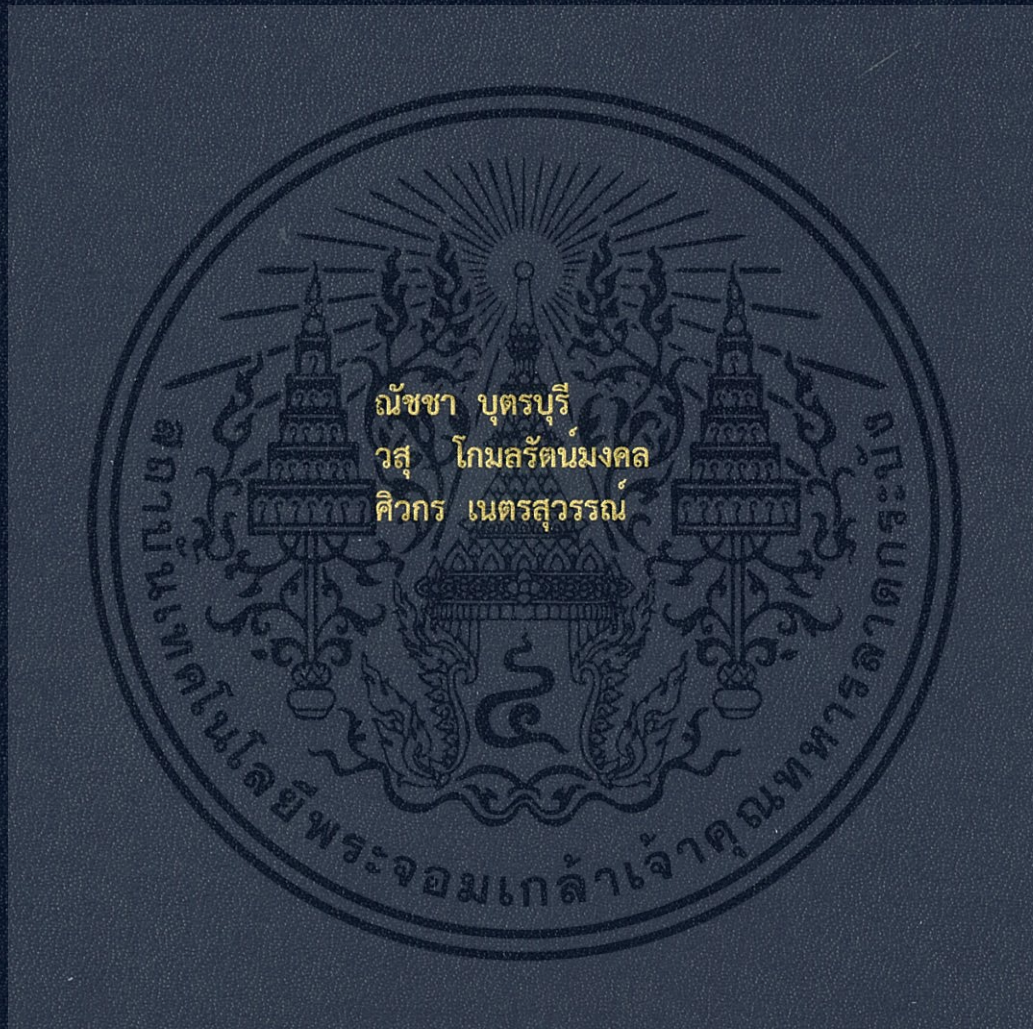


พฤติกรรมการเสียรูปและสมบัติทางกลของโลหะผสม Ti-6Al-4V ELI ที่ผ่าน
กระบวนการผลิตด้วยเทคนิคการทำให้เสียรูปถาวรอย่างรุนแรง

DEFORMATION BEHAVIOR AND MECHANICAL PROPERTY OF
A TI-6AL-4V ELI ALLOY PROCESSED BY SEVERE PLASTIC DEFORMATION
TECHNIQUE



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2560

พฤติกรรมการเสียรูปและสมบัติทางกลของโลหะผสม Ti-6Al-4V ELI ที่ผ่าน
กระบวนการผลิตด้วยเทคนิคการทำให้เสียรูปถาวรอย่างรุนแรง

DEFORMATION BEHAVIOR AND MECHANICAL PROPERTY OF
A TI-6AL-4V ELI ALLOY PROCESSED BY SEVERE PLASTIC DEFORMATION
TECHNIQUE



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DEFORMATION BEHAVIOR AND MECHANICAL PROPERTY OF
A TI-6AL-4V ELI ALLOY PROCESSED BY SEVERE PLASTIC DEFORMATION
TECHNIQUE



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2560

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง พฤติกรรมการเสียรูปและสมบัติทางกลของโลหะผสม Ti-6Al-4V ELI ที่ผ่านกระบวนการผลิตด้วยเทคนิคการทำให้เสียรูปถาวรอย่างรุนแรง

DEFORMATION BEHAVIOR AND MECHANICAL PROPERTIES OF A TI-6AL-4V ELI ALLOY PROCESSED BY SEVERE PLASTIC DEFORMATION TECHNIQUE

ผู้จัดทำ

1. นางสาวณัชชา บุตรบุรี

รหัสประจำตัว 57010382

2. นายวสุ โกมลรัตน์มงคล

รหัสประจำตัว 57011144

3. นายศิวกร เนตรสุวรรณ

รหัสประจำตัว 57011248



จิตรกรณ์

อาจารย์ที่ปรึกษา

(ดร.จิตรกรณ์ วงศางาม)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พฤติกรรมการณ์เสียรูปและสมบัติทางกลของโลหะผสม Ti-6Al-4V ELI ที่ผ่านกระบวนการผลิตด้วย
เทคนิคทำให้เสียรูปถาวรอย่างรุนแรง

นางสาวณัชชา บุตรบุรี 57010382
นายวสุ โกมลรัตน์มงคล 57011144
นายศิวกร เนตรสุวรรณ 57011248
ดร.จิตรภรณ์ วงศางาม อาจารย์ที่ปรึกษา
ดร.สุธี โอสารฤทธิพันธ์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
ปีการศึกษา 2560

บทคัดย่อ

โลหะผสมไทเทเนียม Ti-6Al-4V ELI หลังผ่านกระบวนการทำให้เสียรูปอย่างรุนแรงที่เรียกว่าไฮเพรชเซอร์เทอร์ชัน ในกระบวนการนี้ชิ้นงานทดสอบในรูปของดิสก์ถูกทำให้เสียรูปภายใต้เงื่อนไขที่จำกัดการไหล (quasi-constrained) ที่อุณหภูมิห้อง ความดัน 6.0 GPa และจำนวนรอบการหมุนสูงสุด 10 รอบ หลังจากกระบวนการไฮเพรชเซอร์เทอร์ชัน สมบัติทางกล เช่น ความแข็ง ถูกประเมินและเปรียบเทียบกับชิ้นงานก่อนผ่านกระบวนการทำให้เสียรูปถาวรอย่างรุนแรง โดยค่าความแข็งถูกวัดโดยใช้วิธีแบบวิกเกอร์ส และพฤติกรรมการณ์เสียรูปถูกจำลองโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม Marc mentat ในรูปของค่าความเครียดเทียบเท่า (equivalent strain) ผลจากแบบจำลองพบว่าวัสดุที่ผ่านกระบวนการผลิตมีความเครียดเพิ่มขึ้นตามจำนวนรอบที่เพิ่มขึ้นอันเป็นผลจากแรงกดและแรงบิดที่กระทำต่อชิ้นงาน ซึ่งความเครียดที่เพิ่มขึ้นเริ่มที่ขอบชิ้นงานเข้ามายังศูนย์กลางของชิ้นงานซึ่งเป็นพฤติกรรมการณ์ที่พบได้จากการเสียรูปภายใต้แรงบิด เมื่อพิจารณาผลการวัดค่าความแข็งพบว่า วัสดุมีความแข็งเพิ่มขึ้นหลังผ่านกระบวนการผลิต โดยความแข็งเพิ่มขึ้นตามจำนวนรอบที่เพิ่มขึ้น ซึ่งมีแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับค่าความเครียดที่ได้จากแบบจำลอง จากงานวิจัยนี้สามารถสรุปได้ว่ากระบวนการผลิตด้วยวิธีไฮเพรชเซอร์เทอร์ชันสามารถพัฒนาสมบัติเชิงกลของโลหะผสมไทเทเนียม Ti-6Al-4V ELI ได้

คำหลัก: โลหะผสม Ti-6Al-4V ELI; การทำให้เสียรูปถาวรอย่างรุนแรง; ไฮเพรชเซอร์เทอร์ชัน; ความแข็ง; ไฟไนต์เอลิเมนต์

DEFORMATION BEHAVIOR AND MECHANICAL PROPERTY OF A Ti-6Al-4V ELI ALLOY
PROCESSED BY SEVERE PLASTIC DEFORMATION TECHNIQUE

Nutcha	Butburee	57010382
Wasu	Komolratmongkol	57011144
Siwakorn	Netsuwan	57011248
Dr.Jitraporn	Wongsangam	Advisor
Dr.Sutee	Olarnrithinun	Co-advisor

Year 2016

ABSTRACT

Experiments were conducted on a titanium alloy, Ti-6Al-4V ELI, in order to examine microhardness evolution after subjected to the severe plastic deformation (SPD) technique called high-pressure torsion (HPT). The samples in the form of a disk were deformed under quasi-constrained conditions at room temperature using an applied pressure of 6.0 GPa through different numbers of revolutions up to 10 turns. Microhardness values of HPT-samples was measured and compared with as-received samples using Vickers hardness measurement. Plastic deformation was simulated, using Finite Element Method (FEM) by Marc mentat program. From these results, strain increase when number of turns increase relatively according to compression and torsion on samples. Strain increase from edge in to center that is found torsion deformation behavior. When hardness result is considered, HPT sample hardness increase when number of turns increase relatively, that is likely to be in the same direction as the strain value from simulation result. From this research, HPT process can develop mechanical property of Ti alloy.

Keywords: Ti-6Al-4V ELI; Severe Plastic Deformation (SPD); High-Pressure torsion (HPT); Microhardness; Finite Element Analysis

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี ก็เพราะด้วยความเอาใจใส่ แนะนำ และช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ เสมอมาจาก ดร.จิตรราภรณ์ วงศาางาม อาจารย์ที่ปรึกษา และดร.สุธี โอฟารฤทธิพันธ์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ขอขอบพระคุณทั้งสองท่านเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) ที่เอื้อเพื่อให้มีสถานที่ที่ใช้ในการวิจัยนี้

และต้องขอขอบพระคุณบุคคลสำคัญที่สุดที่ทำให้ข้าพเจ้ามีวันนี้ ก็คือ บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งได้เลี้ยงดูผู้เขียนมาเป็นอย่างดี พร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่ และยังให้กำลังใจ เอาใจใส่เสมอมา ในทุกๆ ด้านอันหาที่เปรียบมิได้ ข้าพเจ้าขอระลึกในพระคุณอันสุดประมาณ และขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 สมมติฐานของงานวิจัย.....	2
1.4 ขอบเขตงานวิจัย.....	3
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 กระบวนการผลิตด้วยเทคนิคการทำให้เสียรูปอย่างรุนแรง (severe plastic deformation, SPD)	4
2.1.1 Equal-channel angular pressing, ECAP	6
2.1.2 High-pressure torsion, HTP	7
2.2 ความแข็งและการวัดค่าความแข็ง (Hardness and Hardness Measurement)	9
2.2.1 ความแข็ง (Hardness).....	9
2.2.2 ความแข็งระดับจุลภาค (Microhardness).....	16
2.2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งเทียบกับค่าความต้านแรงต่างๆ.....	16
2.3 วัสดุทางการแพทย์ (biomaterial)	17
2.3.1 สมบัติพื้นฐานของวัสดุทางการแพทย์.....	18
2.3.2 ประเภทของวัสดุทางการแพทย์.....	19
2.4 ไทเทเนียมและโลหะผสมไทเทเนียม (Titanium and Titanium Alloy)	21
2.5 การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์.....	23
2.5.1 บทนำการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis: FEA).....	23

2.5.2 โหนด (Node).....	24
2.5.3 เอลิเมนต์ (Element)	24
2.5.4 ซอฟต์แวร์ MSC. Marc Mentat.....	25
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	27
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	29
3.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย.....	31
3.2 การศึกษาพฤติกรรมการเสียรูปของวัสดุ (Part I).....	31
3.2.1 การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุ (tensile testing).....	31
3.2.2. การจำลองการเสียรูปทางคอมพิวเตอร์ (simulation procedure)....	32
3.3 การศึกษาสมบัติเชิงกล (Part II).....	39
3.3.1 การเตรียมวัสดุ.....	39
3.3.2 กระบวนการขึ้นรูปโดยวิธีไฮเพรชเซอร์ทอร์ชัน.....	40
3.3.3 การศึกษาสมบัติทางกล.....	41
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล.....	43
4.1 การวิเคราะห์พฤติกรรมการเสียรูปโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	43
4.1.1 ผลการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานเพื่อหาสมบัติเชิงกลของวัสดุของวัสดุ	43
4.1.2 การจำลองกระบวนการไฮเพรชเซอร์ทอร์ชันด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิ	
เมนต์.....	45
4.2 สมบัติเชิงกลของวัสดุ.....	47
4.2.1 ผลของจำนวนรอบต่อค่าความแข็งระดับจุลภาค.....	47
4.2.2 ผลของการกระจายของความแข็งระดับจุลภาค.....	49
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	51
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	51
5.1.1 การวิเคราะห์พฤติกรรมการเสียรูปโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์..	51
5.1.2 การวัดค่าความแข็งด้วยการทดสอบจริง.....	52
5.1.3 การเปรียบเทียบระหว่างการจำลองทางคอมพิวเตอร์และการทดสอบ	52
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	53
เอกสารอ้างอิง.....	54

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 Moh's scale.....	10
2.2 สเกลความแข็งรีอ็อคเวลล์.....	13
2.3 สมบัติเชิงกลและประโยชน์ของโลหะผสมแมกนีเซียม ไทเทเนียม และนิกเกิลบางชนิด	22
3.1 แสดงองค์ประกอบทางเคมี (%โดยน้ำหนัก) ของ Ti-6Al-4V ELI.....	31
3.2 ค่าตัวแปรที่กำหนดคุณสมบัติให้กับชิ้นงาน.....	35
3.3 แสดงเงื่อนไขการผลิตแบบไฮเพอร์เซอร์ทอร์ชัน (HPT)	40
4.1 สมบัติเชิงกลของวัสดุจากการทดสอบแรงดึง.....	45



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 แสดงปัจจัยที่ส่งผลต่อความสัมพันธ์ของวัสดุ.....	1
2.1 กระบวนการผลิตแบบ conventional bulk deformation.....	5
2.2 แสดงหลักการวิธี Equal-channel angular pressing, ECAP.....	6
2.3 แสดงหลักการทำงานของ High-pressure torsion.....	7
2.4 แสดงหลักการทำงานของ High-pressure torsion ที่เงื่อนไขต่างๆ.....	8
2.5 แสดงตัวแปรที่ใช้ประมาณค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในกระบวนการ HPT.....	8
2.6 หลักการวัดความแข็งรีดอคเวลล์.....	12
2.7 หลักการวัดความแข็งแบบวิกเกอร์ส	14
2.8 หลักการวัดความแข็งน็อพ	15
2.9 วงจรการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์.....	26
2.10 ระบบของโปรแกรม Marc.....	27
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	30
3.2 แบบชิ้นงานสำหรับใช้ทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM Standards E8/E8M – 09.....	32
3.3 แสดงเครื่องทดสอบแรงดึงรุ่น Shimadzu autograph AG-X.....	32
3.4 ตัวอย่างชิ้นงานที่ถูกสร้างจากโปรแกรม Solidwork.....	33
3.5 ไฟล์ตัวอย่างชิ้นงานเมื่อถูกนำเข้ามาในโปรแกรม Marc Mentat.....	33
3.6 แสดง Mesh ที่เกิดหลังการ Meshing.....	34
3.7 แสดงค่า Material properties ของชิ้นงาน Ti-6Al-4V ELI.....	35
3.8 แสดง geometric surface ที่กำหนดให้เป็น contact body.....	35
3.9 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของการกด (ซ้าย) และการบิด(ขวา).....	36
3.10 หน้าต่างการตั้งค่า mesh adaptivity หรือการ remeshing	37
3.11 หน้าต่างการกำหนดload case ของการบิด(ซ้าย)และการกด(ขวา).....	37
3.12 แสดงหน้าตาการประมวลผล.....	38
3.13 แสดงผลการแสดงค่าความเครียด Equivalent plastic.....	38
3.14 แสดงการกลึงเพื่อลดขนาดด้วยเครื่อง CNC.....	39
3.15 การตัดชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องตัดละเอียด.....	39
3.16 การขัดชิ้นงานด้วยกระดาษทราย silicon carbide ให้ได้ความหนาที่กำหนด.....	40
3.17 แสดงชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการ mounting.....	41
3.18 เครื่องวัดความแข็ง Buehler TUKON 1102.....	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขึ้นด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต่อ VII อังถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.19 แสดงตำแหน่งที่วัดความแข็ง.....	42
4.1 วัสดุเมื่อผ่านการทดสอบการดึง.....	43
4.2 กราฟความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดเชิงวิศวกรรม.....	44
4.3 กราฟความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดจริง.....	44
4.4 ภาพแสดงความเครียด equivalent plastic ที่ชิ้นงาน Ti-alloy Gr23 บริเวณผิวสัมผัสกับ anvil ด้านล่าง.....	46
4.5 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางจากจุดศูนย์กลางชิ้นงานเทียบกับค่าความแข็งแบบจุลภาคเฉลี่ย (Microhardness) ในแนวรัศมีจำนวน 7 เส้น ที่จำนวนรอบการบิดต่างกัน.....	48
4.6 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบเทียบกับค่าความแข็งแบบจุลภาคเฉลี่ย (microhardness) ในแต่ละจำนวนรอบ.....	48
4.7 (ก) ถึง (ง) แสดงแผนผังรูปทรงของค่าความแข็งแบบจุลภาค (microhardness) ของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการบิดจำนวน 0 , $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$, 2 , 5 และ 10 รอบ.....	50



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

การเลือกใช้วัสดุเป็นอีกปัจจัยสำคัญในการออกแบบอุปกรณ์ และโครงสร้างทางวิศวกรรม โดยทั่วไปแล้วการเลือกวัสดุเพื่อใช้งานจะถูกกำหนดโดยสมบัติของวัสดุ (material properties) ซึ่งได้แก่ สมบัติเชิงกล สมบัติเชิงไฟฟ้า สมบัติทางความร้อน ทางแม่เหล็ก ทางแสง และทางการเสื่อมสภาพ เป็นต้น ซึ่งสมบัติของวัสดุแต่ละชนิดจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางจุลภาค (microstructure) และองค์ประกอบ (composition) ซึ่งถูกกำหนดโดยกระบวนการผลิต (processing) ดังแสดงในรูปที่ 1.1 วัสดุแต่ละชนิดมักมีคุณสมบัติ ข้อดี ข้อด้อยที่แตกต่างกัน ในการออกแบบจึงควรเลือกวัสดุที่มีสมบัติตรงตามความต้องการมากที่สุด ซึ่งในปัจจุบันได้มีการศึกษาและพัฒนาสมบัติของวัสดุเพื่อให้ได้วัสดุที่สามารถตอบสนองต่อการพัฒนาด้านเทคโนโลยี



รูปที่ 1.1 แสดงปัจจัยที่ส่งผลต่อความสัมพันธ์ของวัสดุ

ไทเทเนียมและโลหะผสมไทเทเนียม (titanium and Titanium alloys) เป็นวัสดุที่น่าสนใจในการนำมาใช้ในเชิงอุตสาหกรรมเนื่องจากสมบัติที่โดดเด่นของโลหะชนิดนี้ คือมีค่าความแข็งแรงต่อน้ำหนัก (specific strength) สูง มีความต้านทานต่อการกัดกร่อน (corrosion resistance) ได้ดี เป็นวัสดุทนความร้อนสูง (refractory materials) ดังนั้นไทเทเนียมและโลหะผสมไทเทเนียมจึงถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมหลากหลายเช่น ด้านการบินและอวกาศ การทหาร ยานยนต์ อุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับสารเคมี นอกจากนี้ไทเทเนียมและโลหะผสมไทเทเนียมยังมีสมบัติที่เข้ากันได้กับร่างกายมนุษย์ (biocompatibility) จึงถูกนำมาใช้เป็นวัสดุทางการแพทย์ (biomaterial) อย่างแพร่หลาย เช่น กระดูกเทียม ข้อต่อเทียม เครื่องมือทางทันตกรรม ลวดจัดฟัน รากฟันเทียม เป็นต้น ดังนั้นจึงมีงานวิจัยเพื่อพัฒนาสมบัติของโลหะกลุ่มนี้ให้สามารถใช้ตรงตามความต้องการของผู้ผลิตอย่างต่อเนื่อง

จากรูปที่ 1.1 แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างของวัสดุที่เป็นตัวควบคุมสมบัติของวัสดุนั้นๆ ซึ่งสามารถกำหนดได้จากกระบวนการผลิต ดังนั้นจึงนำเอาเทคโนโลยีด้านการผลิตมาใช้ในการพัฒนาวัสดุให้ได้สมบัติตามที่ต้องการ ขนาดเกรน (grain size) จึงเป็นหนึ่งตัวแปรสำคัญในส่วนของโครงสร้างวัสดุซึ่งเป็นตัวกำหนดสมบัติของวัสดุ ความสัมพันธ์ของ Hall-Petch ดังสมการที่ (1.1) กล่าวว่าเมื่อขนาดเกรนของโลหะเล็กลงจะส่งผลทำให้ค่าความต้านทานแรงสูงขึ้น [1-2] จึงทำให้การผลิตวัสดุที่มีเกรนเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญญาติให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ละเอียด (ultrafine-grained (UFG) materials) เริ่มเป็นที่นิยมเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากวัสดุประเภทนี้มีสมบัติทางกลและทางกายภาพที่ดีเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุชนิดเดียวกันที่มีเกรนหยาบ (course-grained materials)

$$\sigma = \sigma_0 + \frac{K}{\sqrt{d}} \quad (1.1)$$

เมื่อ σ คือค่าความต้านแรง d คือขนาดของเกรน K และ σ_0 เป็นค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับวัสดุ

การผลิตวัสดุเกรนละเอียดในปัจจุบันสามารถทำได้หลายวิธี โดยวิธีการทำให้เสียรูปถาวรอย่างรุนแรง (severe plastic deformation, SPD) ก็เป็นวิธีหนึ่งที่ได้รับค่านิยมในการผลิตวัสดุเกรนละเอียดที่มีขนาดเล็กระดับไมครอน (bulk ultrafine-grained materials) และเนื่องจากสมบัติทางกลของวัสดุที่ผ่านกระบวนการทำให้เสียรูปนั้นจะมีความสัมพันธ์โดยตรงเหมือนกันกับสมบัติต่างๆ ของวัสดุที่เกิดการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก (plastic deformation) ยกตัวอย่างเช่น ค่าความเครียดที่เกิดขึ้นกับชิ้นงาน โดยค่าความเครียดของวัสดุจะมีค่าแปรผันโดยตรงกับค่าความต้านแรง ณ จุดคราก (yield stress) ซึ่งค่าความต้านแรง ณ จุดคราก นั้นแปรผันโดยตรงกับค่าความแข็งของวัสดุ การเข้าใจถึงพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงความเครียดในกระบวนการทำให้เสียรูปถาวรอย่างรุนแรงจึงถือเป็นเรื่องที่สำคัญมากเนื่องจากผลจากการจำลองโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถดูแนวโน้มของความแข็งแรงวัสดุได้ด้วยความสัมพันธ์ที่กล่าวมาข้างต้น จึงเป็นที่มาของการศึกษาโครงการวิจัยนี้จะนำเทคโนโลยีการผลิตวัสดุเกรนละเอียดโดยวิธีการทำให้เสียรูปถาวรอย่างรุนแรงมาประยุกต์กับโลหะผสมไทเทเนียมที่ใช้ทางการแพทย์ ได้แก่ Ti-6Al-4V ELI เพื่อศึกษาคุณสมบัติของโลหะชนิดนี้หลังผ่านกระบวนการผลิตแบบเสียรูปถาวรอย่างรุนแรงเปรียบเทียบกับวัสดุตั้งต้น และเพื่อศึกษาพฤติกรรมการเสียรูปของโลหะชนิดนี้ที่ผ่านกระบวนการผลิตโดยวิธีทำให้เสียรูปถาวรอย่างรุนแรงและไม่ผ่านกระบวนการด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

