



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)

ปริญญญา

วิศวกรรมเครื่องกล

วิศวกรรมเครื่องกล

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การประยุกต์ใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เชิงเส้นจำลองกรรมวิธีการชุบขึ้นรูปร้อนของงาน
ทองเหลือง

Applied Nonlinear Finite Element Analysis for Simulating the Hot Forging Process of
Brass

นามผู้วิจัย นายกิตติกร คำมูล

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์สัจจาทิพย์ ทศนียพันธุ์, M.S.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(อาจารย์จิระชัย มิ่งบรรเจิดสุข, Ph.D.)

ประธานสาขาวิชา

(รองศาสตราจารย์ชวลิต กิตติชัยการ, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การประยุกต์ใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เชิงเส้นจำลองกรรมวิธีการ
ทอบขึ้นรูปร้อนของงานทองเหลือง

Applied Nonlinear Finite Element Analysis for Simulating the Hot Forging Process of Brass

โดย

นายกิติกร คำมูล

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)

พ.ศ. ๒๕๕๕

กิตติกร คำมูล 2555: การประยุกต์ใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เชิงเส้นจำลองกรรมวิธีการ
ทอขึ้นรูปร้อนของงานทองเหลือง ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
(วิศวกรรมเครื่องกล) สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์สัจจาทิพย์ ทศนียพันธุ์, M.S.
153 หน้า

งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้เทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ช่วยงานวิศวกรรม (CAE) ในการ
พยากรณ์รูปทรงสุดท้ายของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการทอขึ้นรูป โดยใช้ซอฟต์แวร์
คอมพิวเตอร์ช่วยออกแบบ (CAD) และซอฟต์แวร์ไฟไนต์เอลิเมนต์ทั่วไป ขนาดของ Billet
สำหรับกระบวนการทอขึ้นรูปร้อนเป็นผลิตภัณฑ์ทองเหลือง เป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญสำหรับการ
ผลิต ขนาดที่เหมาะสมของ Billet จะทำให้ลดเวลาและค่าใช้จ่ายในการผลิต หาก Billet มีขนาด
ใหญ่เกินไป จะทำให้ต้องใช้แรงในการทอขึ้นรูปสูงขึ้นซึ่งเป็นสาเหตุให้อายุการใช้งานของ
แม่พิมพ์และเครื่องทอขึ้นรูปลดลง รวมไปถึงของเสียจาก scrap และเวลาที่ใช้ในการปรับแต่ง
วัสดุที่ใช้เป็นทองเหลืองหรืออัลลอยทองแดง (CuZn40Pb2) แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ
ทองเหลืองได้จากการทดสอบแรงอัดที่อุณหภูมิ 650°C ความสัมพันธ์แบบไม่เชิงเส้นของความ
เค้นและความเครียดของทองเหลืองถูกนำไปประยุกต์ใช้วิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้นด้วยซอฟต์แวร์
MSC.Marc การจำลองการเปลี่ยนรูปทรงของ Billet ในขณะทอขึ้นรูป ได้ใช้แบบจำลองไฟไนต์
เอลิเมนต์ลำดับขั้นตอนและแบบจำลองของวัสดุที่ได้พัฒนาขึ้นมา งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลิตภัณฑ์
ที่ผลิตจริง 3 ชิ้นงาน และทำการเปรียบเทียบกับรูปทรงสุดท้ายของชิ้นงานที่ได้จากการทอขึ้นรูป
ค่าเฉลี่ยของความผิดพลาดจากความหนาของครีบท่อกับ 16.9% ซึ่งวิธีการที่ได้นำเสนอนี้ได้
พิสูจน์ให้เห็นถึงความเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้จำลองกระบวนการทอขึ้นรูปร้อนเพื่อ
พยากรณ์ขนาดและรูปทรงที่เหมาะสมของ Billet โดยได้นำเทคนิคนี้ไปประยุกต์ใช้และสามารถ
ลดน้ำหนักของ Billet ของผลิตภัณฑ์หนึ่งได้ถึง 5.57% ได้เป็นผลสำเร็จ

ลายมือชื่อนิติ

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Kitikorn kummoon 2012: Applied Nonlinear Finite Element Analysis for Simulating the Hot Forging Process of Brass. Master of Engineering (Mechanical Engineering), Major Field: Mechanical Engineering, Department of Mechanical Engineering. Thesis Advisor: Associate Professor Satjarthip Thusneyapan, M.S. 153 pages.

This research applied the Computer-Aided Engineering (CAE) technology to predict the final of the forging product, by the use of available Computer-Aided Design (CAD) and Finite Element Analysis (FEA) software. The size of a Billet for hot forging a brass product is a factor for the production. The optimize size the Billet reduces time and cost of the production. When the Billet size is too large, it leads to higher impact force during the forging which causes to lower lifetime of die and machine; as well as, waste from scrap and retouches time. The material of interested is brass or copper alloy (CuZn40Pb2). A mathematical model of the brass was experimentally obtained by compressing at temperature of 650°C. The non-linear stress-strain relation of the brass was applied to non-linear FEA software, MSC.Marc. The simulation of the deformation of the Billet during the forging was done by using our developed finite-element model, procedures and the material model. The total of three products was studied and compared with the final deformed shapes of the forging workpieces. The average error in the sizes of the flash thickness is 16.9%. Our procedure proved suitable for the simulation of hot forging process specially for prediction the proper size and shape of the Billet; as we applied the technique and successfully reduce the Billet mass of one product by 5.57%.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จตามวัตถุประสงค์ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รศ.สัจจาทิพย์ ทศนียพันธ์ุ ประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่สละเวลาตลอดช่วงทำการศึกษา และวิจัยในการให้คำปรึกษา แนะนำ ตรวจสอบ และช่วยแก้ไขปัญา ให้วิทยานิพนธ์นี้มีความสมบูรณ์ทั้งทางวิชาการและรูปแบบการพิมพ์เสนอรายงานผลวิจัย

ขอกราบขอบพระคุณต่อคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ประกอบด้วย รศ.ดร.สันติ ลักขิตานนท์ ประธานกรรมการ ดร.จิระชัย มิ่งบวรเจตสุข กรรมการร่วม และ ดร.ชาคริต สุวรรณจำรัส ผู้แทนบัณฑิตวิทยาลัย ที่กรุณาให้ข้อเสนอแนะอันเป็นประโยชน์ต่อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

โครงการวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ผู้วิจัยขอขอบคุณ คุณกรรณกร ผลโพธิ์ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ขอขอบพระคุณ คุณพงษ์ศักดิ์ จินดาสุข กรรมการผู้จัดการ บริษัท อาซาฮี-ไทย อัลลอย จำกัด ผู้ให้การสนับสนุนทั้งเรื่องโอกาสและทุนการศึกษา ขอขอบพระคุณ ดร.พงษ์ศักดิ์ ถึงสุข ที่ให้คำปรึกษาแนะนำในการทดสอบสมบัติของวัสดุ ขอขอบคุณ คุณชาญนรินทร์ สาครรัมย์ คุณภาสกร ตั้งชัยพิทักษ์ คุณนิคม การบรรจง และพี่ๆ น้องๆ ที่บริษัท อาซาฮี-ไทย อัลลอย จำกัด ที่ให้คำปรึกษาและอำนวยความสะดวกในการวิจัย ขอขอบคุณ คุณกฤษกร เขาทอง คุณประพันธ์ ธรรมนันทิกุล คุณรวีวัฒน์ รักสัง และน้องๆ ในหน่วยปฏิบัติการวิจัยการออกแบบทางกลและผลิตภัณฑ์ (Mechanical and Product Design Research Laboratory, MPDRL) สำหรับคำแนะนำในทุกๆ ด้าน ขอขอบคุณคุณเสกฐาวรธรรม สุจริตกวัดสกุล วิศวกร ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ที่ให้คำปรึกษาแนะนำในส่วนของการซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการวิจัย

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อกมล คำมูล คุณแม่พนารัตน์ คำมูล ที่ให้การอบรมเลี้ยงดู ส่งเสริม สนับสนุน และเป็นกำลังใจที่ดีตลอดมา จนข้าพเจ้าสำเร็จการศึกษา ประโยชน์อันใดที่พึงมีจากงานวิจัยนี้ย่อมเป็นผลมาจากความกรุณาของทุกท่านที่กล่าวมาข้างต้น ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่ง จึงใคร่ขอขอบพระคุณอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

กิตติกร คำมูล

ตุลาคม 2555

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(12)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	5
อุปกรณ์และวิธีการ	43
อุปกรณ์	50
วิธีการ	60
ผลการวิจัยและวิจารณ์	86
สรุป	147
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	150
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	153

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	แสดงการแบ่งประเภทของกระบวนการขึ้นรูปโลหะก้อน	6
2	แสดงการแบ่งประเภทของกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่น	7
3	แสดงการเปรียบเทียบหลักเครื่องมืองานร้อนตามมาตรฐานของ JIS กับมาตรฐานอื่นๆ	15
4	มาตรฐานของทองเหลือง CuZn40Pb2 เทียบกับมาตรฐานอื่นๆ	18
5	ส่วนผสมทางเคมีของทองเหลือง CuZn40Pb2 ตามมาตรฐาน DIN 17660	18
6	แสดงข้อมูลของ Billet สำหรับทอบขึ้นรูปชิ้นงานฝาประตุน้ำ (VC50)	87
7	ผลการวัดขนาดของชิ้นงานหลังจากทอบขึ้นรูปของชิ้นงานฝาประตุน้ำ (VC50)	87
8	แสดงข้อมูลของ Billet สำหรับการทอบขึ้นรูปชิ้นงานล้นประตุน้ำ (GT50)	89
9	ผลการวัดขนาดของชิ้นงานหลังจากทอบขึ้นรูปของชิ้นงานล้นประตุน้ำ (GT50)	89
10	แสดงข้อมูลของ Billet สำหรับการทอบขึ้นรูปชิ้นงานฝาขันมาตรวัดน้ำ (HC15)	91
11	ผลการวัดขนาดของชิ้นงานหลังจากทอบขึ้นรูปของชิ้นงานฝาขันมาตรวัดน้ำ (HC15)	91
12	แสดงขนาดชิ้นงานก่อนการทดสอบ Ring compression test ที่อุณหภูมิ 650°C	92
13	แสดงขนาดชิ้นงานหลังการทดสอบ Ring compression test ที่อุณหภูมิ 650°C	93
14	การกำหนดตัวแปรสำหรับการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์การกดชิ้นงานทองเหลืองCuZn40Pb2 รูปทรงกระบอกตันแบบ 2 มิติ ที่อุณหภูมิ 650°C	105
15	การกำหนดตัวแปรในการจำลองการทอบขึ้นรูปชิ้นงาน Billet รูปทรงกระบอกตันแบบ 3 มิติ ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	108
16	เปรียบเทียบขนาดจริงกับผล FEA ของชิ้นงานฝาประตุน้ำ (VC50)	124
17	เปรียบเทียบขนาดจริงกับผล FEA ของชิ้นงานล้นประตุน้ำ (GT50)	128
18	เปรียบเทียบขนาดจริงกับผล FEA ของชิ้นงานฝาขันมาตรวัดน้ำ (HC15)	132
19	ผลเปรียบเทียบความหนาที่ 5 ตำแหน่ง ของชิ้นงานจริงกับผล FEA	133
20	แสดงข้อมูล Billet สำหรับการทดสอบการทอบขึ้นรูปที่น้ำหนัก 1.1, 1.15, และ 1.2 เท่าของชิ้นงานล้นประตุน้ำ (GT50)	142

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	แสดงกรรมวิธีการทบขึ้นรูปโดย 1) วัตถุดิบ 2) แม่พิมพ์ 3) แม่พิมพ์และวัสดุที่กำลังถูกขึ้นรูปอยู่ภายในแม่พิมพ์ 4) บริเวณที่เกิดการเสียรูป 5) เครื่องมือที่ช่วยในการทบขึ้นรูป 6) ชิ้นงานสำเร็จ และ 7) Plant environment	8
2	ลำดับการทบขึ้นรูปในแม่พิมพ์	10
3	ก) ภาพแสดงการทบขึ้นรูปโดยมีครีบ และ ข) ลำดับขั้นตอนการทบขึ้นรูปของชิ้นงานก้านสูบ	11
4	การทบขึ้นรูปในแม่พิมพ์ปิดแบบไม่มีครีบ ก) แสดงการขึ้นรูปชิ้นงาน ข) แสดงแม่พิมพ์ที่ใช้ Punch และ ค) แสดงแม่พิมพ์แบบมี Ejector	11
5	ก) และ ข) แสดงกรรมวิธีการทบขึ้นรูปอิสระหรือการทบขึ้นรูปแบบแม่พิมพ์เปิด	12
6	แสดงกรรมวิธีการอยู่	13
7	แสดงกรรมวิธีการทบแนวรัศมี	13
8	ก) กราฟทองแดง-สังกะสี ตามเรย์นอร์ (Reynor) ของความต้านแรงดึง ความยืด และความแข็งของทองเหลืองเทียบกับปริมาณของทองแดง ข) กราฟแสดงเฟสต่างๆ ของทองเหลือง	17
9	โครงสร้างจุลภาคของทองเหลืองเฟส ($\alpha+\beta$) ที่เจือตะกั่วอัลฟาเฟส (α -phase) จะมีสีขาวส่วนตะกั่วจะเป็นรอยดำ	17
10	ก) อุปกรณ์ในการทดสอบแรงอัดเพื่อช่วยให้ชิ้นงานทดสอบอยู่ในแนวตั้งตลอดการทดสอบ และ ข) ลักษณะการจับยึดชิ้นงานและอุปกรณ์ในการทดสอบแรงอัด	20
11	การทดสอบแรงอัดที่อุณหภูมิสูง	20
12	กราฟแสดงการเปรียบเทียบ Engineering Stress-Strain Curve กับ True Stress-Strain Curve	22
13	กราฟแสดงบนแกน Log – Log ของ ความเค้น – ความเครียดจริง ของ อลูมิเนียม (1100-0)	24

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
14	แสดงผลของอัตราความเครียดจริงที่ระดับอุณหภูมิต่างๆ กับ ความเค้นจริงสูงสุดของทองแดง	26
15	แสดงผลของอัตราความเครียดต่อความเค้นคราก ที่อุณหภูมิต่างๆ ของอลูมิเนียมอัลลอย 6063-o	26
16	แสดงความเค้นและความเครียดหรือ Flow curve เมื่อ (ก) มีการเปลี่ยนแปลง ของอุณหภูมิ และ (ข) อัตราความเครียด	27
17	แสดงผลของอุณหภูมิต่อเปอร์เซ็นต์การลดลงของพื้นที่หน้าตัด (Reduction of area, % RA) ของเหล็ก (Iron, Fe) แทนทาลัม (Tantalum, Ta) นิกเกิล (Nickel, Ni) โมลิบดีนัม (Molybdenum, Mo) และทังสเตน (Tungsten, W)	28
18	แสดงผลของอุณหภูมิต่อความเค้นครากของวัสดุที่มีโครงสร้างแบบ BCC (Ta, W, Mo, Fe) และแบบ FCC (Ni)	28
19	แสดงผลของอิทธิพลของอุณหภูมิต่อ Strain hardening exponent (n) ของ อลูมิเนียมบริสุทธิ์	29
20	เปรียบเทียบแบบจำลองความเสียหายคลูอมป์กับความเสียหายที่เกิด ขึ้นจริง	33
21	แสดงอุปกรณ์การทดสอบ Ring Compression Test ที่อุณหภูมิสูง	36
22	แสดงขนาดชิ้นงานรูปวงแหวนสำหรับการทดสอบ Ring Compression Test	37
23	แสดงผลการทดสอบ Ring Compression Test	37
24	การเปลี่ยนแปลงขนาดของชิ้นวงแหวนเมื่อมีความเสียหายน้อย	38
25	การเปลี่ยนแปลงขนาดของชิ้นวงแหวนเมื่อมีความเสียหายมาก	38
26	แสดงการใช้สารหล่อลื่นในกระบวนการทุบขึ้นรูปร้อน	39
27	ขั้นตอนการหล่อขึ้นรูปโดยภาพ ก) แสดงเศษทองเหลืองจาก scrap ที่เป็น วัตถุดิบในการหล่อขึ้นรูป ข) การนำ scrap ใส่เตาหลอม ค) การหลอม scrap และ ง) แสดง Billet ที่ได้จากการหลอมเป็นรูปทรงกระบอก	43

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
28	ขั้นตอนการอัดรีดขึ้นรูปโดยภาพ ก) แสดงแม่พิมพ์ Die ข) แสดงกระบวนการอัดรีดขึ้นรูป ค) แสดง scrap ที่เกิดขึ้นจากการอัดรีดขึ้นรูป และ ง) แสดงเส้นทองเหลือง	44
29	แสดงการตัดเส้นทองเหลืองเพื่อนำไปทุบขึ้นรูปโดยภาพ ก) แสดงการเลื่อยเส้นทองเหลือง และ ข) แสดงก้อนทองเหลืองที่ถูกตัดแล้ว	44
30	แสดงก้อนทองเหลืองขณะถูกให้ความร้อนก่อน (ด้านใน) และชิ้นงานที่ถูกนำไปวางบนแม่พิมพ์	45
31	การติดตั้งแม่พิมพ์บนและล่างที่เครื่องทุบขึ้นรูป	46
32	การให้ความร้อนแก่แม่พิมพ์ตัวบนและตัวล่าง	46
33	แสดงพนักงานนำก้อนทองเหลืองที่ได้รับความร้อนแล้วไปวางบนแม่พิมพ์	47
34	ขั้นตอนการตัดขอบ โดย ก) ชิ้นงานที่ถูกทุบแล้ว ข) ชิ้นงานที่นำไปวางบนแม่พิมพ์ตัดขอบ ค) เศษของขอบที่ถูกตัดทิ้ง และ ง) ชิ้นงานที่ตัดขอบแล้ว	48
35	แสดงการเจาะรูของชิ้นงานที่ได้ตัดขอบแล้ว	48
36	ก) การยิงทรายที่ชิ้นงาน และ ข) ชิ้นงานที่ถูกยิงทรายแล้ว	49
37	ก) ชิ้นงานขณะรอฟันสี และห้องอบสี และ ข) ชิ้นงานที่ฟันสีแล้ว	49
38	เครื่องทุบขึ้นรูปที่ใช้ในการทดลอง	50
39	แสดงแม่พิมพ์ที่ใช้ในการทดลอง โดยภาพ ก) แม่พิมพ์ตัวบนและล่างของชิ้นงานฝาประตุน้ำ ข) แม่พิมพ์ตัวบนและล่างของชิ้นงานลิ้นประตุน้ำ และ ค) แม่พิมพ์ตัวบนและล่างของชิ้นงานฝาขันมาตรวัดน้ำ	51
40	ชิ้นงาน (Billet) ที่ใช้สำหรับการทุบขึ้นรูปฝาประตุน้ำ (VC50)	52
41	ชิ้นงาน (Billet) ที่ใช้สำหรับการทุบขึ้นรูปลิ้นประตุน้ำ (GT50)	52
42	ชิ้นงาน (Billet) ที่ใช้สำหรับการทุบขึ้นรูปฝาขันมาตรวัดน้ำ (HC15)	52
43	ชิ้นงานสำหรับทดสอบ Ring Compression Test	53
44	แสดงเครื่องวัดการยุบตัวที่ใช้ในการทดสอบแรงอัดในสภาวะอุณหภูมิสูง	54
45	แสดงห้องควบคุมอุณหภูมิให้กับชิ้นงานและอุปกรณ์วัดการเคลื่อนที่แบบ LVDT	54

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
46	แสดงชิ้นงานทองเหลืองสำหรับการทดสอบสมบัติทางกลของวัสดุและวัสดุสำหรับใช้ร่อนเพื่อลดความเสียหายในขณะทำการทดสอบ	55
47	เครื่องวัดอุณหภูมิแบบ Infrared Thermometer	56
48	เวอร์เนียแบบ Digital	56
49	เครื่องสแกนสามมิติ รุ่น Model Maker X70	57
50	ซอฟต์แวร์ KUBE	57
51	ชุดแกนกล รุ่น Cimcore 3000i	58
52	Powder Coating แบบ ผุ่นแป้ง รุ่น FD-S Developer	58
53	หน่วยปฏิบัติการวิจัยการออกแบบทางกลและผลิตภัณฑ์ (MPDRL) อาคาร 6 ห้อง 6309 ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน	60
54	แสดงการชั่งน้ำหนักตัวอย่างชิ้นงานทองเหลือง CuZn40Pb2	61
55	แสดงขั้นตอนทดลองชุบขึ้นรูปชิ้นงานฝาประตูน้ำ (VC50) ก) ฟันสารหล่อลื่นบนแม่พิมพ์ ข) นำ Billet วางลงบนแม่พิมพ์ ค) เริ่มการชุบขึ้นรูป ง) ขณะทำการชุบขึ้นรูป จ) ขึ้นรูปเสร็จสิ้น และ ฉ) นำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์	62
56	แสดงขั้นตอนทดลองชุบขึ้นรูปชิ้นงานลิ้นประตูน้ำ (GT50) ก) ฟันสารหล่อลื่นบนแม่พิมพ์ ข) นำ Billet วางลงบนแม่พิมพ์ ค) เริ่มการชุบขึ้นรูป ง) ขณะทำการชุบขึ้นรูป จ) ขึ้นรูปเสร็จสิ้น และ ฉ) นำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์	63
57	แสดงขั้นตอนทดลองชุบขึ้นรูปชิ้นงานฝาชั้นมาตรวัดน้ำ (HC15) ก) ฟันสารหล่อลื่นบนแม่พิมพ์ ข) นำ Billet วางลงบนแม่พิมพ์ ค) เริ่มการชุบขึ้นรูป ง) ขณะทำการชุบขึ้นรูป จ) ขึ้นรูปเสร็จสิ้น และ ฉ) นำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์	64
58	การติดตั้งแม่พิมพ์ที่ใช้ในการทดลอง Ring Compression Test	66
59	ชิ้นงานขณะทำการทดลอง Ring Compression Test ก) ชิ้นงานก่อนการชุบ และ ข) ชิ้นงานหลังการชุบ	66

