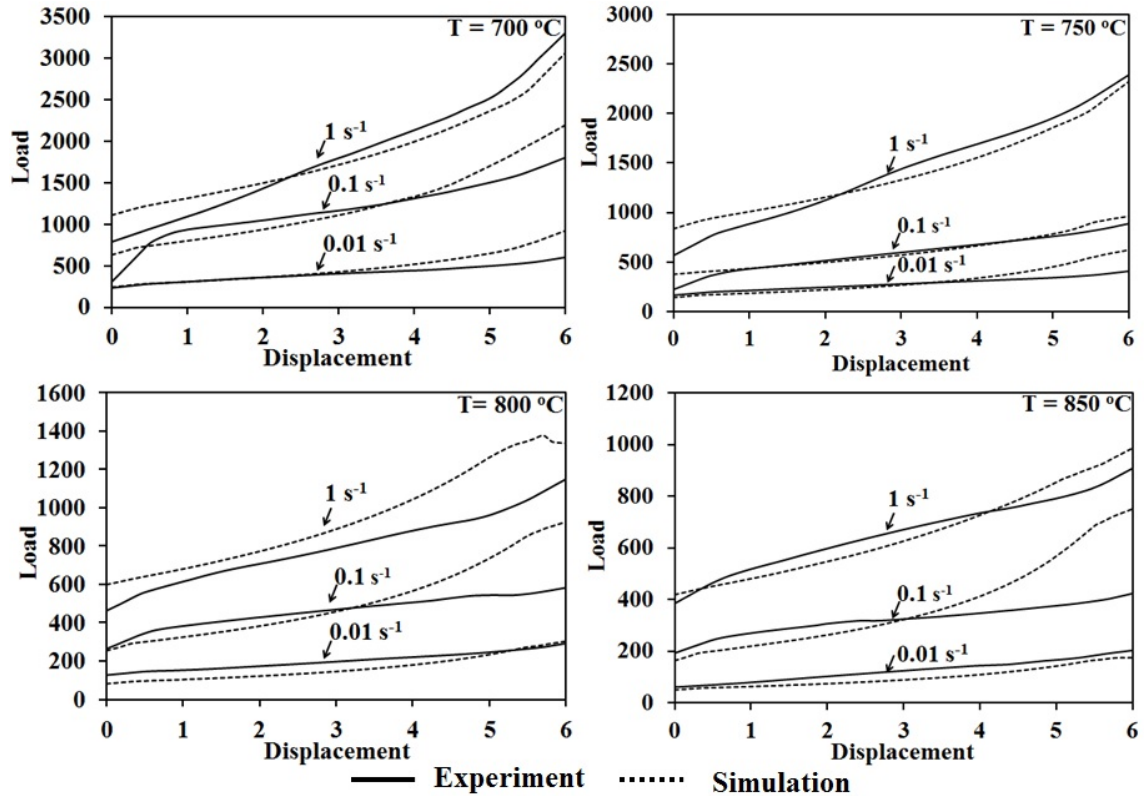
การวิเคราะห์ผลความแม่นยำที่ได้จากการทำนายผลโดยใช้ FEM จะทำการเปรียบเทียบ กราฟ ความสัมพันธ์ระหว่างแรง-ระยะทาง แสดงในรูปดังนี้

4.5.1 การเปรียบเทียบระหว่างผลการทดสอบกับผลของแบบจำลองเส้นโค้งไหล



รูปที่ 4.11 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะทางที่ได้จากการทดลองและการทำนายด้วย FEM โดยใช้สมมติวัสดุที่ได้จากการทดลองจริงของโลหะผสม MAB

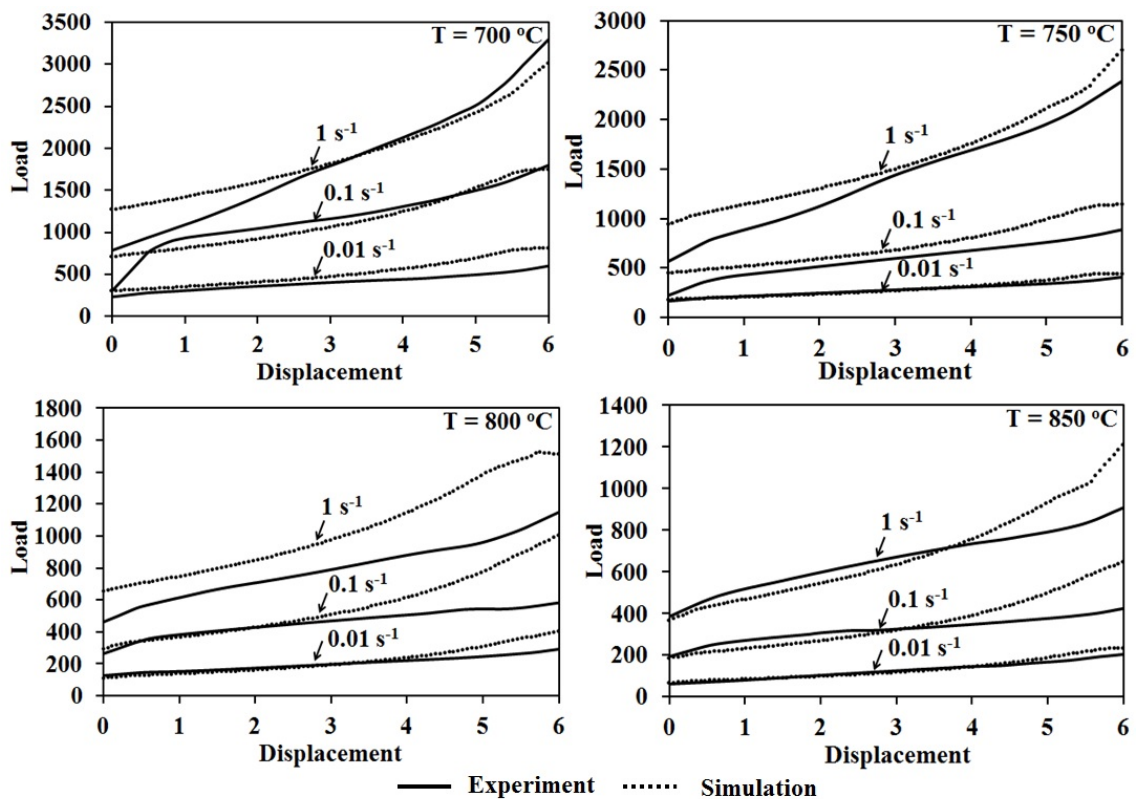
4.5.2 การเปรียบเทียบระหว่างผลของแบบจำลองโดยใช้ค่าคงที่ของทุกๆ ความเครียด แบ่งเป็นช่วงๆ ละ 0.05 ระหว่าง 0.05-0.8



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)

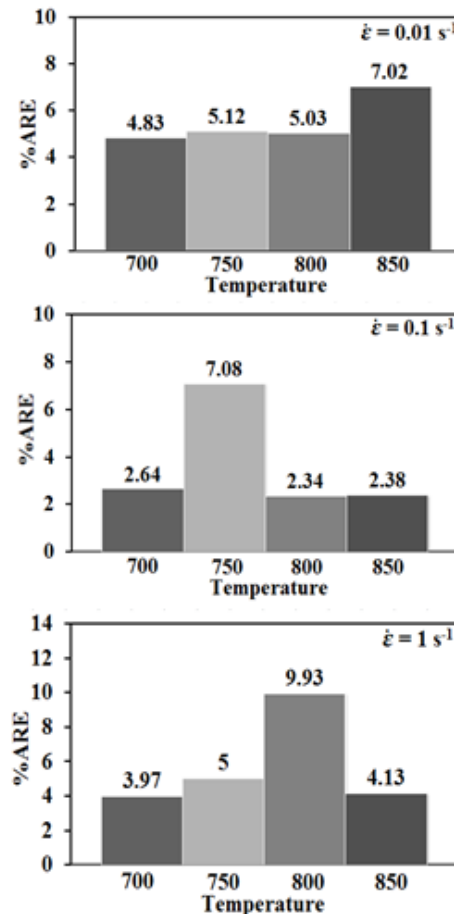
ความถูกต้องและความแม่นยำของผลการจำลองของไฟไนต์เอลิเมนต์ได้รับการวิเคราะห์โดยใช้ค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์เฉลี่ย (ARE) โดยเปอร์เซ็นต์ของความผิดพลาดสัมพัทธ์เฉลี่ยถูกคำนวณจากสมการดังนี้

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

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

4.6.1 ผลเปรียบเทียบค่า ARE ที่ได้จากการทดสอบกับ FEM ที่ใช้สมบัติวัสดุที่มาจากกราฟความเค้น-ความเครียดจริง

การเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสัมพัทธ์เฉลี่ยระหว่างผลการทดลองและผลของการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ในกรณีที่ใช้กราฟความเค้น-ความเครียดจริงจากการทดลองเป็นสมบัติวัสดุของโลหะผสม MAB แสดงดังรูปที่ 4.14

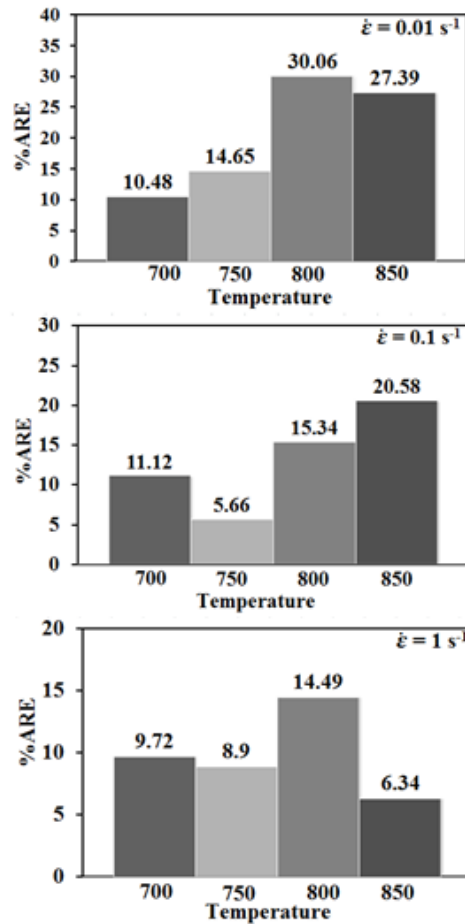


รูปที่ 4.14 การเปรียบเทียบของเปอร์เซ็นต์ของความผิดพลาดสัมพัทธ์เฉลี่ยระหว่างผลการทดลองกับ FEM ที่ใช้สมบัติวัสดุที่มาจากกราฟความเค้น-ความเครียดจริง

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

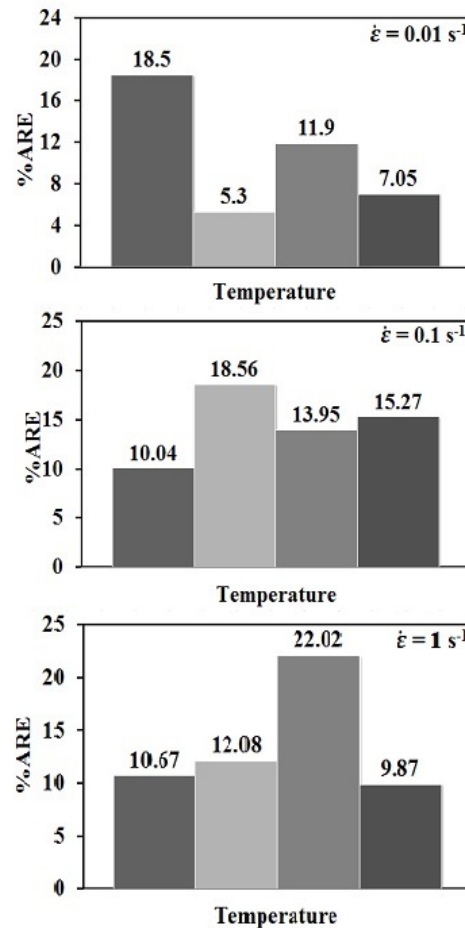


รูปที่ 4.15 การเปรียบเทียบของเปอร์เซ็นต์ของความผิดพลาดสัมพัทธ์เฉลี่ยระหว่างผลการทดลองกับ FEM ที่ใช้สมบัติวัสดุที่มาจากกราฟความเค้น-ความเครียดจริงโดยใช้ค่าคงที่ของทุกๆ ความเครียด แบ่งเป็นช่วงๆ ละ 0.05 ระหว่าง 0.05-0.8

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

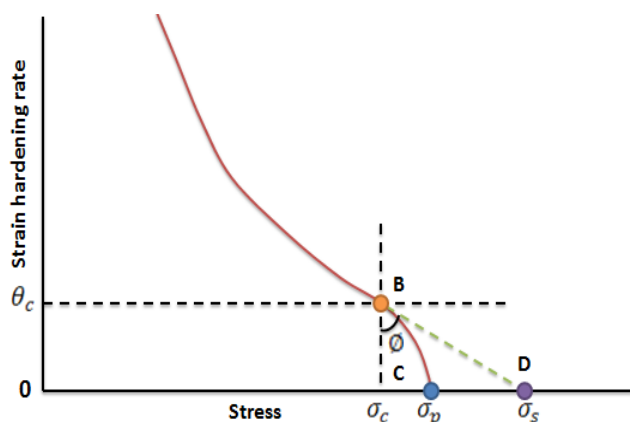
บทที่ 5 ผลการทำแบบจำลองวัสดุในสถานะการกดขึ้นรูปร้อน

ในบทนี้ จะกล่าวถึงผลจากแบบจำลองวัสดุเพิ่มเติมจากบทที่ 4 โดยจะแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นผลการทำแบบจำลองทางวัสดุและวิเคราะห์หาสมการความแม่นยำสำหรับโลหะผสม MAB ส่วนที่สองคือผลของการใช้แบบจำลองทางพลศาสตร์ของวัสดุเพื่ออธิบายเสถียรภาพของการเสถียรภาพเมื่อผ่านการกดขึ้นรูปร้อน และส่วนสุดท้ายคือผลของโครงสร้างจุลภาคและสัดส่วนปริมาตรของการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ เพื่อวิเคราะห์การเกิดการคืนตัวแบบพลศาสตร์และการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์

5.1 ผลการสร้างแบบจำลองเพื่อทำนายพฤติกรรมการไหลโดยใช้สมการชิงกล้า

5.1.1 อัตราความเครียดแข็ง (Work hardening rate)

จากเส้นโค้งความเครียดแข็ง (Work hardening curve) สามารถใช้ในการหาค่าความเค้นวิกฤตสำหรับการเริ่มต้นของการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ ซึ่งหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดจริง ดังแสดงในรูปที่ 5.1 พบว่าค่าอัตราความเครียดแข็ง ($\theta = d\sigma/de$) คำนวณได้จากการทำคอนเวกซ์กับความเค้นวิกฤตไปที่เส้นโค้งไหลเดิม โดยการเริ่มต้นความเครียดแข็งของการเบี่ยงเบนไปเป็นความเค้นวิกฤต (σ_c) จากนั้นคำนวณความเค้นสูงสุด (σ_p) ของการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของอัตราความเครียดแข็ง (θ) มาถึงจุดต่ำสุด ซึ่งสอดคล้องกับการจุดเปลี่ยนโค้งของเส้นโค้ง $d\sigma/de$ กับ σ [58]

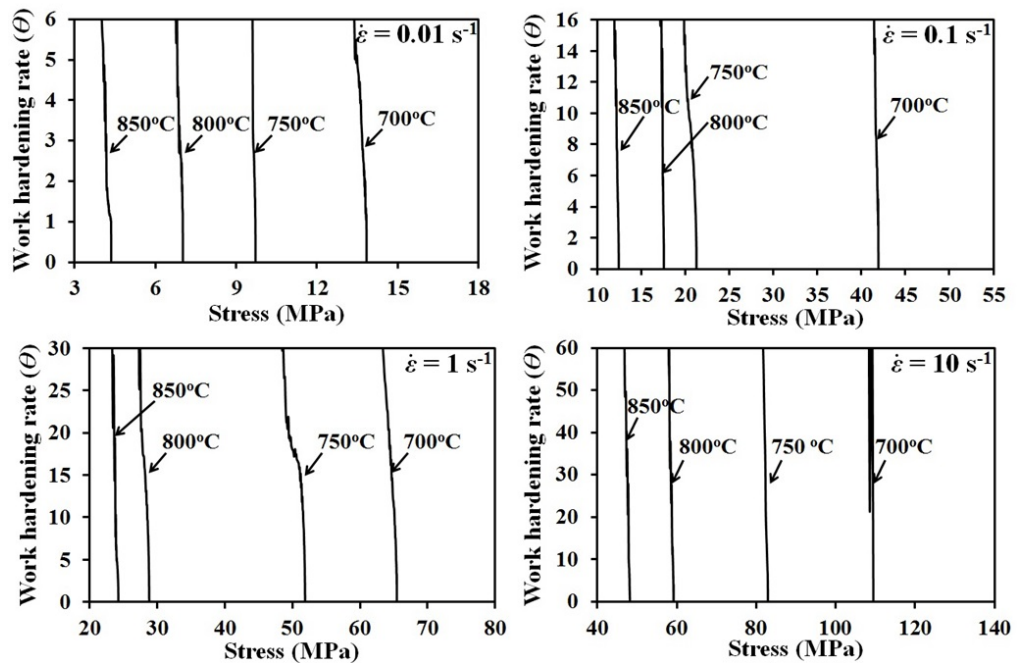


รูปที่ 5.1 การเปลี่ยนความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น – ความเครียดจริงเทียบกับค่าความเค้น