1.2 จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาพฤติกรรมการเสียรูปของวัสดุที่ผ่านกระบวนการผลิตโดยวิธีทำให้เสียรูปถาวรอย่างรุนแรงโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
2. เพื่อศึกษาสมบัติทางกลของโลหะผสมไทเทเนียม Ti-6Al-4V ELI ก่อนและหลังกระบวนการผลิตโดยวิธีการทำให้เสียรูปถาวรอย่างรุนแรง

1.3 สมมติฐานของงานวิจัย

1. สมบัติทางกลของวัสดุสามารถพัฒนาให้ดีขึ้นได้โดยอาศัยกระบวนการผลิตที่เหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ขอบเขตงานวิจัย

1. ผลิตชิ้นงานทดสอบโดยใช้เทคนิคการเสียรูปถาวรอย่างรุนแรง (SPD technique) ที่เรียกว่าไฮเพรสเชอร์ทอร์ชัน (high-pressure torsion, HPT)
2. ศึกษากระบวนการเสียรูปด้วยการจำลองโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
3. ศึกษาสมบัติทางกลโดยการวัดค่าความแข็ง (hardness measurement) ของ Ti-6Al-4V ELI ที่ผ่านกระบวนการผลิตแบบ HPT เทียบกับชิ้นงานตั้งต้น

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. รวบรวมและทำความเข้าใจในเนื้อหาที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย
2. ออกแบบและวางแผนโครงการงานวิจัย
3. เตรียมชิ้นงานทดสอบ
4. ผลิตวัสดุเกรนละเอียดโดยวิธีไฮเพรสเชอร์ทอร์ชัน (high-pressure torsion)
5. ทดสอบสมบัติเชิงกลโดยการวัดค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ส (Vickers hardness measurement)
6. สร้างแบบจำลองการเสียรูปโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
7. วิเคราะห์ผลการทดลอง
8. จัดทำรายงาน

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษาพฤติกรรมการเสียรูปและสมบัติทางกลของวัสดุที่ผ่านกระบวนการผลิตด้วยเทคนิคการทำให้เสียรูปถาวรอย่างรุนแรง จำเป็นต้องมีความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับกระบวนการผลิตด้วยเทคนิคการทำให้เสียรูปถาวรอย่างรุนแรง การทดสอบสมบัติทางกล ข้อมูลของวัสดุ การจำลองทางคอมพิวเตอร์ รวมถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ซึ่งจะกล่าวในบทนี้

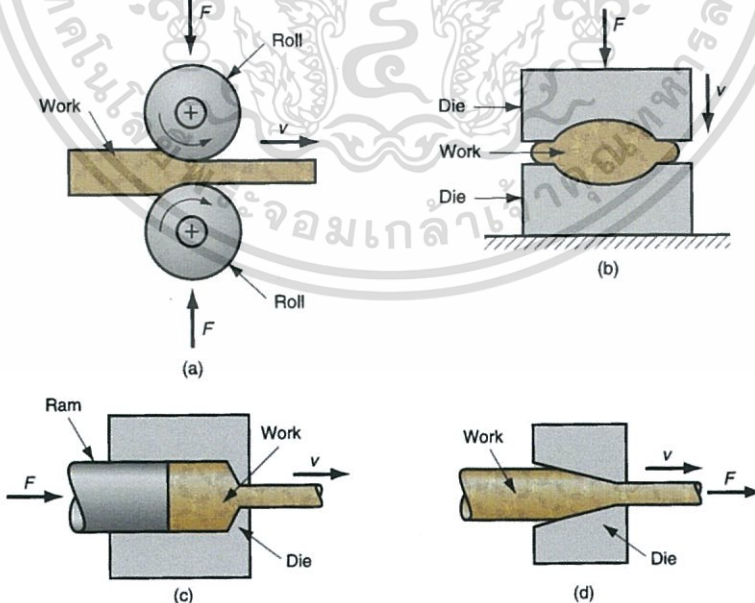
2.1 กระบวนการผลิตด้วยเทคนิคการทำให้เสียรูปอย่างรุนแรง (Severe Plastic Deformation, SPD)

จากความสัมพันธ์ของ Hall-Petch relation [1-2] แสดงให้เห็นว่าถ้าขนาดเกรนเล็กลงจะส่งผลทำให้ค่าความต้านแรง (strength) ของวัสดุสูงขึ้น ทำให้เกิดงานวิจัยที่ทำให้ขนาดของเกรนของวัสดุเล็กลง ตามนิยามวัสดุเกรนละเอียด (Ultrafine-grained (UFG) materials) หมายถึงวัสดุที่มีขนาดเกรนอยู่ในระดับไมครอน (submicron structure; 100 nm ถึง 1000 nm) และระดับนาโน (nano-structure; เล็กกว่า 100 nm) การผลิตวัสดุเกรนละเอียดสามารถแบ่งเป็นสองวิธีหลักๆ คือ “bottom-up” และ “top-down” [3]

วิธี “bottom-up” วัสดุอนุภาคเล็กเช่น อนุภาคนาโนจะถูกใช้เป็นส่วนตั้งต้นในการเตรียมและผลิตชิ้นงาน ตัวอย่างวิธี “bottom-up” ได้แก่ วิธี inert gas condensation, high-energy ball milling and electro deposition วิธีเหล่านี้สามารถผลิตวัสดุที่มีขนาดเกรนที่เล็กมากๆ ถึงระดับนาโน แต่อย่างไรก็ตามวิธีที่ใช้หลักการของ “bottom-up” จะมีข้อเสียอยู่ที่ชิ้นงานที่ผลิตได้อาจจะมีสารเจือปน และอาจจะมีรูพรุนเกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการผลิต นอกจากนี้วิธีนี้ยังมีข้อจำกัดในเรื่องขนาดของชิ้นงานที่มีขนาดเล็ก ส่งผลให้การประยุกต์ใช้งานมีข้อจำกัด

สำหรับวิธี “top-down” วัสดุเกรนหยาบจะถูกทำให้เป็นวัสดุเกรนละเอียดโดยการใส่แรงกระทำเพื่อทำให้เกิดการเสียรูปถาวรส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุ เนื่องจากเทคนิคนี้โดยส่วนใหญ่มีการใส่แรงกระทำที่ค่อนข้างสูงลงในชิ้นงาน ทำให้วิธีนี้ถูกเรียกว่า Severe Plastic Deformation, SPD หรือการเสียรูปถาวรอย่างรุนแรง ข้อดีเมื่อเปรียบเทียบกับวิธี bottom-up คือชิ้นงานที่ผลิตโดยวิธีนี้จะไม่มีปัญหาเรื่องการเจือปนของอนุภาคอื่น และการเกิดรูพรุนในชิ้นงาน

การเสียรูปถาวร (plastic deformation) ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการขึ้นรูปโลหะ (Metal forming) โดยรู้จักกันดีในชื่อ Bulk deformation processes ซึ่งเป็นกระบวนการขึ้นรูปที่มีการเสียรูปและเปลี่ยนแปลงรูปร่างเกิดขึ้นกับชิ้นงานเป็นอย่างมาก และชิ้นงานเริ่มต้นมีลักษณะที่เรียกว่า Bulk คือ มีอัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรต่ำ รูปที่ 2.1 แสดงกระบวนการขึ้นรูปทั่วไปที่จัดอยู่ในกลุ่ม Bulk deformation processes หรือที่เรียกว่า conventional bulk deformation processes ได้แก่ (a) การรีด (rolling) (b) การตีขึ้นรูป (forging) (c) การอัดขึ้นรูป (extrusion) และ (d) การดึงขึ้นรูป (drawing) ผลที่เกิดขึ้นกับการขึ้นรูปโดยวิธีนี้คือ วัสดุที่ผ่านกระบวนการนี้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างภายในทำให้ขนาดเกรนเฉลี่ยมีแนวโน้มเล็กลง อย่างไรก็ตามวิธี conventional bulk deformation processes อาทิเช่น การรีด การตี การอัดและการดึง เหล่านี้ไม่สามารถใช้ผลิตวัสดุที่เกรนละเอียดระดับไมครอนหรือนาโนเมตรได้ เนื่องจากมีข้อจำกัดในการทำให้วัสดุเสียรูปเพราะขนาดของพื้นที่หน้าตัดที่เปลี่ยนไปในแต่ละรอบของการผลิต อย่างไรก็ตามมีการวิจัยและพัฒนาวิธีการผลิตที่จะทำให้ได้เกรนละเอียดระดับไมครอนหรือนาโนเมตรที่โดยอาศัยหลักการทำให้วัสดุเสียรูปแบบถาวรแต่แก้ไขปัญหาระยะขนาดความเครียดที่ได้เนื่องจากขนาดหน้าตัดชิ้นงานที่เปลี่ยนไป โดยวิธีนี้เรียกว่า การเสียรูปถาวรอย่างรุนแรง (severe plastic deformation, SPD) ลักษณะเด่นของวิธีนี้คือขนาดและรูปร่างโดยรวมของชิ้นงานไม่เปลี่ยนแปลงหรือเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ทำให้เกิด hydrostatic pressure ส่งผลต่อโครงสร้างภายในของวัสดุ เกิดกลไกที่ทำให้ขนาดเกรนลดลง (grain refinement) และเกิดเป็นวัสดุเกรนละเอียดที่มีขนาดเกรนระดับไมครอนและนาโนเมตรในที่สุด



รูปที่ 2.1 กระบวนการผลิตแบบ conventional bulk deformation (a) การรีด (b) การตีขึ้นรูป (c) การอัดขึ้นรูป และ (d) การดึงขึ้นรูป [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

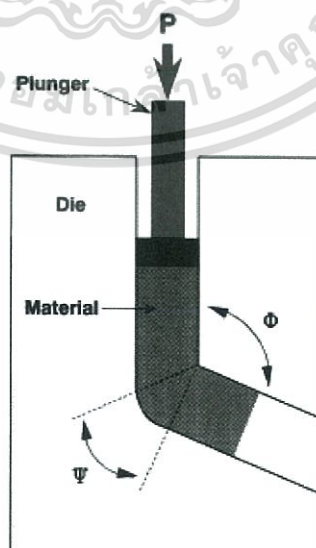
หลักการของ Severe Plastic Deformation, SPD นี้ มีการทำการทดลองกับวัสดุประเภท โลหะและโลหะผสมที่เป็นที่สนใจในทางอุตสาหกรรม หลายชนิดได้แก่ ทองแดง อลูมิเนียม นิกเกิล แมกนีเซียม ไทเทเนียม หรือแม้แต่วัสดุฉลาด (smart materials) เช่น โลหะจำรูป (shape memory materials) เป็นต้น โดยอาศัยหลักการนี้ถูกคิดค้นและออกแบบวิธีเพื่อผลิตวัสดุเกรนละเอียดขึ้น หลากหลายวิธี แต่มีอยู่สองวิธีที่กำลังได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในปัจจุบัน ได้แก่ วิธี equal-channel angular pressing, ECAP และ วิธี high-pressure torsion, HPT

2.1.1 Equal-channel angular pressing, ECAP

Valiev and Langdon [5] ได้ทำการสรุปหลักการเกี่ยวกับวิธี ECAP ตลอดจนบทความที่เกี่ยวข้อง หลักการของ ECAP คือ กระบวนการที่ทำให้ชิ้นงานถูกใส่ไปในแม่พิมพ์ (die) ที่มีช่องหน้าต่างตัดคงที่และทำมุมกันอยู่ โดยใช้แรงอัดที่มีค่ามากส่งผ่านตัวกด plunger ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.2 เมื่อ Φ คือมุมตัดของสองช่องในแม่พิมพ์ Ψ คือมุมของเส้นโค้งภายนอก เมื่อชิ้นงานเคลื่อนที่เข้าไปในแม่พิมพ์แรงเฉือนที่เกิดขึ้นที่มุมทำให้โครงสร้างทางจุลภาค (microstructure) ของวัสดุมีการเปลี่ยนแปลง โดยที่ความเครียดเทียบเท่า (equivalent strain, ε) ที่กระทำกับชิ้นงานเมื่อผ่านแม่พิมพ์จำนวน N ครั้ง มีค่าดังสมการที่ 2.1 [6,7]

$$\varepsilon_N = \frac{N}{\sqrt{3}} \left[2 \cot \left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2} \right) + \Psi \operatorname{cosec} \left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2} \right) \right] \quad (2.1)$$

จากสมการที่ 2.1 พบว่าความเครียดที่กระทำกับชิ้นงานขึ้นอยู่กับจำนวนรอบในกระบวนการผลิต เมื่อ Φ และ Ψ เป็นค่าคงที่ของแม่พิมพ์



รูปที่ 2.2 แสดงหลักการวิธี Equal-channel angular pressing, ECAP [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

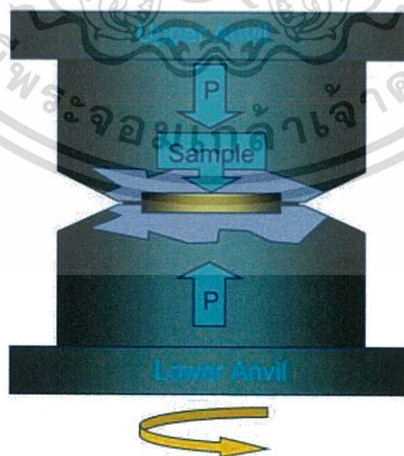
2.1.2 High-pressure torsion, HPT

ส่วนหลักการของ HPT ได้ถูกรวบรวมไว้เช่นกันโดย Zhilyaev and Langdon [9] และแบบจำลองอย่างง่ายของหลักการทำงานของ HPT ได้ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 2.3 โดยทั่วไปวิธี HPT นี้ ชิ้นงานในรูปของดิสก์หรือลักษณะแผ่นบาง จะถูกวางไว้ระหว่าง anvil สองตัว จากนั้นชิ้นงานจะรับแรงอัดจากไฮดรอลิกและแรงบิดจากการหมุน anvil ตัวล่าง ทำให้วัสดุเกิดการเสียรูปแบบถาวร และเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน เกิดเป็นชิ้นงานที่มีขนาดเกรนละเอียด

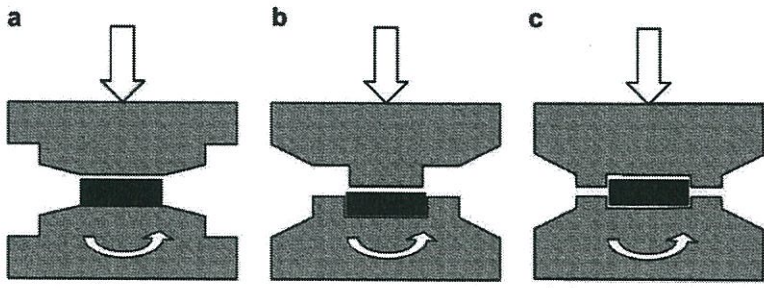
หลักการของ HPT ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 2.3 แต่ในหลักการปฏิบัติจริงนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กระบวนการหลักคือ HPT แบบไม่จำกัดการไหล และแบบจำกัดการไหล ดังแสดงในรูปที่ 2.4

ใน HPT แบบไม่จำกัดการไหลนั้น ชิ้นงานจะถูกวางอยู่บน anvil ด้านล่าง จากนั้นจะถูกให้ความดันและความเครียดจากแรงบิดดังแสดงในรูปที่ 2.4a ภายใต้เงื่อนไขนี้ วัสดุจะไหลออกไปด้านข้างแบบอิสระภายใต้ความดันที่กระทำ และมีความดันย้อนกลับคืนสู่ระบบเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เนื่องจากแรงเสียดทานที่กระทำระหว่างชิ้นงานกับ anvil

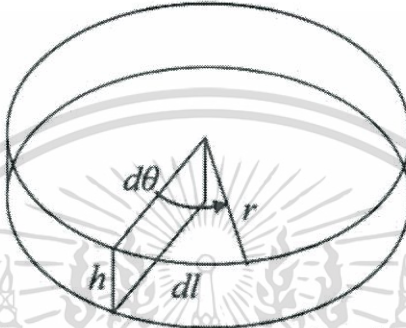
ส่วน HPT แบบจำกัดการไหล ดังแสดงในรูปที่ 2.4b ชิ้นงานจะอยู่ในเบ้าหล่อที่มีขนาดพอดีกับชิ้นงานใน anvil ด้านล่างเพื่อรับภาระ โดยที่วัสดุจะไม่มีไหลออกไปด้านข้างในระหว่างการรับความเครียดจากแรงบิด นั้นหมายถึงว่าในทางปฏิบัติแล้ว HPT แบบจำกัดการไหลที่แท้จริงจะได้รับผลของความดันย้อนกลับด้วย อย่างไรก็ตามมันยากที่จะสร้างกระบวนการนี้ให้ใกล้เคียงกับแบบ HPT แบบจำกัดการไหลในอุดมคติและบ่อยครั้งการทดสอบจะถูกทำที่กระบวนการ HPT แบบกึ่งจำกัดการไหล แทนดังแสดงในรูปที่ 2.4c ที่มีการปล่อยให้วัสดุไหลออกไปด้านข้างได้เล็กน้อยตามช่องว่างระหว่าง anvil ด้านบนและ anvil ด้านล่าง โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้เงื่อนไขแบบกึ่งจำกัดการไหล



รูปที่ 2.3 แสดงหลักการทำงานของ High-pressure torsion [10]



รูปที่ 2.4 แสดงหลักการทำงานของ High-pressure torsion ที่เงื่อนไข (a) แบบไม่จำกัดการไหล และ (b) แบบจำกัดการไหลและ (c) แบบกึ่งจำกัดการไหล [11]



รูปที่ 2.5 แสดงตัวแปรที่ใช้ประมาณค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในกระบวนการ HPT [11]

รูปที่ 2.5 แสดงตัวแปรที่ใช้ประมาณค่าความเครียดที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานภายใต้กระบวนการ HPT สำหรับการหมุนเป็นมุมน้อยๆ $d\theta$ ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ $dl = rd\theta$ เมื่อ r คือรัศมีของชิ้นงาน ซึ่งความเครียดเฉือนที่เกิดขึ้น $d\gamma$ มีค่าดังสมการที่ 2.2 [11]

$$d\gamma = \frac{dl}{h} = \frac{rd\theta}{h} \tag{2.2}$$

เมื่อ h คือความหนาของชิ้นงาน ถ้าสมมติความหนาเป็นอิสระจากมุมการหมุนนั่นคือ $\theta = 2\pi N$ ดังนั้น ความเครียดเฉือน γ มีค่าดังสมการที่ 2.3

$$\gamma = \frac{2\pi N \cdot r}{h} \tag{2.3}$$

เมื่อ N คือจำนวนรอบของการหมุน หากเปรียบเทียบความเครียดเฉือนที่เกิดขึ้นกับความเครียดที่เกิดขึ้นจากการเสียรูปร่างแบบอื่นๆ โดยอาศัย Von Mises criterion จะได้ความเครียดเทียบเท่า (equivalent strain, ϵ) ดังสมการที่ 2.4

$$\epsilon = \frac{2\pi N \cdot r}{\sqrt{3}h} \tag{2.4}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ความแข็งและการวัดค่าความแข็ง (Hardness and Hardness Measurement)

2.2.1 ความแข็ง (hardness)

ความแข็ง (hardness) คือ ความต้านทานของวัสดุต่อการเสียรูปถาวร (plastic deformation) เช่น การขีดข่วน การกด การตัด เป็นต้น ความแข็งสามารถบ่งบอกด้วยหน่วยพื้นฐานของมวล ความยาว และเวลาของวัสดุได้ แต่ความแข็งคือผลจากกระบวนการวัด ประเภทของการทดสอบความแข็งแบ่งเป็น

- 1) Scratch
- 2) Dynamic
- 3) Indentation

2.2.1.1 แบบ Scratch [12]

การทดสอบความแข็งแบบ Scratch หรือการทดสอบความแข็งแบบ Moh's scale ได้ถูกนำมาใช้เป็นครั้งแรกโดยนักแร่วิทยาในปีค.ศ. 1922 นิยมใช้วัดความแข็งของแร่โดยวัสดุที่มีความแข็งมากกว่าจะสามารถขีดข่วนวัสดุที่นิ่มกว่าได้ โดยแบ่งช่วงของความแข็งเป็น 10 สเกลตามวัสดุอ้างอิงในการทดสอบ โดยเพชรมีความแข็งมากที่สุดคือ 10 และ ทัลค์มีความแข็งต่ำสุดคือ 1 ดังตารางที่ 2.1 แต่การทดสอบความแข็งแบบนี้ไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ในการทดสอบกับโลหะ เพราะมีช่วงของสเกลที่ค่อนข้างหายาก และการวัดจะดูความกว้างและความลึกของรอยขีดข่วนที่เกิดจากวัสดุที่ใช้อ้างอิงภายใต้แรงกดคงที่

ตารางที่ 2.1 Moh's scale

Moh's scale	
Diamond	10
Corundum	9
Topaz	8
Quartz	7
Feldspar	6
Apatite	5
Fluorite	4
Calcite	3
Gypsum	2
Talc	1

2.2.1.2 แบบ Dynamic [12]

การทดสอบความแข็งแบบ Dynamic หรือการทดสอบความแข็งแบบ Shore Scleroscope ได้ถูกพัฒนาโดย Albret F. Shore ในปี ค.ศ. 1906 ถูกนำมาใช้ทางการค้าในการทดสอบความแข็งทางด้านโลหะกับวัสดุที่มีขนาดใหญ่ เช่น เหล็กที่ผ่านกระบวนการตีขึ้นรูป (Forging) หรือเหล็กที่ผ่านการรีดขึ้นรูป (Rolling) โดยเทคนิคถูกใช้ทดสอบเป็นครั้งแรกในสหรัฐอเมริกา วิธีทดสอบคือการปล่อยหัวกระแทกจากความสูงที่กำหนดให้ลงมากระทบกับผิวชิ้นงาน แล้ววัดความสูงจากการกระดอนกลับของหัวกระแทก สเกลที่ใช้วัดจะถูกแบ่งเป็น 100 หน่วย โดยการใช้การกระดอนกลับของหัวกระแทกที่ทำจากเพชร

2.2.1.3 แบบ Indentation [12-14]

การทดสอบแบบ indentation เป็นการทดสอบที่ใช้หัวกด (indenter) กดลงไปบนชิ้นทดสอบที่ทำมุมทดสอบเป็น 90° ลงไปอย่างช้าๆ แล้ววัดรอยกดที่เกิดขึ้น จากนั้นนำไปแปลงค่าเป็นความแข็ง การทดสอบแบบนี้สามารถบอกค่าความแข็งออกมาในเชิงตัวเลขตามวิธีการวัด ซึ่งวิธีที่นิยมใช้มีอยู่ 4 วิธีดังนี้

1. การทดสอบความแข็งบริเนลล์ (Brinell Hardness Test)