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
60	Calibration Curve สำหรับการประมาณค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (μ)	67
61	Thermocouple ที่ใช้ในการทดสอบหาสมบัติทางกลของทองเหลือง	67
62	ชิ้นงานทดสอบที่ติดตั้ง Thermocouple แล้ว	68
63	ชิ้นงานทดสอบที่ติดตั้งแผ่น Solid lubrication แล้ว	68
64	แสดงการติดตั้งชิ้นงานทดสอบบนเครื่องวัดการยุบตัว	69
65	แสดงขณะการทดสอบวัสดุที่อุณหภูมิสูงในเครื่องวัดการยุบตัว	69
66	เอลิเมนต์มิติเดียว	71
67	เอลิเมนต์สองมิติ	72
68	เอลิเมนต์สามมิติ	72
69	แสดงความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดในช่วงอีลาสติกและพลาสติก	83
70	แสดงความไม่เชิงเส้นที่เกิดจากการสัมผัส (Contact)	84
71	ลำดับการวิเคราะห์โดยใช้ CAE	85
72	ตัวอย่างชิ้นงานฝาประตุน้ำ (VC50) หลังการทาบขึ้นรูป ของ 3 ตัวอย่างชิ้นงาน	86
73	ตำแหน่งการตรวจวัดชิ้นงานฝาประตุน้ำ (VC50) หลังการทาบขึ้นรูป	86
74	ตัวอย่างชิ้นงานลิ้นประตุน้ำ (GT50) หลังการทาบขึ้นรูป ของ 3 ตัวอย่างชิ้นงาน	88
75	ตำแหน่งการตรวจวัดชิ้นงานลิ้นประตุน้ำ (GT50) หลังการทาบขึ้นรูป	88
76	ตัวอย่างชิ้นงานฝาขันมาตรวัดน้ำ (HC15) หลังการทาบขึ้นรูป ของ 3 ตัวอย่างชิ้นงาน	90
77	ตำแหน่งการตรวจวัดของชิ้นงานฝาขันมาตรวัดน้ำ (HC15) หลังการทาบขึ้นรูป	90
78	แสดงตัวอย่าง ชิ้นงานก่อน ก) และหลัง ข) การทดสอบ Ring compression test เมื่อใช้สารหล่อลื่น 1:10	93
79	แสดงชิ้นงานหลังจากการทดสอบแรงอัดที่อุณหภูมิ 650°C	95
80	กราฟแสดงผลการทดสอบ แรงกดและระยะทาง ของ 10 ชิ้นงานที่อุณหภูมิ 650°C	95

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
81	กราฟแสดง ensemble average (ภาพบน) และ ensample SD (ภาพล่าง) ของการทดสอบแรงกดและระยะทางจากทั้ง 10 ชิ้นงาน	96
82	กราฟแสดงผลการทดสอบแรงกดกับระยะทางกด โดย ก) แสดง ensemble average และขอบเขตของ SD ($\text{avg} \pm \text{SD}$ และ ข) แสดง ensemble average และค่าสูงสุด (Max) และต่ำสุด (Min) ของผลการทดสอบแรงกดกับระยะทางกด	97
83	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นจริงและความเครียดจริงที่บันทึกได้ในขณะทำการทดสอบของชิ้นงานทั้งหมดจำนวน 10 ชิ้น ที่อุณหภูมิ 650°C	98
84	กราฟแสดง ensemble average จาก 10 ชิ้นงาน ของ True Stress กับ True Strain	98
85	กราฟแสดง ensemble SD ของ 10 ชิ้นงาน ของ True stress กับ True strain	99
86	กราฟแสดง ensemble average และขอบเขต SD ($\text{avg} \pm \text{SD}$) ของ True stress กับ True strain	99
87	กราฟแสดง ensemble average และค่าสูงสุด (Max) และต่ำสุด (Min) ของ True Stress กับ True Strain	100
88	กราฟแสดง ensemble average ของ ความเค้นจริงและความเครียดจริงบนกราฟ Log – Log เปรียบเทียบกับสมการที่ (88)	100
89	แสดงการเปรียบเทียบค่าความเค้นจริงในช่วง Plastic ระหว่าง ensemble average ของข้อมูลดิบกับสมการที่ (88)	101
90	แสดงเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของสมการที่ (88) เมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลดิบ (ของภาพที่ 84)	101
91	Surface model ของแม่พิมพ์ฝาประตุน้ำ (VC50)	102
92	Surface model ของแม่พิมพ์ลิ้นประตุน้ำ (GT50)	103
93	Surface model ของแม่พิมพ์ฝาขั้วมาตรวัดน้ำ (HC15)	103

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
94	ผลการสร้างแบบจำลอง FEM การกดชิ้นงานรูปทรงกระบอกตันแบบ 2 มิติ ก) ชิ้นงานจริง ข) ชิ้นงานแบบสมมาตรรอบแกน Z และ ค) การ Mesh ของ แบบจำลองแบบสมมาตรรอบแกน Z	105
95	ผลการสร้างแบบจำลอง FEM การกดชิ้นงานรูปทรงกระบอกตันแบบ 3 มิติ ก) แสดงการ Mesh และ ข) แสดงการกำหนด Upper die และ Lower die ในการกดชิ้นงานทองเหลือง	106
96	ผลการสร้างแบบจำลองการทดสอบ Ring compression test ก) แสดงขนาด ชิ้นงานจริง ข) ชิ้นงานแบบ 2 มิติ และ ค) การ Mesh ของชิ้นงาน	107
97	แสดงผลการสร้าง FEM ของแม่พิมพ์และชิ้นงาน Billet ของฝาประตุน้ำ (VC50)	109
98	แสดงผลการสร้าง FEM ของแม่พิมพ์และชิ้นงาน Billet ของลิ้นประตุน้ำ (GT 50)	111
99	แสดงผลการสร้าง FEM ของแม่พิมพ์และชิ้นงาน Billet ของฝาชัน มาตรวัดน้ำ (HC15)	111
100	ผลการจำลองการกดที่ระยะ 5 mm ของแบบ FEM แบบ 2 มิติ โดย ก) ความ เค้น Von Mises ข) Magnitude ของการเคลื่อนที่ ค) ความเครียดแบบ Total Equivalent Plastic Strain และ ง) ขนาดของชิ้นงานในแนวนอน (แกน X)	113
101	กราฟของแรงและระยะกด เปรียบเทียบผล FEA และผลการทดสอบจริง	114
102	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (% Error) ของผล FEA เมื่อเทียบกับผล การทดลองของการทดสอบการกด	114
103	ผลการจำลองการกดที่ระยะ 5 mm ของแบบ FEM 3 มิติ โดย ก) ความเค้น Von Mises ข) Magnitude ของการเคลื่อนที่ ค) ความเครียดแบบ Total Equivalent Plastic Strain และ ง) ขนาดของชิ้นงานในแนวนอน (แกน X)	116
104	กราฟของแรงและระยะกด เปรียบเทียบผล FEA และผลการทดสอบจริง	117
105	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (% Error) ของผล FEA เมื่อเทียบกับผลการ ทดลองของการทดสอบการกด	117

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
106	ผลการจำลองการกดที่ระยะ 4.25 mm กของแบบ FEM 2 มิติ โดย ก) ความเค้น Von Mises ข) Magnitude ของการเคลื่อนที่ ค) ความเครียดแบบ Total Equivalent Plastic Strain และ ง) ขนาดของชิ้นงานในแนวนอน (แกน X)	119
107	ก) แสดงตำแหน่งชิ้นงานสำหรับสร้างแบบจำลอง FEM ข) ผล FEA แสดงบริเวณที่เกิด Maximum stress และ ค) บริเวณที่เกิดรอยร้าวของชิ้นทดสอบจริง	120
108	แสดงความเค้น Von Mises ของฝาประตุน้ำ (VC50) เมื่อถูกทุบที่ระยะ 25% (9.6 mm), 50% (19.2 mm), 75% (28.79 mm) และ 100% (38.4 mm)	121
109	แสดงค่า Total Equivalent Plastic Strain ของฝาประตุน้ำ (VC50) เมื่อถูกทุบที่ระยะ 25% (9.6 mm), 50% (19.2 mm), 75% (28.79 mm) และ 100% (38.4 mm)	122
110	แสดงความเค้นอัดในทิศทางการกดของฝาประตุน้ำ (VC50) เมื่อถูกทุบที่ระยะ 25% (9.6 mm), 50% (19.2 mm), 75% (28.79 mm) และ 100% (38.4 mm)	123
111	แสดงความเค้น Von Mises ของลิ้นประตุน้ำ (GT 50) เมื่อถูกทุบที่ระยะ 25% (3.12 mm), 50% (6.24 mm), 75% (9.36 mm) และ 100% (12.5 mm)	125
112	แสดง Total Equivalent Plastic Strain ของลิ้นประตุน้ำ (GT 50) เมื่อถูกทุบที่ระยะ 25% (3.12 mm), 50% (6.24 mm), 75% (9.36 mm) และ 100% (12.5 mm)	126
113	แสดงความเค้นอัดในทิศทางการกดของลิ้นประตุน้ำ (GT 50) เมื่อถูกทุบที่ระยะ 25% (3.12 mm), 50% (6.24 mm), 75% (9.36 mm) และ 100% (12.5 mm)	127
114	แสดงความเค้น Von Mises ของฝาขันมาตรวัดน้ำ (HC 15) เมื่อถูกทุบที่ระยะ 25% (10.38 mm), 50% (20.76 mm), 75% (31.14 mm) และ 100% (41.5 mm)	129
115	แสดงค่า Total Equivalent Plastic Strain ของฝาขันมาตรวัดน้ำ (HC 15) เมื่อถูกทุบที่ระยะ 25% (10.38 mm), 50% (20.76 mm), 75% (31.14 mm) และ 100% (41.5 mm)	130

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
116	แสดงความเค้นอัดในทิศทางการกดของฝาชันมาตรวัดน้ำ (HC 15) เมื่อถูกทุบที่ระยะ 25% (10.38 mm), 50% (20.76 mm), 75% (31.14 mm) และ 100% (41.5 mm)	131
117	ก) Point cloud และ ข) ผิวของชิ้นงานลื่นประตุน้ำ (GT50)	132
118	ตำแหน่งการวัดความหนาของครีป (ที่จุดสีดำ)	133
119	แสดงความเค้น Von Mises ของ Billet ที่น้ำหนัก 1.05 เท่า ในขณะที่ถูกทุบที่ระยะ 25% (2.325 mm), 50% (4.65 mm), 75% (6.975 mm) และ 100% (9.3 mm)	135
120	แสดงความเค้น Von Mises ของ Billet ที่น้ำหนัก 1.1 เท่า ในขณะที่ถูกทุบที่ระยะ 25% (2.53 mm), 50% (5.06 mm), 75% (7.59 mm) และ 100% (10.13 mm)	137
121	แสดงความเค้น Von Mises ของ Billet ที่น้ำหนัก 1.15 เท่า ในขณะที่ถูกทุบที่ระยะ 25% (2.73 mm), 50% (5.47 mm), 75% (8.21 mm) และ 100% (10.95 mm)	139
122	แสดงความเค้น Von Mises ของ Billet ที่น้ำหนัก 1.2 เท่า ในขณะที่ถูกทุบที่ระยะ 25% (2.945 mm), 50% (5.89 mm), 75% (8.835 mm) และ 100% (11.78 mm)	141
123	ชิ้นงานลื่นประตุน้ำ (GT50) ที่ได้จากการทดสอบการทุบขึ้นรูปจาก Billet น้ำหนัก 1.1 เท่า	143
124	เปรียบเทียบตำแหน่งที่เกิดความบกพร่องของชิ้นงานลื่นประตุน้ำ (GT50) ที่ได้จากการทดสอบการทุบขึ้นรูปกับผล FEA ของ Billet น้ำหนัก 1.1 เท่า	143
125	ชิ้นงานลื่นประตุน้ำ (GT50) ที่ได้จากการทดสอบการทุบขึ้นรูปจาก Billet น้ำหนัก 1.15 เท่า	143
126	ชิ้นงานลื่นประตุน้ำ (GT50) ที่ได้จากการทดสอบการทุบขึ้นรูปจาก Billet น้ำหนัก 1.2 เท่า	144

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

A	=	พื้นที่หน้าตัด
avg	=	Average
CAD	=	Computer-Aided Design
CAE	=	Computer-Aided Engineering
D	=	เส้นผ่านศูนย์กลาง
E	=	ค่ายังค์โมดูลัส
F	=	แรงที่ใช้กด (Load)
FEA	=	Finite Element Analysis
FEM	=	Finite Element Model
H	=	Height
K	=	สัมประสิทธิ์ความแข็งแรงของชิ้นงานทดสอบ (Strength coefficient)
L	=	ความยาว
ln	=	ลอการิทึมธรรมชาติ (natural logarithm)
m	=	Shear Friction coefficient
max	=	Maximum
min	=	Minimum
mm	=	Millimeter
MPa	=	Mega Pascal
MPDRL	=	Mechanical and Product Design Research Laboratory
MSC	=	MacNeal-Schwendler Corporation
N	=	Newton
n	=	ตัวเลขยกกำลังของความเครียดแข็ง (Strain hardening exponent)
X	=	X- Axis (แกนแนวนอน)
Y	=	Y- Axis (แกนแนวนอน ตั้งฉากกับ X-Axis)
Z	=	Z- Axis (แกนแนวตั้ง หรือแนวความสูง ตั้งฉากกับระนาบ XY)

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

ε	=	Engineering Strain
ε_{eff}	=	Effective Strain
$\bar{\varepsilon}$	=	True Strain
$\bar{\varepsilon}_e$	=	ความเครียดจริงในช่วงยืดหยุ่น
$\bar{\varepsilon}_p$	=	ความเครียดจริงในช่วงพลาสติก
$\bar{\varepsilon}_t$	=	ความเครียดจริงในช่วงของการยืดทั้งหมด
$\dot{\varepsilon}$	=	Strain Rate
μ	=	สัมประสิทธิ์ความเสียดทานคูลอมป์
σ	=	Engineering Stress
$\bar{\sigma}$	=	True Stress
σ_{eff}	=	Effective Stress
σ_n	=	Normal Stress
σ_t	=	ความเค้นสัมผัส หรือความเสียดทาน
σ_u	=	Ultimate Stress
σ_y	=	Yield Stress
τ	=	ความเค้นเฉือน
v	=	ความเร็ว

การประยุกต์ใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เชิงเส้นจำลองกระบวนการทอขึ้นรูปร้อนของ งานทองเหลือง

Applied Nonlinear Finite Element Analysis for Simulating the Hot Forging Process of Brass

คำนำ

การทอขึ้นรูป (Forging) เป็นการขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดด้วยแรงกระแทก เป็นวิธีการที่ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการผลิตชิ้นส่วนโลหะต่างๆ การทอขึ้นรูปที่ชะแทนการหล่อขึ้นรูป เนื่องจากเป็นวิธีที่เหมาะสมกับการผลิตจำนวนมากๆ และชิ้นงานที่ได้จากการทอขึ้นรูปมีความแข็งแรงมากกว่าชิ้นงานจากการหล่อ การทอขึ้นรูปมีความสะดวกและรวดเร็ว ทั้งด้านการทำแม่พิมพ์และอัตราการผลิต อย่างไรก็ตามการทอขึ้นรูปมักจะเกิดความบกพร่องกับชิ้นงานในกระบวนการผลิต เช่น ชิ้นงานไม่เต็ม การเลื่อมทับกันของชิ้นงานและการเกิดรอยร้าว ซึ่งเป็นผลเนื่องจากแม่พิมพ์ที่เสื่อมประสิทธิภาพ ปัญหาดังกล่าวส่งผลให้ต้นทุนการผลิตเพิ่มขึ้น มีผลผลิตต่ำ และทำให้เกิดความเสียเปรียบในการแข่งขันทางการค้า ดังนั้นเพื่อพัฒนาให้การทอขึ้นรูปมีประสิทธิภาพในการผลิตสินค้าที่มีคุณภาพ ให้ผลผลิตสูงและลดต้นทุนการผลิต จึงจำเป็นต้องนำเทคโนโลยีสมัยใหม่เข้ามาช่วยวิเคราะห์และแก้ปัญหาและช่วยการออกแบบชิ้นงานและแม่พิมพ์

งานวิจัยนี้เป็นการประยุกต์ใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis หรือ FEA) โดยใช้ซอฟต์แวร์ไฟไนต์เอลิเมนต์พื้นฐาน ที่สามารถคำนวณแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear) ได้ โลหะทองเหลืองที่ใช้ในการวิเคราะห์เป็น โลหะผสมทองแดง (Copper Alloy) ชนิด CuZn40Pb2 ซึ่งเป็นโลหะที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมการทอขึ้นรูปต่างๆ เช่น ผลิตกังหันข้อต่ออุปกรณ์ประปา ประคูล้ำ และมาตรวัดน้ำประปา ไฟไนต์เอลิเมนต์ได้นำมาใช้ในการหาเงื่อนไขที่เหมาะสมกับการขึ้นรูป และใช้ศึกษาพฤติกรรมของวัสดุขณะขึ้นรูป โดยวิเคราะห์จากแบบจำลอง 3 มิติของกระบวนการขึ้นรูป ผลที่ได้จากการประมวลผลของไฟไนต์เอลิเมนต์ สามารถนำไปใช้ออกแบบชิ้นงานและแม่พิมพ์ของผลิตภัณฑ์ใหม่ เพื่อลดต้นทุนของวัตถุดิบและกระบวนการผลิต นอกจากนี้ยังสามารถใช้ในการปรับปรุงแม่พิมพ์ที่ใช้งานอยู่แล้วให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นได้

งานวิจัยนี้ได้รวบรวมตัวแปรและประเมินค่าที่เหมาะสมในการทบทวนรูปแบบ โดยผลที่ได้จากงานวิจัยนี้ทำให้สามารถลดต้นทุนวัตถุดิบและการผลิตแม่พิมพ์ และลดเวลาในกระบวนการพัฒนาและผลิตผลิตภัณฑ์ ตลอดจนใช้จำลองการผลิตเพื่อสรุปแนวทางการแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์ที่กำลังผลิตอยู่ เพื่อลดปริมาณการเกิดของเสียในกระบวนการผลิตให้น้อยที่สุด ซึ่งเป็นผลดีต่อเนื่องในการใช้พลังงานอย่างคุ้มค่า



วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ ได้แก่

1. พัฒนาระบบการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ สำหรับการผลิตชิ้นส่วนทองเหลืองจากการทอบขึ้นรูปร้อน
2. ใช้ซอฟต์แวร์ FEA พื้นฐานทั่วไป (ที่ไม่ใช่ซอฟต์แวร์เฉพาะสำหรับงานทอบขึ้นรูป) ศึกษาการจำลองกระบวนการทอบขึ้นรูปร้อนและประเมินความแม่นยำ
3. นำผลที่ได้จากงานวิจัยไปพัฒนาและปรับปรุงแม่พิมพ์และกระบวนการทอบขึ้นรูปร้อนเพื่อลดข้อเสียและเพิ่มผลผลิต ซึ่งเป็นผลต่อการลดการใช้พลังงานในการผลิต
4. ถ่ายทอดเทคโนโลยีการออกแบบและจำลองการผลิตชิ้นงานจากการทอบขึ้นรูปร้อนให้แก่บริษัทอาซาฮี-ไทย อัลลอย ให้สามารถดำเนินการได้เองในอนาคต

ขอบเขตของงานวิจัย

1. วัสดุที่ใช้ในการวิจัยเป็นทองเหลือง CuZn40Pb2
2. อุณหภูมิของชิ้นงานก่อนทำการทอบขึ้นรูป 625°C ถึง 750°C
3. ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element) ในการจำลองและทำนายการเปลี่ยนแปลงรูปทรงในกระบวนการทอบขึ้นรูปโลหะก่อน
4. ทำการวิเคราะห์ผลการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยเปรียบเทียบกับผลการทดลอง