เมื่อพิจารณาจากกราฟรูปที่ 5.1 พบว่ามีค่าคงที่ที่ไม่ทราบค่าคือ ϵ_c (ความเครียดวิกฤต) ϵ_p (ความเครียดสูงสุด) σ_c (ความเค้นวิกฤต) σ_p (ความเค้นสูงสุด) ϵ_{ss} (ความเครียดที่สภาวะคงตัว) และ σ_{ss} (ความเค้นที่สภาวะคงตัว) สามารถวิเคราะห์หาค่าได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความเครียดกับความเค้น โดยค่าอัตราความเครียดแข็งนั้นสามารถหาได้จากสมการที่ 2.21

ในงานวิจัยนี้เราจะใช้วิธีหาค่าความเค้นวิกฤตโดยใช้สมการ Polynomial กำลังสาม ซึ่งเป็นวิธีการที่นำเสนอโดย Najafizadeh และ Jonas [59] ซึ่งถูกนำมาใช้เพื่อหาค่าความเค้นวิกฤตสำหรับการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ โดยมองหาค่าความเค้นวิกฤตคือจุดเปลี่ยนโค้งของกราฟความเครียดแข็ง ($d\sigma/d\epsilon$) กับ ความเค้น (σ) เมื่อหาอนุพันธ์อันดับสองของสมการที่ 2.21 ทำให้ได้ค่าความเค้นวิกฤตที่ทำให้การเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ดังแสดงในสมการที่ 2.22 รากที่สองของค่าความเค้นวิกฤตสำหรับการเริ่มต้นของการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์มีค่าเท่ากับศูนย์ แสดงดังในสมการที่ 2.23

เพราะฉะนั้น วิธีการนี้ได้นำมาใช้ในการกำหนดค่าของความเค้นวิกฤตที่มีการเสีรูปร่างที่แตกต่างกัน รูปที่ 5.2 แสดงผลการหาค่าความเค้นวิกฤต ที่ได้จากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นสูงสุดและความเครียดสูงสุด

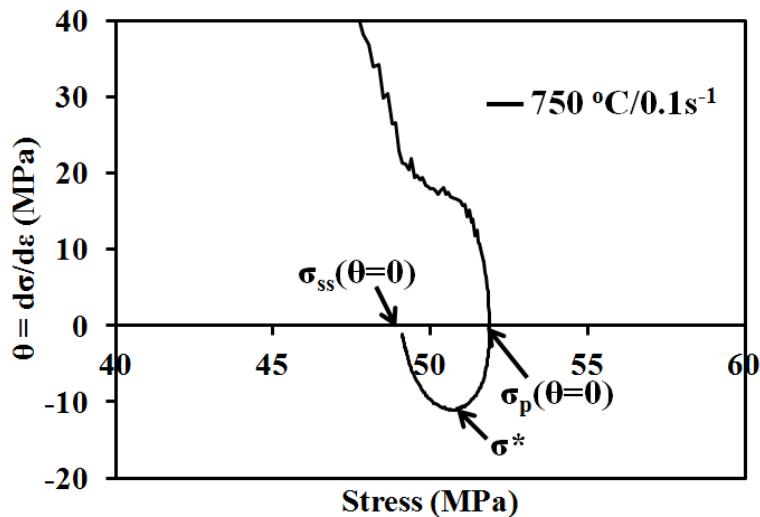


รูปที่ 5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความเครียดกับความเค้นจริงที่อุณหภูมิ 700, 750, 800 และ 850 องศาเซลเซียส และอัตราความเครียด 0.01, 0.1, 1 และ 10 ต่อวินาที ของการกดขึ้นรูปร้อนของวัสดุ MAB

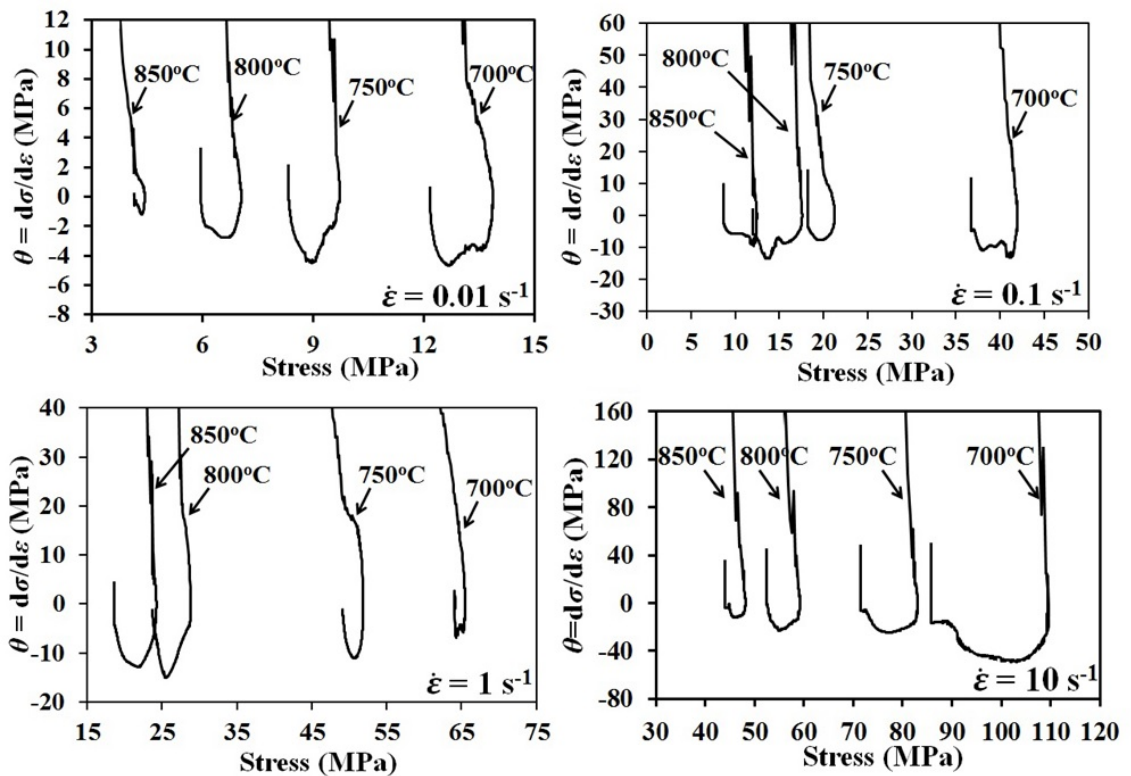
5.1.2 อัตราการอ่อนตัว (Softening rate)

สำหรับการกดขึ้นรูป พบว่ามีการรวมตัวของดิสโลเคชันเพิ่มขึ้นที่บริเวณของความเค้นวิกฤต เนื่องจากการเปลี่ยนรูปรีด อีกทั้งยังพบว่ามีดิสโลเคชันถูกทำลาย เนื่องจากการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดจริงของการกดขึ้นรูปรีดหลังจากค่าความเค้นสูงสุดถูกนำมาใช้ในการคำนวณความเครียดแข็งและในอัตราการอ่อนตัว ($d\sigma/d\varepsilon$ กับ σ) แสดงดังรูปที่ 5.4 ซึ่งจะเห็นว่าม้อัตราการอ่อนตัวสูงสุด (ε^*) เมื่อมีความเครียดที่ติดลบสูงสุด [38]

รูปที่ 5.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการอ่อนตัวกับความเครียด แบ่งได้เป็น 3 บริเวณหลักๆ ดังนี้ บริเวณที่ 1 มีอัตราความเครียดแข็งเป็นเส้นตรงและลดลงจนถึงจุดเปลี่ยนโค้งหรือจุดของความเครียดวิกฤตซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ บริเวณที่ 2 นั้นเป็นการเริ่มต้นของความเครียดแข็งจากความเค้นสูงสุด (σ_p) คือความเค้นเท่ากับ 0 และบริเวณที่ 3 นั้นเป็นการเริ่มต้นของความเครียดแข็งจากความเค้นสูงสุดไปยังความเค้นที่สภาวะคงตัว (σ_{ss}) ซึ่งความเค้นของทั้งสองจุดมีค่าเท่ากับ 0 เท่ากัน อีกทั้งค่าของความเค้นได้มีการเปลี่ยนจากค่าบวกไปเป็นค่าลบเนื่องจากอัตราการอ่อนตัว [58]



รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอ่อนตัว ($\theta=d\sigma/d\varepsilon$) กับความเครียด (σ) ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส และอัตราความเครียดที่ 0.1 ต่อวินาที ของวัสดุ MAB ที่ผ่านการทุบขึ้นรูปรีด



รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอ่อนตัวกับความเค้นจริง ที่อุณหภูมิ 700, 750, 800 และ 850 องศาเซลเซียส และอัตราความเครียด 0.01, 0.1, 1 และ 10 ต่อวินาที ของวัสดุ MAB ที่ผ่านการชุบขึ้นรูปร้อน

โดยตารางที่ 5.1-5.4 จะแสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ คือ ค่า ϵ_c (ความเครียดวิกฤต) ϵ_p (ความเครียดสูงสุด) σ_c (ความเค้นวิกฤต) σ_p (ความเค้นสูงสุด) ϵ_{ss} (ความเครียดที่สภาวะคงตัว) และ σ_{ss} (ความเค้นที่สภาวะคงตัว) ซึ่งหาได้โดยใช้สมการที่เกี่ยวข้องกับอัตราความเครียดแข็งและอัตราการอ่อนตัว (สมการที่ 2.23) เพื่อใช้ในการคำนวณหาสมการเชิงกำลังสำหรับทำนายช่วงกลไกความเครียดแข็งของบริเวณที่ 1 ในรูปที่ 5.3

ตารางที่ 5.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่อัตราความเครียด 0.01 ต่อวินาที

พารามิเตอร์	700°C	750°C	800°C	850°C
ϵ_c	0.032	0.035	0.04	0.07
ϵ_p	0.261	0.1485	0.18	0.279
σ_c	12.33	6.15	4.98	3.40
σ_p	13.85	9.72	7.02	4.35
ϵ_{ss}	0.78	0.8	0.62	0.7
σ_{ss}	12.2	8.4	6.4	4.2

ตารางที่ 5.2 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่อัตราความเครียด 0.1 ต่อวินาที

พารามิเตอร์	700°C	750°C	800°C	850°C
ϵ_c	0.039	0.0396	0.0328	0.0324
ϵ_p	0.0261	0.315	0.014	0.0153
σ_c	23.25	13.49	10.72	7.83
σ_p	41.94	21.28	17.57	12.45
ϵ_{ss}	0.78	0.74	0.64	0.62
σ_{ss}	37	19	15.5	10

ตารางที่ 5.3 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่อัตราความเครียด 1 ต่อวินาที

พารามิเตอร์	700°C	750°C	800°C	850°C
ϵ_c	0.063	0.081	0.027	0.043
ϵ_p	0.38	0.45	0.20	0.23
σ_c	47.34	37.34	18.67	16.75
σ_p	65.46	51.88	28.82	24.25
ϵ_{ss}	0.78	0.74	0.64	0.62
σ_{ss}	64	50	25	21

ตารางที่ 5.4 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่อัตราความเครียด 10 ต่อวินาที

พารามิเตอร์	700°C	750°C	800°C	850°C
ϵ_c	0.011	0.00045	0.0221	0.0299
ϵ_p	0.1215	0.14	0.216	0.1665
σ_c	53.26	38.094	43.66	30.90
σ_p	109.56	82.95	59.22	48.20
ϵ_{ss}	0.6	0.7	0.6	0.56
σ_{ss}	90.49	76	54	44.5

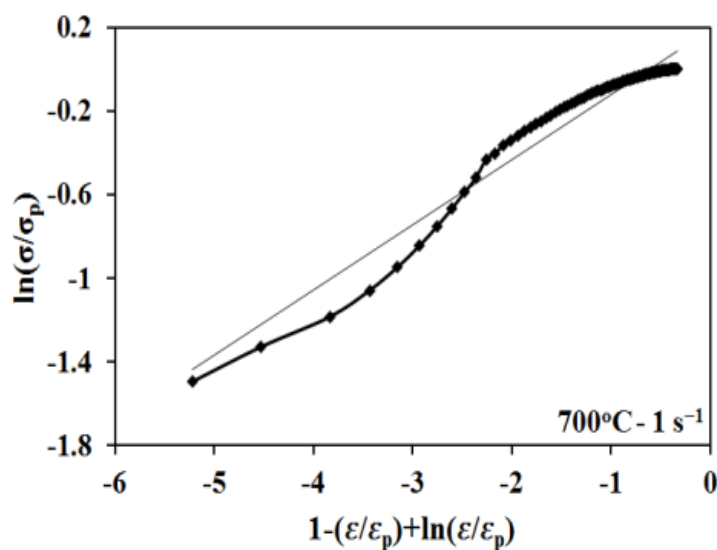
5.1.3 สมการซิงกาต้า (Cingara Equation)

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดจริงสามารถอธิบายบริเวณทั้งสองในรูปที่ 5.3 ได้ ดังนี้ บริเวณที่ 1 คือตั้งแต่จุดเริ่มต้นจนถึงความเค้นสูงสุดของการเสียรูปของโลหะผสม MAB ที่อุณหภูมิสูงจะอธิบายค่าความเครียดจนถึงค่าความเค้นสูงสุดโดยใช้สมการซิงกาต้า และบริเวณที่ 2 นั้นอธิบายการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ด้วยสมการอาลามี่แสดงดังต่อไปนี้ [59]

สำหรับการงานวิจัยนี้ได้ใช้สมการซิงกาต้าในการพิจารณาค่าความเครียดแข็งและความเค้นสูงสุดที่อุณหภูมิ 700, 750, 800 และ 850 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราความเครียด 0.01, 0.1, 1 และ 10 ต่อวินาที พบว่ามีการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ สามารถใช้สมการซิงกาต้าในการทำนายเส้นโค้งไหลของโลหะผสม MAB ได้ดังสมการที่ 2.16

C คือค่าคงที่ของวัสดุ ซึ่งค่าความเค้นสูงสุด และค่าความเครียดสูงสุดของเส้นโค้งไหลที่แต่ละอุณหภูมิ และอัตราความเครียดจากการใช้ลอการิทึมธรรมชาติเขียนเป็นสมการที่ 2.17

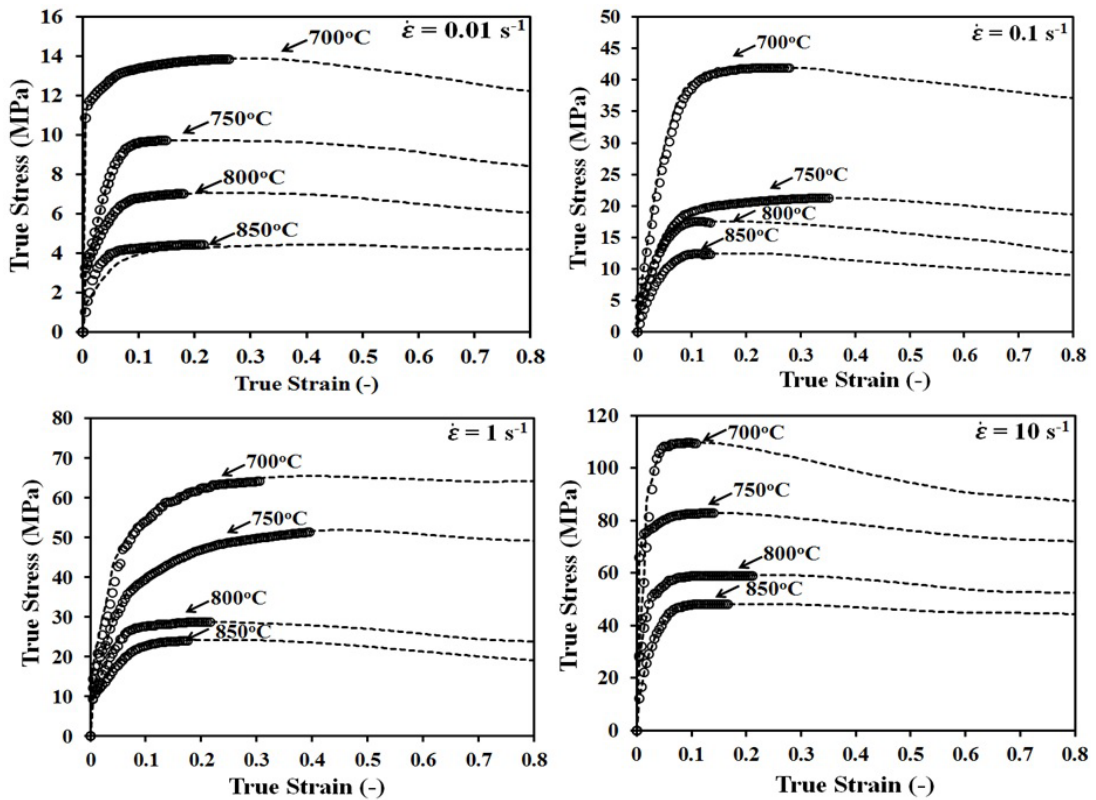
นำสมการที่ 2.17 ไปพล็อตกราฟรูปที่ 5.5 ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(\sigma/\sigma_p)$ กับ $1-\varepsilon/\varepsilon_p + \ln(\varepsilon/\varepsilon_p)$ ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราความเครียด 1 ต่อวินาที เพื่อใช้ในการสร้างแบบจำลองการไหลของเส้นโค้งจนถึงความเค้นสูงสุดของการเสียรูปทำให้สามารถคำนวณหาค่าคงที่ C ได้ดังตารางที่ 5.5 และค่าเฉลี่ยของค่าคงที่ C นั้นมีค่าเท่ากับ 0.203



รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(\sigma/\sigma_p)$ กับ $1-\varepsilon/\varepsilon_p + \ln(\varepsilon/\varepsilon_p)$ ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราความเครียด 1 ต่อวินาที