Dr. J. A. Brinell คิดค้นและประกาศวิธีการทดสอบแบบนี้ในปี ค.ศ. 1900 ซึ่งในขณะนั้นเป็น Chief Engineer ที่ Fagasta Iron Work ประเทศสวีเดน โดยมีแนวความคิดคือต้องการหาวิธีทดสอบที่ง่ายและรวดเร็วในการทดสอบคุณสมบัติของความแข็งของเหล็กและเหล็กกล้า ที่ผ่านกระบวนการตีขึ้นรูป (Forging)

การทดสอบความแข็งบริเนลล์เป็นที่นิยมใช้ เพราะให้ผลการวัดที่แม่นยำสูง และได้มาตรฐานสากล โดยใช้สัญลักษณ์ HBN หรือ HB อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบคือหัวกดทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0, 2.0, 2.5, 5.0 หรือ 10.0 มิลลิเมตรแต่โดยทั่วไปมักใช้ขนาด 10 มิลลิเมตร การทดสอบนี้เหมาะสำหรับค่าความแข็งไม่เกิน 450 HB เนื่องจากการทดสอบความแข็งบริเนลล์ใช้หัวกดทรงกลมเหล็กกล้าชุบแข็ง (Hardened Steelball) ซึ่งหัวกดมีค่าความแข็ง ประมาณ 700 HB เท่านั้น หรือใช้หัวกดทั้งสแตนคาร์ไบด์หากทดสอบกับวัสดุที่แข็งกว่านั้น

วิธีการทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์ คือใช้หัวกดด้วยแรงคงที่ลงบนผิวชิ้นทดสอบ ปล่อยให้อยู่ภายใต้แรงกดชั่วขณะแล้วเอาแรงกดออก ซึ่งทำให้เกิดรอยบุ๋มถาวรบนชิ้นทดสอบ แล้ววัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรอยบุ๋ม เพื่อหาค่าความแข็งจากสมการที่ 2.5

$$HB = \frac{P}{\frac{\pi}{2} D \times (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (2.5)$$

โดยที่ HB = ค่าความแข็งบริเนลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

P = แรงกดทดสอบ (กิโลกรัมแรง)

D = เส้นผ่านศูนย์กลางหัวกด (มิลลิเมตร)

d = เส้นผ่านศูนย์กลางรอยบุ๋ม (มิลลิเมตร)

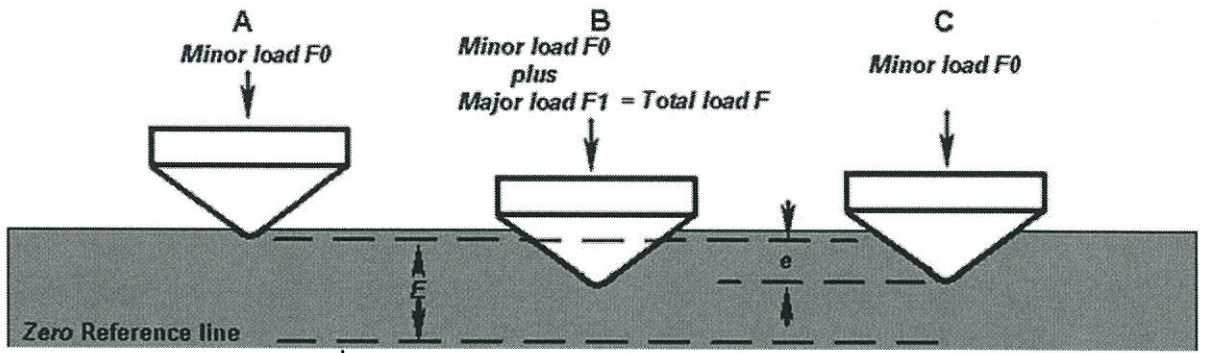
จากสมการที่ 2.5 ค่าความแข็งบริเนลล์ มีหน่วยเป็นกิโลกรัมแรงต่อตารางมิลลิเมตร แต่ในการแสดงค่าความแข็งแบบนี้ไม่นิยมเขียนหน่วย นิยมกำหนดสัญลักษณ์ความแข็งบริเนลล์ใช้สัญลักษณ์ HB เพราะช่วยให้สะดวกรวดเร็วและง่ายต่อการเข้าใจโดยเฉพาะในงานเขียนแบบ หรืองานที่ต้องการระบุความแข็งของวัสดุ เป็นต้น และการทดสอบมาตรฐานจะใช้ทรงกลมเหล็กกล้าแข็งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร แรงกดทดสอบ 3000 กิโลกรัม และมีระยะเวลากด 10-15 วินาที แต่ถ้ามีเงื่อนไขในการทดสอบเป็นอย่างอื่น ก็จะกำหนดสัญลักษณ์เป็นตัวเลขบ่งถึงสภาวะการทดสอบเป็นแต่ละกรณี ดังต่อไปนี้

- 350 HB หมายถึง ความแข็งบริเนลล์ 350 ใช้ทรงกลมเหล็กกล้าแข็งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง
- 10 มิลลิเมตรแรงกดทดสอบ 29.42 กิโลนิวตัน หรือ 3,000 กิโลกรัม เป็นเวลา 10 ถึง 15 วินาที 350 HB หมายถึง ความแข็งบริเนลล์ 350 ใช้ทรงกลมเหล็กกล้าแข็งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง
- 10 มิลลิเมตรแรงกดทดสอบ 29.42 กิโลนิวตัน หรือ 3,000 กิโลกรัม เป็นเวลา 10 ถึง 15 วินาที 350 HB 5/7355/20 หมายถึง ความแข็งบริเนลล์ 350 ใช้ทรงกลมเหล็กกล้าแข็ง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร แรงกดทดสอบ 7355 นิวตัน หรือ 750 กิโลกรัม เป็นเวลา 20 วินาที

มาตรฐานสำหรับการทดสอบความแข็งบริเนลล์คือ ASTM E10

2. การทดสอบความแข็งร็อคเวลล์ (Rockwell Hardness Test)

การทดสอบความแข็งร็อคเวลล์ ถูกจดสิทธิบัตรการประดิษฐ์เครื่องทดสอบความแข็งชนิดใหม่ขึ้นในปี ค.ศ.1914 โดย Stanley P. Rockwell และได้รับสิทธิการจดทะเบียนในปี ค.ศ.1919 โดยมีแนวความคิดที่ว่า เป็นการทดสอบโดยที่ไม่ต้องมีการวัดรอยกด หากแต่เป็นการวัดความแตกต่างของความลึกของรอย กดโดยการใช้เครื่องมือแทน ทำให้สามารถทดสอบได้อย่างรวดเร็ว การทดสอบแบบ Rockwell ไวโดยมีเงื่อนไขว่า หลังถูกกดด้วยแรงกดผ่านหัวกดที่กำหนดวัสดุที่ไหระยะไมคินตัวหลังถูกกดมากมีความแข็งในหน่วย Rockwell น้อยและวัสดุที่ไหระยะไมคินตัวน้อยก็จะถือว่ามีค่าความแข็งมากเป็นอัตราสวนเชิงเส้นไป รูปที่ 2.6 แสดงหลักการวัดความแข็งร็อคเวลล์



รูปที่ 2.6 หลักการวัดความแข็งร็อกเวลล์ [14]

การเพิ่มขึ้นของความลึกของรอยกดอย่างถาวรเป็นผลจากการเพิ่มและเอากะหลักออก และใช้คำนวณค่าความแข็งร็อกเวลล์

$$HR = E - e$$

(2.6)

โดยที่ F_0 = ภาระเริ่มต้น (กิโลกรัมแรง)

F_1 = ภาระหลัก (กิโลกรัมแรง)

F = ภาระรวม (กิโลกรัมแรง)

e = การเพิ่มขึ้นถาวรของความลึกจากภาระหลัก หน่วยของ 0.002 มิลลิเมตร (0.002 มิลลิเมตรมีค่าเท่ากับ 1 หน่วย)

E = ค่าคงที่ขึ้นกับรูปร่างของหัวกด อาทิเช่น 100 หน่วย สำหรับหัวกดเพชร, 130 หน่วย สำหรับหัวกดลูกบอลเหล็ก

HR = ค่าความแข็งร็อกเวลล์

D = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกบอลเหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 สเกลความแข็งรีอคเวลล์

สเกล	หัวกด	ภาระเริ่มต้น Minor Load F0 (kgf)	ภาระหลัก Minor Load F1 (kgf)	ภาระรวม Total Load F (kgf)	ค่าของ E
A	เพชรรูปกรวย	10	50	60	100
B	ลูกบอลเหล็ก 1/16"	10	90	100	130
C	เพชรรูปกรวย	10	140	150	100
D	เพชรรูปกรวย	10	90	100	100
E	ลูกบอลเหล็ก 1/8"	10	90	100	130
F	ลูกบอลเหล็ก 1/16"	10	50	60	130
G	ลูกบอลเหล็ก 1/16"	10	140	150	130
H	ลูกบอลเหล็ก 1/8"	10	50	60	130
K	ลูกบอลเหล็ก 1/8"	10	140	150	130
L	ลูกบอลเหล็ก 1/4"	10	50	60	130
M	ลูกบอลเหล็ก 1/4"	10	90	100	130
P	ลูกบอลเหล็ก 1/4"	10	140	150	130
R	ลูกบอลเหล็ก 1/2"	10	50	60	130
S	ลูกบอลเหล็ก 1/2"	10	90	100	130
V	ลูกบอลเหล็ก 1/2"	10	140	150	130

3. การทดสอบความแข็งวิกเกอร์ส (Vickers Hardness Test)

วิธีการทดสอบแบบนี้ถูกแนะนำโดยบริษัท Vickers Armstrong ในปี ค.ศ.1924 จากความพยายามหาวิธีการทดสอบความแข็ง ที่มีความถูกต้องและเชื่อถือได้มากกว่าการทดสอบแบบเดิม และการเลือกใช้รูปทรงปิระมิดฐานสี่เหลี่ยม เพื่อให้เกิดความชัดเจนของรอยกด และจะทำการวัดขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางได้ง่ายโดยทำหัวทดสอบจากเพชร เพราะมีความแข็งแรงสูงและไม่เกิดการเปลี่ยนรูปได้ง่าย การที่เลือกใช้มุม 136 องศาเป็นการพัฒนามาจากการทดสอบแบบบริเนลล์ ซึ่งในการทดสอบแบบบริเนลล์เกิดรอยกดบนชิ้นงานจะต้องมีขนาดระหว่าง 0.25 และ 0.5 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวทดสอบ ดังนั้นค่าเฉลี่ยของขนาดรอยกดจะเท่ากับ 0.375 ซึ่งมีมุมตามแนวสัมผัส (tangent) เท่ากับ 136 องศาพอดี

การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ส มีลักษณะการวัดที่คล้ายกับการทดสอบแบบบริเนลล์แต่แตกต่างกันที่รูปทรงของ Indenter หรือ หัวกดทดสอบจากทรงกลมเป็นหัวกดรูปปิระมิดฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมยอดมีขนาด 136 องศาทำจากเพชร การทดสอบวิธีนี้เหมาะสำหรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

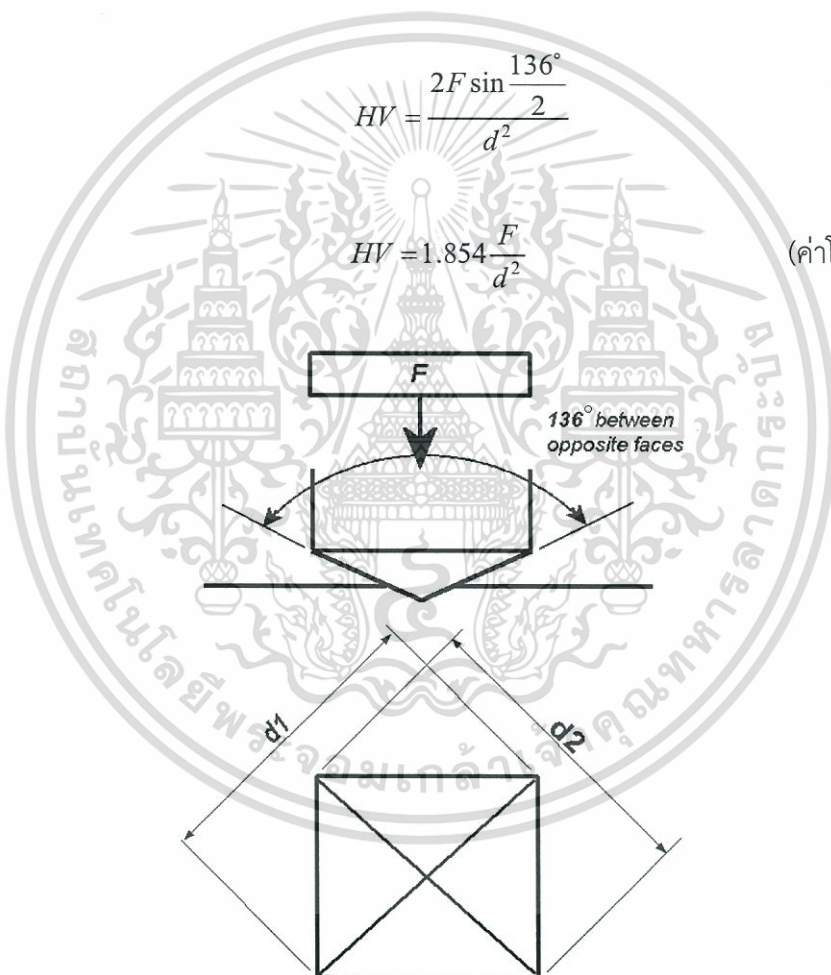
วัสดุที่มีลักษณะอ่อนไปจนถึงแข็งมาก โดยไม่ต้องเปลี่ยนหัวกดแต่เปลี่ยนก็เฉพาะแรงกดเท่านั้น ซึ่งขึ้นอยู่กับความแข็งของโลหะที่ทดสอบ โดยไม่ต้องคำนึงถึงความหนาที่เป็นข้อจำกัดของชิ้นงานทดสอบเนื่องจากหัวกดเพชรมีขนาดเล็กมาก

วิธีการทดสอบความแข็งแบบประกอบด้วยการกดวัสดุทดสอบด้วยหัวกดเพชรรูปปริมาตรฐานสี่เหลี่ยม และมุม 136 องศา ระหว่างผิวหน้าตรงกันข้าม ภายใต้ภาระ 1 – 100 กิโลกรัมแรง ใช้ระยะเวลา 10 – 15 วินาที เส้นทแยง (d_1 และ d_2) ที่หลงเหลือบนผิวหน้าของวัสดุภายหลังจากนำภาระออกดังรูปที่ 2.7 จะถูกวัดโดยกล้องจุลทรรศน์ และคำนวณค่าเฉลี่ยของเส้นทแยง พื้นที่ผิวเอียงของรอยกดจะถูกคำนวณ ค่าความแข็งคำนวณจากผลหารภาระต่อพื้นที่สี่เหลี่ยมของรอยกดดังแสดงในสมการที่ 2.7

$$HV = \frac{2F \sin \frac{136^\circ}{2}}{d^2} \quad (2.7)$$

หรือ

$$HV = 1.854 \frac{F}{d^2} \quad (\text{ค่าโดยประมาณ})$$



รูปที่ 2.7 หลักการวัดความแข็งแบบวิกเกอร์ส [13]

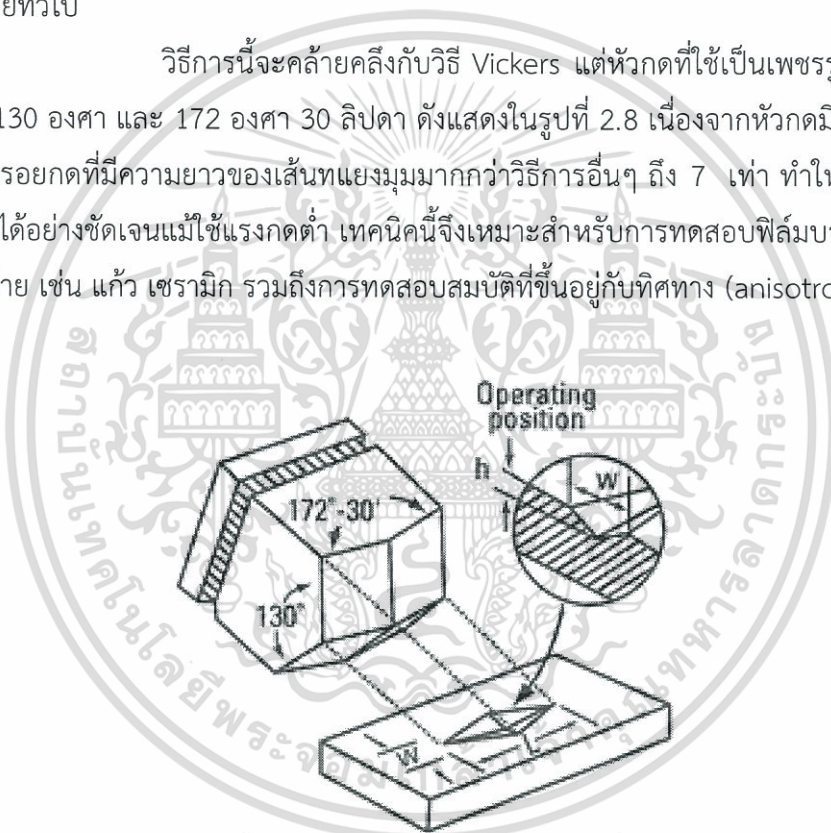
ตัวอย่างการรายงานผลความแข็งวิกเกอร์สควรจะรายงานดังนี้ 800 HV 300 /10 หมายความว่า ความแข็งวิกเกอร์ 800 โดยใช้ภาระ 300 นิวตันเป็นระยะเวลา 10 วินาที การให้ภาระที่แตกต่างกันจะให้ค่าความแข็งที่เท่ากันบนวัสดุที่เป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งดีกว่าการเปลี่ยนสเกลด้วยวิธีทดสอบความแข็งแบบอื่น ข้อได้เปรียบของการทดสอบความแข็งวิกเกอร์ส คือการอ่านเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าที่แม่นยำสูง และสามารถใช้หาคัดแบบเดียวกับทุกประเภทของวัสดุและการชุบแข็งผิว แม้ว่าความแม่นยำและการปรับเปลี่ยนได้สะดวกสำหรับการทดสอบวัสดุที่แข็งมากและอ่อนมาก ภายใต้ภาระที่เปลี่ยนแปลงได้ เครื่องทดสอบความแข็งวิกเกอร์มีราคาแพงกว่าเครื่องทดสอบความแข็งบริเนลล์และรีอคเวลล์

4. การทดสอบความแข็งน็อฟ (Knoop hardness test)

Frederick Knoop, Chauncey G. Peter และ Walter B. Emerson แห่ง National Bureau of Standards ในปีค.ศ.1939 แนวความคิดคือการหาวิธีการทดสอบความแข็งที่สามารถให้รอยกดที่เห็นขนาดได้อย่างชัดเจนในกรณีที่ใช้แรงกดต่ำๆ มีประโยชน์อย่างมากสำหรับวัสดุที่มีความเปราะเช่นแก้ว ซึ่งอาจจะเกิดการแตกกระจายจากการใช้แรงกดสูงดังเช่นการวัดความแข็งโดยทั่วไป

วิธีการนี้จะคล้ายคลึงกับวิธี Vickers แต่หัวกดที่ใช้เป็นเพชรรูปร่างปริระมิดที่มีมุมเป็น 130 องศา และ 172 องศา 30 ลิปดา ดังแสดงในรูปที่ 2.8 เนื่องจากหัวกดมีลักษณะเรียวยาวจึงสร้างรอยกดที่มีความยาวของเส้นทแยงมุมมากกว่าวิธีการอื่นๆ ถึง 7 เท่า ทำให้สามารถเห็นภาพรอยกดได้อย่างชัดเจนแม้ใช้แรงกดต่ำ เทคนิคนี้จึงเหมาะสำหรับการทดสอบฟิล์มบาง หรือวัสดุที่เปราะแตกง่าย เช่น แก้ว เซรามิก รวมถึงการทดสอบสมบัติที่ขึ้นอยู่กับทิศทาง (anisotropy) ได้



รูปที่ 2.8 หลักการวัดความแข็งน็อฟ [12]

ค่าความแข็งน็อฟคำนวณได้จาก

$$HK = 14.229 \frac{F}{d^2} \quad (2.8)$$

โดยที่ F = น้ำหนักกด (กิโลกรัมแรง)

d = พื้นที่ของรอยกด (มิลลิเมตร²)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 ความแข็งระดับจุลภาค (microhardness)

ความแข็งระดับจุลภาค (microhardness) คือ ความแข็งที่วัดด้วยเครื่องมือที่มีหัวกดขนาดเล็กภายใต้แรงกดไม่เกิน 1 กิโลกรัมแรง การทดสอบความแข็งระดับจุลภาค (microhardness) จึงหมายถึงการทดสอบความแข็งแบบกด (indentation) ภายใต้ภาระสถิตขนาด 1 กิโลกรัมแรงหรือน้อยกว่า เหมาะกับชิ้นงานขนาดเล็ก บาง หรือชิ้นงานที่ไม่ต้องการให้ปรากฏรอยกดขนาดใหญ่บนชิ้นทดสอบ วัสดุที่นิยมทดสอบความแข็งระดับจุลภาคนอกจากโลหะทั่วไป ยังมีโลหะแผ่นบาง, แผ่นฟอยด์โลหะ (metal foils), สวด, แก้ว และเซรามิกส์ วัสดุที่กล่าวมานี้ เมื่อถูกรอยกดที่มากจะทำให้เกิดการแตก หรือเสียหาย จึงเหมาะที่จะนำมาทดสอบสร้างรอยขนาดเล็ก นอกจากจะสามารถทดสอบชิ้นงานที่บางแล้ว ยังสามารถทดสอบชิ้นงานที่มีพื้นผิวแข็งได้อีกด้วย การทดสอบแบบนี้ก็นิยมนำมาใช้ในงานวิจัยในห้องปฏิบัติการ หรือในกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรม

การทดสอบความแข็งระดับจุลภาคที่นิยมใช้กันจะมีสองชนิดได้แก่ การทดสอบความแข็งจุลภาคแบบวิกเกอร์ส (Vickers microhardness testing) และการทดสอบความแข็งจุลภาคแบบน็อฟ (Knoop microhardness testing) การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์สและน็อฟเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM E 92 สำหรับกรณีแรงกด 1-120 kgf และมาตรฐาน ASTM E 384 สำหรับกรณีแรงกดต่ำกว่า 1 kgf

2.2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งเทียบกับค่าความต้านแรงต่างๆ

Ashby และ Jones [15] และ Tabor [16] ได้คิดค้นความสัมพันธ์โดยประมาณระหว่างค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ส (H_v) เทียบกับค่าความต้านแรง ณ จุดคราก (yield strength) ได้เป็นสมการที่ 2.9

$$H_v \approx 3 \times \sigma_y \quad (2.9)$$

ทั้งนี้ Ashby และ Jones และ Tabor ยังได้คิดค้นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านแรง ณ จุดคราก (yield strength) กับค่าความต้านแรงบิดที่จุดวิกฤติ (critical shear fracture stress) โดยความสัมพันธ์นี้มีรากฐานมาจากเกณฑ์ของ von Mises และเกณฑ์ของ Tresca ดังแสดงในสมการที่ 2.10 และ 2.11

$$2\tau_0 = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_y \approx 1.15\sigma_y \quad (\text{เกณฑ์ของ Von Mises}) \quad (2.10)$$

$$2\tau_0 = \sigma_y \quad (\text{เกณฑ์ของ Tresca}) \quad (2.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยในเกณฑ์ของ Tresca นั้นความเค้นตั้งฉากจะไม่มีผลต่อความเค้นเฉือนบนระนาบของการเสียรูป สำหรับเกณฑ์ของ von Mises นั้น ผลของความเค้นตั้งฉากต่อพฤติกรรมของการเสียรูปในการบิดไม่แปรผันต่อกันในวัสดุที่ต่างกัน อย่างไรก็ตาม Zhang et al. [17,18] ได้สนับสนุนให้ใช้สมการนี้กับผลของความเค้นตั้งฉากที่เกิดขึ้นต่อค่าความต้านแรงบิดที่จุดวิกฤติในแก้วโลหะ (bulk metallic glass) (BMG) อย่างไรก็ตาม สมการนี้ก็ยังไม่เหมาะสมสำหรับทุกวัสดุ เช่น วัสดุที่เป็นผลึก (crystalline materials), แก้วโลหะ, เซรามิก และอื่นๆอีกมากมาย