ระเบียบวิธีวิจัย

1. ศึกษาทฤษฎีและวิเคราะห์ตัวแปรที่มีผลกระทบต่อกระบวนการทอบขึ้นรูปร้อนของทองเหลือง
2. ศึกษาซอฟต์แวร์ทาง FEA แบบไม่เชิงเส้นเพื่อใช้จำลองการทอบขึ้นรูปร้อน
3. ใช้ FEA ทำการจำลองการทอบขึ้นรูปร้อนจากชิ้นงานตัวอย่าง
4. ทำการทดสอบการขึ้นรูปจากเครื่องทอบขึ้นรูป
5. วิเคราะห์ตัวแปรของ FEA ที่มีผลต่อความแม่นยำ

6. วิเคราะห์และสรุปแบบจำลองและตัวแปรทาง FEA ที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการทုပ်ขึ้นรูปร้อน

7. สรุปผลงานวิจัยและจัดทำรายงาน

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ลดเวลาในการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ทองเหลืองที่ขึ้นรูปโดยการทုပ်
2. ลดเวลาและความสูญเสียจากการแก้ไขแม่พิมพ์ก่อนดำเนินการผลิตจริง ซึ่งส่งผลให้ลดต้นทุนในการทำแม่พิมพ์
3. ลดวัตถุดิบ (ทองเหลือง) ที่สูญเสียในกระบวนการทုပ်ขึ้นรูป
4. ได้องค์ความรู้ในการวิเคราะห์การทုပ်ขึ้นรูปร้อน
5. มีศักยภาพในการใช้เทคโนโลยีการออกแบบขั้นสูงในการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่ผลิตโดยการทုပ်ขึ้นรูปร้อน ซึ่งจะส่งผลให้บริษัทฯ สามารถแข่งขันทางการค้าได้ทั้งในและนอกประเทศ

การตรวจเอกสาร

1. ทฤษฎีการขึ้นรูปโลหะ

กระบวนการขึ้นรูปโลหะ (Metal Forming Processes) หมายถึงกลุ่มวิธีการผลิตชิ้นงานโดยการเปลี่ยนรูปร่างของวัตถุดิบ (Raw Material) ให้เป็นผลิตภัณฑ์ (Product) หรือชิ้นงานให้มีรูปทรงตามต้องการโดยใช้แม่พิมพ์ (Die หรือ Forming Tool) การขึ้นรูปประเภทนี้จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงมวลหรือองค์ประกอบภายในของวัสดุ

การขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรูปทรงซับซ้อนสิ่งที่จะต้องคำนึงถึงเป็นอย่างมากได้แก่ รูปทรง ขนาด ความถูกต้องและค่าพิคัดความเผื่อ ผิวชิ้นงานสำเร็จ และสมบัติของวัสดุหลังการขึ้นรูป (Altan *et al.*, 2005) กระบวนการขึ้นรูปโลหะสามารถแบ่งออกเป็นสองกลุ่ม โดยแบ่งตามวัตถุดิบได้เป็นสองประเภทดังนี้

1.1 กระบวนการขึ้นรูปโลหะก้อน (Massive Forming Processes)

การขึ้นรูปโลหะจากก้อนวัตถุดิบแบ่งได้เป็น 4 กลุ่มหลัก ประกอบด้วย การ forging, rolling, extrusion และ drawing โดยกระบวนการของแต่ละกลุ่มได้สรุปตามตารางที่ 1

1.2 กระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่น (Sheet-Metal Forming Processes)

การขึ้นรูปโลหะจากวัตถุดิบรูปแผ่น สามารถแบ่งได้เป็น 5 กลุ่มหลัก ประกอบด้วย การ Bending and Straight Flanging, Surface Contouring of Sheet, Linear Contouring, Deep Recessing and Flanging และ Shallow Recessing ตามตารางที่ 2

ตารางที่ 1 แสดงการแบ่งประเภทของกระบวนการขึ้นรูปโลหะก่อน

Forging	Rolling	Extrusion	Drawing
- Closed-die forging with flash	- Sheet rolling	- Nonlubricated hot extrusion	- Drawing
- Closed-die forging without flash	- Shape rolling	- Lubricated directed hot extrusion	- Drawing with rolls
- Coining	- Tube rolling	- Hydrostatic extrusion	- Ironing
- Electro-upsetting	- Ring rolling		- Tube sinking
- Forward extrusion forging	- Rotary rolling		
- Backward extrusion forging	- Piercing		
- Hobbing	- Gear rolling		
- Isothermal forging	- Cross rolling		
- Nosing	- Surface rolling		
- Open-die forging	- Shear forming (flow turning)		
- Orbital forging	- Tube reducing		
- P/M forging			
- Radial forging			
- Upsetting			

ที่มา : Kobayashi *et al.* (1989)

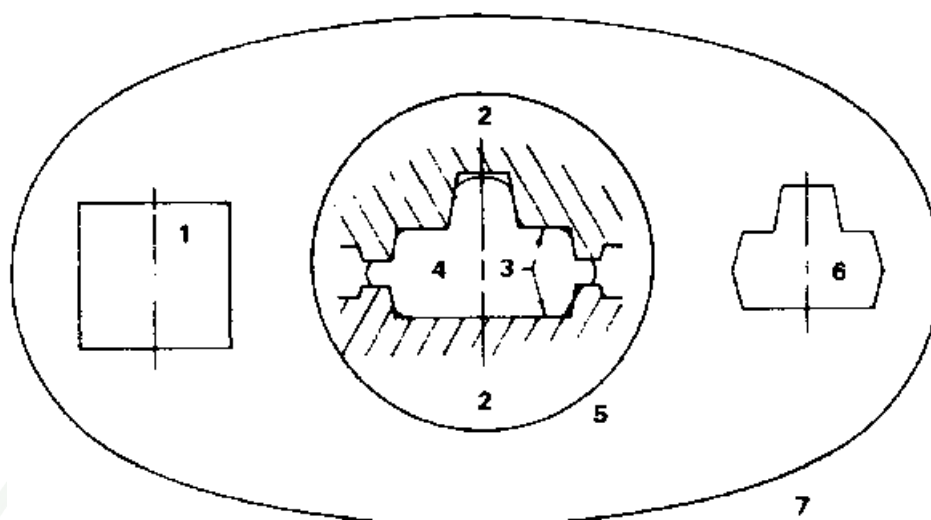
ตารางที่ 2 แสดงการแบ่งประเภทของกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่น

Bending and Straight Flanging	Surface Contouring of Sheet	Linear Contouring	Deep Recessing and Flanging	Shallow Recessing
- Brake bending	- Contour stretch forming	- Linear stretch	- Spinning (and roller flanging)	- Dimpling
- Roll bending	(stretch forming)	forming	- Deep drawing	- Drop hammer
	- Androforming	(stretch forming)	Rubber pad forming	forming
	- Age forming	- Linear roll forming (roll	forming	- Electro- magnetic
	- Creep forming	forming)	- Marform	forming
	- Die-quench forming		process	- Explosive forming
	- Bulging		- Rubber diaphragm	- Jogging
	- Vacuum forming		- Hydroforming	

ที่มา : Kobayashi *et al.* (1989)

2. ทฤษฎีการทอบขึ้นรูป

การทอบขึ้นรูปเป็นกระบวนการขึ้นรูปโดยอาศัยแรงอัด (Compressive force) ผ่านแม่พิมพ์ เพื่อกดอัดให้ชิ้นงานมีขนาดและรูปทรงตามต้องการ โดยแรงอัดดังกล่าวจะทำให้เกิดความเค้นขึ้น ในชิ้นงานจนกระทั่งความเค้นเพิ่มขึ้นมากพอที่จะทำให้ชิ้นงานเกิดการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร (Permanent deformation) จนได้เป็นรูปทรงตามต้องการ



BILLET (1)

PROCESS (2, 3, 4, 5)

PRODUCT (6)

ภาพที่ 1 แสดงกรรมวิธีการทึบขึ้นรูป โดย 1) วัตถุดิบ 2) แม่พิมพ์ 3) แม่พิมพ์และวัสดุที่กำลังถูกขึ้นรูปอยู่ภายในแม่พิมพ์ 4) บริเวณที่เกิดการเสียรูป 5) เครื่องมือที่ช่วยในการทึบขึ้นรูป 6) ชิ้นงานสำเร็จ และ 7) Plant environment

ที่มา : Altan *et al.* (2005)

2.1 การเปรียบเทียบกรรมวิธีการทึบขึ้นรูปกับกรรมวิธีอื่นๆ

ข้อดีของกรรมวิธีทึบขึ้นรูป มีดังนี้

1. ได้สมบัติทางกลที่ดีกว่า
2. สามารถขจัดรูพรุน (Porosity) ที่อยู่ในชิ้นงานออกได้เกือบหมด
3. มีความสามารถในการรับแรงสูง
4. เกรนที่หยาบจะถูกทำให้ละเอียดขึ้น
5. ลดการสูญเสียเนื้อโลหะในการขึ้นรูป
6. ได้ผิวสำเร็จค่อนข้างดี มีความเที่ยงตรงสูง
7. ปราศจากข้อบกพร่องภายใน (Internal defect)
8. ให้ผลผลิตที่สูง (Productivity)
9. มีวัสดุหลายชนิดที่สามารถทึบขึ้นรูปได้

ข้อเสียของกรรมวิธีทุบขึ้นรูป มีดังนี้

1. ความร้อนในงานทุบขึ้นรูปร้อนทำให้เกิดปฏิกิริยาจากการรวมตัวของออกซิเจน (Oxidation)
2. ต้นทุนของเครื่องมือและการดูแลสูง
3. ไม่สามารถทำงานที่มีแกนหรือกลวงภายในได้
4. ต้นทุนการผลิตด้วยการทุบขึ้นรูปสูงกว่าของการหล่อ เมื่อมีการผลิตจำนวนน้อย

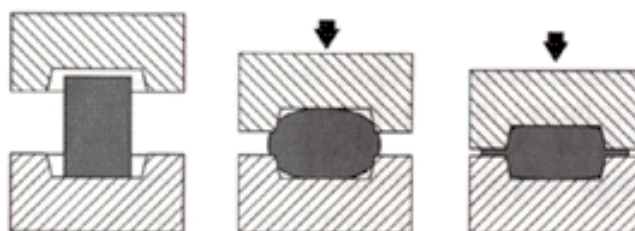
2.2 ประเภทของกระบวนการทุบขึ้นรูป (Type of Forging Processes)

กระบวนการทุบขึ้นรูปสามารถแบ่งได้ตามลักษณะของแม่พิมพ์เป็น 2 กลุ่มคือ การทุบขึ้นรูปในแม่พิมพ์ (closed die forging) และการทุบขึ้นรูปอิสระ (Free Forming หรือ open-Die Forging)

2.2.1 การทุบในแม่พิมพ์ (Closed Die Forging)

การทุบในแม่พิมพ์ เป็นการขึ้นรูปด้วยการกดโดยใช้แม่พิมพ์ 2 ชิ้นเคลื่อนที่เข้าหากัน แม่พิมพ์แต่ละชิ้นจะทำเป็นโพรงแม่พิมพ์ (Die block) ที่มีรอยรูปทรงภายใน (Impression) ส่วนรูปทรงภายนอกของชิ้นงานจะเป็นไปตามรูปทรงภายในของแม่พิมพ์ การไหลตัวของวัสดุจะถูกจำกัดโดยตัวแม่พิมพ์ (ภาพที่ 2) การทุบขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์มีคุณลักษณะต่างๆ ดังนี้

1. ประหยัดเวลาเมื่อเทียบกับการทุบขึ้นรูปอิสระ
2. อัตราการผลิตสูงและมีขนาดที่เที่ยงตรง
3. ลดค่าใช้จ่ายและระยะเวลาที่เกิดจากการตกแต่งผิว
4. สามารถขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรูปทรงซับซ้อนได้
5. ไม่ต้องอาศัยพนักงานที่มีความชำนาญมาก
6. สามารถควบคุมการไหลตัวของวัสดุและสมบัติทางกลได้
7. ราคาของเครื่องมือ และอุปกรณ์สูง
8. เหมาะกับงานที่ต้องผลิตเป็นจำนวนมากๆ



ภาพที่ 2 ลำดับการทุบขึ้นรูปในแม่พิมพ์

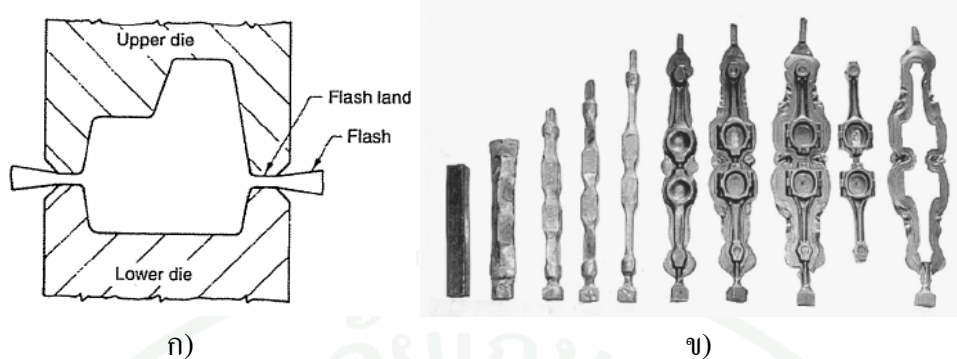
การทุบขึ้นรูปในแม่พิมพ์มี 2 ประเภท ได้แก่

2.2.1.1 การทุบขึ้นรูปในแม่พิมพ์แบบมีครีป (Closed-Die Forging with Flash)

เป็นกรรมวิธีทุบขึ้นรูปก้อนโลหะร้อนในแม่พิมพ์ (ปกติมักจะทำเป็นสองซีกตามแสดงในภาพที่ 3) และมีช่องแคบเพื่อให้เกิดการไหลออกจากโพรงแม่พิมพ์ โลหะส่วนเกินจะโดนอัดรีดผ่านช่องแคบและเกิดเป็นครีปรอบชิ้นงานทุบตามแนวเส้นประกบของแม่พิมพ์ (Parting line) (ชาญ, 2547)

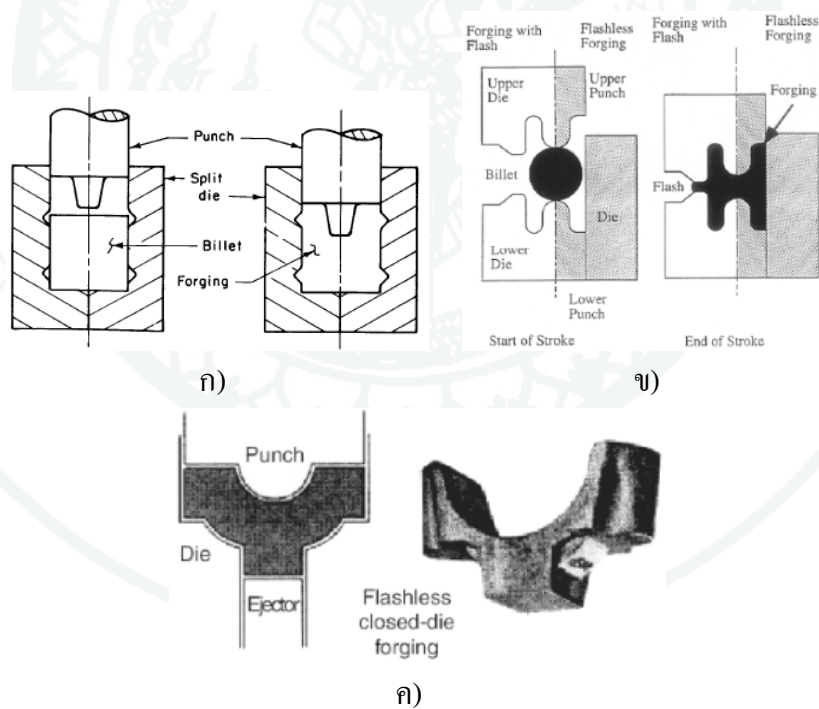
2.2.1.2 การทุบขึ้นรูปในแม่พิมพ์แบบไม่มีครีป (Closed-Die Forging without Flash)

เป็นกรรมวิธีการทุบขึ้นรูปร้อนหรือเย็นแบบไม่มีการสูญเสียวัสดุโดยควบคุมปริมาตรภายในแม่พิมพ์ การขึ้นรูปจะทำโดยใช้ พันช์ (Punch) กดวัสดุให้เข้าไปในแม่พิมพ์ ตัวแม่พิมพ์อาจทำเป็นชิ้นเดียวหรือหลายชิ้นประกอบกันดังภาพที่ 4 (ชาญ, 2547)



ภาพที่ 3 ก) ภาพแสดงการทุบขึ้นรูปโดยมีครีป และ ข) ลำดับขั้นตอนการทุบขึ้นรูปของชิ้นงาน
ก้านสูบ

ที่มา : Altan *et al.* (2005)



ภาพที่ 4 การทุบขึ้นรูปในแม่พิมพ์ปิดแบบไม่มีครีป โดยภาพ ก) แสดงการขึ้นรูปชิ้นงาน ข) แสดง
แม่พิมพ์ที่ใช้ Punch และ ค) แสดงแม่พิมพ์แบบมี Ejector

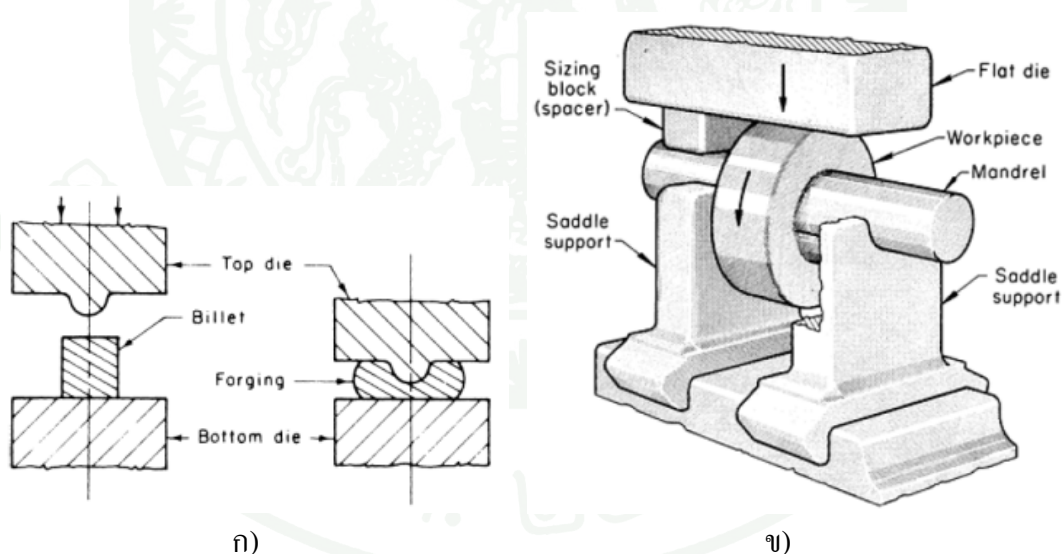
ที่มา : Altan *et al.* (2005)

2.2.2 การทุบขึ้นรูปอิสระ (Free Forming หรือ Open-Die Forging)

การทุบขึ้นรูปอิสระ หรือการทุบขึ้นรูปในแม่พิมพ์เปิด เป็นการขึ้นรูปด้วยการกด โดยให้แม่พิมพ์เคลื่อนที่เข้าหากันและทำให้เกิดรูปทรงเพียงบางบริเวณของชิ้นงาน ดังแสดงในภาพที่ 5 วิธีนี้เหมาะสำหรับการผลิตชิ้นงานจำนวนน้อย หรือชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งการทุบขึ้นรูปอิสระมีคุณลักษณะดังนี้

1. การไหลของโลหะและสมบัติทางกลควบคุมได้น้อย
2. เหมาะสำหรับการผลิตที่ใช้ Cycle time น้อยเท่านั้น
3. ใช้กับชิ้นงานที่มีรูปทรงง่ายๆ
4. การควบคุมขนาดให้อยู่ในพิสัยความเผื่อทำได้ยาก
5. ต้องการแรงงานที่มีความชำนาญ
6. ต้นทุนรวมค่อนข้างจะสูง และมีค่าใช้จ่ายในการตกแต่งผิว

การทุบขึ้นรูปอิสระมีหลายประเภท เช่น



ภาพที่ 5 ก) และ ข) แสดงกรรมวิธีการทุบขึ้นรูปอิสระหรือการทุบขึ้นรูปแบบแม่พิมพ์เปิด

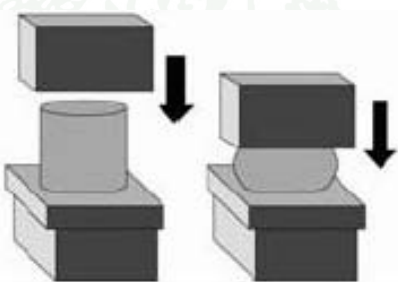
ที่มา : ภาพ ก) Altan *et al.* (2005) และ ข) ASM Handbook (1995)

2.2.2.1 การอยู่ (Upsetting)