ตารางที่ 5.5 ค่าคงที่ C ที่หาได้สำหรับสมการซิงก่าที่อุณหภูมิและอัตราการความเครียดต่างๆ

Strain rate (s^{-1})	T = 700°C	T = 750°C	T = 800°C	T = 850°C
0.01	0.001	0.005	0.0004	0.0009
0.1	0.09	0.98	0.89	0.97
1	0.09	0.18	0.02	0.015
10	0.004	0.003	0.001	0.0005



รูปที่ 5.6 การเปรียบเทียบกราฟความเค้น-ความเครียดจริงที่ได้จากการทำนายด้วยสมการซิงก่าและผลการทดลอง ที่อุณหภูมิ 700, 750, 800 และ 850 องศาเซลเซียส และอัตราการความเครียด 0.01, 0.1, 1 และ 10 ต่อวินาที

รูปที่ 5.6 แสดงผลการเปรียบเทียบกราฟความเค้น-ความเครียดจริงที่ได้จากการทำนายด้วยสมการซิงกาต้าและผลการทดลอง ซึ่งเป็นการคำนวณระหว่างความเค้นสูงสุดกับความเครียดสูงสุด และแบบจำลองมีความสามารถในการทำนายในช่วงความเค้นเท่ากับ 0 จนถึงความเค้นสูงสุดเพราะหลังจากผ่านความเค้นสูงสุดความเค้นจะค่อยๆลดลงเนื่องมาจากความเครียดที่เพิ่มขึ้นซึ่งจะสัมพันธ์กับผลการทดลองจึงเหมาะกับการทำนายในช่วงความเครียดแข็งอีกด้วย

5.2 ผลการสร้างแบบจำลองเพื่อทำนายพฤติกรรมการไหลของวัสดุโดยใช้สมการอาลามี่

การสร้างแบบจำลองวัสดุสำหรับอธิบายการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดจริงของบริเวณที่ 2 ในรูปที่ 5.3 โดยใช้สมการอาลามี่ในสร้างแบบจำลองและใช้เพื่อหาจุดเริ่มต้นของการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ และเพื่อทำนายสัดส่วนปริมาตร (Volume fraction) ของการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ โดยอธิบายในเทอมของเส้นโค้งตัวเอส (S curves) ที่แสดงปริมาณการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ ที่เป็นฟังก์ชันกับเวลา จลนศาสตร์ของการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ (Kinetic of DRX) สามารถทำนายได้จากสมการที่ 2.18 [36]

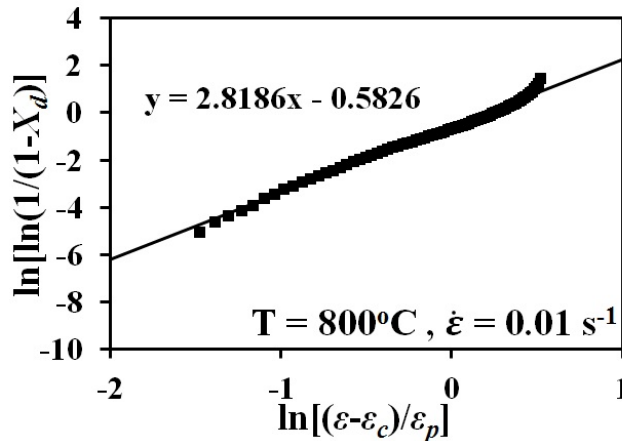
ในงานวิจัยนี้ผลของการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์จะพิจารณาที่ความเค้นสูงสุดจากการสมมติฐานอย่างง่ายของสมการอาลามี่ในระดับที่สามารถยอมรับได้และสัดส่วนปริมาตรของการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ (X_d) คำนวณจากสมการที่ 5.1 โดยเริ่มคำนวณจากค่าความเครียดสูงสุดซึ่งถือว่าเป็นจุดเริ่มการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์จนถึงค่าความเครียดในสภาวะคงที่ (ϵ_{ss}) ซึ่งถือว่าเป็นจุดสิ้นสุดการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์

$$X_d = \frac{\sigma_p - \sigma}{\sigma_p - \sigma_{ss}} \quad (5.1)$$

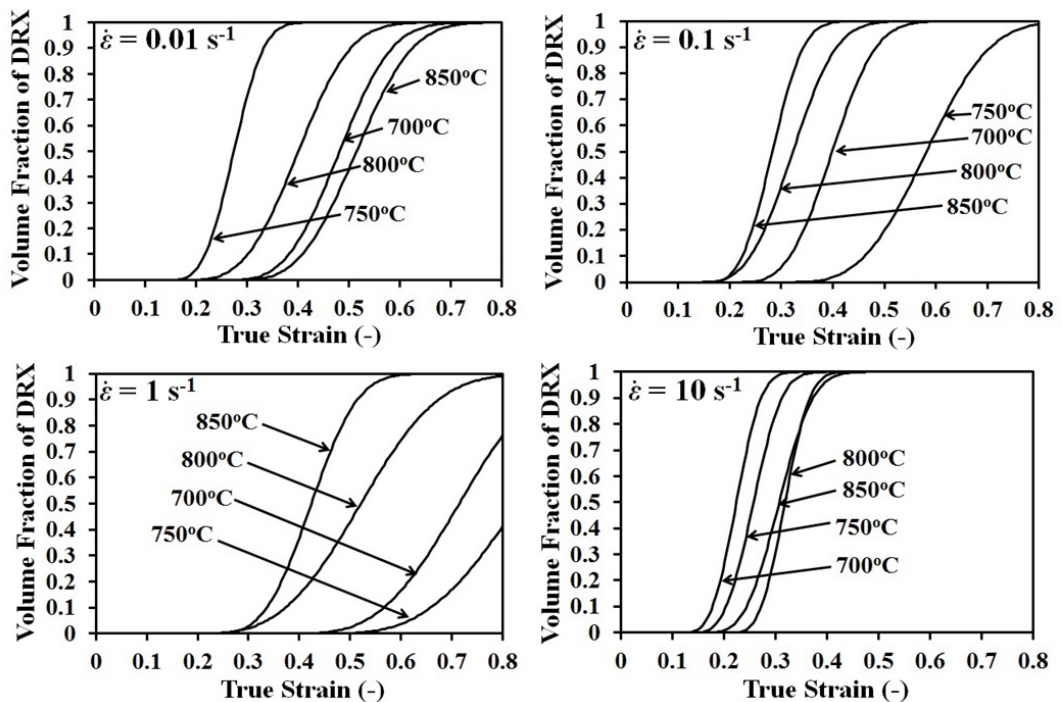
σ_p คือความเค้นสูงสุด σ_{ss} คือความเค้นสภาวะคงตัว และ σ คือความเค้นที่ความเครียดแตกต่างกัน กลไกการอ่อนตัวที่พิจารณาในสมการนี้จะขึ้นอยู่กับสัดส่วนปริมาตรของการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ (X_d) ส่วนการคืนตัวแบบพลศาสตร์จะไม่ได้นำมาพิจารณาร่วมด้วย โดยรูปที่ 5.7 เป็นกราฟเส้นตรงที่ได้จากการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(1/(1-X_d))$ และ $\ln((\epsilon - \epsilon_p)/\epsilon_p)$ ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนรูปที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราความเครียด 0.01 ต่อวินาที การหาค่า X_d ในสมการที่ 5.7 สามารถเขียนใหม่เป็นสมการที่ 2.19 ซึ่งเป็นลอการิทึมธรรมชาติ สำหรับใช้คำนวณหาค่าคงที่ของวัสดุคือ n และ k โดยอาศัยเงื่อนไขของการเสียรูปที่อุณหภูมิ 700, 750, 800 และ 850 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราความเครียด 0.01, 0.1, 1 และ 10 ต่อวินาที

นำค่าของ k และ n ที่มีค่าเท่ากับ 1.17 และ 3.14 ตามลำดับ แทนค่าลงไปในสมการที่ 5.2 ทำให้สามารถหาจลนศาสตร์การเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์สำหรับโลหะผสม MAB ได้ ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยสมการที่ 5.2 ดังนี้

$$X_d = 1 - \exp\left[(-1.17)\left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_c}{\varepsilon_p}\right)^{3.14}\right] \tag{5.2}$$



รูปที่ 5.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln[\ln(1/(1-X_d))]$ และ $\ln[(\varepsilon - \varepsilon_c)/\varepsilon_p]$ ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส และอัตราการความเครียด 0.01 ต่อวินาที ของการคืบขึ้นรูปรีออนของวัสดุ MAB



รูปที่ 5.8 สัดส่วนปริมาณของการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ที่อุณหภูมิ 700, 750, 800 และ 850 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการความเครียด 0.01, 0.1, 1 และ 10 ต่อวินาที

รูปที่ 5.8 แสดงกราฟเส้นโค้งของความสัมพัทธ์ระหว่างการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ของโลหะผสม MAB ที่ผ่านการขึ้นรูปร้อนที่อุณหภูมิ 700, 750, 800 และ 850 องศาเซลเซียส และอัตราความเครียด 0.01, 0.1, 1 และ 10 ต่อวินาที จะสังเกตเห็นว่าสัดส่วนปริมาตรการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์จะเพิ่มขึ้นเมื่อความเครียดจริงเพิ่มสูงขึ้น ดังที่แสดงในกราฟเส้นโค้งรูปตัวเอส

สัดส่วนปริมาตรของการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์จะเพิ่มสูงขึ้น เมื่ออุณหภูมิและอัตราความเครียดสูงขึ้น เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของแรงขับเคลื่อน (Driving force) ในการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ โดยอัตราความเครียดลดลงและอุณหภูมิเพิ่มขึ้น สัดส่วนปริมาตรของการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์จะเข้าสู่สภาวะคงที่เมื่อ $X_d = 1$ ซึ่งหมายถึงกระบวนการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ จากการเปรียบเทียบเส้นโค้งเหล่านี้พบว่า สัดส่วนปริมาตรการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์จะลดลงเนื่องจากการลดลงของอุณหภูมิการเปลี่ยนรูป โดยหมายถึงการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์จะค่อยๆ เกิดขึ้นอย่างช้าๆ ทำให้ใช้เวลาในการเกิดนาน ดังนั้นภายใต้อัตราความเครียดสูงและอุณหภูมิต่ำของการเปลี่ยนรูปของโลหะผสม MAB มีแนวโน้มจะเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ไม่สมบูรณ์ กล่าวคือ “สัดส่วนปริมาตรการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์มีแนวโน้มน้อยกว่า 1”

สัดส่วนปริมาตรของการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ (X_d) สามารถดูจากกราฟของรูปที่ 5.8 ได้ว่า เปอร์เซ็นต์การเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์มีความสมบูรณ์หรือไม่ และสามารถสรุปได้ดังนี้ คือ

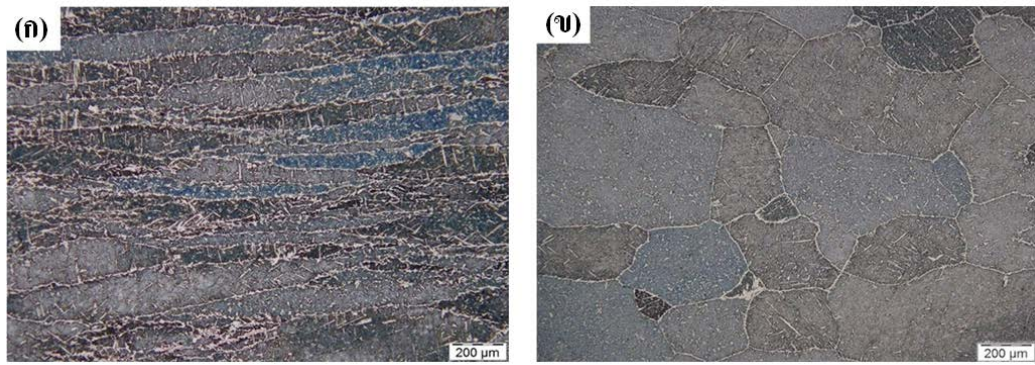
- 1) ที่อัตราความเครียด 0.01 ต่อวินาที ที่เรียงตามอุณหภูมิ 750, 800, 700 และ 850 องศาเซลเซียส มีสัดส่วนปริมาตรของการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์อย่างสมบูรณ์ 100 %
- 2) ที่อัตราความเครียด 0.1 และ 1 ต่อวินาที ที่เรียงตามอุณหภูมิตั้งแต่ 850, 800, 700 และ 750 องศาเซลเซียส พบว่าที่อัตราความเครียด 0.1 ต่อวินาที มีสัดส่วนปริมาตรของการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์อย่างสมบูรณ์ 100 % และที่อัตราความเครียด 1 ต่อวินาที ที่อุณหภูมิ 700 และ 750 องศาเซลเซียส นั้นเป็นสองอุณหภูมิที่สัดส่วนปริมาตรของการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์อย่างไม่สมบูรณ์
- 3) ที่อัตราความเครียดที่ 10 ต่อวินาที ที่เรียงตามอุณหภูมิตั้งแต่ 700, 750, 850 และ 800 องศาเซลเซียส มีสัดส่วนปริมาตรของการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์อย่างสมบูรณ์ 100 %

5.3 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคและสัดส่วนปริมาตรของการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์

การเปรียบเทียบระหว่างโครงสร้างจุลภาคและสัดส่วนปริมาตรของการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ที่ทำนายได้ในรูปที่ 5.9 พบว่าโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม MAB แสดงรูปแบบและเกรนที่เป็นลักษณะโครงสร้างหลังการเสีรูปร่างของเกรนที่ประกอบไปด้วยการคืนตัวแบบพลศาสตร์และการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ โดยโครงสร้างจุลภาคของการคืนตัวแบบพลศาสตร์มักจะเกิดในลักษณะเกรนยาวตามแนวการกดขึ้นรูป และโครงสร้างจุลภาคของการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์มักจะเกิดในเกรนที่มีลักษณะกลมเล็ก

ในกรณีจากรูปที่ 5.8 เป็นการแสดงกราฟสัดส่วนปริมาตรเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ว่าเกิดแบบสมบูรณ์หรือไม่สมบูรณ์ สัดส่วนปริมาตรเกรนการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์จะลดลงและเกรนตั้งต้นที่ยังคงเห็นอยู่ในโครงสร้างจะเป็นการเกิดการคืนตัวแบบพลศาสตร์ ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส จากกราฟสัดส่วนปริมาตรของการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์มีแนวโน้มน้อยกว่า 1 คือเป็นการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ไม่ครบ 100 เปอร์เซ็นต์หรือเกิดแบบไม่สมบูรณ์ เมื่อเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคกับกราฟสัดส่วนปริมาตรการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์มีความสอดคล้องกัน ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส จากกราฟสัดส่วนปริมาตรแสดงว่ามีการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ 100 เปอร์เซ็นต์หรือเป็นการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์อย่างสมบูรณ์ ซึ่งเป็นการทำนายกราฟความเค้น-ความเครียดและเมื่อเทียบกับภาพถ่ายทางโครงสร้างทางจุลภาคซึ่งจะมีลักษณะเป็นเกรนกลมมีขนาดเล็กอยู่ตามขอบเกรน และเป็นโครงสร้างของการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ จึงมีความสอดคล้องกับกราฟสัดส่วนปริมาตรที่คำนวณได้ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

จากภาพถ่ายทางโครงสร้างการคืนตัวแบบพลศาสตร์จะมีอิทธิพลต่อโครงสร้างจุลภาคแสดงที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 5.9 (ก) ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าเป็นโครงสร้างที่ 750 องศาเซลเซียส เกิดการคืนตัวแบบพลศาสตร์ การเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆของการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์สังเกตได้ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส รูปที่ 5.9 (ข) เป็นการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์แบบไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous recrystallization (DDRX)) จะเกี่ยวข้องกับการเกิดนิวเคลียสของเกรนใหม่และกระบวนการคืนสู่สภาพ (Restoration) ในช่วงอุณหภูมิสูงของโลหะผสม MAB ด้วยเหตุผลนี้จึงนำไปสู่ความจริงที่ว่า การเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์จะเกิดที่อุณหภูมิสูงและความเครียดต่ำ



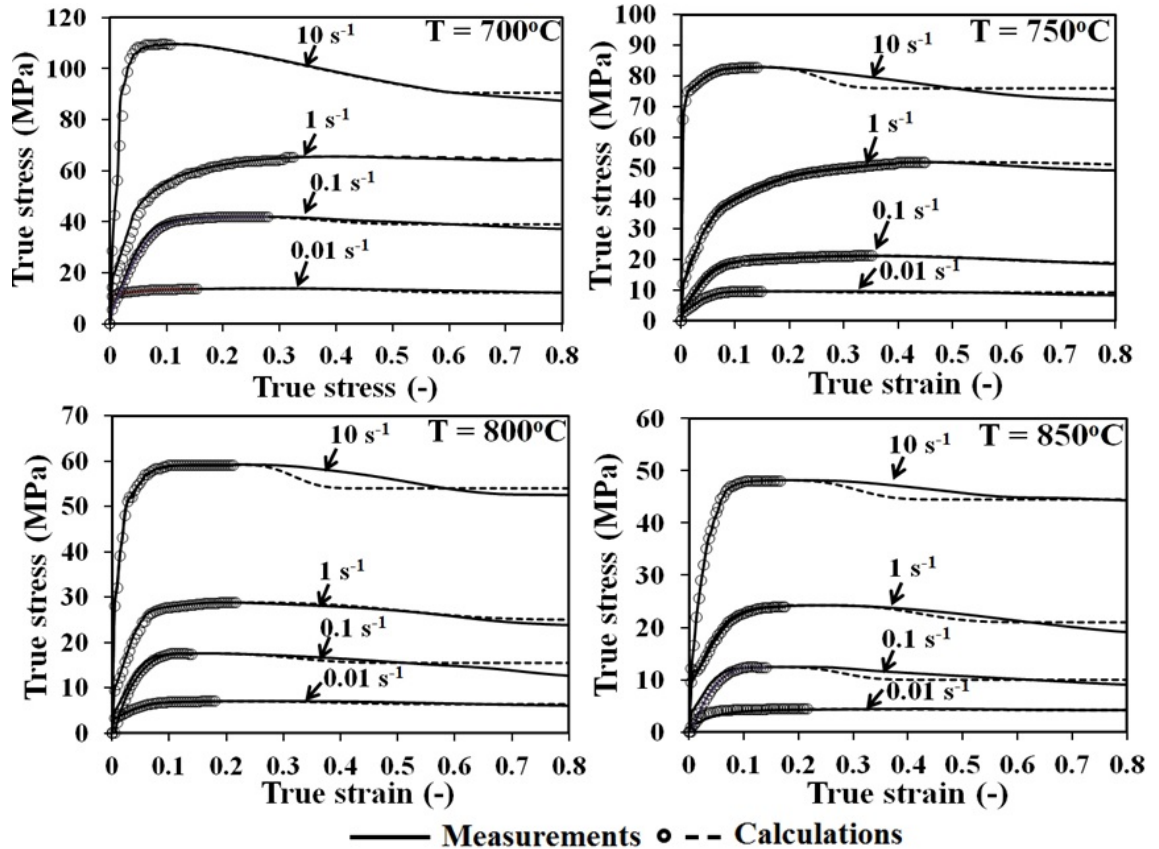
รูปที่ 5.9 โครงสร้างทางจุลภาคที่อัตราความเครียด 1 ต่อวินาที (ก) ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส (ข) ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