ในงานวิจัยตีพิมพ์อื่นๆ ได้หยิบยกความสัมพันธ์ระหว่างความต้านแรงดึงสูงสุด (ultimate tensile strength, UTS) และค่าความแข็ง ซึ่งมีที่มาจากคู่มือ ASM ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในเรื่องของความแข็ง ดังแสดงในสมการที่ 2.12

$$H_v \approx 3 \times \sigma_{UTS} \quad (2.12)$$

โดยที่ H_v คือค่าความแข็งแบบวิกเกอร์สและ σ_{UTS} คือค่าความต้านแรงดึงสูงสุดของวัสดุใดๆ ซึ่งเป็นสมการที่สามารถใช้เปรียบเทียบได้กับทุกวัสดุ และได้มีงานวิจัยยืนยันความถูกต้องของสมการนี้ไว้อย่างมากมายในปัจจุบัน

2.3 วัสดุทางการแพทย์ (biomaterial) [19]

วัสดุการแพทย์ถูกใช้งานในหลากหลายรูปแบบ ทั้งการใช้ประโยชน์จากตัววัสดุนั้นโดยตรง และประยุกต์จากวัตถุดิบในการผลิตอุปกรณ์การแพทย์ ซึ่งวัสดุแต่ละประเภทอาจนำไปใช้งานเป็นระยะที่ต่างกัน

มนุษย์ได้นำวัสดุชนิดต่างๆ มาใช้งานในการรักษาทางการแพทย์ตั้งแต่อดีต จากหลักฐานทางโบราณคดีพบว่าทองคำ แก้ว และไม้ ถูกใช้เป็นอุปกรณ์หรือชิ้นส่วนอวัยวะเทียม เพื่อประโยชน์ในการรักษาทางการแพทย์ เช่น ฟันปลอม ลูกนิยน์ตาเทียม และขาเทียม ที่ถูกพัฒนาเรื่องมาจนถึงในยุคปัจจุบัน รวมถึงมีการนำหลักการอื่นมารวมด้วย เช่น วิศวกรรมเนื้อเยื่อ (tissue engineering) ซึ่งเป็นการปลูกฝังเซลล์บางกลุ่ม ลงไปบนโครงสร้างของวัสดุการแพทย์ที่เหมาะสม เพื่อให้เซลล์เกิดการแบ่งตัว และเจริญเติบโต ก่อนที่จะนำไปปลูกถ่ายในร่างกาย เพื่อให้ทำหน้าที่ต่อไป

2.3.1 สมบัติพื้นฐานของวัสดุการแพทย์

โดยทั่วไป มีจุดประสงค์หลักเพื่อนำมาใช้ในงานทางการแพทย์ ได้แก่ ความสามารถในการนำไปใช้งานในร่างกายซึ่งต้องสัมผัสกับเนื้อเยื่อ โปรตีน เลือด หรือเซลล์ต่างๆ ในร่างกาย เนื่องจากอุปกรณ์จะต้องเกิดปฏิกิริยากับเนื้อเยื่อ หรือสภาพแวดล้อมในร่างกาย ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถเกิดขึ้นได้ ทั้งในลักษณะที่วัสดุการแพทย์จะก่อให้เกิดผลกระทบต่อเนื้อเยื่อ หรือเซลล์ต่างๆในร่างกาย เช่น การระคายเคือง อาการแพ้ การติดเชื้อ ความเป็นพิษที่ก่อให้เกิดเนื้องอกหรือมะเร็ง และลักษณะที่เนื้อเยื่อ หรือสภาพแวดล้อมในร่างกายส่งผลกระทบต่อการใช้งานของวัสดุการแพทย์ เช่น การเสื่อมสภาพ การกัดกร่อน ซึ่งผลกระทบดังกล่าวที่เกิดขึ้นจะส่งผลอย่างมากต่อความสำเร็จ หรือความล้มเหลว ของวัสดุชิ้นๆ ในการใช้งานทางการแพทย์ แต่ทั้งนี้ย่อมขึ้นกับระยะเวลา ตำแหน่ง และหน้าที่ ที่วัสดุการแพทย์นั้น จะถูกนำมาใช้งานด้วย ตัวอย่างเช่น วัสดุการแพทย์ที่ต้องใช้งานเป็นเวลานาน เช่น ข้อเทียม หมอนรองกระดูกสันหลังเทียม ย่อมมีโอกาสที่จะเกิดผลกระทบจากสภาพภายในร่างกาย มากกว่าวัสดุการแพทย์ที่ใช้งานในระยะเวลานั้นๆ เช่น สายสวน หรือสายล้าง แต่โดยสรุปแล้ว วัสดุที่สามารถนำไปใช้งานทางการแพทย์ได้นั้น จะต้องได้รับการยอมรับจากสภาพภายในร่างกาย ไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่างๆ ในทางที่ไม่ดีต่อสภาพภายในร่างกาย และตัววัสดุชิ้นต้องไม่เกิดการเสื่อมสภาพจากปฏิกิริยากับสภาพในร่างกายมนุษย์

นอกจากนี้แล้ว วัสดุการแพทย์จะต้องมีสมบัติที่เหมาะสมกับการใช้งานที่ต้องการ เช่น วัสดุที่นำไปใช้ทดแทนกระดูก ไม่ต้องคำนึงถึงสมบัติทางแสงดังกล่าว แต่ต้องมีสมบัติทางกลที่เหมาะสม เช่น มีความแข็งแรง สามารถรับน้ำหนักหรือแรงกระทำที่เกิดขึ้นจากการใช้งานได้

วัสดุการแพทย์ที่ดียังต้องสามารถผลิตขึ้นได้โดยกระบวนการผลิตที่ไม่ยุ่งยากเกินไป และต้องสามารถทำการฆ่าเชื้อได้ โดยกระบวนการฆ่าเชื้อโดยไม่ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของวัสดุการแพทย์ที่มีอยู่ก่อนการฆ่าเชื้อ เช่น การนึ่งไอน้ำที่อุณหภูมิสูง การอบด้วยแก๊สเอทิลีนออกไซด์ หรือการฉายรังสีแกมมา

ในปัจจุบันก่อนที่จะนำวัสดุประเภทใดประเภทหนึ่งมาใช้งานทางการแพทย์ได้ จะต้องผ่านหลายขั้นตอนการทดลองและทดสอบต่างๆ และใช้ระยะเวลานาน เพื่อยืนยันถึงประสิทธิภาพและความปลอดภัยในการใช้งาน และขั้นตอนสุดท้ายก่อนนำไปใช้กับสิ่งมีชีวิต จะต้องมีการขออนุญาตจากองค์การอาหารและยาของประเทศนั้นๆ เพื่อให้แน่ใจว่า ผู้ป่วยจะไม่เสี่ยงกับอันตรายจากการใช้งานวัสดุหรืออุปกรณ์ดังกล่าว

2.3.2 ประเภทของวัสดุการแพทย์

วัสดุการแพทย์อาจแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภทหลัก ดังนี้

2.3.2.1 โลหะทางการแพทย์

โลหะถือได้ว่าเป็นวัสดุชนิดหนึ่งที่มีความสำคัญต่องานทางด้านทางการแพทย์ จะเห็นได้ว่าในช่วงเริ่มต้นก่อนจะมีการพัฒนาทางการแพทย์อย่างจริงจัง โลหะจะเป็นวัสดุที่ได้รับความสนใจเป็นอันดับต้นๆในการนำมารักษา หรือประดิษฐ์เป็นอุปกรณ์ ด้านการแพทย์ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะโลหะเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงและมีความเหนียว ซึ่งน่าจะปลอดภัย ไม่แตกหักเสียหาย ในการใช้งาน แต่ในความเป็นจริงแล้ว ไม่ใช่ว่าโลหะทุกประเภทสามารถนำมาใช้งานทางการแพทย์ได้

เนื่องจากปัญหาสำคัญของการใช้โลหะทางการแพทย์ ได้แก่ ปัญหาการกัดกร่อนจากสภาพแวดล้อม เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภายในร่างกาย ซึ่งถือได้ว่ารุนแรงมาก ดังนั้นโลหะที่สามารถนำมาใช้งานได้นั้น ต้องทนทานต่อการกัดกร่อนได้ดีด้วย

ปัจจุบันโลหะที่นำมาใช้งานในทางการแพทย์แบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ โลหะมีค่า และโลหะทั่วไปโลหะมีค่า ได้แก่ โลหะในกลุ่มของทองคำ เงิน และแพลทินัม ส่วน โลหะทั่วไป ได้แก่ อะลูมิเนียมหรือโลหะผสมปรอท เหล็กกล้าไม่เป็นสนิม โลหะผสมของโคบอลต์ไทเทเนียมบริสุทธิ์ และโลหะผสมของไทเทเนียม ซึ่งโลหะแต่ละประเภท มีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน และนำไปใช้งานในลักษณะที่แตกต่างกันตามจุดประสงค์ โลหะมีค่ามักนำไปใช้งานทางด้านทันตกรรม เนื่องจากมีราคาแพง ในขณะที่โลหะทั่วไป มีความแข็งแรงมากกว่า และมีราคาต่ำกว่า ทำให้สามารถนำไปใช้งานได้หลากหลายกว่า ไม่ว่าจะเป็นด้านทันตกรรม ออโธพีดิกส์ ศัลยกรรมต่างๆ และมักใช้งาน ในลักษณะที่เป็นวัสดุดิบในด้านการผลิตอุปกรณ์การแพทย์ต่างๆ

2.3.2.2 พอลิเมอร์ทางการแพทย์

พอลิเมอร์หรือพลาสติกเป็นวัสดุที่มีลักษณะเฉพาะตัว คือ เป็นวัสดุที่ประกอบขึ้นด้วยโซ่โมเลกุลขนาดยาว ที่มีหน่วย หรือโครงสร้างทางเคมีซ้ำๆ กันเป็นองค์ประกอบ หากเปรียบเทียบกัน ก็จะมีลักษณะเหมือนกับเส้นบะหมี่ที่ขดรวม และพันทับกันไปมา พอลิเมอร์พบได้ทั้งในธรรมชาติ เช่น แป้ง ยางธรรมชาติ เซลลูโลส และพอลิเมอร์สังเคราะห์ เช่น พอลิเอทิลีน พอลิโพรพิลีน พอลิเอสเทอร์ สำหรับงานทางการแพทย์สามารถนำมาใช้งานได้ทั้งพอลิเมอร์ธรรมชาติ และพอลิเมอร์สังเคราะห์ ซึ่งมีทั้งประเภท ที่ไม่ย่อยสลาย และย่อยสลายได้เมื่อใช้งานในร่างกาย ทั้งนี้ พอลิเมอร์มีข้อดีคือ มีความเหนียว มีน้ำหนักเบา สามารถขึ้นรูปได้ง่าย ราคาถูก และไม่เกิดการกัดกร่อนเหมือนกับโลหะ แต่อย่างไรก็ตาม พอลิเมอร์มีความแข็งแรงน้อยกว่าโลหะ ทำให้ไม่สามารถใช้งานในลักษณะที่ต้องมีการรับแรงสูงมากนัก

2.3.2.3 เซรามิกทางการแพทย์

เซรามิกนอกจากจะถูกใช้ในการผลิตถ้วยชาม หรือเครื่องสุขภัณฑ์ต่างๆ ที่พบเห็นอยู่ในชีวิตประจำวัน แต่เซรามิกก็มีการนำมาใช้งานทางการแพทย์เพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ เพราะมีจุดเด่นคือ มีความแข็งแรงสูง ทนทานต่อการสึกหรอได้ดี และมีความเฉื่อยทางชีวภาพ ตัวอย่างของการใช้งานของเซรามิกในทางการแพทย์ ได้แก่ การใช้ประดิษฐ์ลูกนัยน์ตาเทียม ฝือก กระดูกเทียม หัวและเข้ากระดูกของข้อสะโพกเทียม ครอบฟัน ฟันปลอม นอกจากสมบัติที่มีความเฉื่อยทางชีวภาพแล้ว ยังมีเซรามิกอีกประเภทหนึ่งที่สามารถสร้างพันธะเคมีกับเนื้อเยื่อในร่างกายได้ ทำให้เกิดการยึดแน่นระหว่างวัสดุและเนื้อเยื่อได้ดี ซึ่งส่งผลให้การรักษา โดยใช้เซรามิกประเภทนี้ เป็นไปอย่างรวดเร็วกว่าเซรามิก ที่มีสมบัติความเฉื่อยเพียงอย่างเดียว เซรามิกประเภทนี้ได้แก่ ไฮดรอกซีแอปพาไทต์ และไบโอกลาสส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2.4 คอมโพสิตทางการแพทย์

คอมโพสิต หมายถึง สิ่งที่มีองค์ประกอบที่แตกต่างกัน 2 ส่วนขึ้นไป โดยทั่วไปแล้ว ในทางวิศวกรรมหรือวัสดุศาสตร์ เราใช้คำว่า คอมโพสิต กับวัสดุที่ประกอบด้วย องค์ประกอบที่แตกต่างกันในระดับมหภาค และมีสมบัติ ที่เป็นผลมาจากสมบัติ ของแต่ละ องค์ประกอบมารวมกัน คอมโพสิตมีหลากหลายประเภทด้วยกัน เราสามารถเลือกใช้วัสดุประเภท ต่างๆ เข้ามาประกอบรวมกันเป็นคอมโพสิตชนิดใหม่ ไม่ว่าจะเป็นพลาสติก ร่วมกับเซรามิก โลหะกับ โลหะ พลาสติกกับโลหะ ตัวอย่างที่เห็นได้ในชีวิตประจำวัน ได้แก่ พลาสติกเสริมแรงด้วยใยแก้ว ที่ใช้ ผลิตเป็นหลังคาถาวรทุก และอ่างอาบน้ำ ในทางการแพทย์ เนื้อเยื่อของมนุษย์ เช่น กระดูก เอ็นยึด ผิวน้ำ ก็อาจถือได้ว่าเป็นคอมโพสิตประเภทหนึ่ง เนื่องจาก ประกอบไปด้วยองค์ประกอบที่แตกต่าง กัน ทั้งในระดับโมเลกุล และระดับโครงสร้าง จุลภาค ดังนั้น การใช้งานของคอมโพสิตในทาง การแพทย์ ก็อาศัยเหตุผลที่ว่า วัสดุชนิดใดชนิดหนึ่งเพียงชนิดเดียวยังมีสมบัติ ที่ไม่เหมาะสม หรือไม่ เพียงพอต่อการใช้งานตามต้องการ จึงต้องมีการนำเอาวัสดุหลายประเภท มารวมเข้าด้วยกัน เพื่อนำเอาข้อดีของวัสดุแต่ละประเภทมาใช้ประโยชน์ร่วมกัน ตัวอย่างของคอมโพสิตทางการแพทย์ ได้แก่ วัสดุอุดฟัน หรือวัสดุเคลือบหลุมร่องฟัน ซึ่งประกอบไปด้วยพลาสติกประเภท BIS-GMA ผสมรวมกับ ผงซิลิกา เพื่อเป็นทางเลือกในการใช้งานแทนอะมัลกัม เนื่องจากมีสีฟันที่ใกล้เคียงฟันธรรมชาติ มากกว่า นอกจากนี้ ก็ยังมีข้อเทียมบางประเภทที่ผลิตจากพลาสติกเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน เนื่องจาก สามารถปรับให้มีค่าสมบัติทางกลที่ใกล้เคียงกับกระดูกธรรมชาติ

2.4 ไทเทเนียมและโลหะผสมไทเทเนียม (Titanium and Titanium Alloy) [20]

ไทเทเนียมเป็นโลหะที่ค่อนข้างมีน้ำหนักเบา (ความหนาแน่น = 4.54 g/cm^3) แต่มีความ แข็งแรงสูง (96 ksi สำหรับ 99.0% Ti) ดังนั้นไทเทเนียมและโลหะผสมไทเทเนียมจะถูกนำไปใช้ใน งานทางด้านอวกาศแม้ว่ามันจะมีราคาค่อนข้างแพง นอกจากนี้ไทเทเนียมยังถูกนำไปใช้ประโยชน์ในงานที่ ต้องการความทนต่อการกัดกร่อนที่ดีในสภาวะแวดล้อมทางเคมี เช่น สารละลายคลอรีน และ สารละลายอนินทรีย์คลอไรด์ เป็นต้น โลหะไทเทเนียมมีราคาแพงเพราะยากที่จะสกัดให้มีความ บริสุทธิ์จากสารประกอบไทเทเนียมได้ ไทเทเนียมจะรวมตัวกับออกซิเจน ไนโตรเจน ไฮโดรเจน คาร์บอน และเหล็ก ที่อุณหภูมิสูง ดังนั้นการขึ้นรูปหรือการหล่อจะต้องใช้เทคนิคเฉพาะตัว

ไทเทเนียมจะมีโครงสร้างผลึกแบบ HCP (แอลฟา) ที่อุณหภูมิห้องและจะเปลี่ยนไปเป็น โครงสร้างผลึกแบบ BCC (บีตา) ที่อุณหภูมิ $883 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ธาตุอะลูมิเนียมและออกซิเจนจะทำให้เฟสของ α อยู่ตัวและจะเพิ่มค่าอุณหภูมิที่จะมีการเปลี่ยนเฟส α ไปเป็นเฟส β ส่วนธาตุอื่นๆ เช่น เวนเดียมและ โมลิบดีนัม จะทำให้ β เฟสมีความเสถียรและจะลดค่าอุณหภูมิที่จะทำให้เกิดเฟสที่เสถียร ตารางที่ 2.3 ได้รวบรวมสมบัติเชิงกลและประโยชน์ของไทเทเนียมบริสุทธิ์ (99.0% Ti) และโลหะผสมไทเทเนียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลายชนิด โลหะ Ti-6Al-4V ELI จะเป็นโลหะผสมที่ใช้กันมากที่สุด เพราะมีความแข็งแรงและนำไปใช้งานได้ดี ค่าความต้านทานแรงดึง (tensile strength) ของโลหะผสมชนิดนี้ผ่านกระบวนการทางความร้อน solution heat-treatment และ age-hardening สูงถึง 170 ksi (1173 MPa)

โลหะผสมไทเทเนียมเกรด Ti-6Al-4V ELI ถูกนำไปพัฒนาในหลายงานวิจัย เช่น ส่วนประกอบของกระดูกต้นขา ขาเทียมที่ขาเทียมมีจำนวนแบบที่แตกต่างกัน พื้นผิวที่ระเบิดได้ถูกประดับประดาอย่างไม่สม่ำเสมอ พื้นผิวของลำต้นสองลำถูกตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบออปติคัล (Optical Scanning Electron Microscopy) พบว่ามีความเสียหายที่เกิดจากการถูซ้ำๆกับผิวแข็ง การวิเคราะห์รังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน องค์ประกอบของธาตุที่ถูกดูดซับและไม่ผ่านการฉาบรังสีของพื้นผิวเทียมได้ถูกกำหนดไว้ในสองกรณีโดยใช้หน่วยวิเคราะห์ EDXA ที่กระจายตัวด้วยพลังงาน (EDXA) ที่ติดอยู่กับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน [21] เป็นต้น

Ti-6Al-4V ELI (เกรด 23) คล้ายกับ Ti-6Al-4V (เกรด 5) แต่ Ti-6Al-4V ELI คือ Ti-6Al-4V ที่ถูกลดระดับลงของ ออกซิเจน ไนโตรเจน คาร์บอน และเหล็ก โดย ELI ถูกย่อมาจาก “Extra Low Interstitials” เป็นการทำให้ความเหนียวที่ดีขึ้น และความเหนียวแตกหักดีขึ้นสำหรับวัสดุ Ti6-Al-4V ELI ความต้านทานการกัดกร่อนของความเค้นของโลหะผสมสูง Stress Corrosion Cracking (SCC) ทำให้ Ti6-Al-4V ELI จึงเป็นที่นิยมการใช้งานเนื่องจากทั้งความแข็งแรงสูง และมีความต้านทานการกัดกร่อน [22]

ตารางที่ 2.3 สมบัติเชิงกลและประโยชน์ของโลหะผสมแมกนีเซียม ไทเทเนียม และนิกเกิลบางชนิด [23]

Alloy Type	Common Name (UNS Number)	Composition (wt%)	Condition	Average Mechanical Properties			Typical Applications
				Tensile Strength [MPa (ksi)]	Yield Strength [MPa (ksi)]	Ductility [%EL in 50 mm (2 in.)]	
Commercially pure	Unalloyed (R50250)	99.5 Ti	Annealed	240 (35)	170 (25)	24	Jet engine shrouds, cases and airframe skins, corrosion-resistant equipment for marine and chemical processing industries
α	Ti-5Al-2.5Sn (R54520)	5 Al, 2.5 Sn, balance Ti	Annealed	826 (120)	784 (114)	16	Gas turbine engine casings and rings; chemical processing equipment requiring strength to temperatures of 480°C (900°F)
Near α	Ti-8Al-1Mo- 1V (R54810)	8 Al, 1 Mo, 1 V, balance Ti	Annealed (duplex)	950 (138)	890 (129)	15	Forgings for jet engine components (compressor disks, plates, and hubs)
α - β	Ti-6Al-4V (R56400)	6 Al, 4 V, balance Ti	Annealed	947 (137)	877 (127)	14	High-strength prosthetic implants, chemical-processing equipment, airframe structural components
α - β	Ti-6Al-6V-2Sn (R56620)	6 Al, 2 Sn, 6 V, 0.75 Cu, balance Ti	Annealed	1050 (153)	985 (143)	14	Rocket engine case airframe applications and high-strength airframe structures
β	Ti-10V-2Fe-3Al	10 V, 2 Fe, 3 Al, balance Ti	Solution + aging	1223 (178)	1150 (167)	10	Best combination of high strength and toughness of any commercial titanium alloy; used for applications requiring uniformity of tensile properties at surface and center locations; high-strength airframe components

Source: Adapted from *ASM Handbook, Vol. 2, Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*, 1990. Reprinted by permission of ASM International, Materials Park, OH.