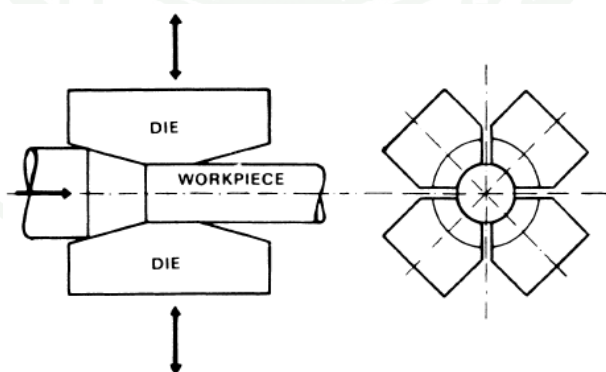
การ Upsetting เป็นกรรมวิธีการทุบขึ้นรูปร้อนหรือเย็น เพื่อให้ความหนาของชิ้นงาน Pre-form บางลง (ชาญ, 2547) ภาพที่ 6 แสดงกรรมวิธี upsetting

2.2.2.2 การทุบแนวรัศมี (Radial Forging)

การทุบแนวรัศมีเป็นกรรมวิธีการทุบขึ้นรูปร้อนหรือเย็น โดยมีเครื่องมือที่เคลื่อนที่ในแนวรัศมีตั้งแต่ 2 ชั้นขึ้นไป (ภาพที่ 7) เพื่อทำชิ้นงานกลมให้หน้าตัดขวางเปลี่ยนแปลงตามแนวยาว (ชาญ, 2547)



ภาพที่ 6 แสดงกรรมวิธีการอยู่



ภาพที่ 7 แสดงกรรมวิธีการทุบแนวรัศมี

ที่มา : Altan *et al.* (2005)

3. อุณหภูมิในการชุบขึ้นรูป

อุณหภูมิเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญสำหรับกรรมวิธีการขึ้นรูปโลหะ โดยเฉพาะการชุบขึ้นรูปเพราะในแต่ละช่วงอุณหภูมิส่งผลต่อความยากง่ายในการไหลตัวของโลหะ รวมถึงแรงที่ต้องใช้ในการขึ้นรูปและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ไม่เท่ากัน จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทราบอุณหภูมิที่เหมาะสมในการชุบขึ้นรูป จากความสำคัญของอุณหภูมิที่มีต่อกรรมวิธีการชุบขึ้นรูป จึงมีการจำแนกการชุบขึ้นรูปตามอุณหภูมิที่ใช้ดังนี้

3.1 การชุบขึ้นรูปเย็น (Cold Forging)

เป็นการชุบขึ้นรูปโลหะที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิของการเกิดผลึกใหม่ (Recrystallization temperature) ของโลหะโดยใช้อุณหภูมิในการชุบที่อุณหภูมิห้องจนถึง 300°C ลักษณะการชุบขึ้นรูปเย็นมีดังนี้

1. ใช้แรงในการขึ้นรูปสูง
2. ความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเนื่องจาก Work Hardening ชิ้นงานจึงแข็งแรงมาก
3. ผิวสำเร็จของชิ้นงานดี จึงลดกระบวนการตกแต่งผิว
4. รูปทรงและขนาดของชิ้นงานมีความเที่ยงตรงสูง
5. เหมาะกับงานที่ผลิตจำนวนมากๆ
6. เหมาะกับชิ้นงานลักษณะสมมาตรในแนวแกน เช่น เฟือง ส่วนประกอบของเพล

เป็นต้น

3.2 การชุบขึ้นรูปร้อน (Hot Forging)

เป็นการชุบขึ้นรูปโลหะที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิของการเกิดผลึกใหม่ ชิ้นงานที่ผ่านการชุบขึ้นรูปร้อนจะมีความหนาแน่นและคุณสมบัติทางกายภาพดีขึ้น เช่น ความแข็งแรง ความสามารถในการรับแรงกระแทก (Toughness) เป็นต้น ลักษณะชิ้นงานจากการชุบขึ้นรูปร้อนมีดังนี้

1. ความแข็งแรงไม่เพิ่มขึ้น เพราะการชุบอยู่ในอุณหภูมิที่สูงอยู่ตลอดเวลา
2. แรงที่ใช้ในการชุบขึ้นรูปต่ำ เนื่องจากความแข็งแรงของชิ้นงานลดลง
3. ผิวสำเร็จและขนาดมีความเที่ยงตรงต่ำ
4. เสียค่าใช้จ่ายในการให้ความร้อนแก่ชิ้นงาน

5. การพัฒนากระบวนการให้เป็นระบบอัตโนมัติทำได้ยาก

ช่วงอุณหภูมิของการชุบขึ้นรูปร้อนของโลหะต่างๆ มีดังนี้

1. เหล็ก 930°C ถึง 1375°C
2. ทองแดง ทองเหลือง และบรอนซ์ 595°C ถึง 930°C
3. โลหะผสมอะลูมิเนียมและแมกนีเซียม 345°C ถึง 485°C

4. วัสดุสำหรับทำแม่พิมพ์ชุบขึ้นรูปร้อน

แม่พิมพ์สำหรับงานชุบขึ้นรูปร้อนส่วนมากทำจากเหล็กเครื่องมืองานร้อน (Hot Work Tool Steel) ได้แก่ เหล็กเกรด SKD61 (มาตรฐาน JIS ซึ่งมีส่วนผสมทางเคมี ประกอบด้วย C 0.30%, Si 1.00%, Cr 5.00%, Mo 1.30%, V 1.00%, W 0.05% และ Ni 0.27%) แม่พิมพ์ที่ขึ้นรูปแล้วจะต้องปรับคุณสมบัติทางกลด้วยกรรมวิธีทางความร้อน (หรือการชุบแข็ง) โดยความแข็งของแม่พิมพ์ชุบขึ้นรูปร้อน อยู่ที่ประมาณ 49-54 HRC (ชาญนรินทร์, 2550)

ตารางที่ 3 แสดงการเปรียบเทียบเหล็กเครื่องมืองานร้อนตามมาตรฐานของ JIS กับมาตรฐานอื่นๆ

มาตรฐาน (Standard)	JIS	AISI	DIN
เกรด	SKD61	H13	X40CrMoV5-1

วัสดุที่จะนำมาใช้ทำแม่พิมพ์สำหรับงานชุบขึ้นรูปร้อนควรมีสมบัติดังนี้ (ดำรง, 2537)

1. มีความเหนียว และความแข็งสูง
2. ไม่เปลี่ยนสมบัติความแข็งและความเหนียว เมื่อได้รับความร้อน และเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในระยะเวลาสั้นๆ
3. ทนต่อการขัดสีสูง
4. สามารถขึ้นรูปโดยการ Machine ง่าย
5. สามารถชุบแข็งได้ง่าย

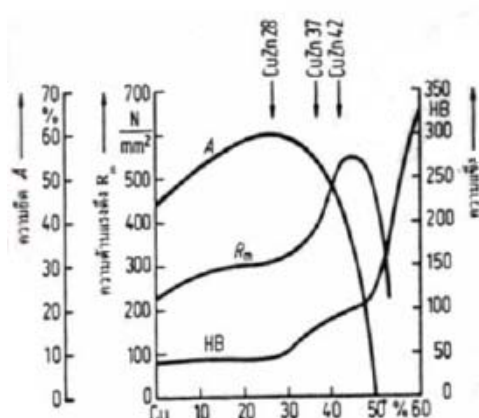
ข้อกำหนดต่างๆ ของวัสดุทำแม่พิมพ์จะมาก หรือน้อยขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ ขนาด รูปทรง และวัสดุของชิ้นงานที่ใช้ สำหรับแม่พิมพ์ขนาดเล็กๆ และเป็นแบบ Flat Impression ควรใช้เหล็กกล้าที่มีปริมาณคาร์บอน 0.70% ถึง 0.85% แม่พิมพ์ทุบขึ้นรูปทั่วไปควรใช้เหล็ก Medium-alloyed steel สำหรับแม่พิมพ์ที่ใช้กับเครื่องทุบขึ้นรูปที่ทำงานในแนวนอน ซึ่งต้องทนกับอุณหภูมิการทำงานสูง ควรใช้เหล็กกล้าผสม High-Alloyed Steel ที่มีความแข็งแรงสูง หรือใช้คาร์ไบด์

5. ทองเหลือง CuZn40Pb2

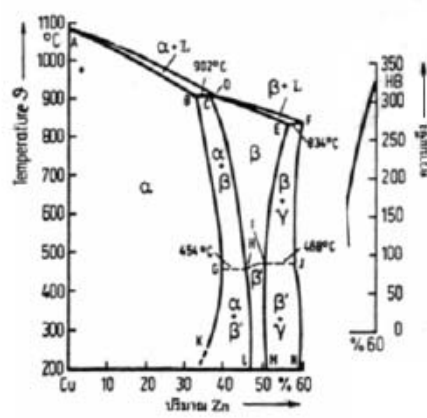
ทองเหลือง (Brass) เป็นโลหะจากการผสมระหว่างทองแดงและสังกะสี ความแข็งและความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเมื่อเจือสังกะสีเพิ่มขึ้น (ภาพที่ 8)

ทองเหลืองที่มีสังกะสีประมาณ 37% จะเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) เป็นเฟสเดียว และคงสภาพโครงสร้างอะตอมเป็น bcc โลหะผสมทองแดงและสังกะสีที่มีทองแดงเกิน 50% เรียกว่า ทองเหลือง และถ้ามีทองแดงเกิน 72% จะเรียกว่า ทองแบก (Tombac) ทองเหลืองอัลฟา (α) บริสุทธิ์เหมาะสำหรับการขึ้นรูปโดยไม่แปดผิว สามารถเปลี่ยนรูปได้ดีที่สุดเมื่อมีสังกะสีประมาณ 28% ดังนั้น CuZn28 จึงเหมาะแก่การอัดลิกขึ้นรูป ตัวอย่างการอัดลิกขึ้นรูปได้แก่ ปลอกสวมแท่งลิปสติค และไฟแช็ก

ในทางปฏิบัติจะเกิดเฟสเบต้า (β -phase) ในปริมาณเล็กน้อยในโครงสร้างของ CuZn37 แต่จะลดลงเมื่อเป็นการขึ้นรูปขณะเย็น โดยเมื่อทองเหลืองที่มีสังกะสีเกิน 37% จะเป็นทองเหลืองเฟส ($\alpha+\beta$) ภาพที่ 9 แสดงโครงสร้างอะตอม bcc ของเฟสเบต้าซึ่งจะมีผลให้ความเหนียวของทองเหลืองลดลงอย่างรวดเร็ว และทำให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้น การที่มีความเหนียวลดลงและการที่เนื้อโลหะเป็นวิวิธพันธุ์ (Heterogeneous) จะทำให้การแปดผิวดีขึ้นมีเศษชิ้นงานขึ้น ทองเหลืองที่แปดผิวได้ดีที่สุดจะต้องมีตะกั่ว 1% ถึง 2% ทองเหลืองที่เจือตะกั่วใช้เป็นวัสดุทำปลายปากกา ลูกกลิ้ง และชิ้นส่วนนาฬิกา



ก)



ข)

ภาพที่ 8 ก) กราฟทองแดง-สังกะสี ตามเรย์นอร์ (Reynor) ของความต้านแรงดึง ความยืด และความแข็งของทองเหลืองเทียบกับปริมาณของทองแดง ข) กราฟแสดงเฟสต่างๆ ของทองเหลือง

ที่มา : มานพ (2536)



ภาพที่ 9 โครงสร้างจุลภาคทองเหลืองเฟส ($\alpha+\beta$) ที่เจือตะกั่วอัลฟาเฟส (α -phase) จะมีสีสว่าง ส่วนตะกั่วจะเป็นรอยดำ

ที่มา : ชาญนรินทร์ (2550)

ทองเหลืองที่มีสังกะสีน้อย 5% ถึง 15% (หรือ ทอมแบก) จะมีสีทองออกแดงถึงสีทองออกเหลือง ส่วน CuZn28 จะมีสีทองออกเขียว CuZn37 จะมีสีเหลือง และทองเหลืองที่มีเนื้อวิวิธพันธ์ (Heterogeneous) จะมีสังกะสี 40% ถึง 42% มีสีออกแดง

รอยร้าวของชิ้นงานทองเหลืองที่เกิดเนื่องจากความเค้น จะขจัดได้โดยการอบอ่อนหรืออบคลายความเค้นที่อุณหภูมิราว 200°C ถึง 300°C ชิ้นส่วนจะคลายความเค้นออกแล้วจะไม่เกิดรอยร้าวได้ง่ายๆ (มานพ, 2536)

ทองเหลืองสำหรับงานทุบขึ้นรูปร้อนตามมาตรฐาน DIN 17660 คือ CuZn40Pb2 ซึ่งสามารถเทียบได้กับมาตรฐานอื่นๆ ได้จากตารางที่ 4

โดยทองเหลือง CuZn40Pb2 จะมีส่วนผสมทางเคมี (Chemical Composition) ที่สำคัญคือปริมาณของทองแดง (Cu) สังกะสี (Zn) และ ตะกั่ว (Pb) โดยสามารถดูส่วนผสมทางเคมีต่างๆ ได้จากตารางที่ 5

ตารางที่ 4 มาตรฐานของทองเหลือง CuZn40Pb2 เทียบกับมาตรฐานอื่นๆ

มาตรฐานโลก (World Standards)				
GERMAN	JAPANESE	U.N.S	BRITISH	EUROPEAN
DIN 17660	JIS 3250	C37710	BS 2872/4	CW617N
CuZn40Pb2	C3771		CZ 122	

ตารางที่ 5 ส่วนผสมทางเคมีของทองเหลือง CuZn40Pb2 ตามมาตรฐาน DIN 17660

ปริมาณของธาตุที่ผสม	Cu	Pb	Zn	Al	Fe	Ni	Sn	อื่นๆ
Max.	57	1.5	ส่วนที่เหลือ	-	-	-	-	-
Min.	59	2.5		0.1	0.4	0.4	0.2	0.2

สมบัติทางฟิสิกส์ของทองเหลือง CuZn40Pb2 (ชาญนรินทร์, 2550)

อุณหภูมิที่ใช้ในการชุบขึ้นรูปร้อน 625°C ถึง 750°C

อุณหภูมิหลอมเหลว 890°C ถึง 900°C

สมบัติทางกลของทองเหลือง CuZn40Pb2 (ชาญนรินทร์, 2550)

ความแข็งแรง (Tensile Strength) ≤ 340 MPa

อัตราการยืดตัว (Elongation) ≤ 20 %

ความแข็ง (Hardness) ≤ 75 HB

6. สมบัติทางกลของวัสดุ

6.1 การทดสอบแรงอัด (Compression Test)

การทดสอบแรงอัดเป็นการทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติทางกล ที่อุณหภูมิและอัตราความเครียดต่างๆ ซึ่งชิ้นงานทดสอบมักนิยมใช้เป็นชิ้นงานรูปทรงกระบอก (ภาพที่ 10 และ 11) การทดสอบนี้จะใช้แรงอัดกดบนชิ้นงานทดสอบ และควบคุมความเร็วให้ชิ้นงานทดสอบเปลี่ยนรูปร่างอย่างสม่ำเสมอตามแนวแกน แล้ววัดค่าแรงและระยะการเปลี่ยนรูปของชิ้นทดสอบ จนกระทั่งชิ้นงานทดสอบเกิดความพองหรือแตก ซึ่งผลการทดสอบที่ได้จะนำไปหาคุณสมบัติทางกลของชิ้นงานทดสอบ โดยความเค้นที่เกิดขึ้นภายในวัสดุสามารถหาได้โดยนำแรงภายนอก F_i ในแต่ละช่วงของการทดสอบหารด้วยพื้นที่หน้าตัดเริ่มต้นของชิ้นงานทดสอบ

$$\sigma = \frac{F_i}{A_0} \quad (1)$$

โดยที่ σ คือ ความเค้นทางวิศวกรรม (Engineering Stress)

F_i คือ แรงที่ใช้กด (Compressive Load)

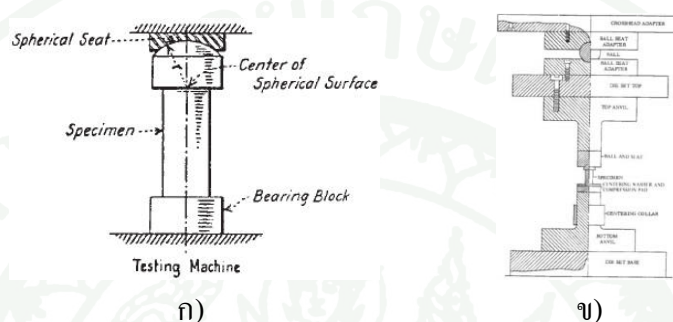
A_0 คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานทดสอบเมื่อไม่มีแรงกระทำ

และ

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{(L_i - L_0)}{L_0} \quad (2)$$

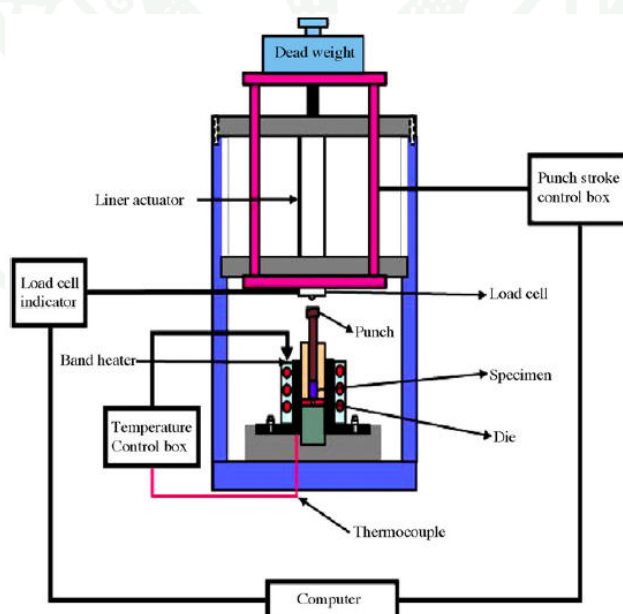
- โดยที่ ε คือ ความเครียดทางวิศวกรรม (Engineering Strain)
 ΔL คือ การเปลี่ยนแปลงความยาวของชิ้นงานทดสอบ
 L_0 คือ ความยาวของชิ้นงานทดสอบเมื่อไม่มีแรงกระทำ
 L_i คือ ความยาวของชิ้นงานทดสอบเมื่อมีแรงมากระทำ หรือ

$$L_i = L_0 + \Delta L$$



ภาพที่ 10 ก) อุปกรณ์ในการทดสอบแรงอัดเพื่อช่วยให้ชิ้นงานทดสอบอยู่ในแนวตั้งตลอดการทดสอบ และ ข) ลักษณะการจับยึดชิ้นงานและอุปกรณ์ในการทดสอบแรงอัด

ที่มา : ASTM E 9 – 89a (2000)



ภาพที่ 11 การทดสอบแรงอัดที่อุณหภูมิสูง

6.2 ความเค้นจริงและความเครียดจริง

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้พื้นที่หน้าตัดและความยาวเดิมของชิ้นทดสอบเรียกว่า กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเชิงวิศวกรรม ในขณะที่การทดสอบแรงอัด เมื่อพื้นที่หน้าตัด และความยาวของชิ้นงานทดสอบ มีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง ซึ่งความเค้นจริง (True Stress) และความเครียดจริง (True Strain) สามารถคำนวณได้โดยใช้ขนาดจริงของพื้นที่หน้าตัดและความยาวที่เปลี่ยนแปลงในขณะนั้นๆ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดภายใต้เงื่อนไขนี้เรียกว่า กราฟของความเค้นจริงและความเครียดจริง (True-Stress True Strain Curve) หรือ Flow curve กราฟประเภทนี้จึงแสดงพฤติกรรมของวัสดุในช่วงการเปลี่ยนรูปถาวรเมื่อความเค้นในโลหะมีมากกว่าความเค้นคราก (Yield Stress, σ_y) ถ้าให้ $\bar{\epsilon}$ เป็นความเครียดจริง ดังนั้น $\bar{\sigma}$ เป็นความเค้นจริง สามารถคำนวณได้จาก

$$\bar{\sigma} = \frac{F_i}{A_i} \quad (3)$$

$$\bar{\epsilon} = \int_{L_0}^{L_i} \frac{dL_i}{L_i} = \ln \left(\frac{L_i}{L_0} \right) \quad (4)$$

โดยที่	F_i	คือ แรงที่ใช้กด (Compressive Load) ในขณะใดๆ
	A_i	คือ พื้นที่หน้าตัดในขณะที่มีแรง F_i มากระทำ
	L_i	คือ ความยาวในขณะที่มีแรง F_i มากระทำ
	L_0	คือ ความยาวของชิ้นงานทดสอบเมื่อไม่มีแรงกระทำ