5.4 การเปรียบเทียบกราฟความเค้น-ความเครียดจริงจากผลการทดลองและการทำนายด้วยสมการซิงกาล่าและสมการอาลามี่

เนื่องจากแบบจำลองของการประมาณค่าความเค้นไหลแบบการคืนตัวแบบพลศาสตร์และสมการ kinetic equation เป็นพื้นฐานสำหรับการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ จะเห็นได้ว่าผลการคำนวณเริ่มจากจุดความเค้นสูงสุดที่เป็นจุดเริ่มต้นของการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ จนถึงความเค้นคงที่ทำให้มีขอบเขตของการคำนวณเฉพาะช่วงการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ การที่ใช้ค่าสูงสุดเป็นจุดเริ่มต้นของการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ เนื่องจากว่าการคำนวณหาอัตราความชันของเส้นโค้งไหล เมื่อเลือกค่าความเค้นวิกฤตเป็นจุดเริ่มต้นของการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ทำให้ผลในการทำนายเส้นโค้งไหลไม่ตรงกับผลการทดสอบและมีความผิดพลาดเกิดขึ้นจากการใช้ค่าคงที่ของโลหะผสม MAB ทั้งหมดมาจากการเฉลี่ย เพื่อนำไปใช้เป็นค่าคงที่สำหรับการทำนายความแม่นยำของโลหะผสม MAB

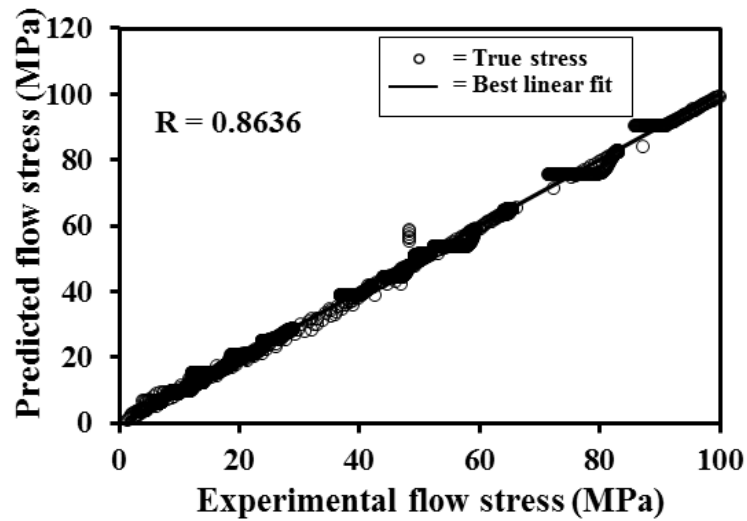
การเริ่มต้นของการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์เป็นการคำนวณที่จุดความเค้นสูงสุด จากการคำนวณข้างต้นทำให้สามารถเลือกใช้แบบจำลองที่เหมาะสมกับพฤติกรรมของเส้นโค้งไหลคือทำนายโดยใช้สมการซิงกาล่าคำนวณในช่วงแรกที่เกิดพฤติกรรมความเครียดแข็งจนถึงความเค้นสูงสุดร่วมกับสมการอาลามี่ในช่วงหลังจากความเค้นสูงสุดดังสมการที่ 5.3 ซึ่งมีความเหมาะสมกับการทำนายพฤติกรรมการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ดังแสดงในรูปที่ 5.10 และสมมติฐานนี้จะช่วยลดความยุ่งยากของสมการอาลามี่ที่สามารถยอมรับได้และมีความแม่นยำอีกด้วย

$$\sigma = \sigma_p - (\sigma_p - \sigma_{ss}) X_{DRX} \quad (5.3)$$



รูปที่ 5.10 การเปรียบเทียบกราฟความเค้น-ความเครียดจากผลการทดลองและการทำนายด้วยสมการซิงก่าล่าและสมการอาลามี่ ของชิ้นงานทดสอบ MAB ที่กดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 700, 750, 800 และ 850 องศาเซลเซียส และอัตราความเครียด 0.01, 0.1, 1 และ 10 ต่อวินาที

จากการเปรียบเทียบระหว่างผลการทำนายและผลการทดลองของสมการซิงก่าล่าและสมการอาลามี่ ในรูปที่ 5.11 ค่าที่ทำนายเปรียบเทียบกับผลการทดลอง สำหรับทุกอุณหภูมิและอัตราความเครียดของการเสียรูปที่มีความสัมพันธ์ระหว่างการทำนายและผลการทดลองที่ได้จากการหาค่า R และ AARE มีค่าเท่ากับ 0.8636 และ 13.04% ตามลำดับ ซึ่งจะแสดงให้เห็นถึงความสามารถให้การทำนายที่ดีของขีดความสามารถของ (ก) สมการซีเนอร์ไฮโลมอนด์ในรูปที่ 4.8 (ข) สมการซิงก่าล่าและสมการอาลามี่ในรูปที่ 5.11 ผลของการทำนายจะแสดงให้เห็นว่าสมการซิงก่าล่าและสมการอาลามี่ของผลที่ได้จะเป็นที่ยอมรับในการพิจารณาโลหะผสม MAB



รูปที่ 5.11 ความสัมพันธ์ระหว่างผลการทดลองและการทำนายโดยสมการซึ่งกล่าวกับสมการอาลามี่

ตารางที่ 5.6 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ทางสถิติ (R) เปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

Titles	Authors	Materials	Model	Accuracy (%)
Modeling high-temperature tensile deformation behavior of AZ31B magnesium alloy considering strain effects	De-Hua Yu et al.	AZ31B magnesium alloy	Zener-Hollomon equation	0.9963
Flow behavior of Nickel Aluminium Bronze under hot deformation	Thossatheppita k et al.	Nickel Aluminium Bronze(NAB Alloy)	Zener-Hollomon equation	0.98
Constitutive equations for elevated temperature flow behavior of commercial purity aluminum	Rezaei et al.	Commercially pure aluminum (AA1070)	Zener-Hollomon equation	0.992
High temperature deformation behavior of Al-Cu-Mg alloys micro-alloyed with Sn	Banerjee et al.	- Alloy-A(Al-6.2% Cu-0.6% Mg alloy) - Alloy-B(Al-6.2%Cu-0.6% Mg alloy containing 0.06w% of Sn)	Zener-Hollomon equation	0.80 0.95
High-temperature flow behavior modeling of 2099 alloy considering strain effects	Zhang et al.	2099 alloy	Zener-Hollomon equation	0.998
Hot compression deformation characteristics of Mg-Mn alloy	Fang et al.	Mg-Mn alloy	Zener-Hollomon equation	0.979
The flow behavior modeling of cast A356 aluminum alloy at elevated temperatures considering the effect of strain	Haghdadi et al.	A356 Aluminum alloy	Zener-Hollomon equation	0.991
Prediction of flow stress for NO8028 alloy under hot working conditions	Wang et al.	NO8028 alloy	Avrami equation	0.998

ในกรณีของโลหะผสม MAB ที่มีส่วนผสมหลักคือ ทองแดง จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโลหะที่มีส่วนผสมของทองแดงที่ได้นำผลของเส้นโค้งไหลที่อุณหภูมิสูงโดยใช้สมการของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาใช้ในการหาความเหมาะสมต่อวัสดุ สำหรับการศึกษาค้นคว้างานวิจัยในตารางที่ 5.6 ผลการทดลองจากการทดสอบกดขึ้นรูปร้อนที่จะคำนวณจากสมการแบบจำลอง (Model equation) มี (ก) สมการซีเนอร์โฮโลมอนด์ (ข) สมการซิงกอล่าและสมการอาลามี่ ดังนั้นผลกระทบที่มีต่อความแม่นยำของการทำนายเส้นโค้งไหล ควรจะนำมาพิจารณา เพื่อที่จะได้สมการที่เหมาะสมต่อวัสดุ และจะเห็นได้ว่าการทำนายของความเค้นไหลจากแบบจำลองที่ได้จากงานวิจัยว่าแบบจำลองไหนเหมาะสมต่อวัสดุ

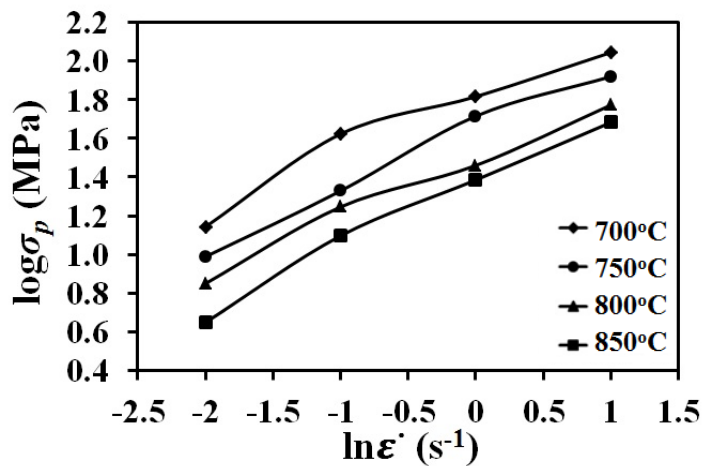
เพื่อเป็นที่ยืนยันและยอมรับสำหรับการทำนายของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในสมการซีเนอร์โฮโลมอนด์ผลของการทำนายไม่เหมาะสมกับโลหะผสม MAB เมื่อเปรียบเทียบระหว่างเส้นโค้งไหล โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่อุณหภูมิต่ำและอัตราความเครียดต่ำ พฤติกรรมนี้แสดงให้เห็นว่าเส้นกราฟที่ได้จากการคำนวณของสมการซีเนอร์โฮโลมอนด์ไม่เหมาะสมกับโลหะผสม MAB และการทำนายของเส้นโค้งไหลที่ใช้สมการซิงกอล่า (ถึงความเค้นสูงสุด) และสมการอาลามี่ (หลังความเค้นสูงสุด) สำหรับแบบจำลองนี้เป็นที่ยอมรับสำหรับผลการทดลองทุกๆบริเวณของการเสียรูป เพราะเมื่อเปรียบเทียบผลระหว่างการทำนายกับผลการทดลองมีความใกล้เคียงกัน เนื่องมาจากมีความสัมพันธ์ของการคืนตัวแบบพลศาสตร์และการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ระหว่างการกดขึ้นรูปร้อน ได้ใช้วิธีหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R) และ ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดสัมพัทธ์ (AARE) การคำนวณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสมการซิงกอล่าและสมการอาลามี่แสดงให้เห็นถึงผลการเปรียบเทียบระหว่างการทำนายกับผลการทดลองที่ดี ทำให้เพิ่มความเชื่อมั่นของค่าคงที่ของโลหะผสม MAB ที่คำนวณได้

5.5 ผลการทำนายเสถียรภาพการขึ้นรูปของโลหะผสม MAB ในระหว่างการกดขึ้นรูปร้อน [60-64]

แบบจำลอง DMM ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการทำนายพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปของวัสดุในระหว่างการขึ้นรูปร้อน โดยอาศัยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดจริง ซึ่งเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ อัตราความเครียดและความเครียด

สมบัติการขึ้นรูปของโลหะที่อุณหภูมิสูงจะเปลี่ยนแปลงไปเมื่อความสามารถในการตอบสนองต่ออัตราความเครียด (Strain rate sensitivity, m) และอุณหภูมิเปลี่ยนแปลง งานที่ได้จากการขึ้นรูปแบบถาวรถูกเปลี่ยนเป็นความร้อนที่อัตราการขึ้นรูปสูง ส่งผลให้เกิดพฤติกรรมการณ์อ่อนตัวของวัสดุขึ้น และทำให้เกิดข้อจำกัดในการขึ้นรูปวัสดุแบบจำลอง DMM ได้ถูกนำมาใช้ในการทำนายพฤติกรรม การเปลี่ยนรูปของวัสดุในระหว่างการขึ้นรูปร้อน โดยอาศัยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดจริง หลักการทั่วไปของแบบจำลอง DMM มีแนวคิดในเรื่องการทำนายความสามารถในการขึ้นรูปของวัสดุ โดยอาศัยการรวมความสัมพันธ์ของสมการคอนสทิทิวทีฟ ความสามารถในการขึ้นรูปร้อน และการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาค DMM ภายใต้อุณหภูมิและอัตราความเครียดที่แตกต่างกัน โดยมีตัวแปรที่สำคัญคือ ความสามารถในการตอบสนองต่ออัตราความเครียด (Strain rate sensitivity, m) และความสามารถในการตอบสนองต่ออุณหภูมิ (Temperature sensitivity, s) ดังแสดงในสมการที่ 5.4 ค่าความสามารถในการตอบสนองต่ออัตราความเครียดสามารถหาได้จากความชันของความเค้นเทียบกับอัตราความเครียดที่อุณหภูมิกงที่ในกราฟ $\log \sigma_p - \log \dot{\epsilon}$ ที่แต่ละอุณหภูมิ ดังแสดงในรูปที่ 5.12

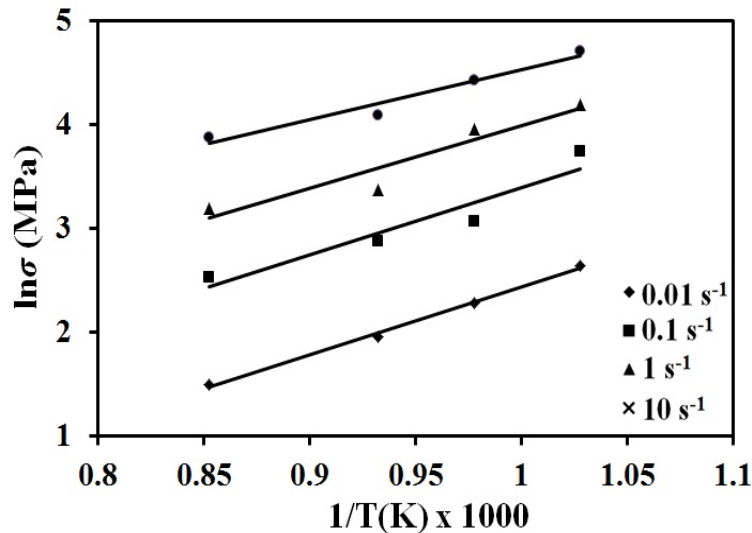
$$m = \left\{ \frac{\partial(\log \sigma_p)}{\partial(\log \dot{\epsilon})} \right\}_T \quad (5.4)$$



รูปที่ 5.12 กราฟระหว่าง $\log \sigma_p$ เทียบกับ $\log \dot{\epsilon}$ สำหรับคำนวณค่า m

ค่าความสามารถในการตอบสนองต่ออุณหภูมิสามารถหาได้จากสมการ 5.5 ซึ่งหาจากความชันของกราฟระหว่าง $\ln \sigma_p$ เทียบกับ $1/T$ ในแต่ละอุณหภูมิ ดังแสดงในรูปที่ 5.13

$$s = \frac{1}{T} \left\{ \frac{\partial(\ln \sigma_p)}{\partial\left(\frac{1}{T}\right)} \right\}_{\varepsilon} \quad (5.5)$$



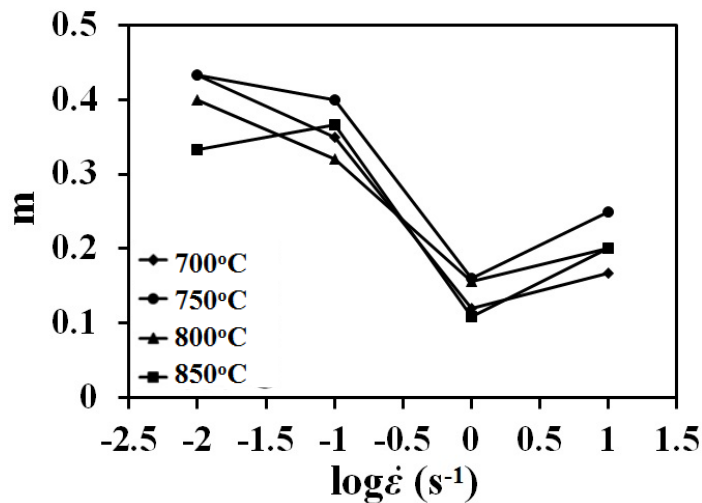
รูปที่ 5.13 กราฟระหว่าง $\log \sigma$ เทียบกับ $1/T$ สำหรับคำนวณค่า s