2.5 การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์

2.5.1 บทนำการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis: FEA)

การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis : FEA) เป็นเทคนิคการวิเคราะห์เชิงตัวเลขเพื่อได้มาซึ่งผลลัพธ์โดยประมาณของปัญหาที่หลากหลายในทางวิศวกรรม [24] ซึ่งประกอบด้วยสมการควบคุมระบบ และใช้เงื่อนไขขอบเขตเพื่อแก้สมการในการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยแบ่งโดเมนของปัญหาออกเป็นส่วนย่อยๆ เรียกว่า เอลิเมนต์ (element) โดยแต่ละเอลิเมนต์จะเชื่อมกันด้วยโหนด (node) ดังนั้นเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ของปัญหา ต้องนำสมการควบคุมของระบบมาสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ของแต่ละเอลิเมนต์บนโดเมน ซึ่งจะได้ผลเฉลยของปัญหาที่จุดต่อบนโดเมน เทคนิคการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ นิยมใช้ในการศึกษาความเค้นในโครงสร้างที่ซับซ้อนในช่วงแรก และถูกนำไปประยุกต์ใช้งานอย่างกว้างขวางในสายงานที่เกี่ยวกับกลศาสตร์ เพราะการวิเคราะห์นี้มีความหลากหลายและเป็นเครื่องมือวิเคราะห์ที่สามารถยืดหยุ่นได้ ซึ่งได้รับความสนใจที่นำมาใช้ศึกษาทางด้านวิศวกรรมและใช้ในอุตสาหกรรม [24]

จากที่กล่าวมาในข้างต้น การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์มีประสิทธิภาพมาก แต่การจำลองสถานการณ์เพื่อหาผลลัพธ์ของปัญหาด้วยคอมพิวเตอร์ ต้องคำนึงถึงความเครียดที่เป็นความสำคัญของปัญหา และตัวแปรอื่นๆ เช่น สมบัติของวัสดุแต่ละชนิดที่นำมาวิเคราะห์ ลักษณะรูปร่างทางเรขาคณิตของชิ้นงาน และที่สำคัญการป้อนข้อมูลเข้าสู่กระบวนการที่ถูกต้องเนื่องจากอาจจะทำให้เกิดค่า

ผลลัพธ์ที่ผิดพลาดได้ ซึ่งอาจถูกมองข้ามจากนักวิเคราะห์ส่วนใหญ่ และความแม่นยำของนักวิเคราะห์ที่ต้องรู้จักวิเคราะห์และประมวลผล จะทำให้การใช้คอมพิวเตอร์ในการจำลองสถานการณ์มีความสมบูรณ์ และได้ผลลัพธ์จากการทดลองที่มีความเป็นไปได้สูง

ในการใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element software) ในการวิเคราะห์ โดยทั่วไปจะประกอบด้วย 3 ขั้นตอนดังนี้

1. ขั้นตอนการเตรียมกระบวนการ (preprocessing)

โดยทั่วไปใช้สำหรับการสร้างแบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์ ซึ่งแบ่งเป็นขั้นส่วนย่อยๆ เรียกว่าเอลิเมนต์ โดยที่ในแต่ละเอลิเมนต์จะถูกเชื่อมด้วยโหนด ซึ่งจะถูกกำหนดการเคลื่อนที่และกำหนดแรงหรือภาระที่มากระทำกับชิ้นงานที่วิเคราะห์ [24]

2. ขั้นตอนการวิเคราะห์ (analysis)

ขั้นตอนการวิเคราะห์ (analysis) ข้อมูลต่างๆ เช่น แบบจำลองเอลิเมนต์ในเงื่อนไขต่างๆ ที่ถูกเตรียมไว้ จะถูกป้อนเข้าสู่ไฟไนต์เอลิเมนต์ตามหลักการของระเบียบการที่สร้างและแก้ไขปัญหาเชิงเส้น (linear) หรือไม่เชิงเส้น (nonlinear) ด้วยสมการทางพีชคณิต โดยไฟไนต์เอลิเมนต์มีสมการรูปทั่วไป [29] ดังแสดงในสมการ 2.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\{k\}\{d\} = \{f\} \quad (2.13)$$

- เมื่อ k = ค่าความแข็ง (stiffness matrix)
 f = ค่าแรงที่มากระทำต่อเอลิเมนต์
 d = ความเคลื่อนที่อิสระของโหนด เอลิเมนต์ (DOF)

3. ขั้นตอนการนำเสนอกระบวนการ (post processing)

ขั้นตอนการนำเสนอกระบวนการ (post processing) ก่อนหน้านี้ต้องใช้การวิเคราะห์แบบที่ถูกสร้างด้วยรหัส code การลงรายละเอียดของการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง และความเค้นลงบนแบบจำลองให้มีความแตกต่างอย่างสิ้นเชิง โดยมักจะพบข้อผิดพลาด และเป็นจุดที่อันตราย อีกทั้งรหัสที่ทันสมัยจะใช้กราฟฟิกแสดงเพื่อให้ง่ายต่อการแสดงผลลัพธ์ ซึ่งรูปแบบของการนำเสนอทางกราฟฟิกจะแสดงเป็นระดับชั้นสีของความเครียดจนเต็มบนแบบจำลอง [24]

2.5.2 โหนด (node)

โหนดเป็นส่วนที่ช่วยเชื่อมต่อโครงสร้างเล็กๆหรือเอลิเมนต์ (element) โดยแต่ละเอลิเมนต์ให้ติดกันด้วยจุดของโหนด นอกจากนี้โหนดยังช่วยในการกำหนดรูปร่างของเอลิเมนต์ที่มีองศาอิสระ โดยปกติแล้วโหนดจะมีอยู่ที่มุมของเอลิเมนต์ หรือจุดของเอลิเมนต์ แล้วกลุ่มของเอลิเมนต์และโหนดจะอยู่ติดกันเป็นกลุ่ม ถูกเรียกว่า แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element model) จะเป็นตัวแทนของชิ้นงานเพื่อนำมาจำลองแบบเมตริกซ์ (matrix) เพื่อนำไปคำนวณในระดับที่ซับซ้อนต่อไป [24]

2.5.3 เอลิเมนต์ (element)

เอลิเมนต์มีมิติ 1-3 มิติ รวมถึงเอลิเมนต์ชนิดพิเศษซึ่งลักษณะ 0 มิติ เช่น lumped springs หรือ กลุ่มของจุด โดยเอลิเมนต์ที่ลักษณะ 1 มิติ เป็นเส้นตรงหรือเส้นโค้ง (beam element) มักใช้ในการวิเคราะห์งานลักษณะที่เป็นโครงเอลิเมนต์ 2 มิติ (shell element) จะเป็นรูปร่างรูปสามเหลี่ยม หรือสี่เหลี่ยมที่เหมาะสมกับการวิเคราะห์งานที่เป็นพื้นผิว (surface) ผนังบาง และแบบ 3 มิติ (solid element) โดยปกติส่วนมากรูปร่างเป็นแบบ tetrahedral, pentahedral, hexahedral (bricks) หรือ เป็นแบบปริซึม (prisms) สามารถใช้กับงานที่เป็นปริมาตรทรงตัน (solid) ซึ่งเอลิเมนต์แต่ละมิติจะมีจุด เรียกว่า จุดโหนด (nodal points) หรือ โหนด (node) ซึ่งใช้เป็นตัวกำหนดรูปร่างทางเลขาคณิตของเอลิเมนต์กับเอลิเมนต์ที่มีรูปร่างมีองศาเป็นแบบอิสระ โดยปกติโหนดจะอยู่ที่มุมหรือจุดปลายของเอลิเมนต์ ในทางกลศาสตร์เอลิเมนต์มีความเฉพาะของพฤติกรรมก่อนวัสดุ เช่น เชิงเส้นยืดหยุ่น (linear elastic) ในวัสดุที่เป็นท่อน (bar element)

2.5.3.1 เอลิเมนต์ 1 มิติ

เอลิเมนต์ 1 มิติ มีลักษณะเป็นเส้น (beam element) เท่านั้นไม่มีรูปทรงเรขาคณิตแบบอื่น ซึ่งมีแต่ความยาว และสามารถมองเห็นพื้นที่หน้าตัดได้ชัดเจน [24]

2.5.3.2 เอลิเมนต์ 2 มิติ

เอลิเมนต์ 2 มิติ (shell element) มีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยม สี่เหลี่ยม โดยมีโหนด 3 และ 4 โหนดตามลำดับ แต่โดยพื้นฐานแล้วจะมีขั้นต่ำ 3 โหนด เอลิเมนต์ชนิดนี้จะใช้กับงานที่เป็นพื้นผิวหรือผนัง ซึ่งอาจแบ่งได้เป็นผนัง (thin shell) และผนังหนา (thick Shell) [24]

2.5.3.3 เอลิเมนต์ 3 มิติ

เอลิเมนต์ 3 มิติ (solid element) มีลักษณะเป็นโครงสร้าง 3 มิติ รูปทรงจะมีความกว้าง ยาว สูง โดยพื้นฐานของเอลิเมนต์นี้ต้องมีตั้งแต่ 3 โหนดขึ้นไป ซึ่งเหมาะกับการจำลองโครงสร้างที่มีความหนา (thick) เมื่อเทียบกับพื้นผิว เหมาะกับงานที่ต้องการค่าความถูกต้อง [24]

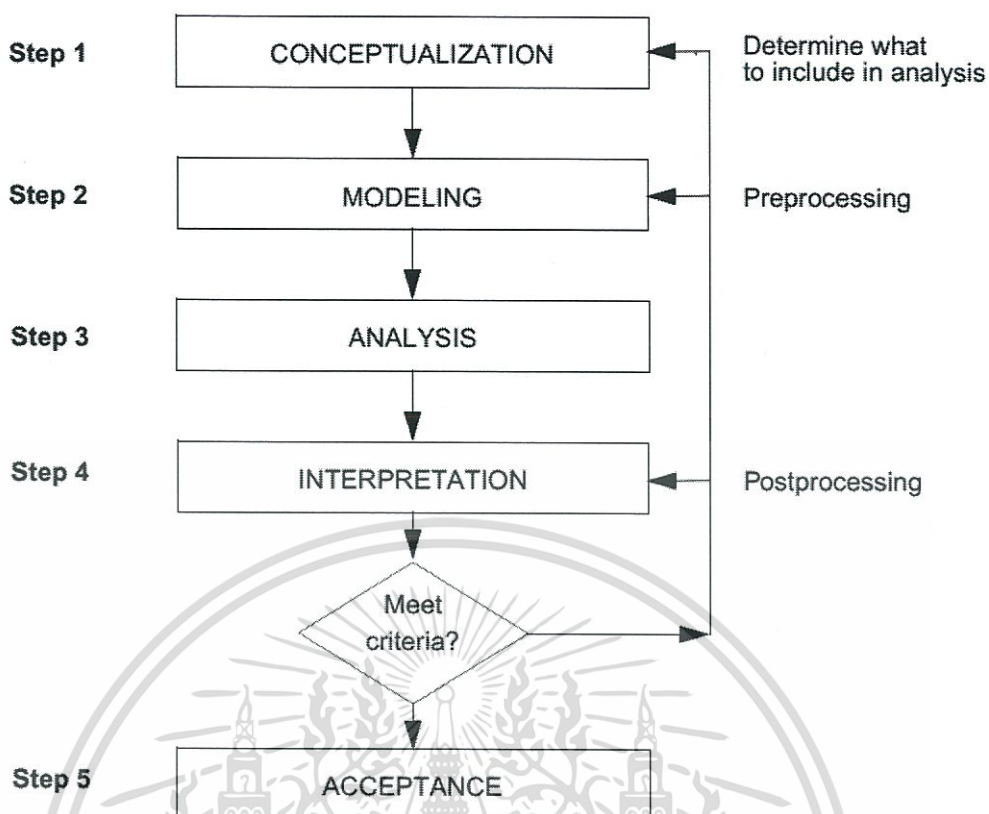
การแบ่งประเภทของระเบียบการไฟไนต์เอลิเมนต์ในทางกลศาสตร์ ซึ่งทำให้มีความเข้าใจในเทคนิคการออกแบบจำลองขั้นสูง เช่น รายละเอียดลำดับชั้น และการวิเคราะห์โดยวิเคราะห์โดยรวมเฉพาะแห่ง [24]

โครงสร้างดั้งเดิมของเอลิเมนต์ (primitive structural element) โดยเอลิเมนต์เหล่านี้จะถูกจำแนกตามโครงสร้างทางกลศาสตร์ซึ่งเกี่ยวเนื่องกับลักษณะทางกายภาพของโครงสร้าง เอลิเมนต์เหล่านี้มาจากกลศาสตร์ทางวัสดุ (mechanics of materials) ซึ่งทำให้เข้าใจง่ายกว่าทฤษฎีทางคณิตศาสตร์ [24]

การแบ่งเอลิเมนต์ในกระบวนการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ จำเป็นต้องแบ่งชิ้นส่วนออกเป็นเอลิเมนต์ที่ถูกเชื่อมด้วยโหนด โดยมีหลักการแบ่งดังนี้ ควรหลีกเลี่ยงการแบ่งเอลิเมนต์ที่รูปร่างผิดปกติ เช่น เอลิเมนต์ที่มีมุมป้านมากเกินไปหรือสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีด้านยาวมากเกินไปหรือลักษณะ large aspect ratio เป็นต้น ควรเป็นสี่เหลี่ยมด้านเท่าหรืออัตราส่วนกว้างต่ออัตราส่วนยาวมีค่าเข้าใกล้ 1 ควรใช้เอลิเมนต์ที่มีขนาดเล็ก ส่วนที่มีความหนาแน่น และแบ่งเอลิเมนต์ขนาดใหญ่ในบริเวณที่ไกลออกไป

2.5.4 ซอฟต์แวร์ MSC. Marc Mentat

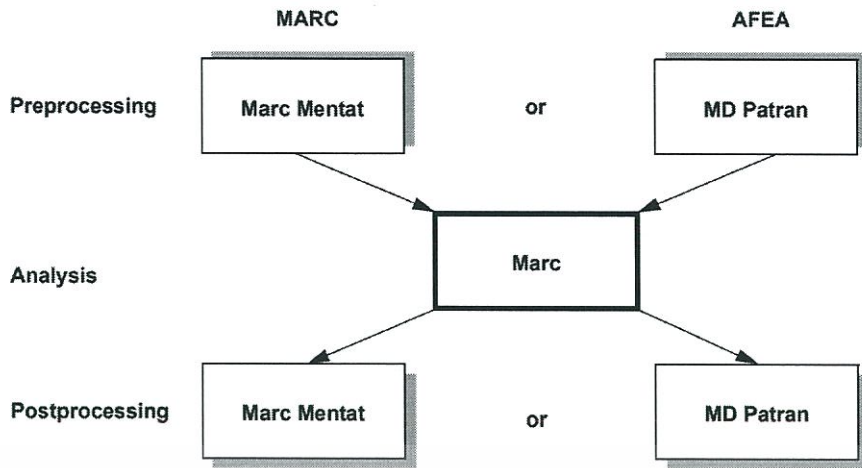
ถูกคิดค้นโดยบริษัท Msc Software ที่มีหน้าที่จัดหาจัดส่งซอฟต์แวร์ เครื่องมือทางคอมพิวเตอร์ที่ช่วยวิเคราะห์งานทางวิศวกรรม ทางบริษัทจัดจำหน่ายและพัฒนาซอฟต์แวร์อย่างหลากหลาย เช่น MSC Marc (Implicit) ใช้วิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้นขั้นสูง (advanced nonlinear) การตีตกกลับ (spring back) เป็นต้นโดยตัวโปรแกรมสามารถแสดงกระบวนการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ออกเป็นวงจรดังนี้



รูปที่ 2.9 วงจรการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ [24]

กระบวนการไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element analysis process) ซึ่งต้องพิจารณาถึงวงจรการวิเคราะห์การไฟไนต์เอลิเมนต์ดังรูปที่ 2.9 แสดงให้เห็นถึง 5 ขั้นตอน จะมีบางกระบวนการที่ต้องได้รับการตรวจสอบมากกว่า 1 ครั้ง หากไม่ตรงตามเกณฑ์ที่ออกแบบสามารถย้อนกลับไปขั้นตอนที่ 1 (conceptualization) และขั้นตอนที่ 2 (modeling) หรือเป็นขั้นตอนในการปรับปรุงกระบวนการ โดยโปรแกรมนี้จะให้ความสำคัญกับ 2 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนที่ 2 ช่วงการสร้างแบบจำลอง (modeling) และขั้นตอนที่ 4 แสดงผลการทดลอง (Interpretation) สำหรับปัญหาทางวิศวกรรม นอกจากนี้โปรแกรม Marc ได้รับการเลือกใช้ตามเกณฑ์ ทั้งมีวิธีที่หลากหลายเพื่อสร้างแบบจำลองที่ยุ่งยาก และเพื่อแสดงการวิเคราะห์ในรูปแบบที่หลากหลาย โดยโปรแกรมจะดำเนินการตามวัตถุประสงค์ของการวิเคราะห์ เมื่อป้อนข้อมูลเสร็จจึงแสดงผลแบบกราฟฟิกส์ [25]

โปรแกรม Marc ที่ใช้วิเคราะห์ปัญหา สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.10 โดยระบบของโปรแกรมประกอบด้วย Marc for Analysis, Marc Mentat หรือ MD Patran for GUI, Marc and Marc Mentat or MD Patran, Analyse your structure (Marc) และ Graphically depict the results (Marc and Marc Mentat or MD Patran)



รูปที่ 2.10 ระบบของโปรแกรม Marc [25]

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Rustan Z. Valiev [26] ได้ทำการศึกษาและพบว่า กระบวนการเสียรูปถาวรอย่างรุนแรงซึ่งมีผลต่อโครงสร้างทางจุลภาคและสมบัติของวัสดุ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกรณีของการเปลี่ยนแปลงเฟสที่ผิดปกติที่ ส่งผลให้เกิดความผิดปกติทางด้านความแข็งแรงและความเหนียวในบางโลหะและโลหะผสมที่ผ่านกระบวนการเสียรูปถาวรอย่างรุนแรง ซึ่งจากการสรุปและวิเคราะห์ผลที่อุณหภูมิห้องแล้ว พบว่า วัสดุเกรนละเอียดที่ผ่านกระบวนการเสียรูปอย่างรุนแรงทำให้เกิดเสถียรภาพทางความร้อนดีขึ้นในวัสดุ ก่อให้เกิดความหนาแน่นที่สูงมากในบริเวณขอบเกรนที่มีมุมสูง ความบกพร่องในผลึก และจุดบกพร่องบนวัสดุที่เห็นได้อย่างชัดเจน ซึ่งทำให้ได้ความแข็งแรงและความเหนียวที่ดีขึ้นในบางโลหะที่ผ่านกระบวนการเสียรูปอย่างรุนแรง

Valiev et al. [27] ได้พิจารณากรรมวิธีทางความเค้น และความร้อน ของวัสดุเกรนละเอียด (UFG) ที่มีขนาดเกรนที่เล็กถึง 20 นาโนเมตรและลักษณะเฉพาะของโครงสร้างของมัน ว่าขอบเกรนระหว่างผลึก เป็นองค์ประกอบหลักของโครงสร้างของวัสดุเกรนละเอียด (UFG) และสถานะที่ไม่สมดุล เช่น การค้นพบชั้นบางๆ ใกล้เคียงขอบเกรนพิเศษในอะตอมที่มีพลังงานสูง โครงสร้างที่ผิดปกติขึ้นมาซึ่งทำให้เกิดผลของค่าความยืดหยุ่นใหม่, ความแข็งแรง, ซูเปอร์พลาสติก, ความหน่วง และสมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุ UFG ซึ่งเป็นงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับวัสดุเกรนละเอียดและการใช้กระบวนการ SPD ทำให้เกิด superfine-grained ที่ขนาด 0.1 ไมครอนหรือต่ำกว่า โดยที่โครงสร้างใหม่ที่เกิดขึ้นส่งผลต่อค่าสมบัติของวัสดุให้เกิดการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม

Figueiredo et al. [28] ได้ทำการศึกษาโมเดลของไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นลูกใช้เพื่อแสดงให้เห็นกระบวนการของ HPT ในเงื่อนไข quasi-constrained ที่แผ่นดิสก์อยู่ในสภาวะการอัดอยู่ระหว่าง upper anvil และ lower anvil แบบจำลองของความแตกต่างของความดันและจำนวนรอบของการบิด จากความดันตั้งแต่ 0-2.0 GPa และรอบองแรงบิดตั้งแต่ 0-1.5 รอบ และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานตั้งแต่ 0-1.0 ภายนอกของการกดจากแบบจำลองถูกแสดงถึงการกระจายของความเครียดประสิทธิผล (effective strain) ภายในสภาวะของการยุบตัวเทียบกับแรงบิดที่คาดการณ์และความดันที่เหมาะสม จะมีผลเล็กน้อยต่อการกระจายของค่าเฉลี่ยของค่าความเครียด โดยแปรผันตามระยะทางจากจุดศูนย์กลางของดิสก์ พบว่าเมื่อเพิ่มแรงกดจะมีความเครียดบริเวณที่สูงกว่าที่ขอบแรงบิดจากการหมุนของ anvil จะขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างชิ้นงานกับพื้นผิว anvil

Kim et al. [29] ได้ทำการศึกษาในการตอบสนองแบบวิโทร(vitro) ของ mouse fibroblast cell line 3T3 บนพื้นผิวของเกรนละเอียดของไทเทเนียมที่ผ่านกระบวนการเสียรูปถาวรอย่างรุนแรง (SPD) โดยการเสียรูปถาวรอย่างรุนแรงในไทเทเนียมส่งผลทำให้ความแข็งแรงสูงกว่าวัสดุเกรนหยาบ และ Ti-6Al-4V ELI เกรนหยาบ จากการเปรียบเทียบระหว่าง ไทเทเนียมที่ผ่านกระบวนการเสียรูปถาวรอย่างรุนแรงกับไทเทเนียมที่ไม่ผ่านกระบวนการ สามารถพิจารณาได้จากการเพิ่มของพลังงานโดยการเปลี่ยนสภาพของขนาดเกรน และร่องจำนวนมากของพื้นผิวนาโนในไททาเนียมที่ผ่านกระบวนการเสียรูปถาวร จะได้ผลการทดสอบความเป็นพิษต่อเซลล์ของวัสดุเกรนละเอียดและหยาบไม่แตกต่างกัน เป็นงานวิจัยที่แสดงให้เห็นว่าวัสดุ Ti-6Al-4V ELI ที่ผ่านกระบวนการ SPD แล้วนั้นยังคงมีความสามารถเข้ากันได้ดีกับเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิตเหมือนกันกับวัสดุเดิมที่ยังไม่ผ่านกระบวนการ ทำให้สามารถนำไปพัฒนาต่อไปในฐานะวัสดุทางการแพทย์ได้เหมือนเดิม

บทที่ 3

ขั้นตอนการดำเนินงาน

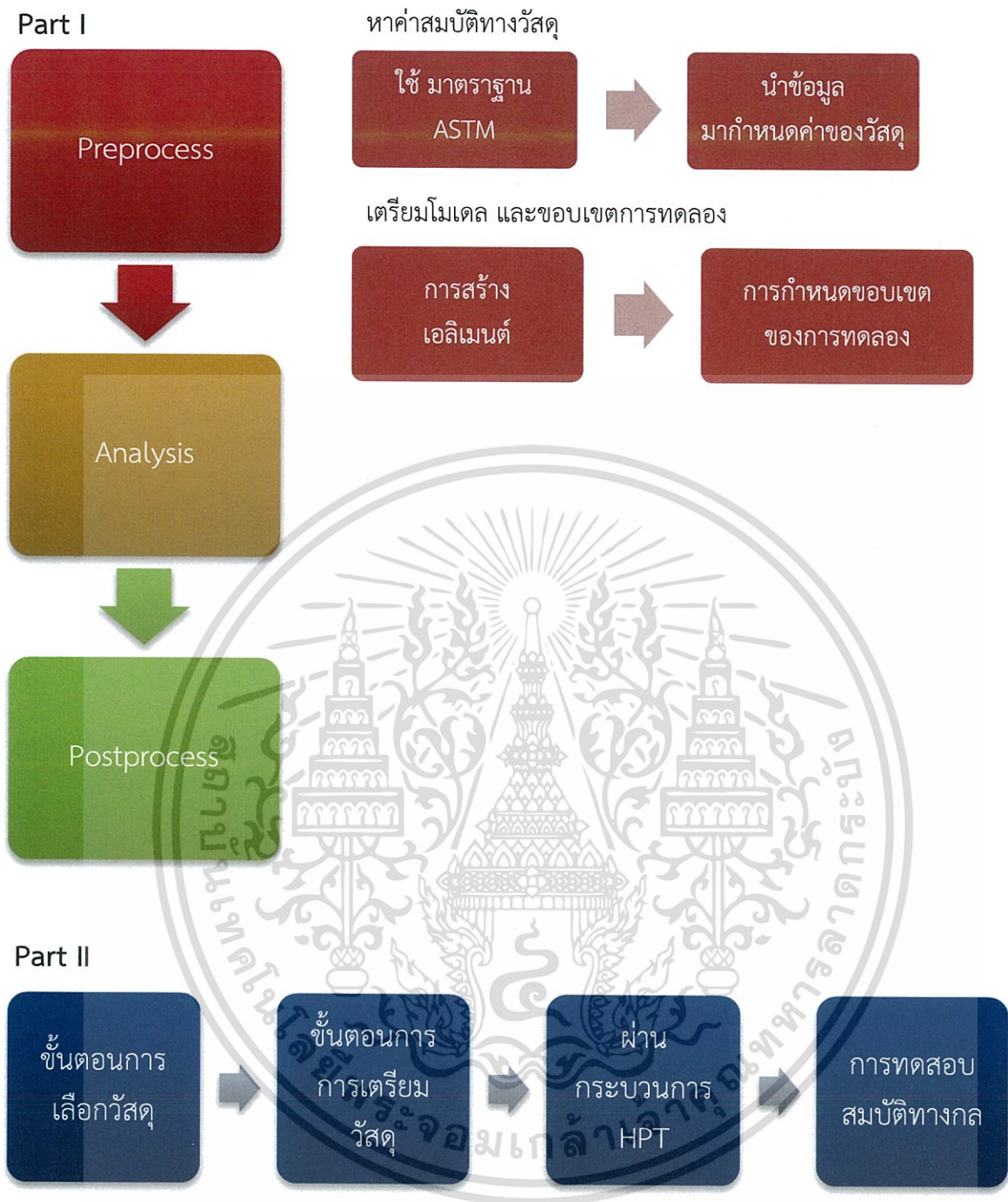
เนื้อหาในบทที่ 3 นี้จะกล่าวถึงการดำเนินงานซึ่งถูกแสดงในรูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน แบ่งออกเป็น 2 ส่วน เพื่อให้บรรลุตามวัตถุประสงค์ ดังนี้