ในกรณีการขึ้นรูปโลหะ ปริมาตรก่อนและหลังการขึ้นรูปจะเกิดการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ดังนั้น จึงสามารถสมมติให้ปริมาตรไม่เปลี่ยนแปลงทั้งก่อนและหลังการขึ้นรูป ดังนั้น

$$A_0 L_0 = A_i L_i \quad (5)$$

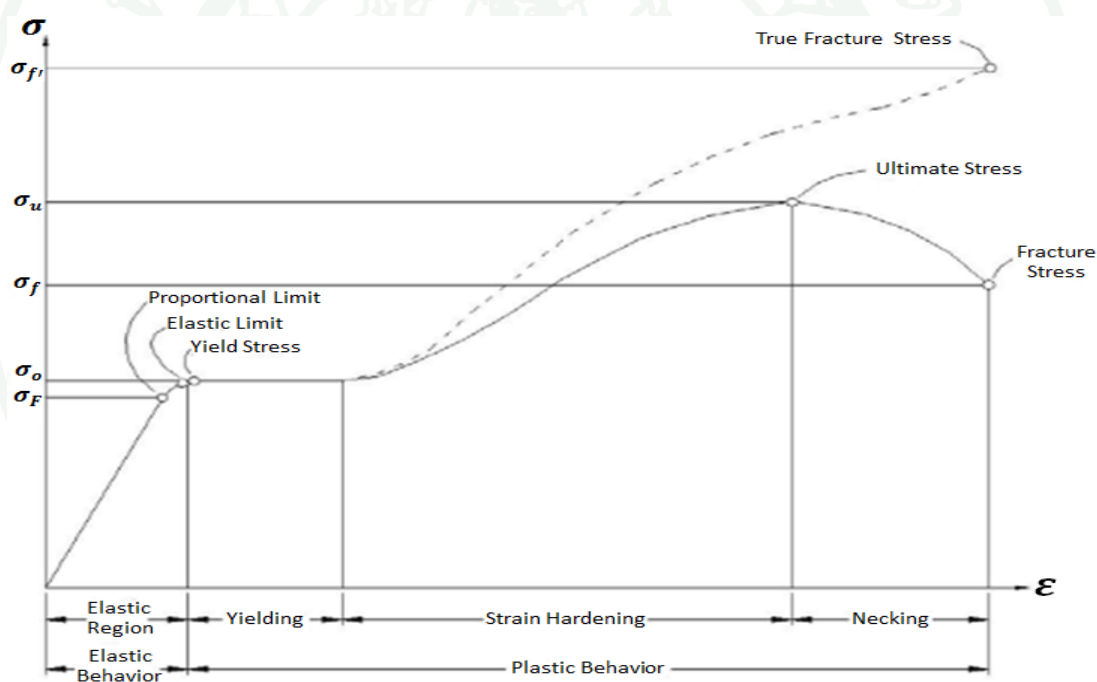
$$\frac{A_0}{A_i} = \frac{L_i}{L_0} = \frac{L_0 + \Delta L}{L_0} = 1 + \epsilon \quad (6)$$

ดังนั้น ความเค้นจริงและความเครียดจริง เมื่อสมมุติให้มีปริมาตรคงที่ ในขณะที่มีแรงมากระทำ สามารถคำนวณความเค้นและความเครียดทางวิศวกรรม (σ และ ε) ได้จาก

$$\bar{\sigma} = \sigma(1 + \varepsilon) \quad (7)$$

$$\bar{\varepsilon} = \ln\left(\frac{L_0 + \Delta L}{L_0}\right) = \ln(1 + \varepsilon) \quad (8)$$

กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ความเค้นจริงและความเครียดจริงเปรียบเทียบกับความเค้นและความเครียดทางวิศวกรรมได้แสดงในภาพที่ 12



ภาพที่ 12 กราฟแสดงการเปรียบเทียบ Engineering Stress-Strain Curve กับ True Stress-Strain Curve

6.3 ความเครียดแข็ง (Strain Hardening)

เมื่อแรงที่มากกระทำบนชิ้นงานมากกว่าแรงที่จุดคราก ชิ้นงานทดสอบจะมีการเปลี่ยนรูปหรือขนาดอย่างถาวร และเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกและอะตอมในเนื้อโลหะทดสอบ

มีผลทำให้ชิ้นงานทดสอบสามารถรับแรงได้มากขึ้น ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่าเกิด “ความเครียดแข็ง” ในเนื้อชิ้นงานทดสอบ

ความสัมพันธ์ของความเค้นจริงและความเครียดจริงในช่วงยืดหยุ่น (Elastic) เมื่อ $\bar{\sigma} \leq \bar{\sigma}_y$ และในช่วงพลาสติก (Plastic) เมื่อ $\bar{\sigma} \geq \bar{\sigma}_y$ สามารถคำนวณได้จาก

$$\bar{\sigma} = \begin{cases} E\bar{\epsilon}_e & ; \bar{\sigma} \leq \bar{\sigma}_y \\ K\bar{\epsilon}_p^n & ; \bar{\sigma} \geq \bar{\sigma}_y \end{cases} \quad (9)$$

$$\bar{\sigma} = \begin{cases} E\bar{\epsilon}_e & ; \bar{\sigma} \leq \bar{\sigma}_y \\ K\bar{\epsilon}_p^n & ; \bar{\sigma} \geq \bar{\sigma}_y \end{cases} \quad (10)$$

เมื่อ	E	คือ ค่ายังค์โมดูลัส (Young's Modulus)
	$\bar{\epsilon}_e$	คือ ความเครียดจริงในช่วงยืดหยุ่น
	n	คือ ตัวเลขยกกำลังของความเครียดแข็ง (Strain hardening exponent)
	K	คือ สัมประสิทธิ์ความแข็งแรงของชิ้นงานทดสอบ (Strength coefficient)
	$\bar{\epsilon}_p$	คือ ความเครียดจริงในช่วงพลาสติก

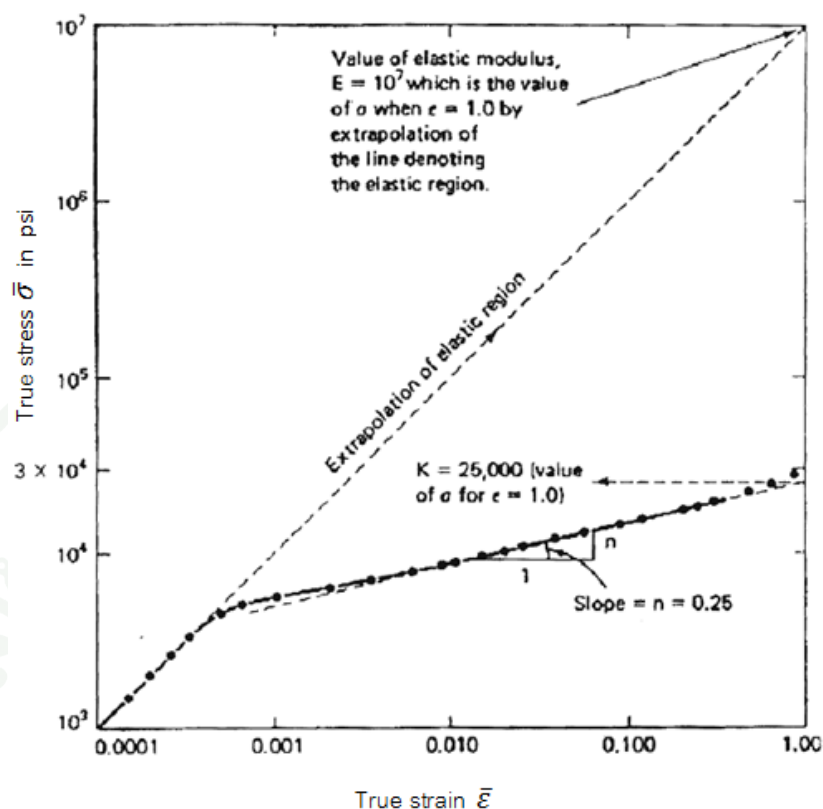
โดยค่าความเครียดจริงในช่วงพลาสติก $\bar{\epsilon}_p$ สามารถหาได้จาก

$$\bar{\epsilon}_p = \bar{\epsilon}_t - \bar{\epsilon}_e = \bar{\epsilon}_t - \frac{\bar{\sigma}}{E} \quad (11)$$

เมื่อ $\bar{\epsilon}_t$ คือ ความเครียดจริงในช่วงของการยืดทั้งหมด

ความสัมพันธ์ของ ความเค้นและความเครียดจริงในช่วงพลาสติก ตามสมการที่ 10 เป็น สมการยกกำลัง n จึงเรียกว่าเป็น สมการยกกำลัง (Power Equation) เมื่อคำนวณโดยใช้สมการ ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นจริงและความเครียดจริง ผลจากสมการนี้สามารถให้ค่าที่สอดคล้องกับผลของการทดสอบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงที่ก่อนเกิดคอคอดหรือ (necking) (เดช, 2548) เมื่อพลอตค่า $\bar{\sigma}$ และ $\bar{\epsilon}$ ลงบนกราฟ Log – Log (ภาพที่ 13) กราฟที่ได้จึงเป็นเส้นตรง ดังนั้นการ คำนวณค่า K และ n ของสมการที่ 10 สามารถพิจารณาได้จาก

$$\log \bar{\sigma} = n \log \bar{\epsilon}_p + \log K \quad (12)$$



ภาพที่ 13 กราฟบนแกน Log – Log ของ ความเค้นจริงและความเครียดจริง ของอลูมิเนียม (1100-0)

ที่มา : Hosford and Caddell (2007)

เมื่อเปรียบเทียบกับสมการเส้นตรงโดยมีแกน X เป็น แกนในแนวนอน และ แกน y เป็น แกนในแนวตั้ง หรือ

$$y = mx + b \quad (13)$$

$$\text{โดยมี } y = \log \bar{\sigma} \text{ และ } x = \log \bar{\epsilon}_p \quad (14)$$

$$\text{ดังนั้น } m = n \text{ และ } b = \log K \quad (15)$$

ค่า K สามารถหาได้ที่จุดตัดเมื่อ ε มีค่าเท่ากับ 1 ส่วนความลาดชันของเส้นตรงมีค่าเท่ากับ n การหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจริง จึงมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการกำหนดสมบัติทางกลของโลหะในการจำลองการทอบขึ้นรูปด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

6.4 ผลกระทบของอัตราความเครียดและอุณหภูมิ

ในการทดสอบโลหะด้วยแรงอัดหรือแรงดึง พบว่าลักษณะของ Flow curve ขึ้นอยู่กับความเร็วในขณะทำการกดหรือดึงขึ้นงานทดสอบ หรืออัตราความเครียด (Strain rate) การทดสอบแรงดึงโดยทั่วไปจะกำหนดอัตราความเครียดอยู่ระหว่าง 10^{-5} ถึง 10^{-1} ต่อวินาที สมการของอัตราความเครียดของความเครียดจริง ได้แสดงในสมการที่ 16

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\bar{\varepsilon}}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\ln \frac{L_i}{L_0} \right) = \frac{1}{L_i} \frac{dL_i}{dt} = \frac{v}{L_i} \quad (16)$$

โดยที่ $\dot{\varepsilon}$ คือ อัตราความเครียด (True-Strain Rate)
 v คือ ความเร็วของหัวจับ (Crosshead velocity) หรือความเร็วในการดึงหรือกดในขณะทดสอบ
 L_i คือ ความยาวของชิ้นงานขณะใดๆ

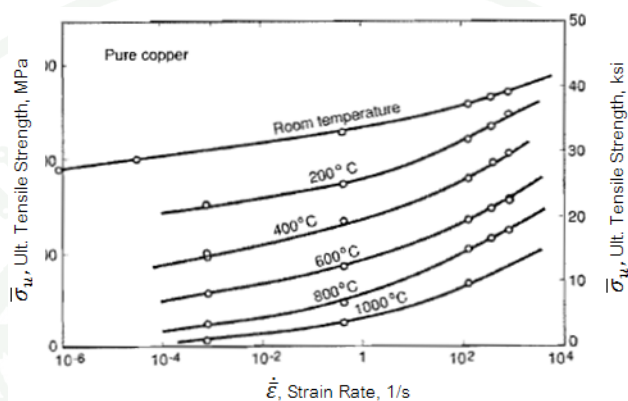
ในทำนองเดียวกันอัตราความเครียดวิศวกรรม ($\dot{\varepsilon}$) ในเทอมของความเร็ว (v) และความยาวเดิม (Gauge length, L_0) คือ

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt} = d \frac{(L_i - L_0)/L_0}{dt} = \frac{1}{L_0} \frac{dL_i}{dt} = \frac{v}{L_0} \quad (17)$$

จากสมการที่ 17 และ ความสัมพันธ์ระหว่าง $\dot{\varepsilon}$ และ $\dot{\varepsilon}$ คือ

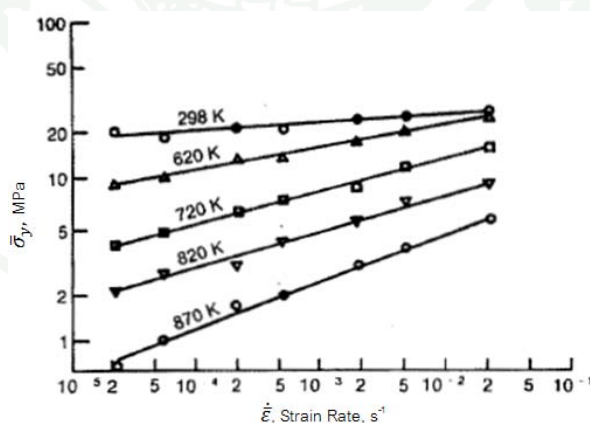
$$\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}} = \frac{v}{L_i} = \frac{L_0}{L_i} \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{1 + \varepsilon} \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\dot{\varepsilon}}{1 + \varepsilon} \quad (18)$$

ผลของการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและอัตราความเครียด ($\dot{\epsilon}$) ต่อความเค้นที่ทำให้วัสดุแตกหัก (σ_u) และความเค้นคราก (σ_y) ได้แสดงในภาพที่ 14 และ 15 ตามลำดับ โดยทั้งสองภาพนี้ได้แสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมิคงที่ใดๆ ความเค้น σ_u และ σ_y จะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราความเครียดจริง และเมื่อมีอุณหภูมิเพิ่มมากขึ้น มีผลให้ค่าความเค้น σ_u และ σ_y มีค่าต่ำลง



ภาพที่ 14 แสดงผลของอัตราความเครียดจริงที่ระดับอุณหภูมิต่างๆ กับความเค้นจริงสูงสุดของทองแดง

ที่มา : Dowling (1993)

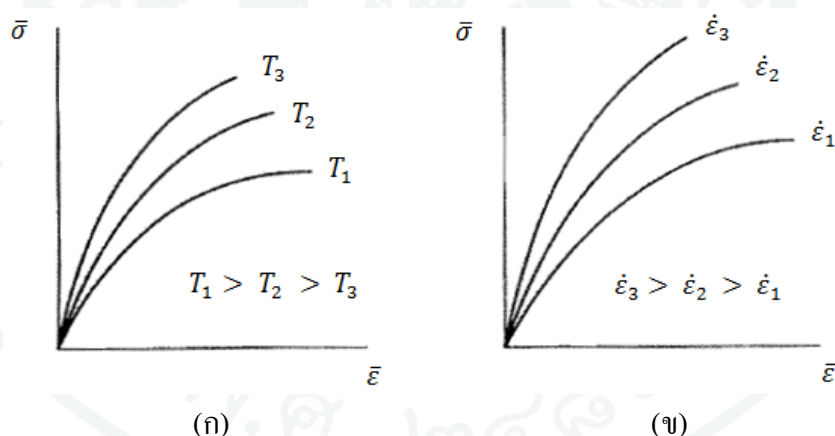


ภาพที่ 15 แสดงผลของอัตราความเครียดต่อความเค้นคราก ที่อุณหภูมิต่างๆ ของอลูมิเนียมอัลลอย 6063-o

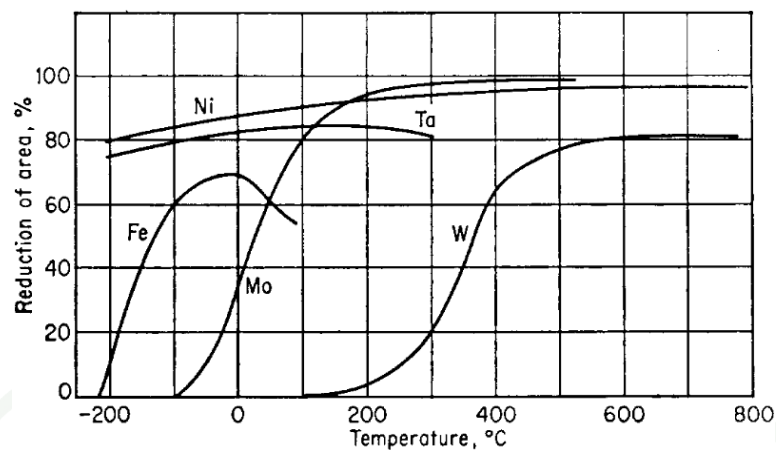
ที่มา : Dieter (1988)

จากภาพที่ 16 (ก) แสดงว่าการเพิ่มอุณหภูมิมีผลให้เส้นกราฟของ flow curve ต่ำลง(หรือความเค้นลดลง) แต่ความเครียด (ϵ) ที่ความเค้นแตกหักมากขึ้น และภาพที่ 16 (ข) เมื่อเพิ่มอัตราความเครียด ($\dot{\epsilon}$) ทำให้เส้นกราฟของ flow curve สูงขึ้น (หรือความเค้นสูงขึ้น) แต่ความเครียด (ϵ) ที่ความเค้นแตกหักมีค่าน้อยลง ภาพที่ 17 จะพบว่าที่อัตราความเครียดคงที่ การเพิ่มอุณหภูมิมีผลให้เปอร์เซ็นต์การลดลงพื้นที่หน้าตัดของโลหะต่างๆ เพิ่มขึ้น หรือกล่าวคือ ค่าความเครียด (ϵ) มากขึ้น ในขณะที่แรงกระทำยังเท่าเดิม ภาพที่ 18 จะพบว่า เหล็ก โมลิบดีนัม ทั้งสแตน ที่มีโครงสร้าง Unit cell แบบ BCC ความเค้นครากจะลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ ในขณะที่ นิกเกิล ที่มีโครงสร้าง Unit cell แบบ FCC ความเค้นครากจะลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ดังนั้น โลหะที่มีโครงสร้าง Unit cell แบบ BCC เช่น เหล็ก โครเมียม โมลิบดีนัม ทั้งสแตน และวัสดุจำพวก เซรามิก ได้รับผลกระทบจากอุณหภูมิ มากกว่าโลหะที่มีโครงสร้าง Unit cell แบบ FCC เช่น ทองแดง อลูมิเนียม ทองคำ นิกเกิล

นอกจากนี้ ภาพที่ 19 แสดงค่า n (Strain hardening exponent) ของโลหะทั่วไปจะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น

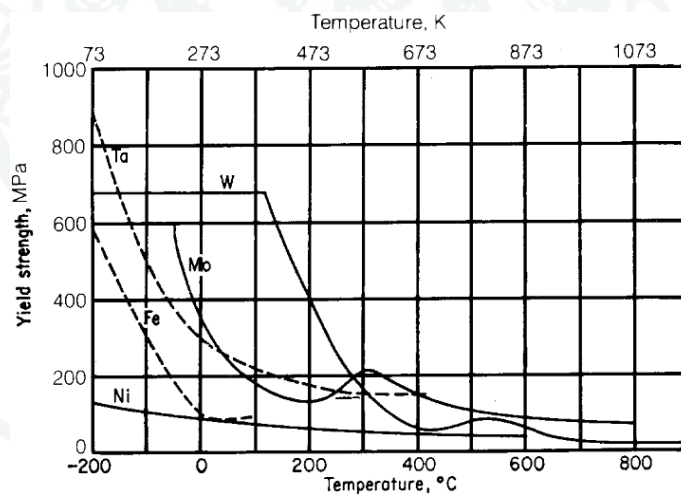


ภาพที่ 16 แสดงความเค้นและความเครียดหรือ Flow curve เมื่อ (ก) มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ และ (ข) อัตราความเครียด



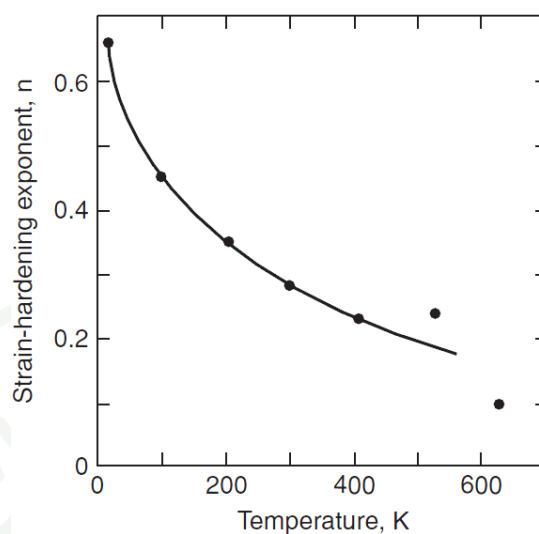
ภาพที่ 17 แสดงผลของอุณหภูมิต่อการลดลงของพื้นที่หน้าตัด (Reduction of area, % RA) ของเหล็ก (Iron, Fe) แทนทาลัม (Tantalum, Ta) นิกเกิล (Nickel, Ni), โมลิบดีนัม (Molybdenum, Mo) และทังสเตน (Tungsten, W)

ที่มา : Dieter (1988)