การพิจารณาเสถียรภาพของการเปลี่ยนรูปแบบถาวรของวัสดุนั้น จะพิจารณาในส่วนของอุณหภูมิและอัตราความเครียด เมื่อมีการปลดปล่อยพลังงานเข้าสู่ภาวะสมดุล โดยจะใช้เกณฑ์ในการพิจารณาทั้งหมด 4 เกณฑ์ดังสมการ 2.26-2.29 โดยถ้าผลการทดสอบอยู่ภายใต้เกณฑ์ที่กำหนดไว้ แสดงว่าการเปลี่ยนรูปของวัสดุมีเสถียรภาพ

สมการที่ 2.26 เป็นเกณฑ์ที่แสดงถึงความสามารถในการตอบสนองต่ออัตราความเครียด โดยมีแนวคิดพื้นฐานที่ว่า วัสดุจะไม่ปลดปล่อยพลังงานเมื่อความสามารถในการตอบสนองต่ออัตราความเครียดมีค่าเท่ากับศูนย์หรือติดลบ ที่สภาวะดังกล่าวจะทำให้วัสดุเกิดการแตกหักในระหว่างการขึ้นรูปร้อน ขณะที่ค่าความสามารถในการตอบสนองต่ออัตราความเครียดเพิ่มขึ้น มีแนวโน้มทำให้สภาวะการเสียรูปเฉพาะจุด (Localised Deformation) ของวัสดุลดลง ส่งผลให้วัสดุสามารถยืดตัวได้มากขึ้นโดยไม่เกิดการคอด (Necking) ค่าความสามารถในการตอบสนองต่ออัตราความเครียดของวัสดุ MAB ที่หาได้ในช่วง 0.1- 0.45 ดังรูปที่ 5.14 ซึ่งอยู่ในขอบเขตของเกณฑ์ในสมการที่ 2.26 ทุกช่วงอุณหภูมิ

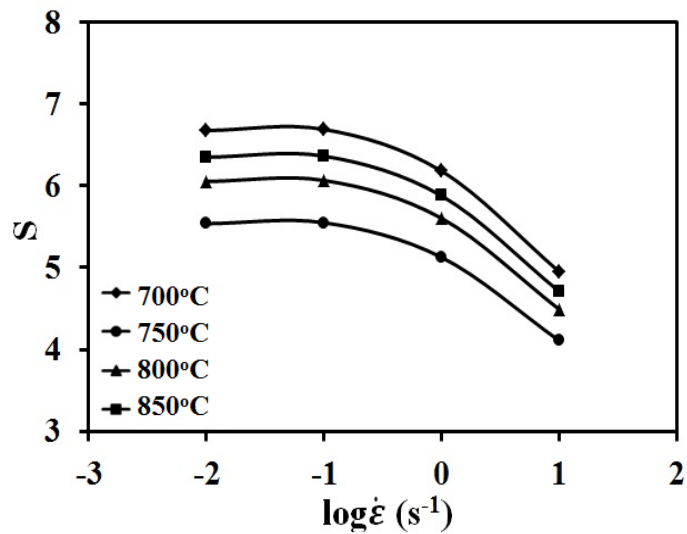
สมการที่ 2.27 เป็นเกณฑ์ที่แสดงถึงสภาพความสม่ำเสมอของสนามความเค้นของชิ้นงานระหว่างการเปลี่ยนรูป ตลอดจนแนวโน้มที่อาจทำให้เกิดสภาวะความเครียดเฉพาะจุด (Strain localization) โดยจากสมการ 2.27 นี้ จะสามารถหาค่าได้จากความชันของความสามารถในการตอบสนองต่ออัตรา

ความเครียดกับ $\log \dot{\epsilon}$ ในแต่ละอุณหภูมิที่ทดสอบ ดังตัวอย่างในรูปที่ 5.14 อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความสามารถในการตอบสนองต่ออัตราความเครียด (m) กับอัตราความเครียด ($\log \dot{\epsilon}$) ของโลหะผสม MAB ตามสมการที่ 2.27 มีค่าบวกที่อัตราความเครียดระหว่าง $0.01-0.1 \text{ s}^{-1}$ ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส และที่อัตราความเครียดระหว่าง $1.0 - 10 \text{ s}^{-1}$ ที่ทุกอุณหภูมิ การขึ้นรูปในช่วงดังกล่าว ไม่อยู่ในขอบเขตของเกณฑ์เสถียรภาพ เพื่อพิจารณาในเงื่อนไขอื่น คือ ที่อัตราความเครียดระหว่าง $0.01-0.1 \text{ s}^{-1}$ ในอุณหภูมิ 700, 750 และ 800 องศาเซลเซียส รวมทั้งที่อัตราความเครียดระหว่าง $0.1-1.0 \text{ s}^{-1}$ ในทุกช่วงอุณหภูมิ อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความสามารถในการตอบสนองต่ออัตราความเครียดกับอัตราความเครียดมีค่าเป็นลบ ดังนั้นจึงอยู่ในเกณฑ์เสถียรภาพ



รูปที่ 5.14 กราฟระหว่าง m เทียบกับ $\log \dot{\epsilon}$ ที่แต่ละอุณหภูมิ

สมการที่ 2.28 เป็นเกณฑ์ที่แสดงถึงเสถียรภาพของการขึ้นรูปโดยจัดเป็นกระบวนการที่ผันกลับไม่ได้ (Irreversible process) โดยเทียบเกณฑ์ความสามารถในการตอบสนองต่ออุณหภูมิกับอัตราการเกิดเอนโทรปีสุทธิ (Net entropy production) ต้องมีค่าเป็นบวกเสมอ ซึ่งเป็นไปตามเงื่อนไขของกระบวนการที่ผันกลับไม่ได้ ค่าความสามารถในการตอบสนองต่ออุณหภูมิที่ต่ำ มีแนวโน้มเกิดพฤติกรรมการคืนตัวแบบพลศาสตร์ ในขณะที่ค่าความสามารถในการตอบสนองต่ออุณหภูมิที่สูง จะแสดงพฤติกรรมเกิดการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ ดังแสดงในรูปที่ 5.15 เพื่อพิจารณาเกณฑ์เสถียรภาพที่จากความสามารถในการตอบสนองต่ออุณหภูมิ พบว่ามีค่าความสามารถในการตอบสนองต่ออุณหภูมิอยู่ในช่วง 4-7 ซึ่งอยู่ในขอบเขตของเกณฑ์เสถียรภาพตามสมการที่ 2.28 สำหรับทุกอุณหภูมิและอัตราความเครียดที่ทดสอบ



รูปที่ 5.15 กราฟระหว่าง s เทียบกับ $\log \dot{\epsilon}$ ในแต่ละอุณหภูมิ

ในสมการที่ 2.29 เป็นเกณฑ์ที่แสดงถึงเสถียรภาพของการขึ้นรูป โดยอาศัยความสัมพันธ์ของอัตราเปลี่ยนแปลงของความสามารถในการตอบสนองต่ออุณหภูมิกับอัตราความเครียด โดยจะต้องมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0 จึงจะถือว่าการขึ้นรูปมีเสถียรภาพ ในทางกลับกันขณะที่อัตราความเครียดสูงขึ้นมีผลทำให้ระดับความร้อนอะเดียแบติก (Adiabatic heating) เพิ่มขึ้น นั่นหมายถึงในขณะที่ขึ้นรูปมีการคายความร้อนออกจากวัสดุทำให้ระบบการเปลี่ยนรูปแบบถาวรของวัสดุมีอุณหภูมิสูงขึ้น ความร้อนที่คายออกมาหรือเพิ่มขึ้นอยู่กับอัตราความเครียด หากการเปลี่ยนรูปวัสดุกระทำด้วยอัตราความเครียดที่สูง ส่งผลให้วัสดุคายความร้อนออกสู่ระบบไม่ทัน อุณหภูมิในระหว่างการเปลี่ยนรูปของวัสดุจึงสูง ทำให้อัตราเปลี่ยนแปลงของความสามารถในการตอบสนองต่ออุณหภูมิกับอัตราความเครียดมีค่าเป็นบวก เกิดสภาวะการเปลี่ยนรูปเฉพาะจุด (Flow localization) อันเนื่องมาจากความร้อนอะเดียแบติก สภาวะการนี้จะไม่เป็นไปตามเกณฑ์เสถียรภาพตามสมการที่ 2.29 แต่หากความสามารถในการตอบสนองต่ออุณหภูมิมีน้อยกว่าอัตราความเครียดที่สูงขึ้น มีแนวโน้มทำให้การเกิดความเครียดเฉพาะจุด (Strain localization) และการเกิดแถบเฉือนจากอะเดียแบติก (Adiabatic shear band) ที่ลดลง หมายถึงการเปลี่ยนรูปแบบถาวรของวัสดุ MAB ยังคงมีเสถียรภาพ เมื่อพิจารณาอัตราการเปลี่ยนแปลงของความสามารถในการตอบสนองต่ออุณหภูมิที่มีต่ออัตราความเครียด จะพบว่าอัตราดังกล่าวมีค่าเป็นบวกที่อัตราความเครียดระหว่าง $0.01-0.1 \text{ s}^{-1}$ ในทุกช่วงอุณหภูมิ การขึ้นรูปในช่วงดังกล่าว ไม่อยู่ในขอบเขตของเกณฑ์เสถียรภาพในสมการที่ 2.29 ถ้าพิจารณาที่เงื่อนไขอื่น คือ ที่อัตราความเครียด

ระหว่าง $0.1-10 \text{ s}^{-1}$ ในทุกช่วงอุณหภูมิ อัตราการเปลี่ยนแปลงความสามารถในการตอบสนองต่ออุณหภูมิต่ออัตราความเครียดมีค่าเป็นลบ คือ อยู่ในเกณฑ์เสถียรภาพสำหรับสมการที่ 2.29

ตารางที่ 5.7 สรุปขอบเขตของแต่ละเกณฑ์เสถียรภาพในทุกช่วงอุณหภูมิและอัตราความเครียดในการวิเคราะห์เสถียรภาพการกดขึ้นรูปร้อนของโลหะผสม MAB

Criteria	Strain rate	700°C	750°C	800°C	850°C
$0 < m < 1$	All	✓	✓	✓	✓
$\frac{\partial m}{\partial(\log \dot{\epsilon})} \leq 0$	$0.01-0.1 \text{ s}^{-1}$	✓	✗	✓	✓
	$0.1-1 \text{ s}^{-1}$	✓	✓	✓	✓
	$1-10 \text{ s}^{-1}$	✗	✗	✗	✗
$s > 1$	All	✓	✓	✓	✓
$\frac{\partial s}{\partial(\log \dot{\epsilon})} \leq 0$	$0.01-0.1 \text{ s}^{-1}$	✗	✗	✗	✗
	$0.1-1 \text{ s}^{-1}$	✓	✓	✓	✓
	$1-10 \text{ s}^{-1}$	✓	✓	✓	✓

✓ Satisfied ✗ Unsatisfied

สรุปได้ว่า การเปลี่ยนรูปแบบถาวรของโลหะผสม MAB ที่มีความเสถียรภาพสำหรับเงื่อนไขของกระบวนการในช่วงอัตราความเครียด $0.1-1$ ต่อวินาที ที่อุณหภูมิ 700-850 องศาเซลเซียส สำหรับการดำเนินงานต่อไปจะอาศัยบทสรุปจากการศึกษาและข้อมูลที่เกี่ยวข้องในการทดสอบไปสู่การปรับปรุงและควบคุมกระบวนการขึ้นรูปของโลหะผสม MAB

บทที่ 6 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการทำนายพฤติกรรม การเปลี่ยนรูปที่อุณหภูมิสูง

ในการศึกษานี้ การทดสอบการกดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 700, 750, 800 และ 850 องศาเซลเซียสและอัตราความเครียดที่ 0.01, 0.1, 1 และ 10 ต่อวินาที ของโลหะผสม MAB โดยใช้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดจริงได้รับการพิจารณาและสามารถอธิบายโดยใช้สมการคอนสทิทิวทีฟที่พหุนามกับสมการซีเนอร์โฮโลมอนด์ สมการซิงก่าล่า สมการอาลามี่และแบบจำลอง DMM จากผลการศึกษาจะสรุปได้ดังนี้

- กราฟความเค้น-ความเครียดจริงของโลหะผสม MAB ที่อุณหภูมิสูงแสดงให้เห็นค่าความเค้นสูงสุดเพียงจุดเดียวภายใต้อุณหภูมิและอัตราความเครียดที่พิจารณา หลังจากความเค้นสูงสุดนั้นความเค้นจะค่อยๆลดลงจนถึงสภาวะคงที่ในขณะที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น
- ค่าคงที่ของวัสดุ n_1 , n_2 , β , α , Q และ A ของสมการคอนสทิทิวทีฟที่พหุนามกับสมการซีเนอร์โฮโลมอนด์ ซึ่งได้พิจารณาจากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดจริงที่ได้จากการทดลอง มีพลังงานกระตุ้น (Q) ของโลหะผสม MAB คือ 194 กิโลจูลต่อโมล
- ผลการเปรียบเทียบระหว่างผลของแบบจำลองโดยใช้ค่าคงที่ของทุกๆ ความเครียด แบ่งเป็นช่วงๆ ละ 0.05 ระหว่าง 0.05-0.8 ผลที่ได้จากการทดลองกับผลการคำนวณที่ได้รับการประเมินโดยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R) และค่าเฉลี่ยความผิดพลาดสัมบูรณ์ (AARE) ของพฤติกรรมเปลี่ยนรูปโดยใช้สมการคอนสทิทิวทีฟที่พหุนามกับสมการซีเนอร์โฮโลมอนด์ สมการซิงก่าล่าและสมการอาลามี่ ภายใต้อุณหภูมิและอัตราความเครียดของการกดขึ้นรูปร้อน ค่าของ R และ AARE ที่ได้จากการเปลี่ยนรูปคือ 0.5434 และ 22.46 %, 0.8636 และ 13.04 % ตามลำดับ ผลการศึกษาพบว่า สมการซิงก่าล่าและสมการอาลามี่มีความแม่นยำและมีน้ำหนักเชื่อถือ
- สัดส่วนปริมาณของการคืนตัวแบบพลศาสตร์และการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ของโลหะผสม MAB จากการสังเกตโครงสร้างจุลภาคที่ขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 750 และ 800 องศาเซลเซียสและอัตราความเครียด 1 ต่อวินาที ซึ่งที่อัตราความเครียดเดียวกันอุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสแสดงการคืน

ตัวแบบพลศาสตร์ และอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสแสดงการเกิดผลึกใหม่แบบพลศาสตร์ ซึ่งสอดคล้องกับภาพถ่ายทางโครงสร้างจุลภาค

- การวิเคราะห์เสถียรภาพการเปลี่ยนรูปของวัสดุ MAB จากแบบจำลอง DMM พบว่าเกณฑ์ความสามารถในการตอบสนองต่ออัตราความเครียด เกณฑ์อัตราการเปลี่ยนแปลงของ m เทียบกับ $\log \dot{\epsilon}$ และเกณฑ์ความสามารถในการตอบสนองต่ออุณหภูมิ มีเสถียรภาพในทุกอุณหภูมิและอัตราความเครียดที่ทดสอบ เกณฑ์ที่สำคัญคืออัตราการเปลี่ยนแปลงของ s เทียบกับ $\log \dot{\epsilon}$ พบว่าโลหะผสม MAB มีเสถียรภาพการเสวยรูปในช่วงอัตราความเครียด 0.1-1 ต่อวินาทีกับในช่วงอุณหภูมิ 700-850 องศาเซลเซียส

6.2 สรุปผลการจำลองการก่อกำเนิดรูปที่เทียบกับการทดสอบที่อุณหภูมิสูงด้วยโปรแกรม

DEFORM 3D

ในการศึกษานี้ การทดสอบการก่อกำเนิดรูปที่อุณหภูมิและอัตราความเครียดที่แตกต่างกันที่ได้ดำเนินการสำหรับโลหะผสม MAB ที่ได้ผลิตขึ้นจากการหล่อ การจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของการทดสอบการก่อกำเนิดรูปอ่อนสำหรับผลการทดลองที่ได้จากเส้นโค้งไหลและตัวแปรของซีเนอร์โฮโลมอนต์ที่กำหนดสำหรับอธิบายพฤติกรรมของการเปลี่ยนรูปถาวร ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะทางที่กำหนดจากการทดลองและแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ถูกนำมาเปรียบเทียบกันสรุปได้ดังนี้

- ค่าคงที่ของวัสดุของแบบจำลองซีเนอร์โฮโลมอนต์สามารถคำนวณได้โดยตรงจากเส้นโค้งไหลที่ได้จากการทดลอง
- ผลการเปรียบเทียบความแม่นยำระหว่างผลที่ได้จากการทดลองกับผลของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ จะพิจารณาโดยใช้เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสัมพัทธ์เฉลี่ย (ARE) โดย ผลจากแบบจำลองเส้นโค้งไหล (Flow curve) ผลของแบบจำลองโดยใช้ค่าคงที่ของความเค้นสูงสุด และผลของแบบจำลองโดยใช้ค่าคงที่ของทุกๆ ความเครียด แบ่งเป็นช่วงๆ ละ 0.05 ระหว่าง 0.05-0.8 ซึ่ง % ARE ต่ำสุดหรือมีความแม่นยำมากที่สุดคือ 2.34 %, 5.3 % และ 5.66 % ตามลำดับ ที่ผลจากแบบจำลองเส้นโค้งไหล (Flow curve) มีความแม่นยำมากที่สุดคือ 2.34 %