ส่วนแรก เป็นส่วนของการจำลองพฤติกรรมการเสียรูปของวัสดุที่ผ่านกระบวนการผลิต ซึ่งหัวข้อในส่วนนี้ประกอบด้วย Preprocess, วิเคราะห์ (Analysis) และ Postprocess

โดย Preprocess คือกระบวนการเตรียมข้อมูลก่อนการวิเคราะห์ผล ประกอบด้วยการหาค่าสมบัติของวัสดุ เพื่อให้ข้อมูลถูกใช้ในการจำลอง และการเตรียมโมเดล นำโมเดลไปใช้ในโปรแกรมการจำลองซึ่งต้องสร้างและกำหนดเอลิเมนต์ การกำหนดขอบเขตของการทดลอง รวมถึงกำหนดสมบัติของวัสดุที่ผ่านการทดสอบ จากนั้นนำข้อมูลมาวิเคราะห์ (Analysis) ด้วยโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ โดยโครงงานวิจัยนี้เลือกการจำลองโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ด้วยการใช้โปรแกรม Marc mentat

และนำผลจากการจำลองโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ มาผ่าน Postprocess คือการวิเคราะห์ผลที่ได้

ส่วนที่ 2 เริ่มต้นจากการเลือกวัสดุ เตรียมวัสดุให้ได้ขนาดที่เหมาะสม นำมาผ่านกระบวนการเสียรูปถาวรอย่างรุนแรง แบบ HPT โดยกำหนดเงื่อนไขการทดลองในรูปแบบต่างๆ และทดสอบสมบัติทางกล โดยโครงงานวิจัยนี้เลือก วิธีการวัดความแข็งแบบจุลภาค โดยรายละเอียดจะถูกกล่าวในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

วัสดุทางการแพทย์ที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้อยู่ในกลุ่มโลหะผสมไทเทเนียม ซึ่งถูกนำมาใช้เป็นวัสดุทางการแพทย์อย่างแพร่หลาย ได้แก่ commercial titanium grade 23: Ti-6Al-4V ELI โดยมีองค์ประกอบทางเคมี (% โดยน้ำหนัก) ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงองค์ประกอบทางเคมี (%โดยน้ำหนัก) ของ Ti-6Al-4V ELI

Chemical composition (weight %)										
O	N	C	H	Fe	Al	V	Ni	Mo	Other	Residuals
0.13	0.03	0.08	0.0125	0.25	5.5-6.5	3.5-4.5				0.4

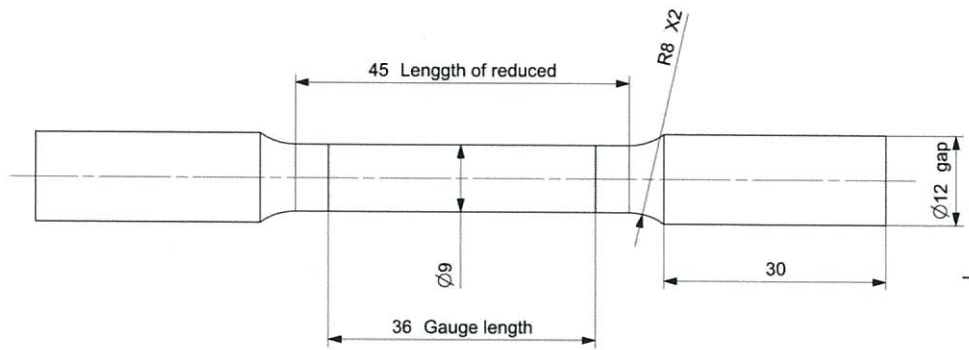
3.2 การศึกษาพฤติกรรมการเสียรูปของวัสดุ (Part I)

การศึกษาพฤติกรรมการเสียรูปของวัสดุเมื่อผ่านกระบวนการไฮเพอร์ซเซอร์ทอร์ชัน โดยการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element analysis (FEA)) มีขั้นตอนหลักดังนี้

3.2.1 การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุ (tensile testing)

3.2.1.1 เตรียมวัสดุตั้งต้น

ขนาดชิ้นงานทดสอบแรงดึงอ้างอิงตาม ASTM Standards E8/E8M – 09 ซึ่งเป็นมาตรฐาน สำหรับชิ้นงานโลหะทดสอบแรงดึง โดยวัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นไทเทเนียมลักษณะแท่งตามมาตรฐาน JIS G 3141 รายละเอียดขนาดของชิ้นงานที่จะใช้ในการทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM Standards E8/E8M – 09 แสดงไว้ในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แบบชิ้นงานสำหรับใช้ทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM Standards E8/E8M – 09

3.2.1.2 การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุ (tensile testing)

ทำการทดสอบแรงดึงที่อัตราความเครียด (strain rate) เท่ากับ $4.5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ สำหรับหาคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ โดยเครื่องทดสอบแรงดึง รุ่น Shimadzu autograph AG-X ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แสดงเครื่องทดสอบแรงดึงรุ่น Shimadzu autograph AG-X

3.2.2 การจำลองการเสียรูปทางคอมพิวเตอร์ (simulation procedure)

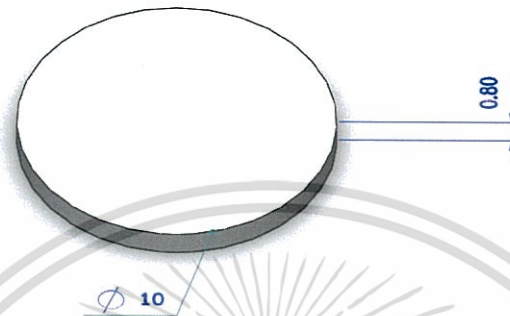
3.2.2.1 การจำลองที่ใช้ในการศึกษา

งานวิจัยในส่วนนี้เป็นการศึกษาการเสียรูปของวัสดุเมื่อผ่านกระบวนการไฮเพอร์ซอร์ชัน โดยใช้โปรแกรม Marc Mentat ในการศึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

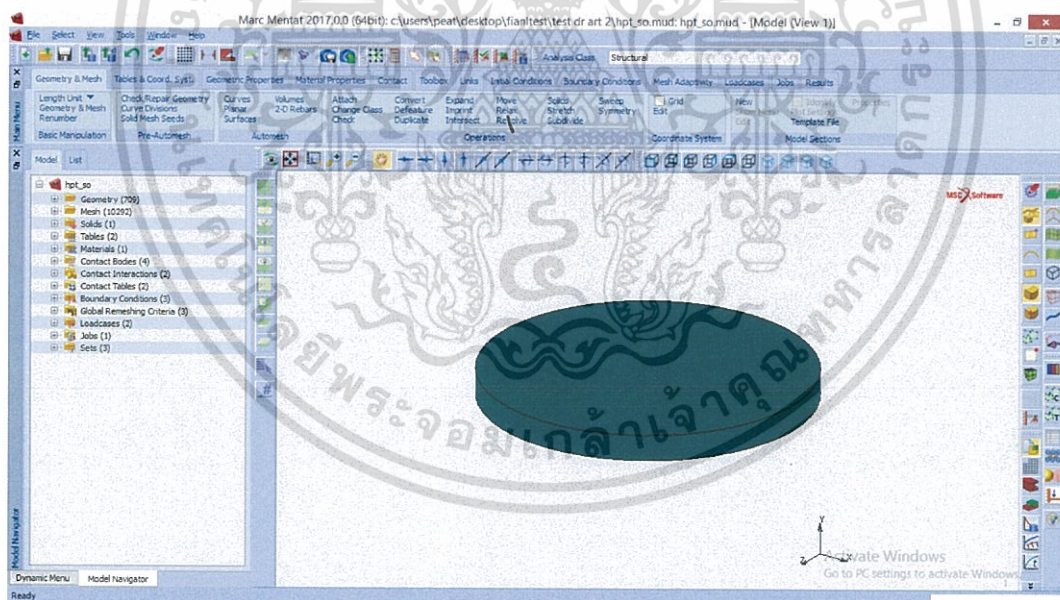
3.2.2.2 การสร้างโมเดลสำหรับการวิเคราะห์

สร้างชิ้นส่วนให้เป็นลักษณะ disk เพื่อจำลองเป็นชิ้นงานในระหว่างกระบวนการไฮเพอร์เซอร์เทอร์ชันด้วยโปรแกรม Solidwork โดยให้ชิ้นงานมีขนาดความหนา 0.8 มิลลิเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ตัวอย่างชิ้นงานที่ถูกสร้างจากโปรแกรม Solidwork

นำเข้าไฟล์ตัวอย่างชิ้นงานดังรูป 3.4 เข้ามาในโปรแกรม MSC Marc Mentat ดังรูปที่ 3.5



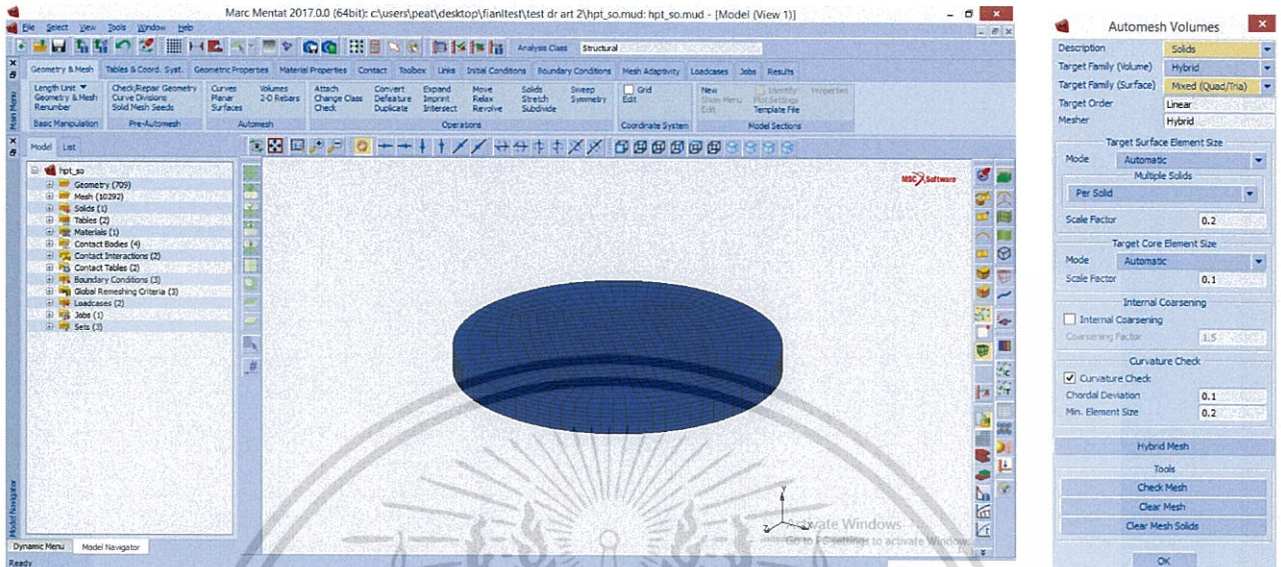
รูปที่ 3.5 ไฟล์ตัวอย่างชิ้นงานเมื่อนำเข้ามาในโปรแกรม Marc Mentat

3.2.2.3 การแบ่งส่วนชิ้นงาน (Meshing)

ทำการ Meshing ชิ้นงานด้วยคำสั่ง automesh ซึ่งเป็นคำสั่งของการสร้าง mesh ที่มีประสิทธิภาพ น่าเชื่อถือ และประหยัดเวลาในการสร้าง mesh มากกว่าการสร้าง mesh จากคำสั่ง manual

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

mesh โดยตั้งค่า mesh solids แบบ hybrid mixed(quad/tria) ออกมาเป็น mesh brick 8 node จะได้ผลจากการ meshing ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แสดง Mesh ที่เกิดหลังการ Meshing

3.2.2.4 การกำหนดเงื่อนไขการจำลอง

1. การกำหนดสมบัติวัสดุ (material properties) และสมบัติทางพลาสติก (Plasticity properties)

ในการกำหนดสมบัติวัสดุ โดยใช้ชื่อ (name) ว่า Ti 6Al 4V ELI ประเภท (type) Standard โดยกำหนดค่า mass density จากค่าโรงงานผลิตไทเทเนียม ส่วนค่า Young's modulus และ Poisson's ratio ถูกกำหนดจากการทดสอบวัสดุจากการดึง (tensile testing) ที่ถูกกล่าวในหัวข้อ 3.2.1 และเลือกเอลิเมนต์ของชิ้นงานทั้งหมดที่ถูกกำหนดจากคำสั่ง automesh ในส่วนของการกำหนดสมบัติทางพลาสติก โดยค่า yield stress ถูกกำหนดจากการทดสอบวัสดุจากการดึง (tensile testing) และใช้ทฤษฎีการเสีรूपคือ Von Mises ส่วนคำสั่งอื่นที่ไม่ได้ถูกกล่าวถึงให้ใช้ค่าเริ่มต้นของโปรแกรม ดังรูปที่ 3.7 และข้อมูลที่ถูกใช้จากการทดสอบวัสดุจากการดึง ดังตารางที่ 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

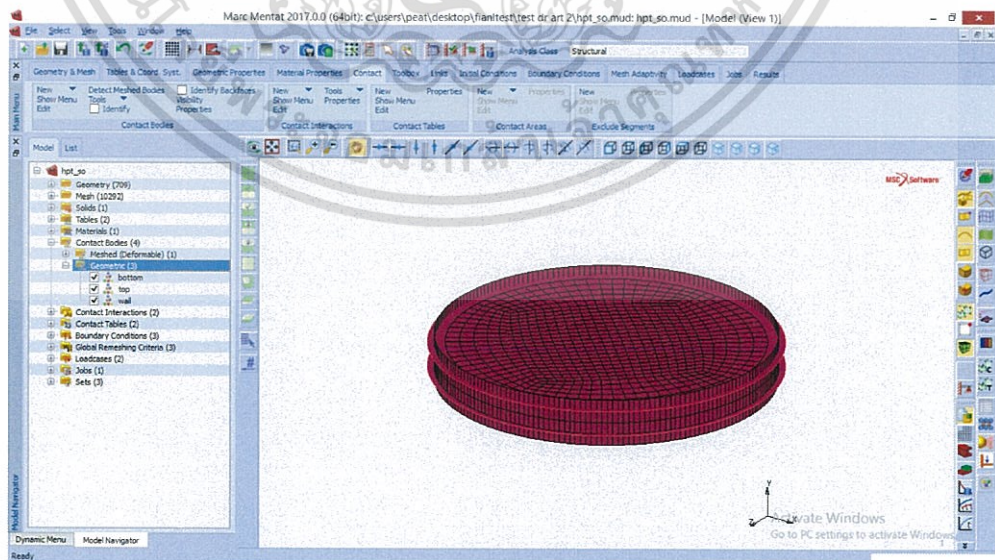


รูปที่ 3.7 แสดงค่า Material properties ของชิ้นงาน Ti-6Al-4V ELI

ตารางที่ 3.2 ค่าตัวแปรที่กำหนดคุณสมบัติให้กับชิ้นงาน

Mass Density	4.43 g/cm ³
Young's Modulus	106791 MPa
Poisson's ratio	0.34

2. สร้าง Geometric Surface ของตัว Anvil ขึ้นมาเป็น Contact body เพื่อที่จะกำหนดพื้นผิวสัมผัส ว่าได้รับแรงกระทำมาจากตัว lower upper anvil ให้ตรงตามเงื่อนไขการทดลอง คือ กิ่งจำกัดการไหล หรือ จำลองจากรูปที่ 2.4 c)

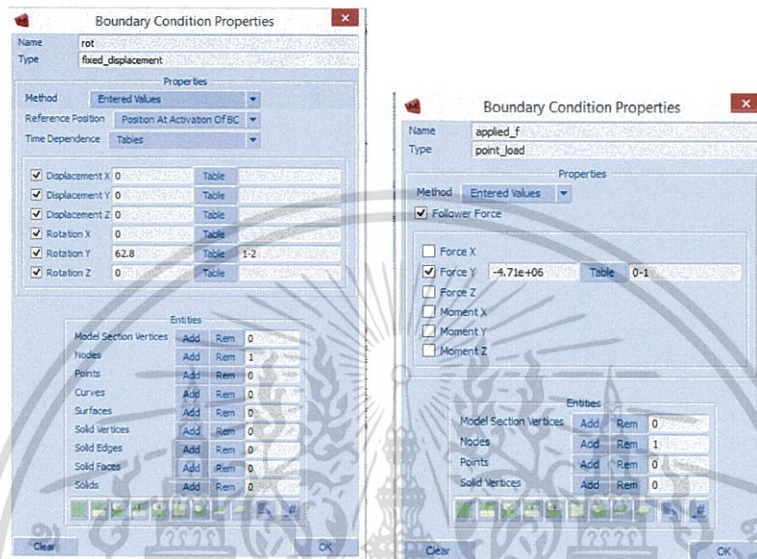


รูปที่ 3.8 แสดง geometric surface ที่กำหนดให้เป็น contact body

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. กำหนด boundary condition ทั้งการกดและการบิด

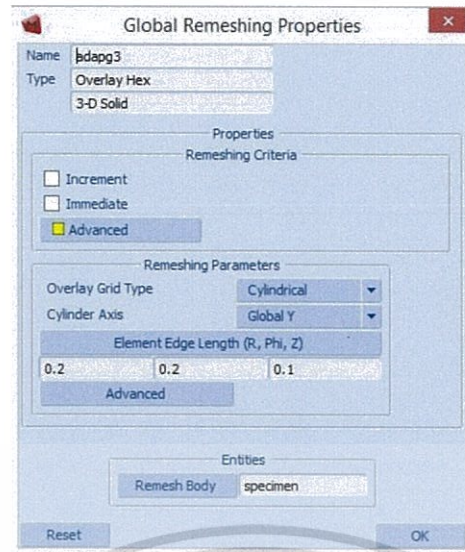
เพื่อกำหนดการบิดที่บริเวณเครื่องจักรที่ใช้ในการผลิตตามแนวแกน Y ไปที่ 62.8 rad และกำหนดแรงดัน 6 Gpa กับชิ้นงานแผ่นกลมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 mm หรือมีพื้นที่ 78.5 mm² คำนวณได้แรงกระทำเท่ากับ 4.71×10^6 นิวตัน โดยกำหนดให้ พื้นผิวด้านบนของตัวเครื่อง ให้แรงกดกับชิ้นงาน และพื้นผิวด้านล่างให้แรงบิดกับชิ้นงาน



รูปที่ 3.9 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของการกด (ซ้าย) และการบิด(ขวา)

4. ตั้งค่า Mesh adaptivity

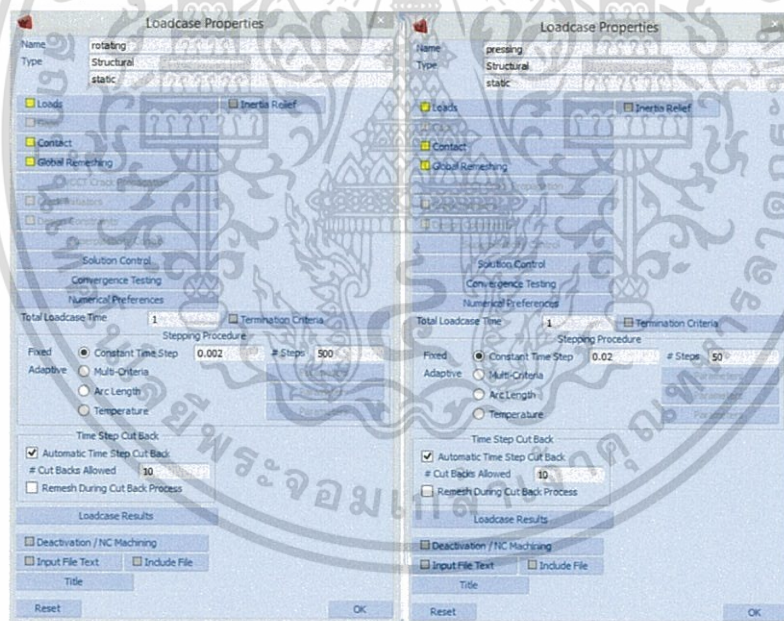
เป็นการตั้งค่าสำหรับการคำนวณเพื่อหาคำตอบของการเสียรูปของ mesh การตั้งค่า mesh adaptivity ทำเพื่อสร้าง mesh ขึ้นมาใหม่ให้มีขนาดตามที่กำหนดไว้ โดยที่กำหนดเป็นแบบ cylindrical ส่วนคำสั่งอื่นที่ไม่ได้ถูกกล่าวถึงให้ใช้ค่าเริ่มต้นของโปรแกรม ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 หน้าต่างการตั้งค่า mesh adaptivity หรือการ remeshing

5. กำหนด load case

คือการตั้งค่า step คือการตั้งค่าขั้นตอนการคำนวณให้แบ่งย่อย ให้ผลที่ได้ละเอียดมากขึ้นโดยใช้จำนวน step ทหารด้วยเวลายิ่งจำนวน step มากยิ่งละเอียด และใช้เวลาในการคำนวณมากขึ้น