ภาพที่ 18 แสดงผลของอุณหภูมิต่อความเค้นครากของวัสดุที่มีโครงสร้างแบบ BCC (Ta, W, Mo, Fe) และแบบ FCC (Ni)

ที่มา : Dieter (1988)



ภาพที่ 19 แสดงผลของอุณหภูมิต่อ Strain hardening exponent (n) ของอลูมิเนียมบริสุทธิ์

ที่มา : Hosford and Caddell (2007)

6.5 สภาพพลาสติกและเกณฑ์การคราก

วัสดุจะเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรต้องเกิดความเค้นมากกว่า ความเค้นคราก (Yield Stress) ในการวิเคราะห์ความเค้นในชิ้นงานจะใช้สมการทางคณิตศาสตร์ของความเค้นที่เรียกว่า เกณฑ์การคราก (Yield Criteria) เพื่อทำนายความเค้นที่เกิดขึ้นในเนื้อชิ้นงานว่าจะเกิดการเปลี่ยนขนาดอย่างถาวรหรือไม่

6.5.1 เกณฑ์การคราก (Yield Criteria)

เกณฑ์การครากเป็นสมการคณิตศาสตร์ของความเค้นที่สามารถระบุการเกิดการคราก หรือการเปลี่ยนรูปร่างถาวร (Johnson, 1973) ทฤษฎีที่นิยมใช้สำหรับวัสดุที่เป็นโลหะ มี 2 ทฤษฎี คือ ทฤษฎีของเทสกา (Tresca) และทฤษฎีของฟอนมิสเซส (Von-Mises)

ทฤษฎีของเทสก์เป็นสมการที่ง่ายต่อการคำนวณความเค้นและใช้กันมากในอดีตที่ผ่านมา ปัจจุบันการวิเคราะห์วัสดุเหนียวนิยมนำทฤษฎีของ ฟอนมิสเชส หรือเกณฑ์พลังงานแปรรูป (Distortion energy criterion) รูปแบบฟังก์ชันของเกณฑ์การคราก คือ

$$f(\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}) = C \quad (19)$$

หรือในพจน์ของความเค้นฉาก

$$f(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = C \quad (20)$$

โดยมีสมมุติฐานดังนี้

1. เนื้อโลหะจะต้องสม่ำเสมอ และมีสมบัติเท่ากันทุกทิศทาง
2. โหลดที่กระทำต่อวัสดุจะต้องเป็นโหลดคงที่
3. วัสดุสามารถจะรับแรงดึงและรับแรงอัดได้เท่ากัน หรือมีความเค้นครากดึงเท่ากับ ความเค้นครากอัด (หรือไม่เกิด Bauschinger effect)
4. ปริมาตรของชิ้นงานมีค่าคงที่ หรือผลรวมของความเครียดที่เปลี่ยนไปในทิศทางต่างๆ รวมแล้วมีค่าเท่ากับศูนย์ ($d\varepsilon_1 + d\varepsilon_2 + d\varepsilon_3 = 0$)
5. ความเค้นเฉลี่ย $\left(\sigma_{avg} = \frac{(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)}{3} \right)$ ไม่มีผลต่อการคราก
6. อัตราความเครียด (Strain rate) และอุณหภูมิคงที่

6.5.2 เกณฑ์ของฟอนมิสเชส (Von Mises Criteria) (Hosford and Caddell, 2007)

เกณฑ์นี้กล่าวว่า การครากเกิดขึ้นเมื่อรากของค่าความเค้นเฉือนเฉลี่ย (Root-mean shear stress) C_1 ตามสมการที่ (21) และค่าคงที่ C_2 ตามสมการที่ (22)

$$C_1 = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{3}} \quad (21)$$

$$C_2 = (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \quad (22)$$

ภายใต้เงื่อนไขเมื่อมีแรงดึงมากระทำแกนเดียว (แกน 1) จะได้ $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ และเมื่อให้ $\sigma_1 = Y$ ทำให้ค่าคงที่ C_2 เท่ากับ $2Y^2$ เมื่อเกิดการเลื่อนอย่างเดียวโดยให้ $\sigma_1 = k = -\sigma_3$ และ $\sigma_2 = 0$ จะได้ $C_2 = 6k^2$ ดังนั้น เกณฑ์ของฟอนมิเชสจึงเขียนได้เป็น

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = \begin{cases} 2Y^2 & \text{สำหรับดึงแกนเดียว} \\ 6k^2 & \text{สำหรับแรงเฉือน} \end{cases} \quad (23)$$

6.5.3 ความเค้นประสิทธิผล (Effective Stress)

ความเค้นประสิทธิผล หรือ σ_{eff} คือค่าความเค้นที่จะทำให้เกิดการคราก จากเกณฑ์ของฟอนมิเชสความเค้นประสิทธิผลคำนวณได้จาก (Hosford and Caddell, 2007)

$$\sigma_{eff} = Y = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (25)$$

6.5.4 ความเครียดประสิทธิผล (Effective Strain)

ความเครียดประสิทธิผลหรือ ε_{eff} มีนิยามว่า งานส่วนเพิ่ม (Incremental Work หรือ dw) ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร โดยเป็นไปตามสมการ (Hosford and Caddell, 2007)

$$dw = \sigma_{eff} d\varepsilon_{eff} = \sigma_1 d\varepsilon_1 + \sigma_2 d\varepsilon_2 + \sigma_3 d\varepsilon_3 \quad (26)$$

จากเกณฑ์ของฟอนมิเชส ความเครียดประสิทธิผลคำนวณได้จากสมการ incremental effective strain, $d\varepsilon_{eff}$

$$d\varepsilon_{eff} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(d\varepsilon_1 - d\varepsilon_2)^2 + (d\varepsilon_2 - d\varepsilon_3)^2 + (d\varepsilon_3 - d\varepsilon_1)^2} \quad (27)$$

ถ้า $d\varepsilon_1, d\varepsilon_2$ และ $d\varepsilon_3$ เป็นค่าคงที่ค่า ε_{eff} สามารถเขียนได้เป็น

$$\varepsilon_{eff} = \sqrt{\frac{2}{3}(\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \varepsilon_3^2)} \quad (28)$$

7. ความเสียดทานและสารหล่อลื่นสำหรับกระบวนการทอขึ้นรูปร้อน

7.1 ความเสียดทาน

การต้านทานการเคลื่อนที่ของผิวสัมผัส หรือ ความเสียดทาน (Friction) ที่เกิดขึ้นในกระบวนการทอขึ้นรูป เกิดขึ้นในขณะที่มีการไหลตัวของโลหะจากการกดของแม่พิมพ์ ดังนั้นแรงเสียดทานระหว่างแม่พิมพ์และชิ้นงานจึงมีผลอย่างมากต่อการไหลตัวของโลหะ รวมถึงคุณภาพของผิวและสิ่งบกพร่องที่เกิดภายในเนื้อวัสดุ ความเค้นของแม่พิมพ์ แรงและพลังงานที่ใช้ในการขึ้นรูป อิทธิพลของความเสียดทานในกระบวนการทอขึ้นรูปเป็นเรื่องที่ซับซ้อน และผลการศึกษาวิจัยที่ผ่านมาของการของความสัมพันธ์ของความเสียดทานต่อตัวแปรต่างๆ ยังไม่เป็นที่น่าพอใจ ความเสียดทานที่กำหนดได้ในซอฟต์แวร์ MSC.Marc มี 2 แบบ คือ ความเสียดทานคูลอมป์ (Coulomb Friction) ที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์แบบจำลองทั่วไป และแบบความเสียดทานเฉือน (Shear Friction) สำหรับใช้วิเคราะห์แบบจำลองการขึ้นรูปโลหะแบบก้อน

7.1.1 ความเสียดทานคูลอมป์ (Coulomb Friction)

เนื่องด้วยความเค้นเฉือน (Shear Stress) มีความผันแปรเชิงเส้นกับความดันระหว่างชิ้นงานและแม่พิมพ์ ดังสมการ

$$\tau = \mu p \quad (29)$$

โดยที่ τ	คือ ความเค้นเฉือน
p	คือ ความดันระหว่างแม่พิมพ์และชิ้นงานในแนวสัมผัส
μ	คือ สัมประสิทธิ์ความเสียดทานคูลอมป์

เมื่อเกิดการลื่นไถลแบบสะดุด (Stick) ค่าสัมบูรณ์ของความเค้นสัมผัส ($|\sigma_t|$) มีค่า

$$|\sigma_t| < \mu \sigma_n \quad (30)$$

โดยที่ σ_t คือ ความเค้นสัมผัส (Contact stress) หรือความเสียดทาน

σ_n คือ ความเค้นฉาก

μ คือ สัมประสิทธิ์ความเสียดทานคูลอมป์

เมื่อเกิดการลื่นไถล (Slipping) เพียงอย่างเดียว ค่า σ_t คำนวณได้จาก

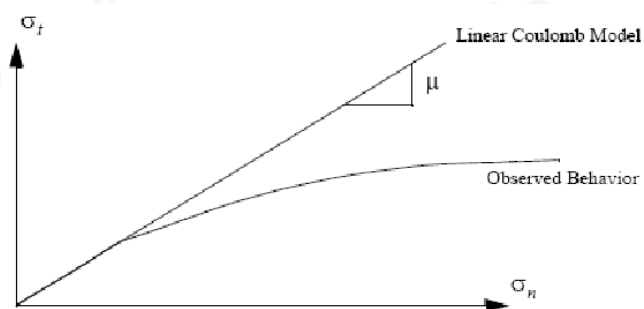
$$\sigma_t = \mu \sigma_n \cdot t \quad (31)$$

โดยที่ t คือ เวกเตอร์การสัมผัสในทิศทางที่สัมพันธ์กับการเคลื่อนที่ หรือ

$$t = \frac{v_r}{\|v_r\|} \quad (32)$$

และ v_r คือ ความสัมพันธ์ของความเร็ว

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง σ_n และ σ_t ได้แสดงในภาพที่ 20



ภาพที่ 20 เปรียบเทียบแบบจำลองความเสียดทานคูลอมป์กับความเสียดทานที่เกิดขึ้นจริง

ที่มา : MSC.Marc (2003)

ความคลาดเคลื่อนจากการใช้ความเค้นเฉือนคลอมบี้ จะพบเมื่อมีแรงหรือความเค้นสูง ในช่วงที่มีความเค้นสูง ค่าสัมประสิทธิ์ความเค้นเฉือนจะไม่เป็นเส้นตรงตามแสดงในภาพที่ 20 สำหรับงานขึ้นรูปแบบก้อน จะใช้ความเค้นเฉือนแบบเนียน หรือความเค้นเฉือนคงที่ แทนความเค้นเฉือนคลอมบี้

7.1.2 ความเค้นเฉือน (Shear Friction)

ความเค้นเฉือนสำหรับการวิเคราะห์งานขึ้นรูปโลหะแบบก้อน ตามทฤษฎีระบุใน ซอฟต์แวร์ MSC.Marc กำหนดให้ความเค้นเฉือน เป็นสัดส่วนกับความเค้นประสิทธิผล (Equivalent stress) ของวัสดุ ดังแสดงตามสมการ

$$|\tau| = \frac{m\bar{\sigma}}{\sqrt{3}} \quad (33)$$

โดยมี m คือ สัมประสิทธิ์ความเค้นเฉือน มีค่า $0 \leq m \leq 1$

เมื่อเกิดการลื่นไถลแบบเสถียร ความเค้นเฉือน $|\tau|$ มีสมบัติตามสมการที่ 34

$$|\tau| < m \frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{3}} \quad (34)$$

และเมื่อเกิดการลื่นไถลเพียงอย่างเดียว $|\tau|$ เท่ากับ

$$|\tau| = -m \frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{3}} . t \quad (35)$$

โดยความเค้นเฉือน หรือตัวประกอบการเฉือน มีลักษณะคล้ายคลึงกับความเค้นเฉือนคลอมบี้กล่าวคือ เป็นค่าคงที่ระหว่างชิ้นงาน แม่พิมพ์ และการหล่อขึ้น ซอฟต์แวร์ MSC.Marc จะมีการคำนวณสองส่วน คือ ส่วนแรกเป็นฟังก์ชันของ arctangent (arctan) ตามสมการ 36 เพื่อให้มีความเรียบต่อเนื่อง

$$\tau = -m \frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{3}} \frac{2}{\pi} \arctan\left(\frac{v_r}{RVCNST}\right) \cdot t \quad (36)$$

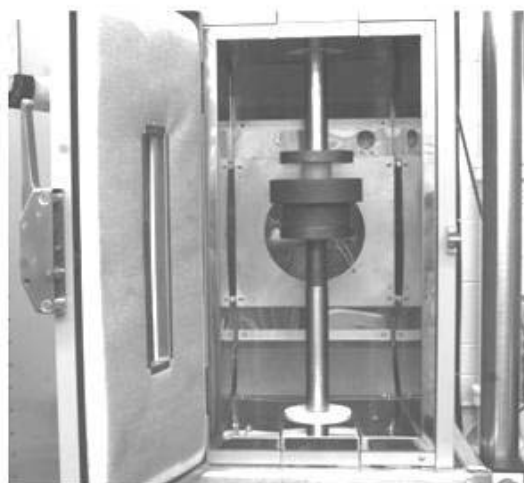
ส่วนที่สองเป็นแบบ Bilinear สำหรับคำนวณตามสมมติฐานความเค้นเฉือน ใน Node เป็นสัดส่วนกับแรงเฉือน สรุปคือ ความเสียหายขึ้นอยู่กับความเค้นเฉือน ตามสมการ 37 ดังนั้น

$$\tau = \min\left(m\sigma_n, m\frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{3}}\right) \quad (37)$$

ความเสียหายแบบเฉือน หรือแบบคงที่ (m) มีความเหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์งานขึ้นรูปโลหะมากกว่าความเสียหายคลอมป์ อนึ่งค่า m สำหรับการขึ้นรูปโลหะจะเป็นสัดส่วนกับค่าความเค้นไหลในเนื้อของชิ้นงาน ค่าคงที่ของการสัมผัส และอุณหภูมิ การหาค่าความเสียหายในกระบวนการขึ้นรูปโลหะ สามารถทดสอบได้จากการทดสอบการกดวงแหวนของวัสดุชิ้นงาน (Ring Compression Test) ด้วยแผ่นกดที่เป็นวัสดุชนิดเดียวกันกับแม่พิมพ์

7.2 การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหาย

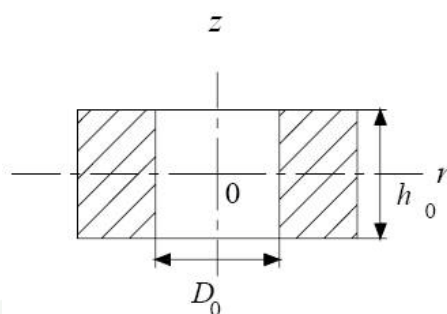
การหาค่าความเสียหายระหว่างผิวหน้าสัมผัสชิ้นงานกับผิวหน้าสัมผัสแม่พิมพ์ สามารถทดสอบได้จากการทดสอบการกดวงแหวน (Ring Compression Test) ซึ่งเป็นการทดสอบ (ภาพที่ 21) ที่ใช้อุปกรณ์และเครื่องมือที่ไม่ซับซ้อนมาก (Jang-Ping, 2008) การทดสอบนี้สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายในช่วงการเสียรูปอย่างถาวรของวัสดุได้ โดยไม่ต้องวัดแรงในการขึ้นรูป ไม่ต้องทราบค่าความแข็งของวัสดุ ไม่จำกัดอัตราความเครียด (Strain rate) ไม่จำกัดอุณหภูมิและสารหล่อลื่น ข้อเสียของวิธีนี้คือ ไม่มีทฤษฎีความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ได้จากการวัดและค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายมารองรับ อย่างไรก็ตามวิธี Slap Method สามารถนำมาใช้คำนวณความสัมพันธ์ดังกล่าวได้ แต่ความน่าเชื่อถือก็น้อย เพราะไม่ได้คำนึงถึงอิทธิพลของ Inhomogeneous deformation ของวัสดุ อย่างไรก็ตามการทดสอบ Ring Compression Test เป็นที่ยอมรับในการทดสอบหาค่าความเสียหายที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย



ภาพที่ 21 แสดงอุปกรณ์การทดสอบ Ring Compression Test ที่อุณหภูมิสูง

ที่มา : http://mmri.Mcmaster.ca/mfl/research_test_ring_compression.html

การทดสอบ Ring Compression Test สามารถกระทำได้โดยเริ่มจากการ เตรียมชิ้นงาน ทดสอบรูปวงแหวน (ภาพที่ 22) ซึ่งมีอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง ภายในต่อความสูง เท่ากับ 6 : 3 : 2 ตามลำดับ แม่พิมพ์ที่ใช้กดต้องเป็นแผ่นราบที่ต้องมีความเรียบ เท่ากับผิวของแม่พิมพ์ที่ใช้ในการทุบขึ้นรูป การทดสอบกระทำโดยกดชิ้นงานให้ความสูงลดลงอยู่ ในช่วง 30% ถึง 50% เสร็จแล้ววัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกและภายใน แล้วนำไปคำนวณ ค่า % Reduction ของเส้นผ่านศูนย์กลางวงใน และค่า % Reduction ของความสูง (ภาพที่ 23) เพื่อนำไปอ่านค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายจาก Calibration curve อนึ่งขณะทำการทดสอบกด ชิ้นงาน ทิศทางของแรงกดจะต้องอยู่ในแนวตั้งฉากกับผิวชิ้นงานเพื่อให้การไหลขนานกับผิว แม่พิมพ์ ชิ้นงานวงแหวนภายหลังการกดจะพบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกมีขนาดใหญ่ขึ้น ส่วนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในอาจสามารถมีขนาดเพิ่มขึ้น ลดลง หรือคงที่ ซึ่งขึ้นอยู่กับค่า สัมประสิทธิ์ความเสียหายระหว่างผิวของแม่พิมพ์และชิ้นงาน ในสถานะที่ไม่มีความเสียหาย ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในจะขยายออกเป็นสัดส่วนกับเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก การ ขยายตัวของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในมีค่าน้อยลงเมื่อค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายเพิ่มขึ้น เส้น ผ่านศูนย์กลางภายในจะมีค่าน้อยกว่าเดิม เมื่อค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายสูงชิ้นงานทำให้เกิด Compressive hoop stress



ภาพที่ 22 แสดงขนาดชิ้นงานรูปวงแหวนสำหรับการทดสอบ Ring Compression Test

Reduction in height [%]		Decrease in I.D. [%]
7.2%		-1.48%
22.2%		-2.96%
40.0%		-1.85%

ภาพที่ 23 แสดงผลการทดสอบ Ring Compression Test

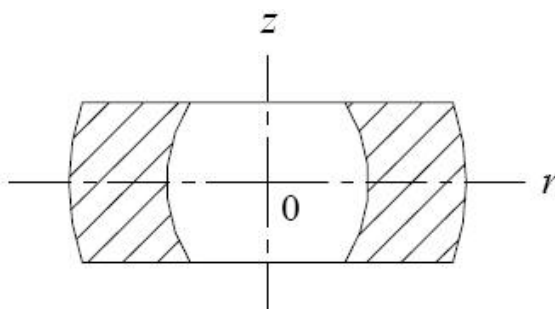
ที่มา : Altan *et al.* (2005)

การเปลี่ยนแปลงขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน ของชิ้นงานวงแหวนมี 3 ลักษณะที่อาจเกิดขึ้นได้ ดังนี้

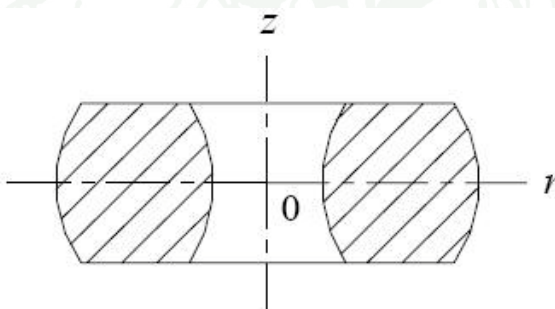
1. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่าเดิม ($m = 0$) ลักษณะนี้จะเกิดเมื่อการไหลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเป็นสัดส่วนกัน ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของวงแหวนจึงเท่าเดิม

2. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเพิ่มขึ้น (m มีค่าน้อย) ตามแสดงในภาพที่ 24 ลักษณะนี้จะเกิดเมื่อมีความเสียดทานน้อย ทำให้ Compressive Hoop Stress มีค่าน้อยเป็นผลให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของวงแหวนเพิ่มมากขึ้น

3. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในลดลง (m มีค่ามาก) ลักษณะนี้จะเกิดเมื่อการขยายตัวของวงแหวนเริ่มลดลง เนื่องจากมีความเค้นดันทันสูงจนกระทั่ง Compressive Hoop Stress เกิดมากพอที่จะทำให้เกิดการหดตัวของเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (ภาพที่ 25)