- การคำนวณกราฟแรงและระยะทางของโลหะผสม MAB ภายใต้การกดขึ้นรูปร้อนผลสรุปคือผลจากแบบจำลองเส้นโค้งไหลโดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์มีความแม่นยำใกล้เคียงกับผลการทดลองดีกว่าที่ได้จากการใช้ค่าคงที่ของวัสดุจากโปรแกรม DEFORM 3D
- จากผลการทดสอบ รวมทั้งการทำแบบจำลองจากโปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์แสดงให้เห็นว่าถึงการเปรียบเทียบของเปอร์เซ็นต์ของความผิดพลาดสัมพัทธ์เฉลี่ยระหว่างผลการทดลองกับ FEM ที่ใช้สมบัติวัสดุที่มาจากกราฟความเค้น-ความเครียดจริงจากรูปที่ 4.17 จะให้ความเค้นไหลใกล้เคียงกับงานทดสอบ ซึ่งแตกต่างจากการทดสอบ ARE ประมาณไม่เกิน 10 %

6.3 ข้อเสนอแนะ

ในการศึกษาพฤติกรรมการขึ้นรูปของโลหะผสม MAB ในสภาวะการกดขึ้นรูปที่อุณหภูมิสูง ที่ใช้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดจริง โดยได้ทำการทดสอบกับชิ้นงานจริงโดยใช้เครื่องไดลาโตมิเตอร์เปรียบเทียบกับสมการซีเนอร์ไฮโลมอนด์ สมการชิงกาล่า สมการอาลามี่ และ ความเสถียรภาพของการขึ้นรูป แต่ในการศึกษาไม่ได้้นำการทดสอบการตีขึ้นรูปจริงและวิเคราะห์กับชิ้นงานจริงในอุตสาหกรรม ดังนั้นในการศึกษาและงานวิจัยดังกล่าวต่อไปในอนาคตควรที่จะทำการทดสอบและวิเคราะห์กับชิ้นงานจริง เพื่อที่จะสามารถพิสูจน์ความถูกต้องและความแม่นยำของแบบจำลองทางวิศวกรรมที่ได้ศึกษาว่ามีความถูกต้องและแม่นยำมากน้อยเพียงใดและรวมถึงความเป็นจริงที่จะนำไปใช้ในเชิงพาณิชย์ต่อไป

เอกสารอ้างอิง

1. Iqbal, J., Hasany, F. and Ahmad, F., 2012, "Characterization of Phases in an As-Cast Copper-Manganese-Aluminum Alloy", **Journal of Materials Science and Technology**, Vol. 22, pp. 779-784.
2. Dawson, R.J.C., 1978, "Aluminum Bronze", **Engineering Material and Design**, Vol. 12, pp. 25-28.
3. Meigh, H.J., 2000, "Cast and Wrought Aluminum Bronze-Properties, Process and Structure", **Institute of Materials**, pp. 404.
4. ศิริชัย ต่อสกุล และอนุชา วัฒนาภา, 2554, **พื้นฐานเทคโนโลยีการขึ้นรูปโลหะ**, พิมพ์ครั้งที่ 1, ซีเอ็ดยูเคชั่น, กรุงเทพฯ, หน้า 11-309.
5. ทีดีซี, n.d., **Fact-Link** [Online], Available : <https://www.fact-link.com> [2014, November 5].
6. Aibaba, n.d., **Alibaba Group** [Online], Available : <https://www.alibaba.com> [2014, November 5].
7. Bluehost, n.d., **The library of manufacturing** [Online], Available : <https://thelibraryofmanufacturing.com> [2014, November 5].
8. จิรสุข ศรีราช, n.d., **การศึกษาการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดโลหะโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์**, [Online], Available : <https://mis.en.kku.ac.th> [2014, November 5].
9. สิทธิชัย แสงอาทิตย์, n.d., **การทดสอบวัสดุ** [Online], Available : <https://www.ird.sut.ac.th> [2014, November 5].

10. Penny Colton, n.d., **Recorder** [Online], Available : <https://csegrecorder.com> [2014, November 5].
11. แสงระวี แซ่เฮ้า, n.d., **สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี** [Online], Available : <https://www.tpa.or.th> [2014, November 5].
12. พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์, n.d., **ความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) ของโลหะ** [Online], Available : https://www.elecnet.chandra.ac.th/courses/ELEC2101/chapter_6/stress.doc [2014, November 5].
13. School of material science and engineering, n.d., **stress and strain 4** [Online], Available : <https://www.materials.unsw.edu.au/tutorials/online-tutorials/stress-and-strain-0> [2014, November 5].
14. ชาญชัย ศุภกิจอมรพันธุ์, n.d., **การวัดแรงทางการแพทย์** [Online], Available : https://www.4shared.com/web/preview/doc/-mm62_z6?locale=ru [2014, November 5].
15. Robert, K., 1989, Materials Testing for the Metal Forming Industry, **Springer**, New York, pp. 21-36.
16. Leonard, J., 2001, **NDT Resource Center** [Online], Available : <https://www.nde-ed.org> [2014, November 5].
17. Tom Esposito, n.d., **Industrial Heating** [Online], Available : <https://www.industrialheating.com> [2014, November 5].
18. Guo-Zheng, Q., 2013, “Characterization for Dynamic Recrystallization Kinetics Based on Stress-Strain Curves”, **In:Peter Wilson(ed)**, Intech, chapter 2, pp.1111-2222.

19. Yang, H., Li Z.H. and Zhang Z.L., 2006, “Investigate on Zener-Hollomon parameter in the warm-hot deformation behavior of 20CrMnTi”, **Journal of Zhejiang University Science A**, Vol. 8, pp. 1453-1460.
20. Chen, F., 2014, “Mathematical Modeling of Critical Condition for Dynamic Recrystallization”, **Procedia Engineering**, Vol. 81, pp. 486-491.
21. Wang, Z.J., Qiang, H.F., Wang, X.R. and Wang G., 2012, “Constitutive Model for a New Kind of Metastable β Titanium Alloy during Hot Deformation”, **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**, Vol. 22, pp. 634-641.
22. Yazdani, M., Abbasi, S.M., Taheri, A.K. and Momeni, A., 2013, “Hot Deformation Behavior of Fe-29Ni-17Co Alloy”, **Transfer Nonferrous Material Society**, Vol. 23, pp. 3271-3279.
23. Dieter G.E., Kuhn H.A. and Semiatin S.L., 2003, “Handbook of Workability and Process Design”, ASM International, Materials Park, pp. 17-19.
24. ชศกร ประทุมวัลย์, n.d., การเลือกใช้ชนิดเอลิเมนต์ (Element type) ให้เหมาะสมกับปัญหาการกลศาสตร์ของแข็ง [Online], Available : <https://www.vcharkarn.com/varticle/41926> [2014, November 5].
25. Shyalee, W. and Yeh, G.W., 1997, “The Plastic Deformation Behaviour of AISI 4340 Alloy Steel Subjected to High Temperature and High Strain Rate Loading Conditions”, **Journal of Materials Processing Technology**, Vol. 71, pp. 224-234.
26. Mirzadeh, H., Cabrera, J.M., Prado, J.M. and Najafizadeh, A., 2011, “Hot Deformation Behavior of a Medium Carbon Microalloyed Steel”, **Materials Science and Engineering A**, Vol. 528, pp. 3876-3882.

27. Lin, Y.C., Chen, M.S. and Zhong, J., 2008, "Constitutive Modeling for Elevated Temperature Flow Behavior of 42CrMo Steel", **Computational Materials Science**, Vol. 42, pp. 470-477.
28. Lin, Y.C., Chen, M.S. and Zhong, J., 2008, "Prediction of 42CrMo Steel Flow Stress at High Temperature and Strain Rate", **Mechanics Research Communications**, Vol. 35, pp. 142-50.
29. Banerjee, S., Robi, P.S., Srinivasan, A. and Lakavath, P.K., 2010, "High Temperature Deformation Behavior of Al-Cu-Mg Alloys Micro-alloyed with Sn", **Materials Science and Engineering A**, Vol. 527, pp. 2498-2503.
30. Wanjara, P., Jahazi, M., Monajati, H. and Yue, S., 2005, "Immarigeon J.P. Hot Working Behavior of Near-alpha Alloy IMI834", **Materials Science and Engineering A**, Vol. 396, pp. 50-60.
31. Zhang, F., Di, H., Wang, X., Cao, Y., Zhang, J. and Ma, T., 2013, "Constitutive Analysis of the Hot Deformation Behavior of Fe-23Mn-2Al-0.2C Twinning Induced Plasticity Steel in Consideration of Strain", **Material and Design**, Vol. 44, pp. 354-364.
32. Cai, J., Li, F., Liu, T., Chen, B. and He, M., 2011, "Constitutive Equation for Elevated Temperature Flow Stress of Ti-6Al-4V Alloy Considering the Effect of Strain", **Material and Design**, Vol. 32, pp. 1144-1151.
33. Haghdam, N., Zarei-Hanzaki, A. and Abedi, H.R., 2012, "The Flow Behavior Modeling of Cast A356 Aluminum Alloy at Elevated Temperature Considering the Effect of Strain", **Materials Science and Engineering A**, Vol. 535, pp. 252-257.
34. Zhang, F., Shen, J., Yan, X.D., Sun, J.L., Yang, Y. and Liu, Y., 2014, "High-temperature Flow Behavior Modeling of 2099 Alloy Considering Strain Effect", **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**, Vol. 24, pp. 798-805.

35. Cingara, A., McQueen, H.J. and Avramovic-Cingara, G., 1994, "Modeling of Multistage Rolling with Difference Equations", **Scripta Metallurgica et Materialia**, Vol. 30, pp. 1437-1442.
36. Wang, M.H., Li, Y.F., Wang, W.H., Zhou, J. and Chiba, A., 2013, "Quantitative Analysis of Work Hardening and Dynamic Softening Behavior", **Material and Design**, Vol. 45, pp. 384-392.
37. Jia, J., Zhang, K. and Lu, Z., 2014, "Dynamic Recrystallization Kinetics of a Powder Metallurgy Ti-22Al-25Nb Alloy during Hot Compression", **Materials Science and Engineering A**, Vol. 607, pp. 630-639.
38. Quan, Z.Q., Li, G.S., Chen, T., Wang, Y.X., Zhang, Y.W. and Z, J., 2011, "Dynamic Recrystallization Kinetics of 42CrMosteel during Compression at Different Temperature and Strain Rates", **Materials Science and Engineering A**, Vol. 528, pp. 4643-4651.
39. Reyes-Calderon, F., Mejia, L., Boulaajaj, A. and Cabrera, J.M., 2013, "Effect of Microalloying Element (Nb, V and Ti) on the Hot Flow Behavior of high-Mn Austenitic Twinning Induced Plasticity (TWIP) Steel", **Materials Science and Engineering A**, Vol. 560, pp. 552-560.
40. Mirzadeh, H. and Najafizadeh, A., 2010, "Prediction of the Critical Conditions for Initiation of Dynamic Recrystallization", **Material and Design**, Vol. 31, pp. 1174-1179.
41. Wang, L., Liu, F., Zuo, Q. and Chen, C.F., 2013, "Prediction of Flow Stress for NO8028 Alloy under Hot Working Conditions", **Material and Design**, Vol. 47, pp. 737-745.

42. Qin, Y.J., Pan, Q.L., He, Y.B., Li, W.B., Liu, X.Y. and Fan, X., 2010, “Modeling of Flow Stress for Magnesium Alloy during Hot Deformation”, **Materials Science and Engineering A** , Vol. 527, pp. 2790-2797.
43. Zhou, H.T., Peng, Q.Z., Yang, H.X., Zhou, X., Liu, R.R., Peng, Y. and Zhong, F.H., 2014, “Dynamic Recrystallization during Hot Deformation of GH690 Alloy: A Study using Processing Maps”, **Journal of Nuclear Materials**, Vol. 448, pp. 153-162.
44. Luo, J., Li, M.Q. and Wu, B., 2011, “The Correlation between Flow Behavior and Microstructural Evolution of 7050 Aluminum Alloy”, **Materials Science and Engineering A**, Vol. 530, pp. 559-564.
45. Xu, Y., Hu, L., Deng, T. and Ye, L., 2013, “Hot Deformation Behavior and Processing Map of As-cast AZ61 Magnesium Alloy”, **Materials Science and Engineering A**, Vol. 559, pp.528-533.
46. Park, N.K., Yeom, J.T. and Na, Y.S., 2002, “Characterization of Deformation Stability in Hot Forging of Conventional Ti-6Al-4V using Processing Maps”, **Journal of Materials Processing Technology**, Vol. 130-131, pp. 540-545.
47. Venugopal, S., Venugopal, P. and Mannan, S.L., 2008, “Optimisation of Cold and Warm Workability of Commercially Pure Titanium using Dynamic Material Model (DMM) Instability Maps”, **Journal of Materials Processing Technology**, Vol. 202, pp. 201-215.
48. วีระพงษ์ สัจจาลิ, n.d., **Dilatometer (Thermal expansion coefficient - COE)** [Online], Available : <https://www.mfu.ac.th> [2014, November 5].

49. Yin, F., Hua, L., Mao, H. and Xinghui, 2013, "Constitutive Modeling for Flow Behavior of GCr15 Steel under Hot Compression Experiments", **Material and Design**, Vol. 43, pp. 393-401.
50. Yu, D.H., 2013, "Modeling High-temperature Tensile Deformation Behavior of AZ31B Magnesium Alloy Considering Strain Effects", **Material and Design**, Vol. 51, pp. 323-330.
51. Jia, J., Zhang, K. and Lu, Z., 2014, "Dynamic Recrystallization Kinetics of a Power Metallurgy Ti-22Al-25Nb Alloy during Hot Compression" **Materials Science and Engineering A**, Vol. 607, pp. 630-639.
52. Thossatheppitak, B., Uthaisangasuk, V., Mungsuntisuk, P., Suranuntchai, S. and Manonukul, A., 2014, "Flow Behavior of Nickel Aluminum Bronze under Hot Deformation" **Materials Science and Engineering A**, Vol. 604, pp. 183-190.
53. Jiang, F., Zhang, H., Ji, X., Meng, X. and Li, L., 2014, "Comparative Hot Deformation Characters of Al-Mn-Mg-RE Alloy and Al-Mn-Mg-RE-Ti Alloy", **Materials Science and Engineering A**, Vol. 595, pp. 10-17.
54. Zhang, T., Tao, Y.R. and Wang, X.Y., 2014, "Constitutive Behavior, Microstructural Evolution and Processing Map of Extruded Al-1.1Mn-0.3Mg-0.25RE Alloy during Hot Compression", **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**, Vol. 24, pp. 1337-1345.
55. Gao, L. and Luo, A., 2013, "Hot Deformation Behavior of As-cast Mg-Zn-Mn-Ce Alloy in Compression", **Materials Science and Engineering A**, Vol. 560, pp. 492-499.

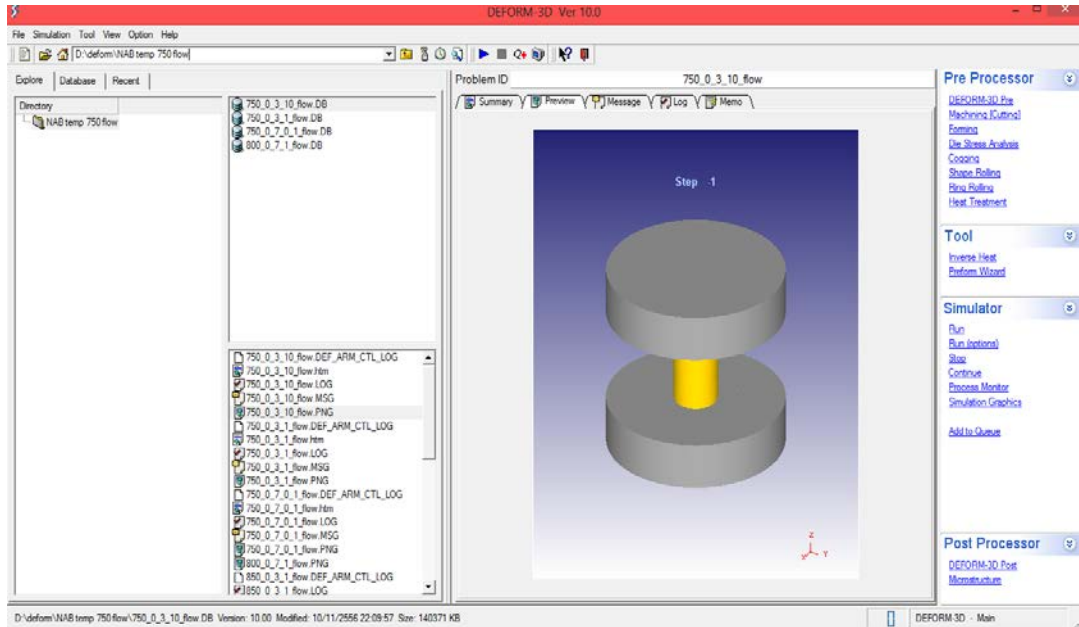
56. Doherty, R.D., Hughes, D.A., Humphreys, F.J., Jonas, J., Juul, J., Jensen, D., Kassnerf, M.E., King, W.E., McNelley, T.R., McQueen, H.J. and Rollett, A.D., 1997, "Current Issues in Recrystallization: A Review", **Materials Science and Engineering A**, Vol. 238, pp. 219-274.
57. Zhang, H., Konopleva, E.V. and McQueen, H.J., 2001, "Effect of Mn Dispersoid on Hot Working of Al-1Mn", **Materials Science and Engineering A**, Vol. 319-321, pp. 711-715.
58. Jia, J., Zhang, K. and Lu, Z., 2014, "Dynamic Recrystallization Kinetics of a Powder Metallurgy Ti-22Al-25Nb Alloy during Hot Compression", **Materials Science and Engineering A**, Vol. 607, pp. 630-639.
59. Mirzadeh, H. and Najafizadeh, A., 2010, "Prediction of the Critical Conditions for Initiation of Dynamic Recrystallization", **Materials and design**, Vol. 31, pp. 1174-1179.
60. Zhang, J., Di, H., Mao, K., Wang, X., Han, Z. and Ma, T., 2013, "Processing Maps for Hot Deformation of a High-Mn TWIP Steel: A Comparative Study of Various Criteria Based on Dynamic Materials Model", **Materials Science and Engineering A**, Vol. 587, pp. 110-122.
61. Xu, Y., Hu, L., Deng, T. and Ye, L., 2013, "Hot Deformation Behavior and Processing Map of As-cast AZ61 Magnesium Alloy", **Materials Science and Engineering A**, Vol. 559, pp. 528-533.
62. Lu, B.J., Peng, J., Shi, D.W., Tang, A.T. and Pan, F.S., 2013, "Constitutive Modeling of Dynamic Recrystallization Kinetics and Processing Maps of Mg-2.0Zn-0.3Zr Alloy Based on True Stress-strain Curves", **Material Science and Engineering A**, Vol. 560, pp. 727-733.