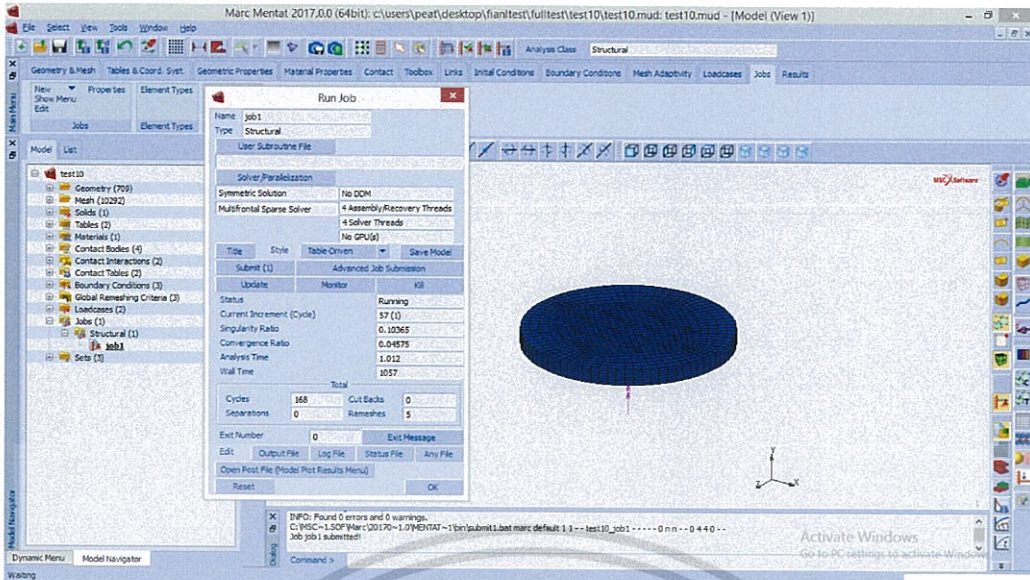


รูปที่ 3.11 หน้าต่างการกำหนดload case ของการบิด(ซ้าย)และการกด(ขวา)

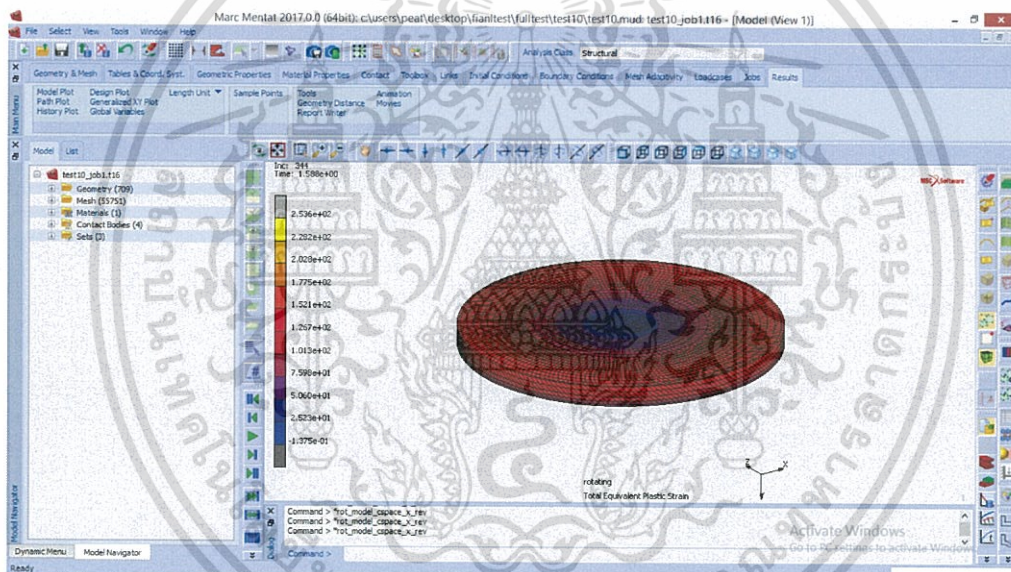
6. เข้าสู่กระบวนการคำนวณและประมวลผล

ใช้คำสั่ง Job > Run > Submit เพื่อเริ่มกระบวนการคำนวณและจะขึ้นหน้าต่างการประมวลผล ระยะเวลาที่ใช้ในการประมวลผลขึ้นอยู่กับความสามารถในการคำนวณของคอมพิวเตอร์แต่ละเครื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 แสดงหน้าต่างการประมวลผล



รูปที่ 3.13 แสดงผลการแสดงค่าความเครียด Equivalent plastic

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การศึกษาสมบัติเชิงกล (Part II)

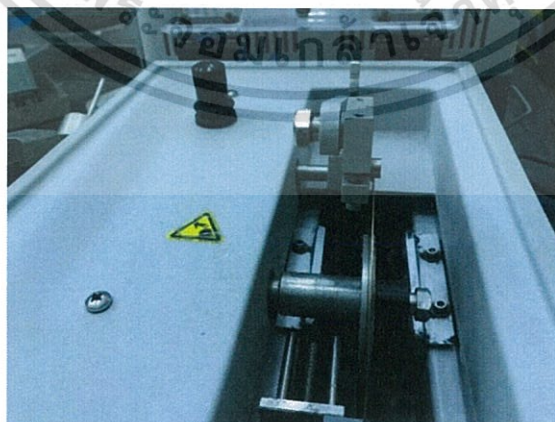
3.3.1 การเตรียมวัสดุ

1. ทำการกลึงแท่งทรงกระบอกตัน Ti-6Al-4V ELI จากเดิมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.6 มิลลิเมตร ให้เหลือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร โดยมีความยาวแต่ละแท่งเป็น 100 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 แสดงการกลึงเพื่อลดขนาดด้วยเครื่อง CNC

2. นำแท่งทรงกระบอกตัน ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ยาว 100 มิลลิเมตร มาทำการตัดด้วยเครื่องตัดละเอียดดังรูปที่ 3.15 ให้ลักษณะเป็นดิสก์ที่มีความหนาประมาณ 1 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.15 การตัดชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องตัดละเอียด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. นำชิ้นงานลักษณะดิสก์ที่ได้มาขัดให้มีความหนาสุดท้ายอยู่ในช่วง 0.8-0.85 มิลลิเมตร ด้วยกระดาษทราย silicon carbide (SiC) ตั้งแต่เบอร์ 180, 240, 400, 600, 800, 1200 grit ดังแสดงรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 การขัดชิ้นงานด้วยกระดาษทราย silicon carbide ให้ได้ความหนาที่กำหนด

3.3.2 กระบวนการขึ้นรูปโดยวิธีไฮเพรสเชอร์ทอร์ชัน

ชิ้นงานทดสอบ Ti-6Al-4V ELI ในรูปของดิสก์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร จะถูกนำไปผ่านกระบวนการผลิตเพื่อที่จะทำให้เกรนละเอียดขึ้นโดยใช้หลักการการทำให้วัสดุเสียรูปถาวรอย่างรุนแรง (severe plastic deformation, SPD) ดังที่กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ การขึ้นรูปโลหะแบบทำให้เสียรูปถาวรอย่างรุนแรง (severe plastic deformation, SPD) ซึ่งในโครงการวิจัยนี้จะทำการศึกษาวัสดุเกรนละเอียดที่ผลิตโดยวิธี ไฮเพรสเชอร์ทอร์ชัน (high-pressure torsion, HPT) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 โดยมีเงื่อนไขการทดสอบดังตารางที่ 3.3 โดยตัวแปรคงที่ได้แก่ อุณหภูมิ ความดัน ความเร็วรอบ แต่จะมีการแปรผันจำนวนรอบ ซึ่งก็คือความเครียดที่กระทำ (imposed strain) กับชิ้นงานทดสอบ เพื่อจะใช้ในการศึกษาวิวัฒนาการของโครงสร้างและสมบัติของวัสดุภายใต้ความเครียดที่กระทำกับชิ้นงานทดสอบ

ตารางที่ 3.3 แสดงเงื่อนไขการผลิตแบบไฮเพรสเชอร์ทอร์ชัน (HPT)

เงื่อนไขการผลิตแบบ HPT ของ Ti-6Al-4V ELI	
อุณหภูมิ (°C)	อุณหภูมิห้อง
ความดัน (GPa)	6.0
ความเร็วรอบ (rpm)	1.5
จำนวนรอบ (รอบ)	1/4, 1/2, 2, 5 และ 10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 การศึกษาสมบัติทางกล

ในเทอมของความแข็ง (hardness) คุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานก่อนและหลังการผลิตแบบ HPT ถูกพิจารณาเปรียบเทียบกันโดยมีขั้นตอนการหาค่าความแข็งดังต่อไปนี้

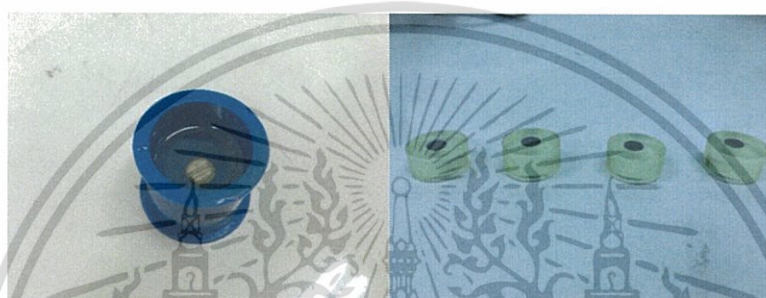
1. การเตรียมชิ้นงานเพื่อวัดค่าความแข็ง

การเตรียมชิ้นงานเพื่อวัดค่าความแข็งมีรายละเอียดขั้นตอนดังต่อไปนี้

1.1 การขึ้นเรือน (mounting) ใช้การขึ้นเรือนแบบร้อน (hot mounting)

1.2 การขัด (grinding) เป็นการขัดด้วยกระดาษทราย SiC จากเบอร์หยาบจนถึงเบอร์ 1200 grit

1.3 การขึ้นเรือน (mounting) ใช้การขึ้นเรือนแบบเรซินดังรูป 3.17



รูปที่ 3.17 แสดงชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการ mounting

1.4 การขัด (grinding) ทำการขัดด้านที่มีผิวหน้าของชิ้นงานทดสอบ โดยขัดด้วยกระดาษทราย SiC ตั้งแต่เบอร์ grit size ตามมาตรฐาน ANSI คือเบอร์ 180, 240, 400, 600, 800, 1200 ตามลำดับ โดยเปิดใช้น้ำเป็นตัวหล่อลื่นตลอดการขัด และขัดแบบ fixed abrasive bonding

1.5 การขัดเงา (polishing) ด้วยผ้าขัดด้วยน้ำยาขัด diamond suspension ขนาด 6 ไมครอน และ 3 ไมครอน ตามลำดับ

2. วิธีการวัดค่าความแข็ง

การวัดค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบนั้นจะใช้การวัดความแข็งระดับจุลภาค (microhardness) โดยใช้วิธีการทดสอบความแข็งจุลภาคแบบวิกเกอร์ส (Vickers microhardness test) Buehler TUKON 1102 ดังรูปที่ รูปที่ 3.18 ด้วยโหลด 500 กรัมแรง เป็น Dwell time 15 วินาที โดยการวัดความแข็งจะมีแบ่งออกเป็น 2 แบบ ถูกแสดงรายละเอียดดังรูปที่ 3.20 ดังนี้

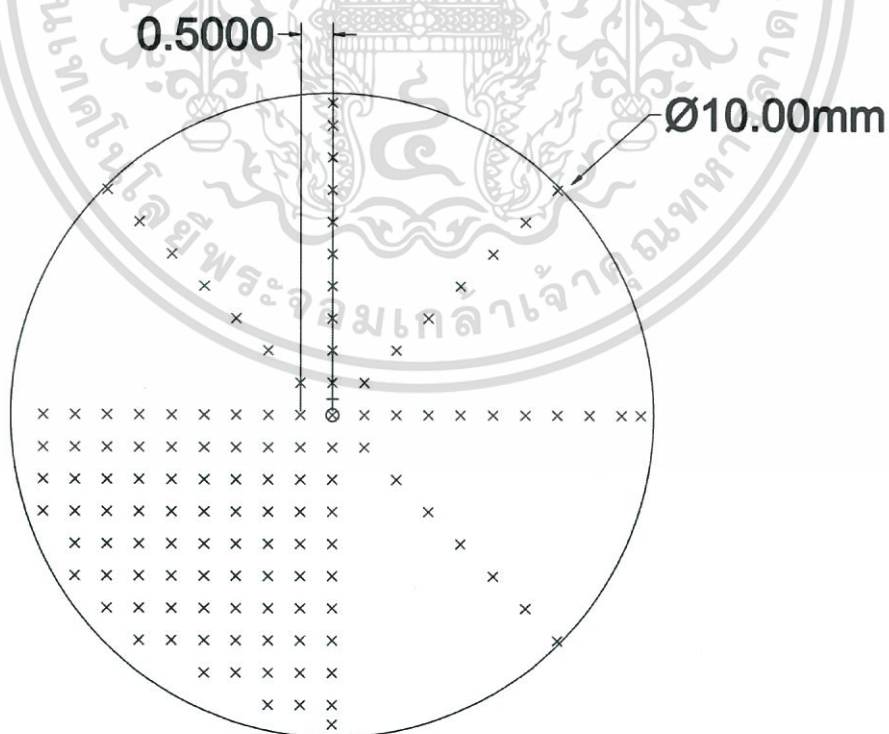
2.1 การวัดความแข็งเฉลี่ยตามแนวเส้นผ่านศูนย์กลางของแต่ละชิ้นงานทดสอบ เพื่อศึกษาการค่าความแข็งที่ขึ้นอยู่กับตำแหน่งที่แปรผันจากจุดศูนย์กลางถึงขอบของชิ้นงาน โดยแต่ละตำแหน่งจะห่างกัน 0.5 mm จากนั้นคำนวณหาค่าความแข็งเฉลี่ยแต่ละตำแหน่งจาก 7 แนวเส้นผ่านศูนย์กลาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 เป็นการวัดการกระจายความแข็งที่ตำแหน่งต่างๆ (distribution of local hardness) ที่พื้นที่ 1 ใน 4 ของผิวชิ้นงาน เนื่องจากลักษณะการเสียรูปตลอดผิวชิ้นงานสมมาตรกันจึงทำการวัดแค่ 1 ควอดแรนต์



รูปที่ 3.18 เครื่องวัดความแข็ง Buehler TUKON 1102



รูปที่ 3.19 แสดงตำแหน่งที่วัดความแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

4.1 การวิเคราะห์พฤติกรรมความเค้น-ความเครียดโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

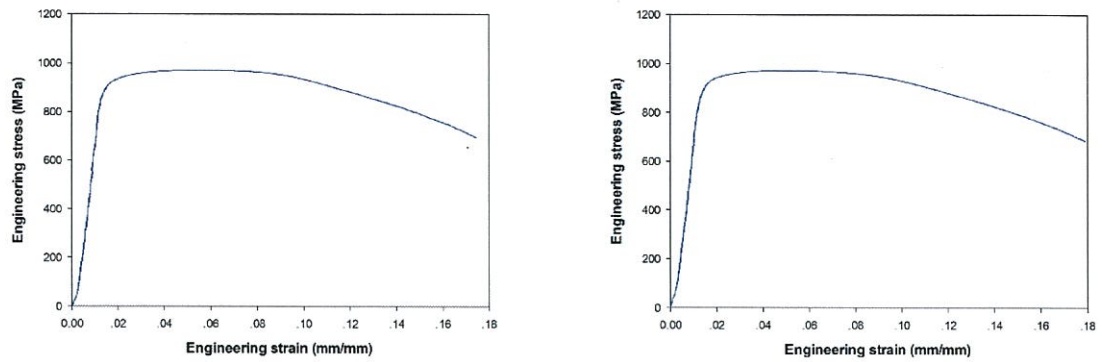
4.1.1 ผลการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานเพื่อหาสมบัติของวัสดุ

การทดสอบแรงดึงเพื่อใช้หาค่าคุณสมบัติของวัสดุเพื่อใช้ในการจำลองคอมพิวเตอร์ โดยค่าที่ได้เป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบชิ้นงานจำนวน 2 ชิ้น เพื่อให้ข้อมูลมีความถูกต้องและแม่นยำมากขึ้น กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดเชิงวิศวกรรม และความเค้นกับความเครียดจริง แสดงไว้ในรูปที่ 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ ซึ่งจากกราฟความสัมพันธ์ของความเค้นกับความเครียดพบว่าวัสดุแสดงพฤติกรรมการตอบสนองต่อภายใต้แรงดึงที่มากกระทำตามรูปแบบวัสดุเหนียวคือมีช่วงการเสียรูปถาวร (plastic deformation) อย่างเห็นได้ชัดดังรูปที่ 4.1 ก่อนที่จะเกิดความเสียหายขึ้น โดยตารางที่ 4.1 แสดงค่าความยืดหยุ่น (modulus of elasticity) ค่าความต้านแรงดึงสูงสุด (ultimate tensile strength) ค่าความต้านแรง ณ จุดคราก (yield stress, 0.2% offset) และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (Percent elongation) ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยจากการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานที่มีอัตราความเครียด (strain rate) $4.5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ทั้งหมด 2 ชิ้น โดยจะนำค่าที่ได้จากการทดสอบไปเป็นข้อมูลสำหรับการกำหนดสมบัติเชิงกลของวัสดุในโปรแกรมจำลองด้วยคอมพิวเตอร์เป็นขั้นตอนต่อไป

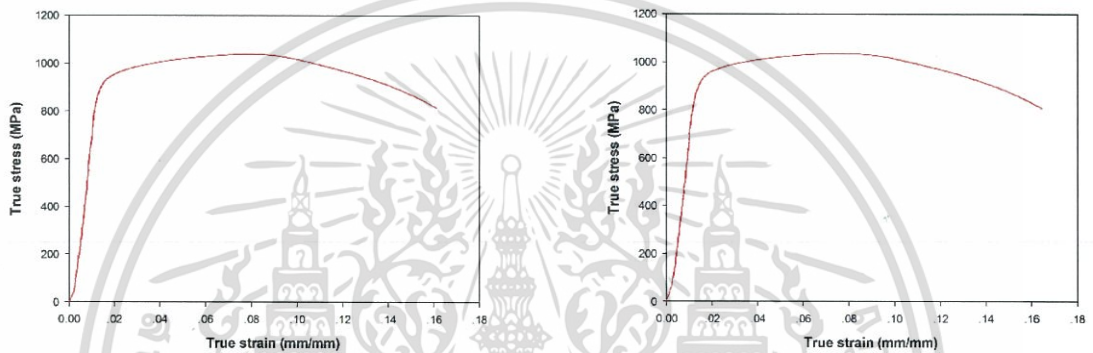


รูปที่ 4.1 วัสดุเมื่อผ่านการทดสอบการดึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดเชิงวิศวกรรมขั้นที่ 1 (ซ้าย) และขั้นที่ 2 (ขวา)



รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดจริงขั้นที่ 1 (ซ้าย) และขั้นที่ 2 (ขวา)

ตารางที่ 4.1 สมบัติเชิงกลของวัสดุจากการทดสอบแรงดึง

	ชิ้นงานที่ 1	ชิ้นงานที่ 2	ค่าเฉลี่ย
Modulus of elasticity, E (GPa)	109.8	103.8	106.8
Ultimate tensile strength, UTS (MPa)	912.5	925.0	975.7
Yield stress(Offset 0.2%), σ_y (MPa)	970.8	971.9	926.3
Percent elongation (%)	17.5	17.9	17.7

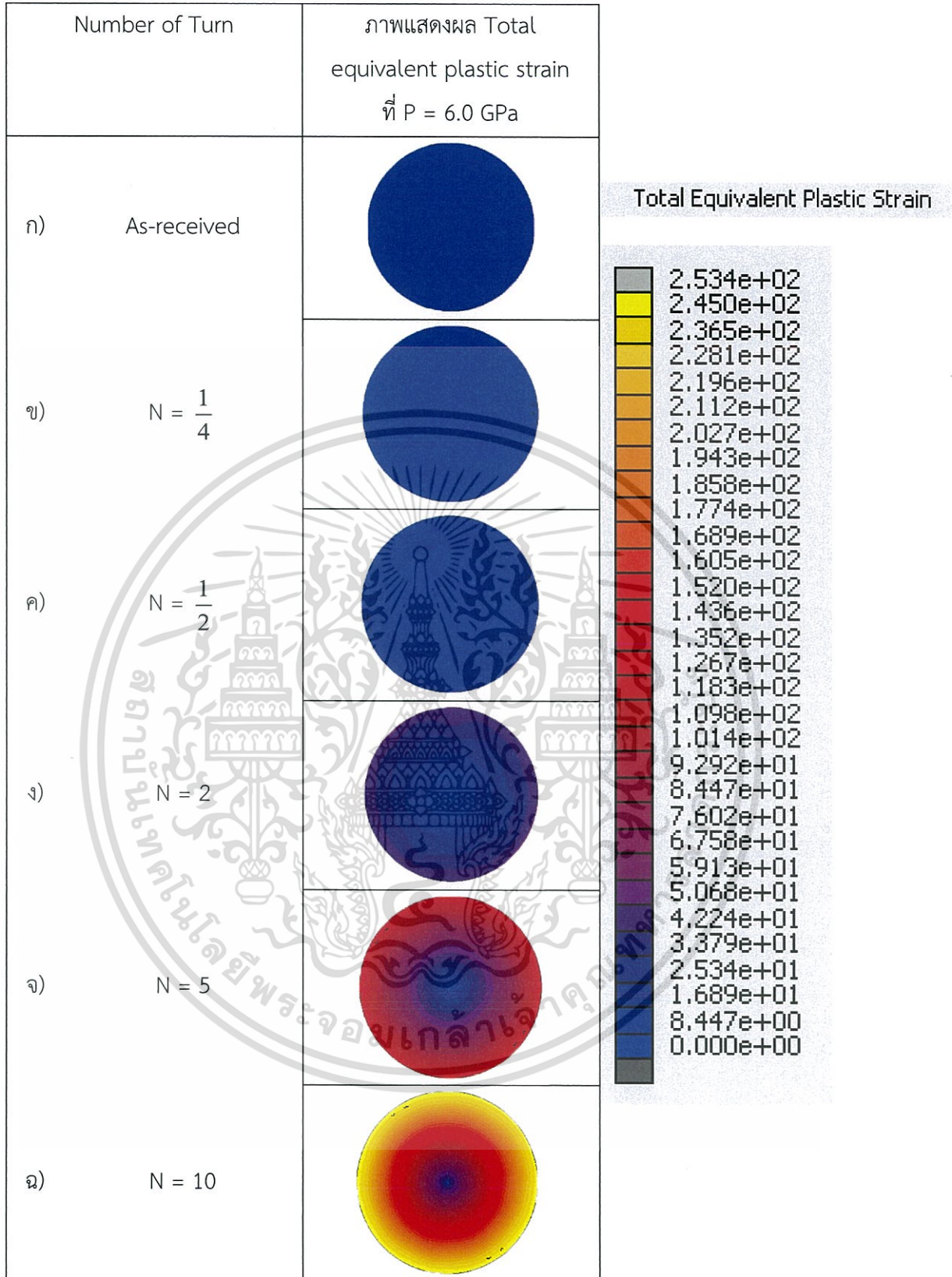
4.1.2 การจำลองกระบวนการไฮเพอร์เซอร์ทอร์ชันด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ผลการจำลองกระบวนการเสียรูปของชิ้นงานที่เงื่อนไขกึ่งจำกัดการไหล (quasi-constrained) ผ่านวิธีระเบียบการไฟไนต์เอลิเมนต์ ด้วยโปรแกรม Marc Mentat จะได้ผลความเครียดพลาสติก equivalent (equivalent plastic strain, PEEQ) ดังรูปที่ 4.4 แสดงผลจากการจำลองการกระจายของค่า PEEQ บน Ti-6Al-4V ELI ที่ผ่านกระบวนการ HPT ที่มีค่าความแตกต่างของจำนวนรอบของแรงบิดตามเงื่อนไขการทดลองการกระจายของ PEEQ ซึ่งส่วนของชิ้นงานสัมผัสกับพื้นผิวของเครื่องจักร เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.4 ก)-จ) ที่แสดงถึงชิ้นงานผ่านการบิดเอกซอร์ชันเป็นเอกซอร์ชันที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำนวน $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$, 2, 5 และ 10 ตามลำดับ ที่ค่าความดันคงที่ เท่ากับ 10 GPa โดยการเพิ่มจำนวนรอบจะทำให้จำนวนของค่าของการกระจายของ PEEQ เพิ่มขึ้นจากการพิจารณาผลดังกล่าวข้างต้น เมื่อเพิ่มรอบการบิดจะส่งผลให้ค่า PEEQ ที่เกิดขึ้นที่ขอบนอกไล่เข้าสู่ศูนย์กลางแสดงให้เห็นว่ารัศมีมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงแปรผันจากรัศมีกับจำนวนรอบ ตามสมการทฤษฎี equivalent von Mises strain