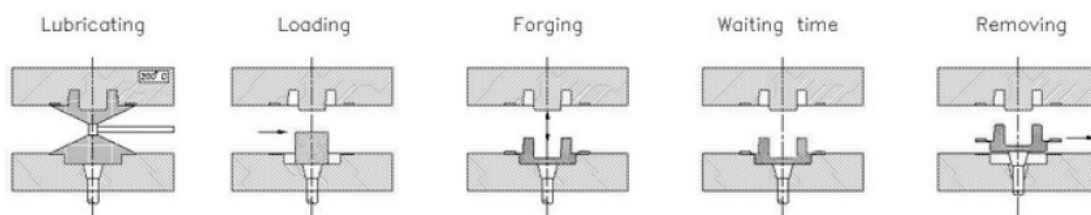
ภาพที่ 24 การเปลี่ยนแปลงขนาดของชั้นวงแหวนเมื่อมีความเค้นดันทันน้อย



ภาพที่ 25 การเปลี่ยนแปลงขนาดของชั้นวงแหวนเมื่อมีความเค้นดันทันมาก

7.3 สารหล่อลื่นสำหรับกระบวนการทึบขึ้นรูปร้อน

สารหล่อลื่นที่ใช้ในการทึบขึ้นรูปร้อน มีวัตถุประสงค์หลักคือ ช่วยให้ชิ้นงานหลุดจากแม่พิมพ์ได้ง่ายขึ้น สารหล่อลื่นที่นิยมใช้ได้แก่ ผงกราไฟต์ผสมกับน้ำ (น้ำเป็นสื่อพาผงกราไฟต์ไปยึดติดที่ผิวหน้าแม่พิมพ์) แล้วทำการพ่นที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างแม่พิมพ์กับชิ้นงาน ขั้นตอนการใช้สารหล่อลื่นในกระบวนการทึบขึ้นรูปร้อนได้แสดงในภาพที่ 26



ภาพที่ 26 แสดงการใช้สารหล่อลื่นในกระบวนการทอขึ้นรูปร้อน

ที่มา : Altan *et al.* (2005)

8. ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ทฤษฎีในการวิเคราะห์กระบวนการขึ้นรูปโลหะ ที่ได้มีการพัฒนาและที่นิยมใช้นั้น มีอยู่หลายวิธี เช่น วิธี Slab Method, Slip-Line Field Method, Viscoplasticity Method, Upper and Lower Bound Techniques, Hill's General Method และวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method, FEM) เนื่องจากได้มีการนำคอมพิวเตอร์มาช่วย การประมวลผลทางคณิตศาสตร์ จึงทำให้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นที่นิยมใช้แพร่หลายมากขึ้น (Kobayashi *et al.*, 1989) และสะดวกในการวิเคราะห์ปัญหาทางวิศวกรรมศาสตร์

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้เริ่มในปี ค.ศ.1940 โดยใช้วิเคราะห์ปัญหาความเค้นในมิติเดียว เช่น ความเค้นในท่อนโลหะและคาน แต่ในเวลานั้นยังไม่เป็นที่นิยม ต่อมาในปี ค.ศ.1954 เมื่อคอมพิวเตอร์ได้พัฒนาให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จึงได้รับความนิยมมากขึ้น โดย Turner, Clough, Martins และ Topp ได้นำวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาวิเคราะห์ปัญหาสองมิติเป็นครั้งแรก โดยแสดงวิธีการหา stiffness matrix ของเอลิเมนต์สองมิติแบบสามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยม

ในปี ค.ศ. 1960 Clough ได้วิจัยพัฒนาวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ มาใช้วิเคราะห์ปัญหาความเค้นระนาบ (plane stress) โดยใช้เอลิเมนต์ชนิดสามเหลี่ยมมุมฉากศึกษาการเปลี่ยนแปลงของขนาดในช่วงยืดหยุ่น (elastic) ต่อมาทฤษฎีของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ได้รับความนิยมมากขึ้นและได้พัฒนาใช้หลักการต่างๆ ซึ่งสามารถวิเคราะห์ปัญหาที่มีการเปลี่ยนรูปของวัสดุในช่วงยืดหยุ่นไม่เชิงเส้น (non-linear elastic) ได้ ซึ่งเป็นของกรณีเมื่อมีความเครียดและการกระจัดมาก ปัจจุบันวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้รับความนิยมอย่างกว้างขวาง

9. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจำลองกรรมวิธีการทอบขึ้นรูป พบว่ามีหลายงานวิจัยที่นำวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาใช้ในการศึกษาการทอบขึ้นรูป เพื่อทำนายขนาดของชิ้นงาน ศึกษาการลดการสูญเสียวัสดุ และลดความผิดพลาดในการผลิต ทำให้การออกแบบสำเร็จได้อย่างรวดเร็ว งานวิจัยที่เกี่ยวข้องมีดังนี้

Mamalis *et al.* (1996) ได้จำลองกระบวนการทอบขึ้นรูปเฟืองหนอนจากวัสดุอัลลอย X5CrNi189 ด้วยการใส่ไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์ของสองบริษัท เพื่อแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของผลการจำลองที่ได้จากระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่ต่างกัน งานวิจัยนี้ทดสอบระเบียบวิธีแบบปริยาย (Implicit Method) โดยใช้ซอฟต์แวร์ MSC. Marc และทดสอบแบบระเบียบวิธีชัดแจ้ง (Explicit Method) โดยใช้ซอฟต์แวร์ Dyna 3D แบบจำลองการทอบขึ้นรูปใช้แบบจำลองวัสดุแบบ Rigid-Perfectly-Plastic โดยจำลองการทอบขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 1250°C ผลการจำลองพบว่าการใช้ระเบียบวิธีแบบปริยาย ด้วยซอฟต์แวร์ MSC. Marc สามารถพยากรณ์การไหลตัวของโลหะได้อย่างถูกต้อง และให้ผลใกล้เคียงกับผลของการวัดที่ได้จากการทดลอง ส่วนผลการจำลองที่ได้จากระเบียบวิธีชัดแจ้ง ด้วยซอฟต์แวร์ Dyna 3D มีความคลาดเคลื่อนมากกว่า แต่มีข้อได้เปรียบในเวลากำหนดที่น้อยกว่าระเบียบวิธีปริยาย

Muammer *et al.* (1996) ได้วิจัยกระบวนการผลิตของวัสดุกึ่งของแข็ง (Semi-Solid Forging, SSF) แบบจำลองกระบวนการผลิต และการพัฒนาสมการความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นจริงกับความเครียดจริง งานวิจัยนี้ได้จำลองการทอบขึ้นรูปร้อนวัสดุอลูมิเนียมอัลลอย A356 ที่อุณหภูมิ 580°C โดยใช้ซอฟต์แวร์ไฟไนต์เอลิเมนต์ Deform 2D และกำหนดแบบจำลองเป็นแบบ Semi-Solid Forging การวิจัยได้จำลองการทอบขึ้นรูปงาน ภายใต้เงื่อนไขอุณหภูมิคงที่ และไม่คงที่ เพื่อศึกษาการไหลของวัสดุอลูมิเนียมอัลลอยในแม่พิมพ์ปิด ผลการจำลองเมื่อเทียบกับการทดลองจริงพบว่า สามารถพยากรณ์การเกิด รอยพับและจุดที่วัสดุไหลมาเชื่อมติดกันได้อย่างถูกต้อง ทั้งนี้ความแม่นยำขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่กำหนด โดยเฉพาะความสัมพันธ์ ระหว่างความเค้นจริงและความเครียดจริง ที่ได้มาจากการทดลอง Compression Tests ภายใต้การควบคุมสภาพแวดล้อมต่างๆ ได้แก่ อุณหภูมิ และอัตราความเครียด

Vazquez and Altan (2000) ได้จำลองการทอบขึ้นรูปร้อนอลูมิเนียมของชิ้นงานก้านสูบ เครื่องยนต์ซึ่งมีรูปทรงที่ซับซ้อน โดยมีจุดประสงค์เพื่อลดการสูญเสียที่เกิดจากครีบของชิ้นงาน โดยในกระบวนการผลิตมีการสูญเสียวัสดุที่เป็นครีบประมาณ 20% ถึง 40% งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการออกแบบ Preform เพื่อให้ทอบขึ้นรูปแบบไร้ครีบและทำให้การกระจายตัวของวัสดุมีความถูกต้องอันเป็นผลให้ลดการรับภาระเกินพิกัดของแม่พิมพ์ วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ Al 2618 ขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 400°C ศึกษาการทอบขึ้นรูปในแม่พิมพ์ปิดเพื่อให้ได้รูปร่างที่แม่นยำ การจำลองการทอบขึ้นรูปใช้ซอฟต์แวร์ Deform 3D ผลการจำลองสามารถลดการเกิดของเสียให้เหลือเพียง 5% ของน้ำหนักของชิ้นงานจริง

He Yang *et al.* (2002) ได้ใช้ Finite Element Analysis จำลองกระบวนการทอบขึ้นรูปร้อนของชิ้นงานใบพัดไทเทเนียมสำหรับใช้ในเครื่องยนต์ของเครื่องบิน โดยการจำลองได้ใช้แบบจำลอง Rigid-Viscoplastic วัสดุที่ใช้ในการขึ้นรูปคือ Ti-6Al-4V ทำการขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 950°C ผลจากงานวิจัยนี้สามารถนำไปเป็นแนวทางในการออกแบบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพทั้งด้านกระบวนการทอบขึ้นรูปร้อน และการออกแบบแม่พิมพ์ สำหรับใบพัดแบบรูปทรงต่างๆ และกระบวนการทอบขึ้นรูปทั่วไป

Behrens (2008) ได้เสนอ Finite Element Model ของการจำลองการสึกหรอของแม่พิมพ์ เพื่อประมาณการสึกหรอของแม่พิมพ์ รวมถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นจากอุณหภูมิต่อค่าความแข็งของแม่พิมพ์ ซึ่งวัสดุที่ใช้เป็นแม่พิมพ์ในงานวิจัยคือ เหล็ก 1.2365 (DIN EN Standard) ซึ่งมีค่าความแข็ง 53.5 HRC และวัสดุ C45 ขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 1250°C การจำลองได้มุ่งเน้นไปยังชิ้นส่วนเมนเดรลของแม่พิมพ์ เนื่องจากเกิดการสึกหรอมากที่สุด โดยต้องทำการเปลี่ยนตามวงจรการทำงานที่ 500, 1000 และ 2000 จากผลการจำลองเมื่อเทียบกับการวัดค่าจริง พบว่ารูปทรงและตำแหน่งของการสึกหรอของเมนเดรลเป็นไปในแนวโน้มเดียวกัน และจากการวัดค่าความแข็งเมื่อเทียบกับผลจากแบบจำลองพบว่ามีความแม่นยำสูง

Lva and Zhang (2008) ได้จำลองกระบวนการทอบขึ้นรูปร้อนชิ้นงาน Gas turbine compressor blade ซึ่งเป็นวัสดุ Stainless steel โดยชิ้นงานมีความซับซ้อนทั้งด้านรูปทรงและความไม่คงตัวของการกระแทกระหว่างชิ้นงานกับแม่พิมพ์ โดยงานวิจัยนี้ใช้แบบจำลองสามมิติ Rigid-Viscoplastic Finite Element Method และใช้ซอฟต์แวร์ DEFORM 3D เนื่องจากชิ้นงานมีรูปทรงซับซ้อน และต้องการลดแรงที่ใช้ในการขึ้นรูป จึงมีการทอบขึ้นรูปเพื่อเตรียมรูปทรงก่อนทอบขึ้นรูป

จริง (Preform) โดยขั้นตอนการขึ้นรูปเริ่มจาก Upsetting preform, Heading preform, Busting preform และ Final Forging จากผลการจำลองเมื่อนำไปเปรียบ-เทียบกับการทดลองขึ้นรูปจริง พบว่ามีความสอดคล้องและยอมรับได้ในเกณฑ์ที่ดี ผลการจำลองยังพบว่าความเครียดสะสมและอุณหภูมิของชิ้นงานลดลงเป็นอย่างมากทำให้เกิดการพัฒนากระบวนการผลิตให้เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ

Hua and Han (2008) ได้ทำการจำลองกระบวนการทอบขึ้นรูปเย็นแบบโรตารีโดยใช้แบบจำลองสามมิติแบบ elastic-plastic dynamic explicit finite element model กับชิ้นงานเหล็ก AISI 1020 รูปทรงกระบอก และใช้ซอฟต์แวร์ ABAQUS เพื่อจำลองการทอบขึ้นรูป งานวิจัยนี้ได้จำลองในเงื่อนไขต่างๆ เช่น การเปลี่ยน feed rate ของแม่พิมพ์ตัวล่าง ความเร็วในการหมุนของแม่พิมพ์ตัวบนและเปลี่ยนทั้ง feed rate ของแม่พิมพ์ตัวล่างกับความเร็วในการหมุนของแม่พิมพ์ตัวบน รวมทั้งสิ้น 5 เงื่อนไข เพื่อหาค่าตัวแปรที่เหมาะสม ซึ่งผลการจำลองเมื่อเทียบกับการทดลองทอบขึ้นรูปเย็นแบบโรตารี พบว่ามีความสอดคล้องกัน โดยการจำลองตามเงื่อนไขทั้งหมดมีความคลาดเคลื่อนสูงสุดประมาณ 17.62%

อุปกรณ์และวิธีการ

การดำเนินการศึกษาการชุบขึ้นรูปร้อนแม่พิมพ์ปั๊มใช้แม่พิมพ์ทำจากเหล็ก SKD61 (มาตรฐาน JIS) และขึ้นงานเป็นทองเหลืองตามมาตรฐาน DIN 17660 อุณหภูมิในการขึ้นรูปอยู่ในช่วงที่ 625°C ถึง 750°C เนื่องจากการดำเนินงานจะใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อจำลองกรรมวิธีชุบขึ้นรูป ดังนั้นจึงจำเป็นต้องศึกษาขั้นตอนการขึ้นรูปเพื่อเก็บเป็นข้อมูลสำหรับการทดลองขั้นตอนการทำงานมีดังนี้

กระบวนการชุบขึ้นรูปร้อน

1.1 การเตรียมชิ้นงานสำหรับกระบวนการชุบขึ้นรูปร้อน

- การหล่อขึ้นรูป (Casting) ตามแสดงในภาพที่ 27 เป็นการขึ้นรูปโลหะโดยการหลอมทองเหลืองเป็นรูปทรงกระบอกโดยใช้แม่พิมพ์เพื่อขึ้นรูปเป็นก้อนหรือBillet



ก)



ข)



ค)



ง)

ภาพที่ 27 ขั้นตอนการหล่อขึ้นรูปโดย ก) แสดงเศษทองเหลืองจาก scrap ที่เป็นวัตถุดิบในการหล่อขึ้นรูป ข) การนำ scrap ใส่เตาหลอม ค) การหลอม scrap และ ง) แสดง Billet ที่ได้จากการหลอมเป็นรูปทรงกระบอก

- การอัดรีดขึ้นรูป (Extrusion) ตามแสดงในภาพที่ 28 เป็นการขึ้นรูปทองเหลืองเพื่อแปรรูปจากก้อน Billet ให้เป็นเส้นทองเหลืองโดยในการอัดรีดจะทำการอัดรีดผ่านแม่พิมพ์ (Die) เพื่อให้เส้นทองเหลืองมีขนาดหน้าตัดและลักษณะตามต้องการ

- การตัดทองเหลือง (Saw Cutting) เป็นการตัดแบ่งเส้นทองเหลืองให้ได้ขนาดชิ้นงานตามต้องการ (ภาพที่ 29) เพื่อนำไปทอขึ้นรูปต่อไป



ก)



ข)



ค)



ง)

ภาพที่ 28 ขั้นตอนการอัดรีดขึ้นรูปโดยภาพ ก) แสดงแม่พิมพ์ Die ข) แสดงกระบวนการอัดรีดขึ้นรูป ค) แสดง scrap ที่เกิดขึ้นจากการอัดรีดขึ้นรูป และ ง) แสดงเส้นทองเหลือง



ก)



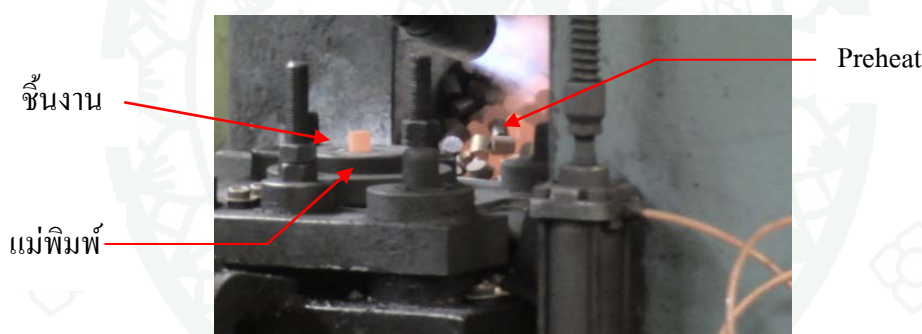
ข)

ภาพที่ 29 แสดงการตัดเส้นทองเหลืองเพื่อนำไปทอขึ้นรูปโดยภาพ ก) แสดงการเลื่อยเส้นทองเหลือง และ ข) แสดงก้อนทองเหลืองที่ถูกตัดแล้ว

1.2 กระบวนการชุบขึ้นรูปร้อน

- การให้ความร้อน (Preheat) โดยใช้เตาเผา (Heating furnace) ตามแสดงในภาพที่ 30 เป็นการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานเพื่อลดความเค้นไหล (Flow stress) ของทองเหลือง ซึ่งเป็นผลให้ใช้แรงในการชุบขึ้นรูปน้อยลง อุณหภูมิที่ใช้ประมาณ 625°C ถึง 750°C ขั้นตอนการให้ความร้อนชิ้นงานมีดังนี้

1. เปิดวาล์วลม
2. นำทองเหลืองใส่เตาเผา
3. ให้ความร้อนของทองเหลืองอยู่ประมาณ 625°C ถึง 750°C
4. นำชิ้นงานวางบนแม่พิมพ์
5. สั่งให้เครื่องทำการชุบขึ้นงาน โดยกดปุ่มสวิทช์ควบคุม 2 ปุ่มพร้อมกัน



ภาพที่ 30 แสดงก้อนทองเหลืองขณะถูกให้ความร้อนก่อน (ด้านใน) และชิ้นงานที่นำมาวางบนแม่พิมพ์

- การชุบขึ้นรูปร้อน (Hot forging) เป็นกระบวนการชุบขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์ที่มีความร้อนสูงเพื่อกดอัดชิ้นงานดิบให้มีรูปทรงและขนาดตามต้องการ (ภาพที่ 31) ขั้นตอนการชุบขึ้นรูปร้อนมีดังนี้

1. ให้ความร้อนแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิ 150°C ถึง 200°C (ภาพที่ 32)
2. นำก้อนทองเหลืองจากเตาเผาไปวางบนแม่พิมพ์ (ภาพที่ 33)
3. ทำการชุบขึ้นรูป
4. นำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ เพื่อนำไปสู่กระบวนการตัดขอบต่อไป



ภาพที่ 31 การติดตั้งแม่พิมพ์ตัวบนและล่างที่เครื่องทุบขึ้นรูป



ภาพที่ 32 การให้ความร้อนแก่แม่พิมพ์ตัวบนและตัวล่าง



ภาพที่ 33 แสดงพนักงานนำก้อนทองเหลืองที่ได้รับความร้อนแล้วไปวางบนแม่พิมพ์

1.3 การตกแต่งชิ้นงาน

การตกแต่งชิ้นงานเป็นการเก็บรายละเอียดของชิ้นงานเพื่อให้ตรงตามแบบที่ต้องการ ประกอบด้วย

- การตัดขอบ (Trimming) เป็นการตัดขอบที่เป็นส่วนเกินของชิ้นงานออก เพื่อให้ชิ้นงานถูกทุบขึ้นรูปแล้ว มีขนาดตามต้องการ
- การปั๊มรู หรือ Punching
- การเจาะรู หรือ Drilling (ภาพที่ 34)
- ชิงทราย หรือ Shot Blasting (ภาพที่ 35)
- การพ่นสี และอบหรือ Spray coating and heating (ภาพที่ 36)



ก)



ข)



ค)



ง)

ภาพที่ 34 แสดงขั้นตอนการตัดขอบ โดย ก) ชิ้นงานที่ถูกทุบแล้ว ข) ชิ้นงานที่นำไปวางบนแม่พิมพ์ตัดขอบ ค) เศษของขอบที่ถูกตัดทิ้ง และ ง) ชิ้นงานที่ตัดขอบแล้ว



ภาพที่ 35 แสดงการเจาะรูของชิ้นงานที่ได้ตัดขอบแล้ว



ก)

ข)

ภาพที่ 36 ก) การยิงทรายที่ขึ้นงาน และ ข) ขึ้นงานที่ถูกยิงทรายแล้ว



ก)

ข)

ภาพที่ 37 ก) ขึ้นงานขณะร่อนสี และห้องอบสี และ ข) ขึ้นงานที่พ่นสีแล้ว

อุปกรณ์

2.1 เครื่องทุบขึ้นรูป

เครื่องทุบขึ้นรูปที่ใช้เป็นเครื่องแบบ Mechanic Press ผลิตโดยบริษัท TAKSIN ประเทศไทย รุ่น TS 250 สามารถให้แรงทุบสูงสุด 250 ตัน โดยมีความเร็วในการทุบคงที่ 33 SPM ดังแสดงในภาพที่ 38