63. Park, N.K., Yeom, J.T. and Na, Y.S., 2002, "Characterization of Deformation Stability in Hot Forging of Conventional Ti-6Al-4V using Processing Maps", **Journal of Materials Processing Technology**, Vol. 130-131, pp. 540-545.
64. Gegal, H.I., Malas, J.C. and Doraivelu, S.M., 1988, "Shende VA. Metals Handbook, Forming and Forging", **ASM International**, Vol. 14, pp. 417-438.

ภาคผนวก ก

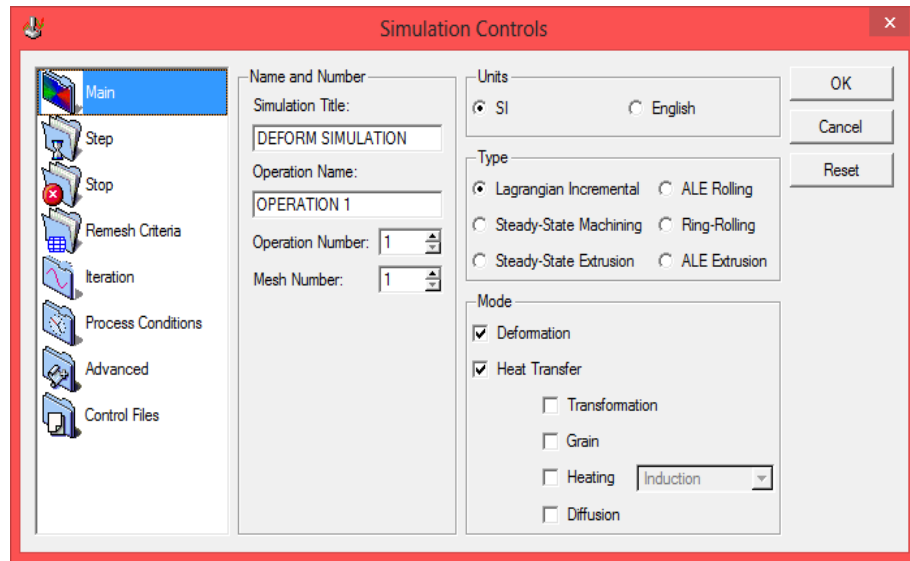
แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม DEFORM 3D

ก.1 โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้ในการคำนวณหาการเปลี่ยนรูปโดยวิธีการทอบขึ้นรูป ร้อน

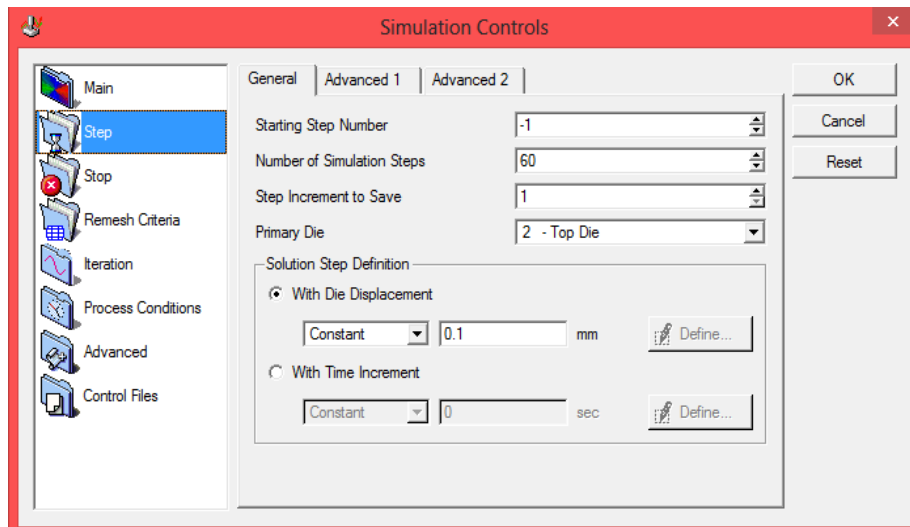


รูปที่ ก.1 หน้าจอการทำงานของโปรแกรม DEFORM 3D

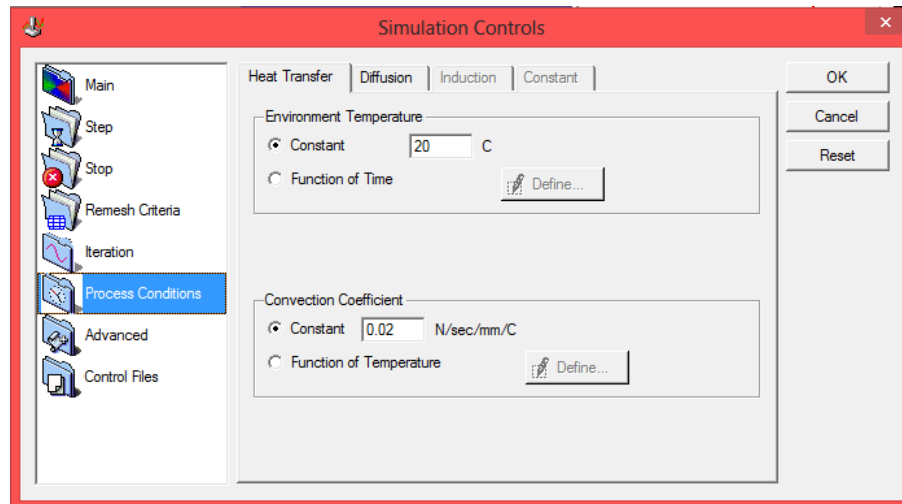
ก.2 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม DEFORM 3D



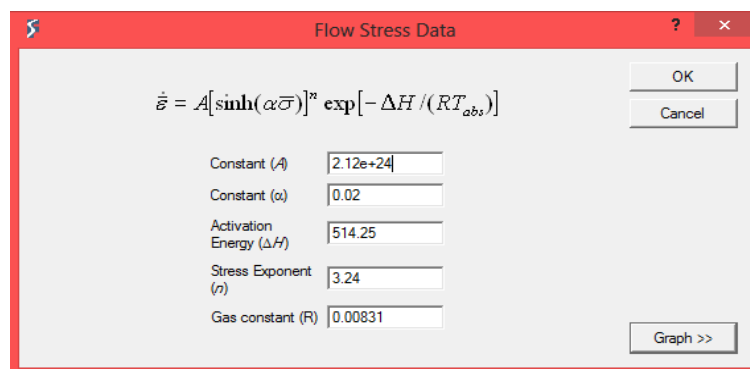
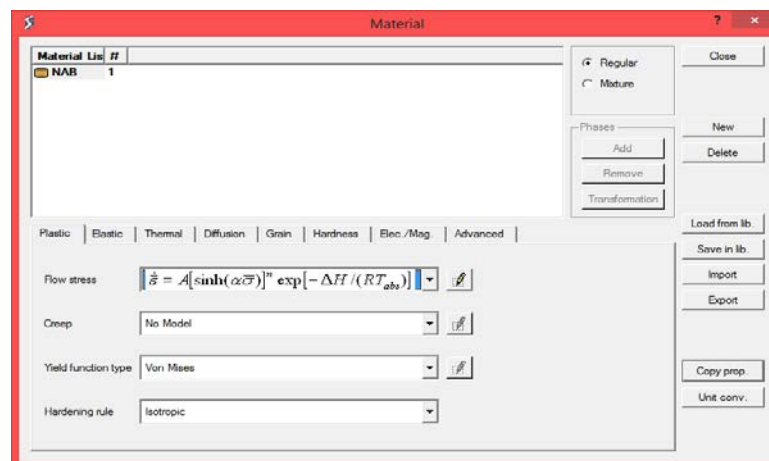
รูปที่ ก.2 หน้าต่าง Simulation Controls ในส่วนของ Main



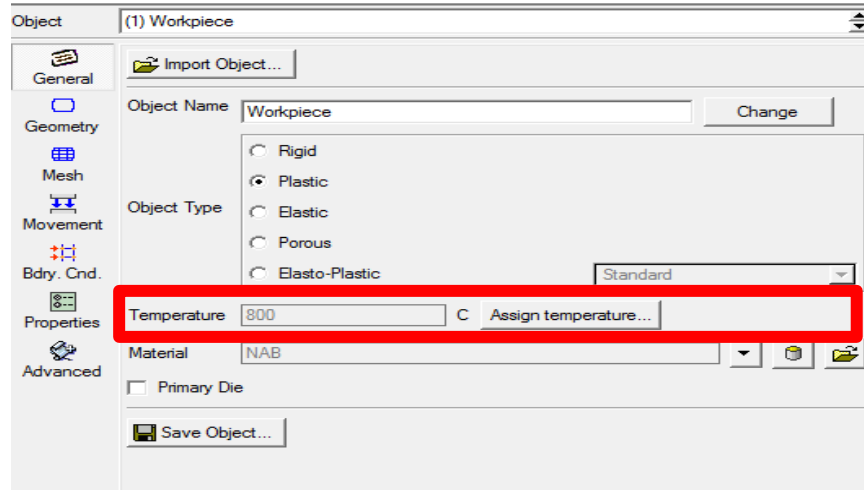
รูปที่ ก.3 หน้าต่าง Simulation Controls ในส่วนของ Step



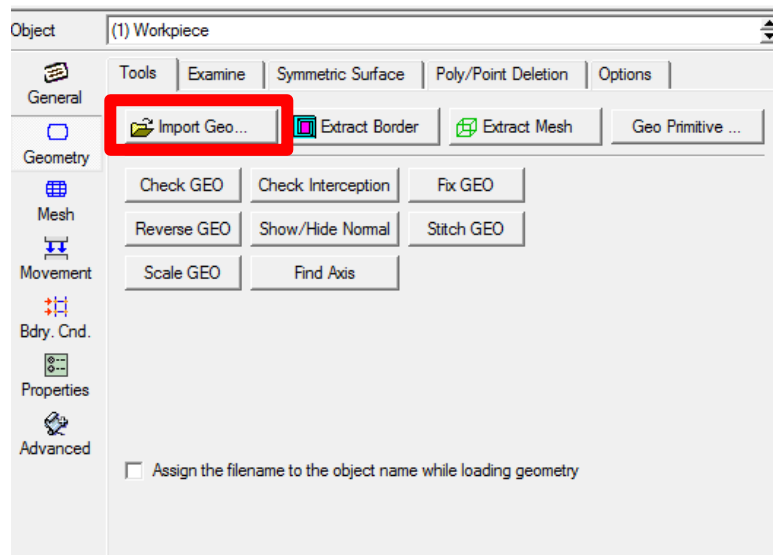
รูปที่ ก.4 หน้าต่าง Simulation Controls ในส่วนของ Process Conditions



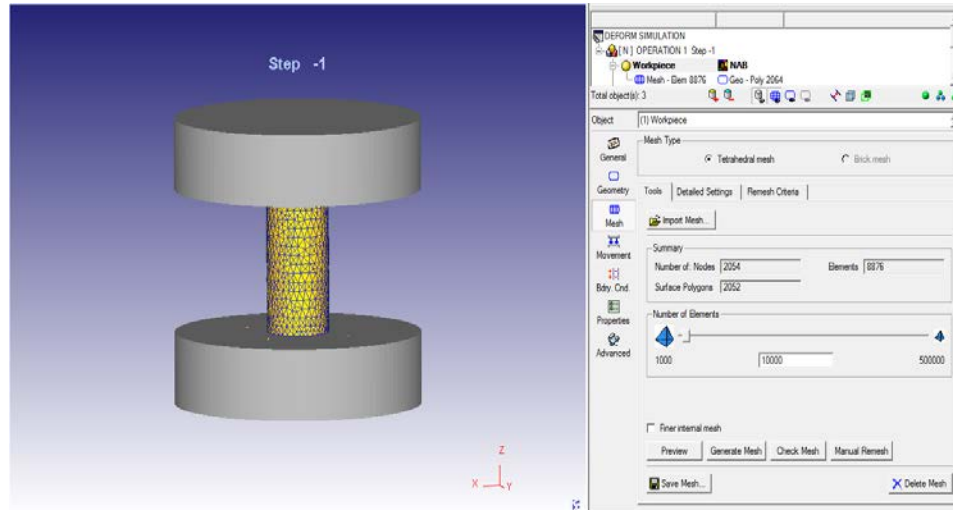
รูปที่ ก.5 หน้าต่าง Material



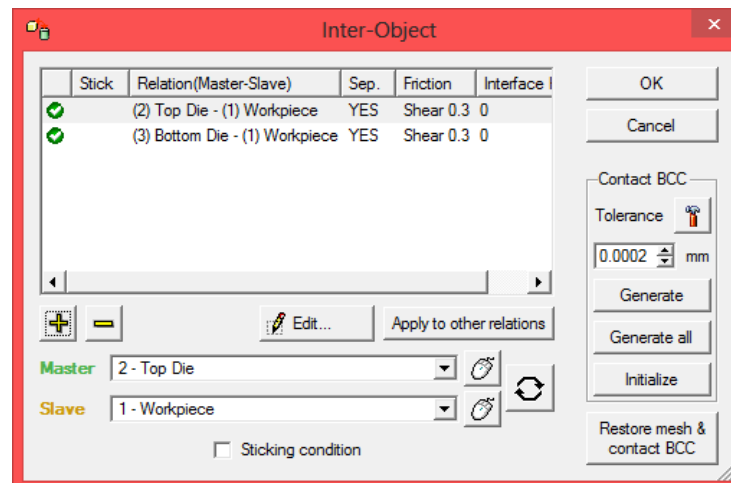
รูปที่ ก.6 หน้าต่าง Object Data ในส่วนของ General



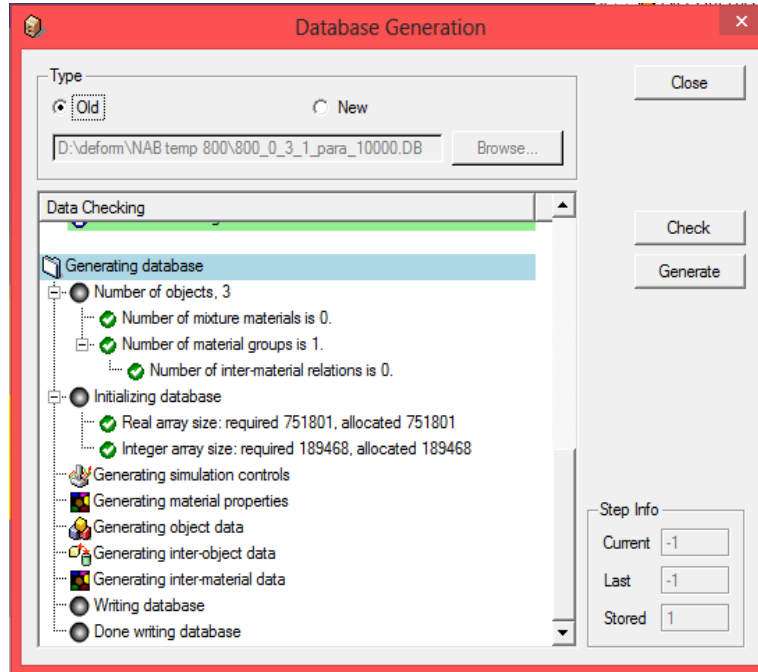
รูปที่ ก.7 หน้าต่าง Object Data ในส่วนของ Geometry



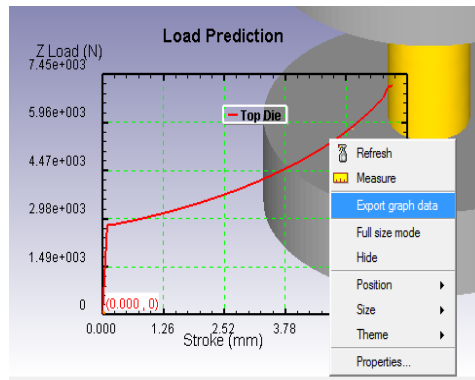
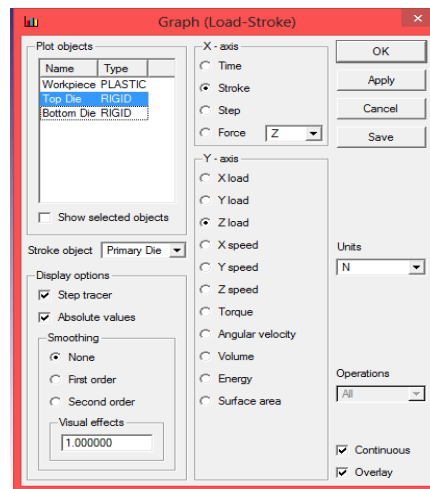
รูปที่ ก.8 หน้าต่าง Object Data ในส่วนของ Mesh