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 ภาพแสดง PEEQ ที่ชิ้นงาน Ti-6Al-4V ELI บริเวณผิวสัมผัสกับ anvil ด้านล่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 สมบัติเชิงกลของวัสดุ

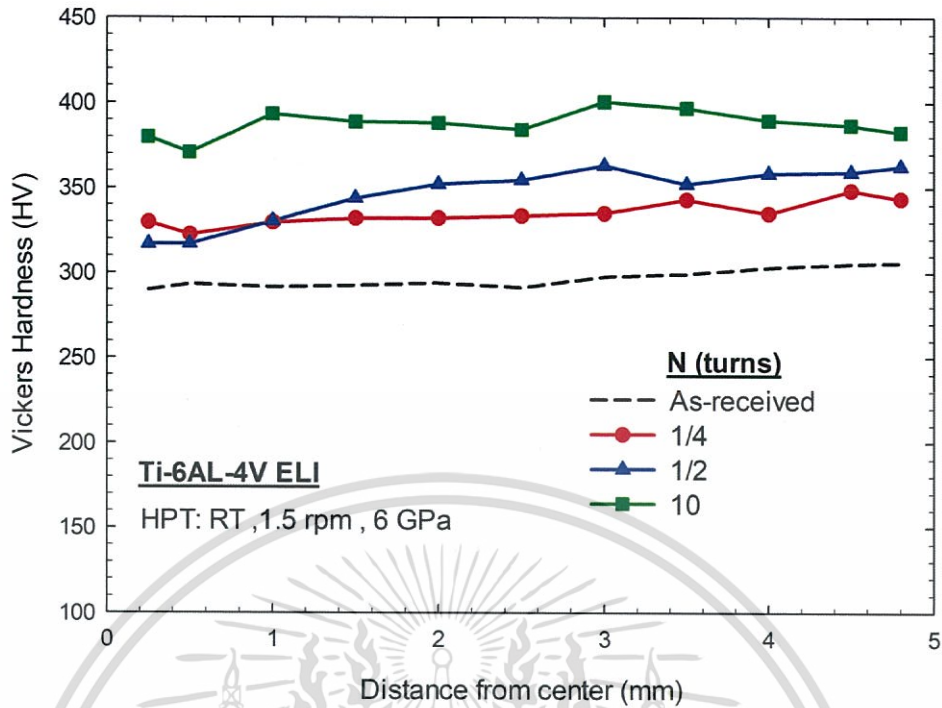
4.2.1 ผลของจำนวนรอบต่อค่าความแข็งระดับจุลภาค

จากรูปที่ 4.5 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางจากจุดศูนย์กลางชิ้นงานเทียบกับค่าความแข็งแบบจุลภาคเฉลี่ย (microhardness) ในแนวรัศมีมีจำนวน 7 เส้น ที่จำนวนรอบการบิดต่างกัน ที่ความดันคงที่ เพื่อแสดงถึงผลกระทบของของจำนวนรอบ รูปที่ 4.6 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบเทียบกับค่าความแข็งแบบจุลภาคเฉลี่ย (microhardness) ในแต่ละจำนวนรอบ เมื่อความดันคงที่ จากรูปที่ 4.5 และ 4.6 ถูกพบว่าโดยภาพรวมของการเพิ่มจำนวนรอบ ค่าความแข็งแบบจุลภาคเฉลี่ยจะเพิ่มขึ้นมา โดยทั้ง 3 กรณีพบค่าสูงสุดที่ความดัน คงที่ $N = 10$ คือ 390 HV

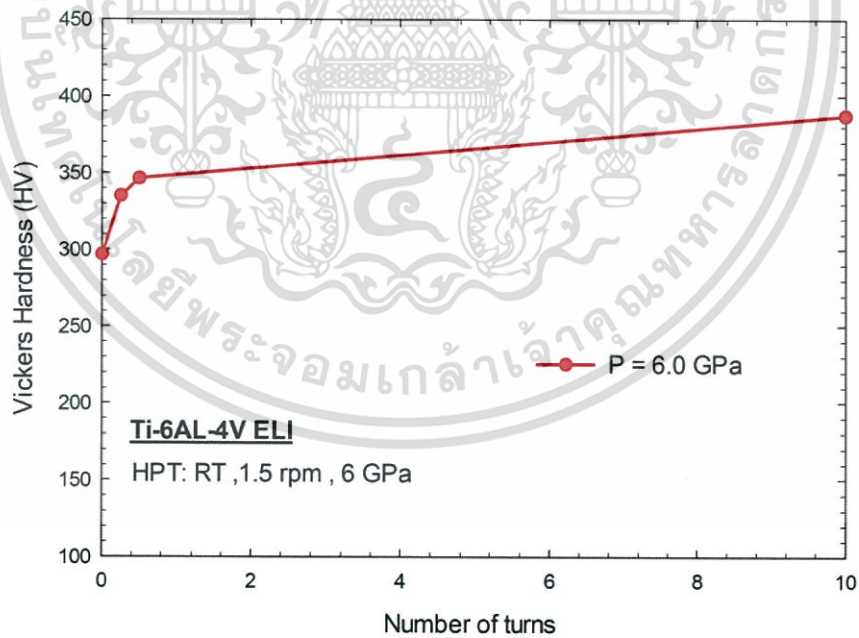
จากรูปที่ 4.5 แสดงให้ค่าความแข็งแบบจุลภาคเฉลี่ยในแนวรัศมีมีจำนวน 7 เส้น ของวัสดุที่ถูกเพิ่มของจำนวนรอบได้แก่ $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ และ 10 รอบ มีช่วงของค่าความแข็งระดับจุลภาคบริเวณกลางที่ผิวของดิสก์เพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 311.0-348.5 HV, 317.0-366.7 HV, และ 372.9-400.6 ตามลำดับ โดยพบว่าเมื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งที่จุดศูนย์กลางชิ้นงานกับจุดที่เพิ่มระยะห่างออกจากจุดศูนย์กลาง ค่าความแข็งแบบจุลภาคที่บริเวณขอบของชิ้นงานสูงกว่าค่าบริเวณจุดศูนย์กลางของชิ้นงาน และโดยรอบ และจากความแตกต่างของค่าความแข็งจุลภาค ของวัสดุที่ผ่านการทดลองในแต่ละจำนวนรอบได้แก่ $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ และ 10 รอบเท่ากับ 37.5 HV, 49.7 HV และ 27.7 HV พบว่ามีความแตกต่างของความแข็งน้อยที่สุดอยู่ที่จำนวน 10 รอบเท่ากับ 27.7 HV หรือมีความเป็น Homogenous มากที่สุด

จากรูปที่ 4.6 แสดงให้เห็นอัตราการเพิ่มขึ้นของ ค่าความแข็งแบบจุลภาคเฉลี่ย (microhardness) ในช่วง $\frac{1}{4}$ - $\frac{1}{2}$ รอบเพิ่มขึ้นและ ในช่วง $\frac{1}{2}$ - 10 รอบลดลง

ดังนั้นสามารถสรุป การเกิดของความเครียดแข็ง (strain hardening) และความหนาแน่นของการเลื่อน (dislocation) เกิดขึ้นเนื่องจากการปรับให้มีความเสียหายมาก



รูปที่ 4.5 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางจากจุดศูนย์กลางชิ้นงานเทียบกับค่าความแข็งแบบจุลภาคเฉลี่ย (Microhardness) ในแนวรัศมีจำนวน 7 เส้น ที่จำนวนรอบการบิดต่างกัน



รูปที่ 4.6 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบเทียบกับค่าความแข็งแบบจุลภาคเฉลี่ย (microhardness) ในแต่ละจำนวนรอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 ผลของการกระจายของความแข็งระดับจุลภาค

จากรูปที่ 4.7 แสดงรูปร่างการกระจายของค่าความแข็งระดับจุลภาคบนพื้นผิวของ anvil หลังกระบวนการ HPT ที่เงื่อนไขกึ่งจำกัดการไหล (quasi-constrained) สำหรับความแตกต่างของจำนวนรอบในเงื่อนไขการทดลอง แสดงการเปรียบเทียบระหว่าง 4.7 ก)-ฉ) ที่ความดันคงที่แสดงให้เห็นการเพิ่มของจำนวนรอบได้แก่ $\frac{1}{4}$ -10 รอบ มีช่วงของค่าความแข็งระดับจุลภาคบริเวณกลางที่ผิวของดิสก์เพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 311.0-348.5 HV, 317.0-366.7 HV, 358.4-405.6 HV, 353.3-381.2 HV และ 372.9-400.6 ตามลำดับ ซึ่งพบว่าเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่เพิ่มจำนวนกับรอบการบิดมากขึ้น ผลของค่าความแข็งแบบจุลภาคเฉลี่ยของชิ้นงานทดสอบมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามจำนวนรอบการบิด และค่าความแข็งในรอบการบิดที่สูงขึ้นนั้นค่าความแข็งที่ขอบนอกสุดเริ่มจะมีการคงตัวและมีแนวโน้มว่าจะไม่เพิ่มขึ้นโดยค่าความแข็งที่รัศมีน้อยลงมาเริ่มมีอัตราการเพิ่มขึ้นที่สูงกว่าที่ขอบนอกสุด ส่งผลให้ค่าความแข็งทั้งชิ้นงานจะเข้าสู่สภาพ homogeneous และจากความแตกต่างของค่าความแข็งจุลภาค ของชิ้นงานที่ผ่านการทดลองในแต่ละจำนวนรอบได้แก่ $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$, 2, 5 และ 10 รอบเท่ากับ 37.5 HV, 49.7 HV, 47.2 HV, 27.9 HV, และ 27.7 HV พบว่ามีความแตกต่างของความแข็งน้อยที่สุดอยู่ที่จำนวน 10 รอบเท่ากับ 27.7 HV หรือมีความเป็น Homogenous มากที่สุด และมีความแข็งเฉลี่ยสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 390 HV อีกทั้งเมื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งแบบจุลภาคแบบจุดในจำนวนรอบที่เท่ากัน พบว่าค่าความแข็งที่จุดศูนย์กลางชิ้นงานกับจุดที่เพิ่มระยะห่างออกจากจุดศูนย์กลาง มีค่าความแข็งแบบจุลภาคที่บริเวณขอบของชิ้นงานสูงกว่าค่าบริเวณจุดศูนย์กลางของชิ้นงานและโดยรอบ

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยเรื่องโครงสร้างจุลภาคและสมบัติของโลหะผสม Ti-6Al-4V ELI ที่ผ่านกระบวนการผลิตด้วยเทคนิคการทำให้เสียรูปถาวรอย่างรุนแรง ในการศึกษาครั้งนี้ ได้แบ่งการวิเคราะห์คุณสมบัติของวัสดุหลังจากผ่านกระบวนการไฮเพอร์เซอร์ทอชั้นออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของการศึกษาพฤติกรรมการเสียรูปของวัสดุเมื่อผ่านกระบวนการผลิตด้วยเทคนิคการทำให้เสียรูปถาวรอย่างรุนแรง โดยระเบียบการวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ ด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ (computer simulation) และส่วนของการวัดค่าความแข็งของวัสดุด้วยการทดสอบจริง (hardness measurement) สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

5.1.1 การวิเคราะห์พฤติกรรมการเสียรูปโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

จากการศึกษาการเสียรูปของวัสดุเมื่อผ่านกระบวนการผลิตด้วยเทคนิคการทำให้เสียรูปถาวรอย่างรุนแรง ที่สังเกตได้จากความเครียด equivalent plastic ของวัสดุด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ (computer simulation) โดยระเบียบการวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ มี 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนของการหาวัสดุเชิงกลโดยการทดสอบแรงดึง และการจำลองทางคอมพิวเตอร์ (computer simulation)

1. ผลการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานเพื่อหาสมบัติเชิงกลของวัสดุของวัสดุ

การหาคุณสมบัติทางกลของวัสดุด้วยทดสอบแรงดึงที่ทราบ โดยใช้ค่าเฉลี่ยจากการทดสอบของชิ้นงาน 2 ชิ้น พบว่าได้ค่า $E = 106.791 \text{ GPa}$, $UTS = 975.68 \text{ MPa}$, Yield stress = 926.33 MPa และ Percent elongation = 17.669% ซึ่งจะถูกนำไปใช้ในการวิเคราะห์การเสียรูปของวัสดุ ด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ (computer simulation)

2. การจำลองกระบวนการไฮเพอร์เซอร์ทอชั้นด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

พบว่าผลการทดสอบมีแนวโน้มว่า ชิ้นงานได้รับค่าความเครียด equivalent plastic เพิ่มขึ้นตามจำนวนรอบและระยะจากจุดศูนย์กลาง โดยที่ค่าความเครียดที่ชิ้นงานได้รับที่สอดคล้องกับค่าความแข็งของวัสดุที่เพิ่มขึ้น ซึ่งตรงกับสมการ equivalent von mises strain ที่ค่ารัศมีเพิ่มขึ้นจะเพิ่มค่าความเครียด equivalent ด้วย

5.1.2 การวัดค่าความแข็งด้วยการทดสอบจริง

การวัดค่าความแข็งของวัสดุด้วยการทดสอบจริง โดยใช้วิธีการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ส โดยวัดค่าความแข็งกับชิ้นงานก่อนและหลังทดสอบกระบวนการผลิตด้วยเทคนิคการทำให้เสียรูปถาวรอย่างรุนแรง โดยมีการวิเคราะห์ดังนี้

1. ผลของจำนวนรอบต่อค่าความแข็งระดับจุลภาค

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าจำนวนรอบการบิดต่างกัน มีผลกระทบต่อความแข็งแบบจุลภาคเฉลี่ย โดยการเพิ่มจำนวนรอบโดยภาพรวมจะมีผลให้ค่าความแข็งแบบจุลภาคเฉลี่ยจะเพิ่มขึ้นมาดังรูปที่ 4.5 และ 4.6 ซึ่งพบว่าทั้ง 3 กรณีพบค่าสูงสุดที่ความดัน คงที่ $N = 10$

ดังนั้นสามารถสรุป การเกิดของความเครียดแข็ง (strain hardening) และความหนาแน่นของการเลื่อน (dislocation) ดังหัวข้อที่ 2.3 เกิดขึ้นเนื่องจากการปรับให้มีความเสียหายมากหรือการเกิด Bulk deformation processes ซึ่งเป็นกระบวนการขึ้นรูปที่มีการเสียรูปและเปลี่ยนแปลงรูปร่างเกิดขึ้นกับชิ้นงานเป็นอย่างมาก

เมื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งที่จุดศูนย์กลางชิ้นงานกับจุดที่เพิ่มระยะห่างออกจากจุดศูนย์กลาง ค่าความแข็งแบบจุลภาคที่บริเวณขอบของชิ้นงานสูงกว่าค่าบริเวณจุดศูนย์กลางของชิ้นงานและโดยรอบ และมีความเป็น Homogenous ซึ่งมีความตรงกับสมการ equivalent von mises strain เนื่องจากการวิจัยดังกล่าว ผลของค่าความแข็งจะต้องค่าความแข็งแบบจุลภาคที่บริเวณขอบของชิ้นงานสูงกว่าค่าบริเวณจุดศูนย์กลางของชิ้นงาน และจะมีค่าในแต่ละจุดที่ใกล้เคียงมากขึ้นเมื่อมีการเพิ่มจำนวนรอบ

2. ผลของการกระจายของความแข็งระดับจุลภาค

จากผลการทดสอบพบว่าค่าความแข็งแบบจุลภาคเฉลี่ยของชิ้นงานทดสอบมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามจำนวนรอบการบิดที่เพิ่มขึ้น และค่าความแข็งในแต่ละชิ้นงานในจุดที่มีระยะห่างจากจุดศูนย์กลางที่มากขึ้นจะมีค่าความแข็งมากกว่ามากกว่าจุดที่ใกล้เคียงจุดศูนย์กลาง ดังรูปที่ 4.7 และยังส่งผลให้ค่าความแข็งแบบจุลภาคของชิ้นงานทดสอบมีคุณสมบัติใกล้เคียงกันแบบเป็นเนื้อเดียวกันทั่วทั้งชิ้นงานเพิ่มมากขึ้นในจำนวนรอบที่สูงขึ้น กล่าวคือค่าความแข็งจะเริ่มมีค่าสม่ำเสมอมากขึ้นในชิ้นงานทดสอบที่มีรอบสูงขึ้น ซึ่งผลการทดลองทั้งหมดนี้มีความสอดคล้องกับสมมติฐานที่ตั้งไว้

5.1.3 การเปรียบเทียบระหว่างการจำลองทางคอมพิวเตอร์และการทดสอบ

จากการพิจารณาของผลที่กล่าวมาข้างต้น จะสรุปได้ว่าการเพิ่มขึ้นของจำนวนรอบจำนวนของ PEEQ จะเพิ่มขึ้นที่ทั่วทั้งดิสก์ และการเปรียบเทียบของ experimental และ simulation แสดงว่าค่าความแข็งแบบจุลภาค และความเครียดที่ตรงกลางสูงกว่าบริเวณอื่นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษาต่อไปคือการศึกษาคุณสมบัติของวัสดุเพิ่มเติมในด้านอื่น เช่น การศึกษาโครงสร้างทางจุลภาค การทดสอบการสึกหรอ คุณสมบัติการต้านทานการกัดกร่อน เพื่อศึกษาหาข้อดีหรือข้อบกพร่องเพิ่มเติมของวัสดุ ซึ่งจะช่วยให้สามารถระบุข้อจำกัดของวัสดุรวมถึงสามารถกำหนดจุดประสงค์ที่จะนำไปใช้ให้มีความหลากหลายได้มากยิ่งขึ้น ในส่วนของการจำลองทางคอมพิวเตอร์ควรกำหนด mesh element ของระบบให้ละเอียดมากยิ่งขึ้น เพราะข้อมูลส่วนนี้จะช่วยให้ได้รับผลลัพธ์จากการจำลองที่ใกล้เคียงกับการทดสอบจริงมากขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] E.O. Hall. 1951. "The Deformation and Ageing of Mild Steel: III Discussion of Results." **Proceedings of the Physical Society Section B.** 64(9): 747.
- [2] N. J. Petch. 1953. "The Cleavage Strength of Polycrystals." **Journal of the Iron and Steel Institute.** (174): 25.
- [3] Y.T. Zhu, T.C. Lowe, T.G. Langdon. 2004 "Performance and applications of nanostructured materials produced by severe plastic deformation" **Scripta Materialia** 51, 825
- [4] M.P. Groover. 2013. **Principles of Modern Manufacturing**, 5th ed., John Wiley & Sons, Inc.
- [5] R.Z. Valiev, Terence G.Langdon. 2006. "Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement." **Progress in Materials Science.** 51(7), 881.
- [6] Y. Iwahashi, J. Wang, Z.Horita, M. Nemoto, T.G. Langdon. 1996. "Principle of equal-channel angular pressing for the processing of ultra-fine grained materials", **Scripta materialia** 35(2), 143.
- [7] Y. Wu, I. Baker. 1997 "Experimental study of equal channel angle extrusion" **Scripta materialia.** 37, 437.
- [8] K. Nakashima, Z. Horita, M. Nemoto, T.G. Langdon. 1998 "Influence of channel angle on the development of ultrafine grains in equal-channel angular pressing", **Acta Materialia.** 46(5), 1589.
- [9] A. P. Zhilyaev, Terence G. Langdon. 2008. "Using high-pressure torsion for metal processing: Fundamentals and applications." **Progress in Materials Science** 53 (6), 893.
- [10] Zenji Horita, Terence G. Langdon. 2008. "The evolution of homogeneity in an aluminum alloy processed using high-pressure torsion", **Acta Materialia** 56(18), 5168.
- [11] Alexander P.Zhilyaev, Terence G.Langdon. 2008 "Using high-pressure torsion for metal processing: Fundamentals and applications." **Progress in Materials Science** 53(6), 893-979
- [12] ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. 2017. Hardness [Online]. Available at: <https://>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

www.mtec.or.th/mcu/phml/index.php/th/2014-09-12-03-39-42/32-2009-04-20-04-14-05

- [13] lnwshop. 2017. Hardness Test [Online]. Available at: <https://www.pballtechno.com/article/22/การทดสอบความแข็ง-hardness-test>,
- [14] Rockwell Hardness Test. [Online]. Available : <https://www.gordonengland.co.uk/hardness/rockwell.htm>
- [15] Z.F. Zhang, J. Eckert, L. Schultz,. (2003) “Difference in compressive and tensile fracture mechanisms of $Zr_{59}Cu_{20}Al_{10}Ni_8Ti_3$ bulk metallic glass” **Acta Materialia** Volume 51, Pages 1167-1179
- [16] Z.F. Zhang, G. He, J. Eckert, L. Schultz, (2003) “Fracture Mechanisms in Bulk Metallic Glassy Materials” *Phys. Rev. Lett.* 91 045505.
- [17] R. Vaidyanathan, M. Dao, G. Ravichandran, S. Suresh (2001) “ Study of mechanical deformation in bulk metallic glass through instrumented indentation” *Acta Mater.* 49 3781–3789.
- [18] H.E. Boyer, T.L. Gall (Eds.), **Metals Handbook**, Desk Edition, ASM International, Metals Park, Ohio, 1985.
- [19] สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน. 2017. วัตถุประสงค์ของการใช้วัสดุการแพทย์ [Online]. Available at: <http://kanchanapisek.or.th/kp6/sub/book/book.php?book=30&chap=9&page=t30-9-infodetail01.html>
- [20] รศ.แมน อมรสิทธิ์, รศ.ดร. สมชัย อัครทิวา และ อ.ธรรมนุญ อุดมมัน. 2008. **วัสดุวิศวกรรม**. McGraw-Hill.
- [21] H.J. Agins, N.W. Alcock, M. Bansal, E. Salvati, P.O. Wilson, P.M. Pellicci, etal. 1988. **Metallic wear in failed titanium-alloy hip replacements** *J Bone Joint Surg Am*, 170A (3), pp. 347-356
- [22] ArcamAB. Ti6Al4V ELI Titanium Alloy [Online]. Available at: <http://www.arcam.com/wp-content/uploads/Arcam-Ti6Al4V-ELI-Titanium-Alloy.pdf>
- [23] Rafael Nunes, J.H. Adams, et.al. 1990. **ASTM Handbook**. vol.2 : permission of ASM International.
- [24] David Roylance. 2001. “**Finite Element Analysis.**” Department of Materials Science and Engineering Massachusetts Institute of Technology Cambridge.
- [25] MARC Analysis Research Corporation. 1999. **Mentat User’s Guide, Version 3.3**.USA: MARC Analysis Research Corporation.
- [26] R.Z. Valiev. 2003. “Paradoxes of Severe Plastic Deformation”, **Advance**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Engineering Materials**, Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA , pp.296-300.
- [27] R. Z. Valiev, A. V. Korznikov, R. R. Mulyukov. 1993. “Structure and properties of ultrafine-grained materials produced by severe plastic deformation” **Materials Science and Engineering**. 168(2): 141-148.
- [28] R.B.Figueiredo P.R. Cetlin, T.G. Langdon. 2011. “Using finite element modeling to examine the flow process in quasi-constrained high-pressure torsion.” **Materials Science and Engineering A** 528, 8198
- [29] Taik Nam Kim, A. Balakrishnan, B. C. Lee, W. S. Kim, B. Dvorankova, K. Smetana, J. K. Park, B. B. Panigrahi. 2008. “In vitro fibroblast response to ultrafine-grained titanium produced by a severe plastic deformation process”, **Journal of Materials Science: Materials in Medicine**, 553-557.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้