รูปที่ ก.9 หน้าต่าง Inter-Object



รูปที่ ก.10 หน้าต่าง Database Generation

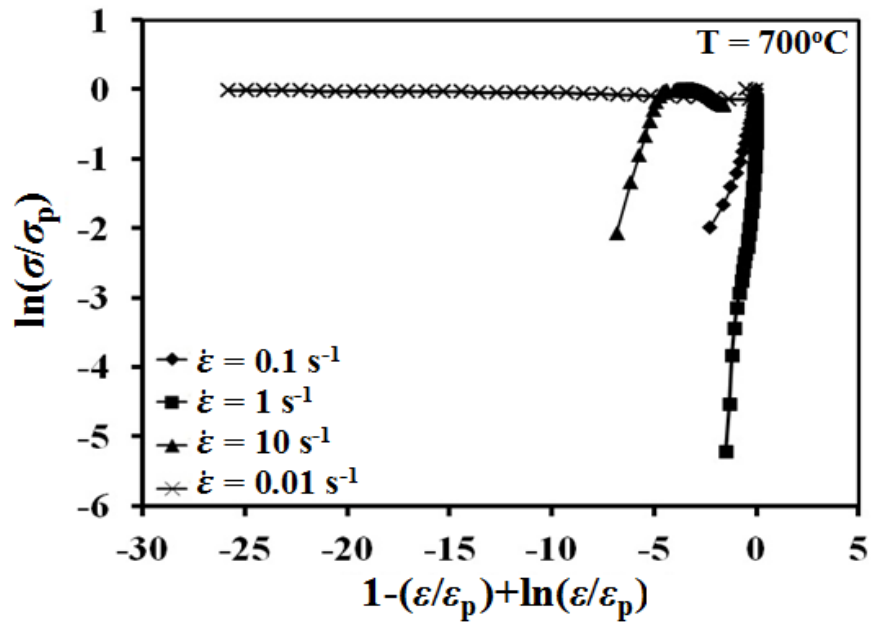


รูปที่ ก.11 หน้าต่าง Graph (Load-Stroke)

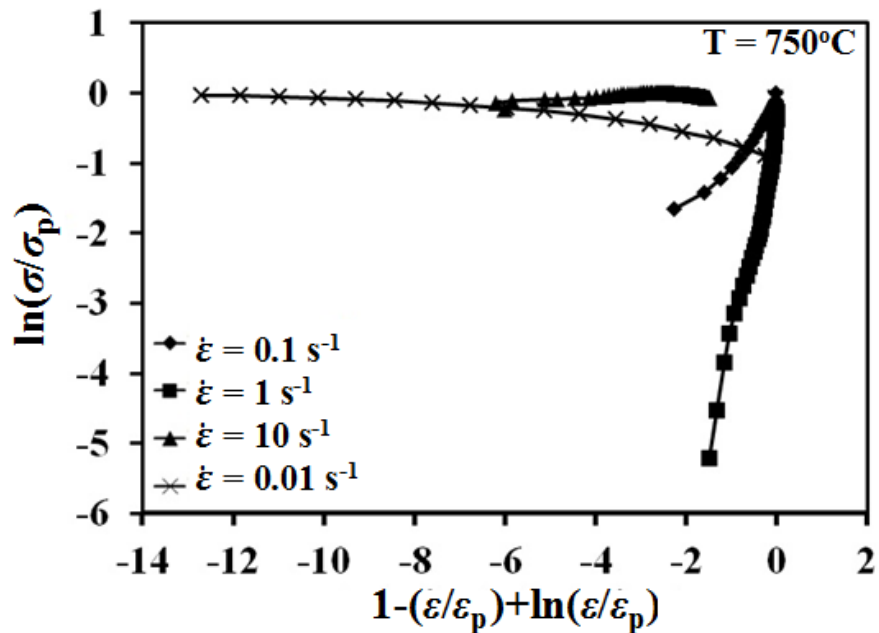
ภาคผนวก ข

ผลการสร้างแบบจำลองทำนายพฤติกรรมของการไหลของวัสดุโดยใช้สมการซิงก่า

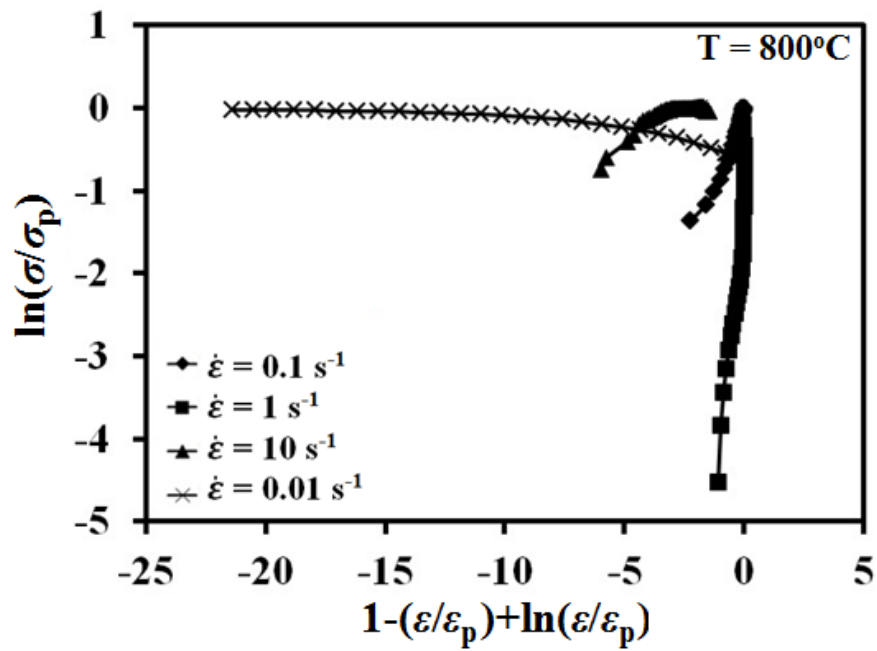
ข.1 พล็อตค่าคงที่ C ของสมการซิงกาต้าที่อุณหภูมิ 700, 750, 800 และ 850 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราความเครียด 0.01 0.1 1 และ 10 ต่อวินาที



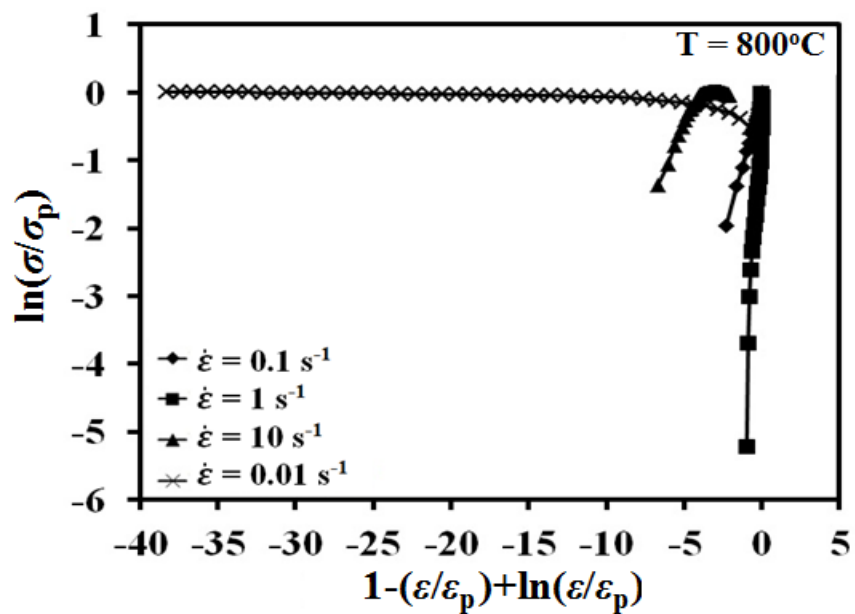
รูปที่ ข.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(\sigma/\sigma_p)$ กับ $1-\epsilon/\epsilon_p + \ln(\epsilon/\epsilon_p)$ ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราความเครียด 0.01 0.1 1 และ 10 ต่อวินาที



รูปที่ ข.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(\sigma/\sigma_p)$ กับ $1-\epsilon/\epsilon_p + \ln(\epsilon/\epsilon_p)$ ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียสด้วยอัตราความเครียด 0.01 0.1 1 และ 10 ต่อวินาที

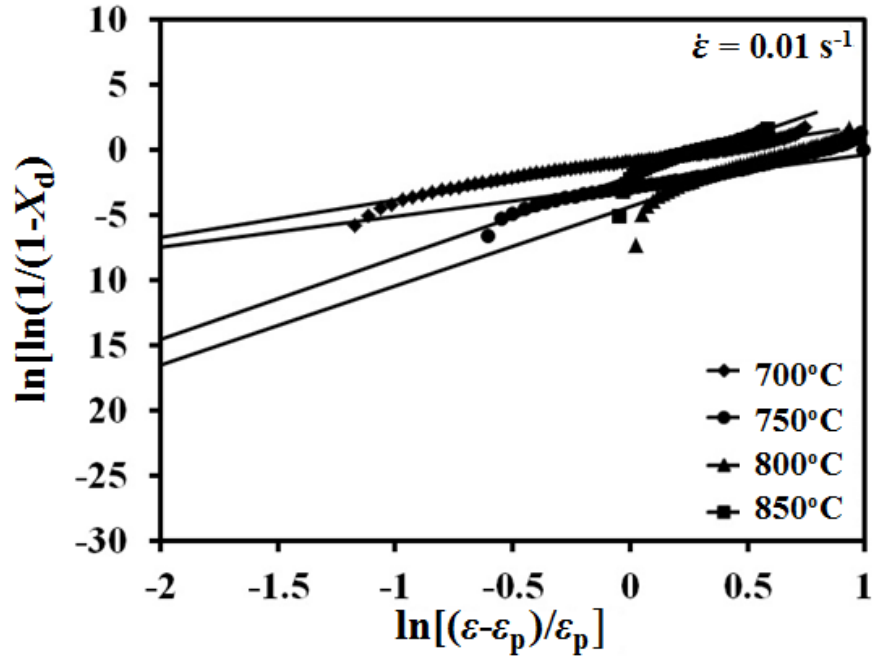


รูปที่ ข.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(\sigma/\sigma_p)$ กับ $1-\epsilon/\epsilon_p + \ln(\epsilon/\epsilon_p)$ ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสด้วย อัตราความเครียด 0.01 0.1 1 และ 10 ต่อวินาที

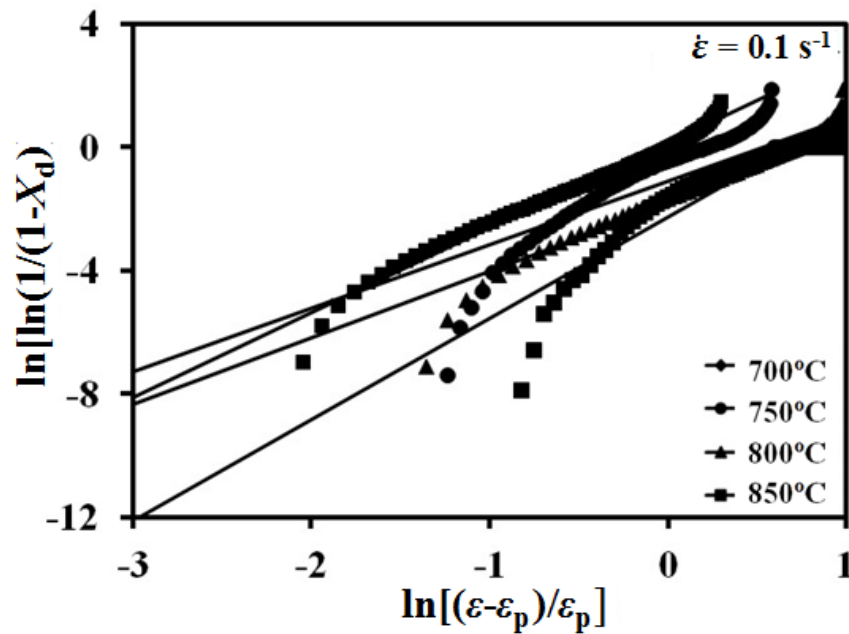


รูปที่ ข.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(\sigma/\sigma_p)$ กับ $1-\epsilon/\epsilon_p + \ln(\epsilon/\epsilon_p)$ ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียสด้วย อัตราความเครียด 0.01 0.1 1 และ 10 ต่อวินาที

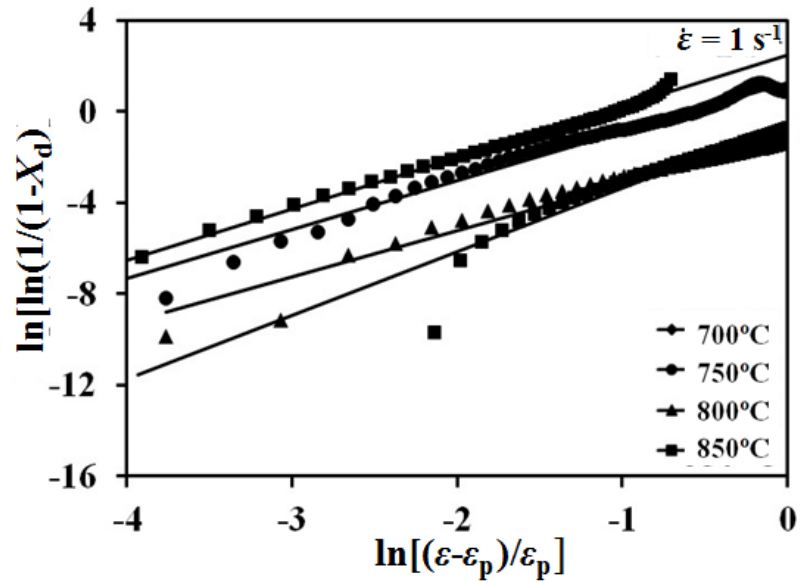
ข.5 พล็อตค่าคงที่ k , n ของสมการอาลามี่ที่อุณหภูมิ 700, 750, 800 และ 850 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราความเครียด 0.01, 0.1, 1 และ 10 ต่อวินาที



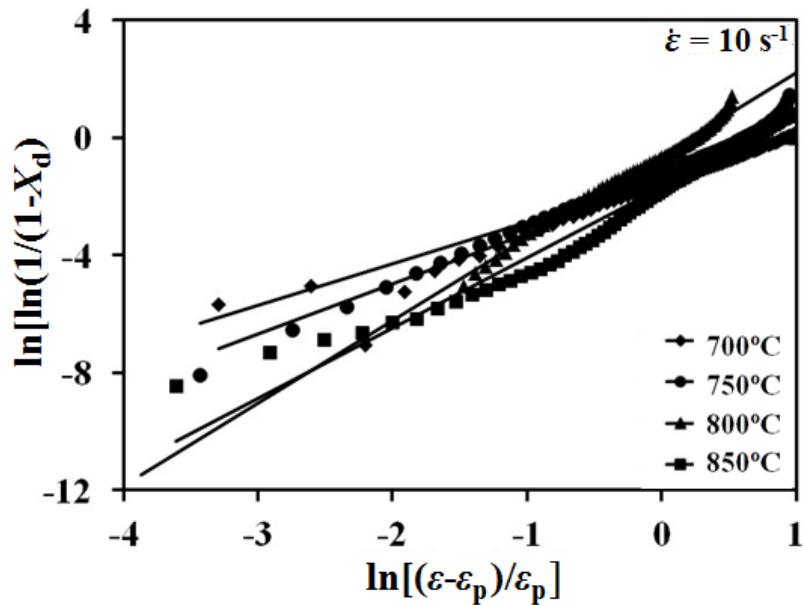
รูปที่ ข.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln[\ln(1/(1-X_d))]$ และ $\ln[(\epsilon-\epsilon_c)/\epsilon_p]$ ที่อุณหภูมิ 700 750 800 และ 850 องศาเซลเซียส อัตราความเครียด 0.01 ต่อวินาที



รูปที่ ข.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln[\ln(1/(1-X_d))]$ และ $\ln[(\epsilon-\epsilon_c)/\epsilon_p]$ ที่อุณหภูมิ 700 750 800 และ 850 องศาเซลเซียส อัตราความเครียด 0.1 ต่อวินาที



รูปที่ ข.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln[\ln(1/(1-X_d))]$ และ $\ln[(\varepsilon-\varepsilon_p)/\varepsilon_p]$ ที่อุณหภูมิ 700 750 800 และ 850 องศาเซลเซียส อัตราความเครียด 1 ต่อวินาที



รูปที่ ข.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln[\ln(1/(1-X_d))]$ และ $\ln[(\varepsilon-\varepsilon_p)/\varepsilon_p]$ ที่อุณหภูมิ 700 750 800 และ 850 องศาเซลเซียส อัตราความเครียด 10 ต่อวินาที

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ – สกุล	นางสาวอัจฉริยา อังคุศิริพงษ์
วัน เดือน ปีเกิด	17 พฤศจิกายน 2533
ประวัติการศึกษา	
ระดับมัธยมศึกษา	มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนอัสสัมชัญธนบุรี พ.ศ. 2550
ระดับปริญญาตรี	วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี พ.ศ. 2554
ระดับปริญญาโท	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีการขึ้นรูปวัสดุและนวัตกรรมการผลิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี พ.ศ. 2557
ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์	Aungsusiripong, A., Suranuntchai, S., Uthaisangsuk, V., 2014, “Constitutive Modeling of Flow Stress of MAB alloy”, Materials Science and Engineering , (Accepted). Aungsusiripong, A., Suranuntchai, S., Uthaisangsuk, V., 2014, “FE Simulation of Hot Compression Test of MAB alloy” , The 5th TSME International Conference on Mechanical Engineering , 17-19 December 2014, The Empress, Chiang Mai, pp.41.