ภาพที่ 38 เครื่องทุบขึ้นรูปที่ใช้ในการทดลอง

2.2 แม่พิมพ์ทุบขึ้นรูปร้อน

แม่พิมพ์ที่ใช้สำหรับการทดลองเป็นแม่พิมพ์สำหรับใช้ในการผลิตชิ้นงานทองเหลือง ฝาประตุน้ำ (VC50) ฝาขันมาตรวัดน้ำ (HC15) และล้นประตุน้ำ (GT50) โดยงานวิจัยนี้ใช้เหล็กมาตรฐาน JIS เกรด SKD61 เป็นแม่พิมพ์ ซึ่งเหล็ก SKD61 นิยมใช้ทำเป็นเครื่องมือและแม่พิมพ์ที่ใช้กับงานขึ้นรูปร้อน (ภาพที่ 39)



ก)



ข)



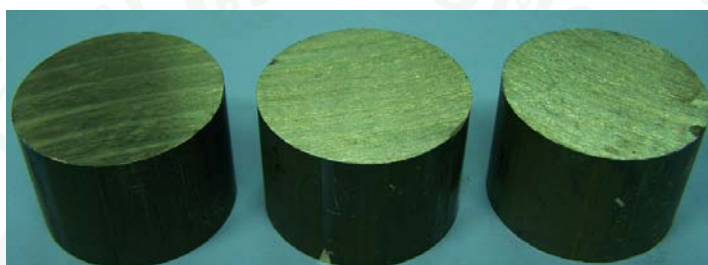
ค)

ภาพที่ 39 แสดงแม่พิมพ์ที่ใช้ในการทดลอง โดยภาพ ก) แสดงแม่พิมพ์ตัวบนและล่างของชิ้นงานฝาประตุน้ำ ข) แม่พิมพ์ตัวบนและล่างของชิ้นงานล้นประตุน้ำ และ ค) แม่พิมพ์ตัวบนและล่างของชิ้นงานฝาขันมาตรวัดน้ำ

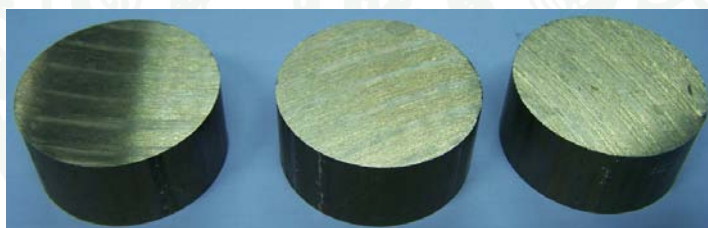
2.3 ชิ้นงานทดสอบในการชุบขึ้นรูปร้อน

งานวิจัยนี้ใช้ทองเหลือง CuZn40Pb2 ตามมาตรฐาน DIN 17660 ซึ่งเป็นทองเหลืองที่มีความสามารถในการชุบขึ้นรูปร้อนได้ดี เพื่อใช้เป็นชิ้นงานทดสอบในการชุบขึ้นรูปร้อน โดยขนาดต่างๆ ของชิ้นงาน หรือ Billet ที่ใช้มีดังนี้

- ชิ้นงานสำหรับทดสอบการทุบขึ้นรูปฝาประตุน้ำ (ภาพที่ 40) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 42 mm. และสูง 28.5 mm.
- ชิ้นงานสำหรับทดสอบการทุบขึ้นรูปล้นประตุน้ำ (ในภาพที่ 41) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 44.7 mm. และสูง 20.5 mm.
- ชิ้นงานสำหรับทดสอบการทุบขึ้นรูปฝาขันมาตรวัดน้ำ (ในภาพที่ 42) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 44.5 mm. และสูง 20.5 mm.



ภาพที่ 40 ชิ้นงาน (Billet) ที่ใช้สำหรับการทุบขึ้นรูปฝาประตุน้ำ (VC50)



ภาพที่ 41 ชิ้นงาน (Billet) ที่ใช้สำหรับการทุบขึ้นรูปล้นประตุน้ำ (GT50)



ภาพที่ 42 ชิ้นงาน (Billet) ที่ใช้สำหรับการทุบขึ้นรูปฝาขันมาตรวัดน้ำ (HC15)

2.4 ชิ้นงานทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

การทดสอบนี้ใช้ชิ้นงานรูปวงแหวน ทำการกดด้วยแผ่นราบ 2 แผ่น แล้ววัดความสูงและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในที่เปลี่ยนแปลงไป แล้วนำไปอ่านค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจาก Calibration Curve ชิ้นงานทดสอบที่ใช้มีอัตราส่วนของ เส้นผ่านศูนย์กลางวงนอกต่อเส้นผ่านศูนย์กลางวงในต่อความสูง เท่ากับ 6 : 3 : 2 เมื่อใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางวงนอกเท่ากับ 25.4 mm. ชิ้นงานจะต้องมีเส้นผ่านศูนย์กลางวงใน เท่ากับ 12.7 mm. และความสูง เท่ากับ 8.5 mm. ภาพชิ้นงานทดสอบได้แสดงในภาพที่ 43



ภาพที่ 43 ชิ้นงานสำหรับการทดสอบ Ring Compression Test

2.5 เครื่องวัดการยุบตัวของวัสดุ (Dilatometer)

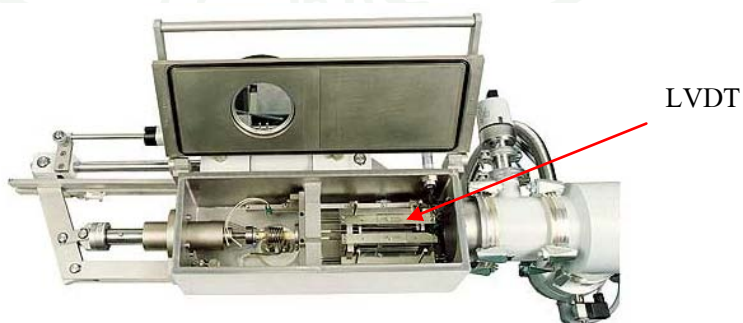
เครื่องวัดการยุบตัวของวัสดุ (ภาพที่ 44) ขนาด 25 kN ของบริษัท Bahr - Thermoanalyse GmbH ของประเทศเยอรมนี รุ่น DIL 805 ใช้สำหรับทดสอบแรงอัดในสถานะอุณหภูมิสูง โดยให้ความร้อนด้วยกระแสเหนี่ยวนำ (ภาพที่ 45) และมีอุปกรณ์วัดการเคลื่อนที่แบบ LVDT (Linear variable differential transformer) รายละเอียดของเครื่องมีดังนี้

- | | |
|---|------------------------------------|
| - Temperature range dependent
on sample material | 20°C - 1500°C |
| - Heating principle | inductive |
| - Sample material | electrically conductive solid body |
| - Atmosphere | inert gas, vacuum, air |
| - Resolution ΔL | 0.05 μm |
| - Resolution of Temperature | 0.05°C |
| - Sample geometry | d = 5 mm., L = 10 mm. |

- Heating rate (max)	100 K s ⁻¹
- Cooling rate (max)	100 K s ⁻¹
- Deformation force (max)	25 kN
- Deformation rate	0.01 ถึง 125 mm s ⁻¹
- Strain rate	0.1 ถึง 12.5 s ⁻¹
- True strain	0.05 ถึง 1.2
- Deformation range	3 to 10 mm sample rest length
- Number of deformation steps	any number
- Min. breaks between deformation steps	60 ms



ภาพที่ 44 แสดงเครื่องวัดการยุบตัวที่ใช้ในการทดสอบแรงอัดในสภาวะอุณหภูมิสูง



ภาพที่ 45 แสดงห้องควบคุมอุณหภูมิให้กับชิ้นงานและอุปกรณ์วัดการเคลื่อนที่แบบ LVDT

โดยเครื่องวัดการยุบตัว ได้ดำเนินการทดสอบที่ สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย อาคารสำนักพัฒนาอุตสาหกรรมรายสาขา ชั้น 1 ซ.ศรีมิตร ถ.พระราม 4 แขวงพระโขนง เขตคลองเตย กรุงเทพฯ 10110

2.6 ชิ้นงานสำหรับใช้ทดสอบสมบัติทางกลของวัสดุ

ชิ้นงานทดสอบเป็นวัสดุทองเหลือง CuZn40Pb2 ตามมาตรฐาน DIN 17660 (ซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้ทึบขึ้นรูป) สำหรับใช้ทดสอบหาสมบัติทางกลของวัสดุเพื่อใช้เป็นข้อมูลสำหรับวิเคราะห์ FEA ชิ้นงานทดสอบเป็นรูปทรงกระบอกตันมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 mm. และสูง 10 mm. และแผ่นรองลิ้นเพื่อลดความเสียหาย (ตามแสดงในภาพที่ 46)

2.7 เครื่องวัดอุณหภูมิ

เครื่องวัดอุณหภูมิดังแสดงในภาพที่ 47 เป็นแบบ Infrared Thermometer (FLUKE รุ่น 572) สำหรับใช้วัดอุณหภูมิของชิ้นงานก่อนการทึบขึ้นรูป ความละเอียด $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$

2.8 เวอร์เนียส (Vernier)

เวอร์เนียสแบบ Digital (ยี่ห้อ Mitutoyo) มีความละเอียด 0.01 mm ใช้สำหรับวัดขนาดของแม่พิมพ์ และขนาดของชิ้นงาน



ภาพที่ 46 แสดงชิ้นงานทองเหลืองสำหรับการทดสอบสมบัติทางกลของวัสดุและวัสดุสำหรับใช้รองลิ้นเพื่อลดความเสียหายในขณะทำการทดสอบ



ภาพที่ 47 เครื่องวัดอุณหภูมิแบบ Infrared Thermometer



ภาพที่ 48 เวอร์เนียแบบ Digital

2.9 เครื่องสำหรับการตรวจวัดผิวชิ้นงาน

1. เครื่องสแกนสามมิติ รุ่น Model Maker X70 (ภาพที่ 49) ผลิตโดยบริษัท 3-D Scanners จำกัด ประเทศไทย
2. ซอฟต์แวร์ KUBE (ภาพที่ 50) ผลิตโดยบริษัท Metris จำกัด ประเทศเบลเยียม
3. ชุดแขนกล รุ่น Cimcore 3000i (ภาพที่ 51) ผลิตโดยบริษัท CIM CORE จำกัด ประเทศฝรั่งเศส โดยชุดแขนกลมีขนาดกะทัดรัด น้ำหนักเบา สามารถหมุนได้ 360 องศา และมีรายละเอียดของเครื่องดังนี้

- Measuring Envelope 1.8 m. (6 ft.)
- Measuring Volume 3 m³ (113 ft³)

- Single Point Sphere Test	± 0.01 mm. (0.0004 in.)
- Point Repeatability	± 0.01 mm. (0.0007 in.)
- Volumetric Length Accuracy	± 0.01 mm. (0.0004 in.)
- Arm Weight	5.8 kg. (12.7 lbs.)

4. Powder Coating แบบ ผ่นแป้ง รูน FD-S Developer (ภาพที่ 52) ผลิตโดยบริษัท TASETO จำกัด ประเทศญี่ปุ่น



ภาพที่ 49 เครื่องสแกนสามมิติ รูน Model Maker X70



ภาพที่ 50 ซอฟต์แวร์ KUBE



ภาพที่ 51 ชุดแขนกล รุ่น Cimcore 3000i



ภาพที่ 52 Powder Coating แบบ ผ่นแป้ง รุ่น FD-S Developer

โดยรายการที่ 1 ถึง 4 ได้ใช้ดำเนินการทดสอบ ณ ที่บริษัท สแกนเนอร์ สามมิติ จำกัด เลขที่ 11 ซอยพระราม 2 ซอย 54 แยก 4-3 ถนนพระรามที่ 2 แขวงสามยุค เขตบางขุนเทียน กทม 10150

2.9 อุปกรณ์สำหรับการวิเคราะห์โดยใช้ CAD/CAE

1. เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลหน่วยประมวลผลกลาง Intel core i7, 2.8 GHz, หน่วยความจำ DDRAM 4 GB, Hard Disk 500 GB, การ์ดแสดงผลหน่วยความจำวีดีโอ 512 MB และจอภาพ LCD ขนาด 17 นิ้ว
2. เครื่องพิมพ์ชนิด Inkjet

3. ซอฟต์แวร์ CAD ชื่อ Pro/ENGINEER Wildfire 3 ของบริษัท Parametric Technology Corporation, USA
4. ซอฟต์แวร์ CAE ชื่อ MSC.Patran และ MSC.Marc ของบริษัท MSC Software Corporation, USA
5. ซอฟต์แวร์ MATLAB ของบริษัท Mathworks, USA สำหรับประมวลผลทางสถิติและพล็อตกราฟเส้น

2.10 สถานที่ทดสอบ

งานวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งภายใต้ชุดโครงการสนับสนุนผู้ปฏิบัติการวิจัยในภาคอุตสาหกรรม ซึ่งได้รับการสนับสนุนงบประมาณจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และจากบริษัท อาซาฮี-ไทย อีลลอย จำกัด ภายใต้โครงการ การประยุกต์ใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เชิงเส้นจำลองกรรมวิธีการทึบขึ้นรูปร้อนของงานทองเหลือง สัญญาเลขที่ MRG-WI525E031

งานวิจัยนี้ได้ใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์ MSC.Marc และคอมพิวเตอร์ในหน่วยปฏิบัติการวิจัยการออกแบบทางกลและผลิตภัณฑ์ (MPDRL) อาคาร 6 ห้อง 6309 ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน

การทดสอบการทึบขึ้นรูป และ Ring Compression test ได้ดำเนินการที่ บริษัท อาซาฮี-ไทย อีลลอย จำกัด เลขที่ 9/23 ม.7 ถ.สุขสวัสดิ์ ต.บางจาก อ.พระประแดง จ.สมุทรปราการ

การทดสอบการยู่บตัวของวัสดุ ดำเนินการที่ ศูนย์ทดสอบของสถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย อาคารสำนักพัฒนาอุตสาหกรรมรายสาขา ชั้น 1 ซอยตรีมิตร ถนนพระราม 4 แขวงพระโขนง เขตคลองเตย กรุงเทพฯ



ภาพที่ 53 หน่วยปฏิบัติการวิจัยการออกแบบทางกลและผลิตภัณฑ์ (MPDRL) อาคาร 6
ห้อง 6309 ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน

วิธีการ

3.1 การทดสอบการทาบขึ้นรูปร้อน

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบการขึ้นรูปชิ้นงานจากผลิตภัณฑ์ประเภท จำนวน 3 ชิ้นส่วน ได้แก่ ฝาประตุน้ำ (VC50), ลิ้นประตุน้ำ (GT50) และ ฝาขันมาตรวัดน้ำ (HC15) โดยในการทดลองได้ดำเนินการตามขั้นตอนของกระบวนการทาบขึ้นรูปที่ได้กล่าวไปแล้ว การทดสอบจะทำการทาบขึ้นรูปชิ้นงานจำนวน 10 ชิ้นต่อแบบ อนึ่งในการทดลองจะมีการบันทึกข้อมูลดังนี้

3.1.1 การบันทึกข้อมูลเบื้องต้น

ก่อนการทดลองทาบขึ้นรูปชิ้นงานจะทำการบันทึกข้อมูลเบื้องต้นอันได้แก่

- เส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงของชิ้นงาน Billet
- น้ำหนักของก้อน Billet

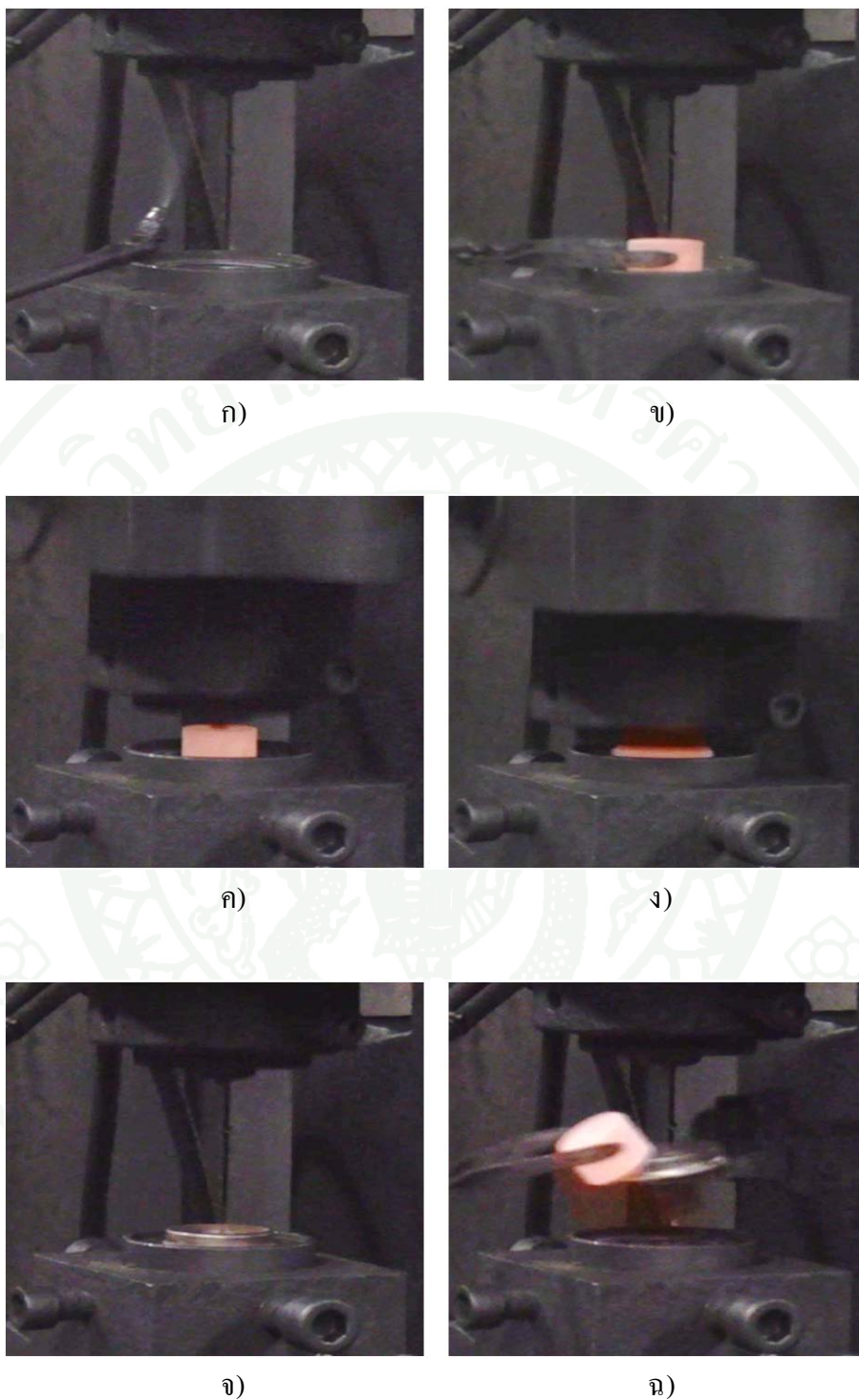


ภาพที่ 54 แสดงการชั่งน้ำหนักตัวอย่างชิ้นงานทองเหลือง CuZn40Pb2

3.1.2 การบันทึกผลการทดลอง

ข้อมูลจากผลการทดลองที่จะทำการบันทึกมีดังนี้

- ชนิดของสารหล่อลื่นและอัตราส่วนผสม
- อุณหภูมิของแม่พิมพ์ขณะทำการขึ้นรูป
- อุณหภูมิบรรยากาศ ขณะทำการทุบขึ้นรูป
- อุณหภูมิของชิ้นงานก่อนการทุบขึ้นรูป
- ขนาดของชิ้นงานที่ได้ภายหลังการทดลองทุบขึ้นรูปของแต่ละชิ้นงาน



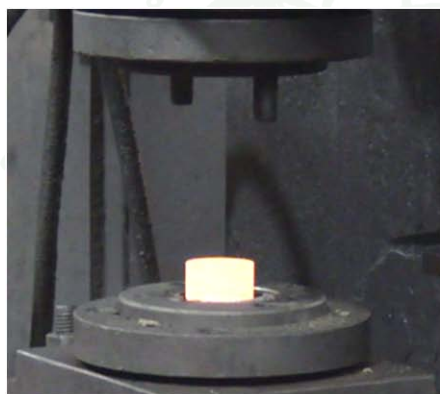
ภาพที่ 55 แสดงขั้นตอนทดลองทอขึ้นรูปชิ้นงานฝาประตุน้ำ (VC50) ก) ฟันสารหล่อลื่นบนแม่พิมพ์ ข) นำ Billet วางลงบนแม่พิมพ์ ค) เริ่มการทอขึ้นรูป ง) ขณะทำการทอขึ้นรูป จ) ขึ้นรูปเสร็จสิ้น และ ฉ) นำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์



ก)



ข)



ค)



ง)

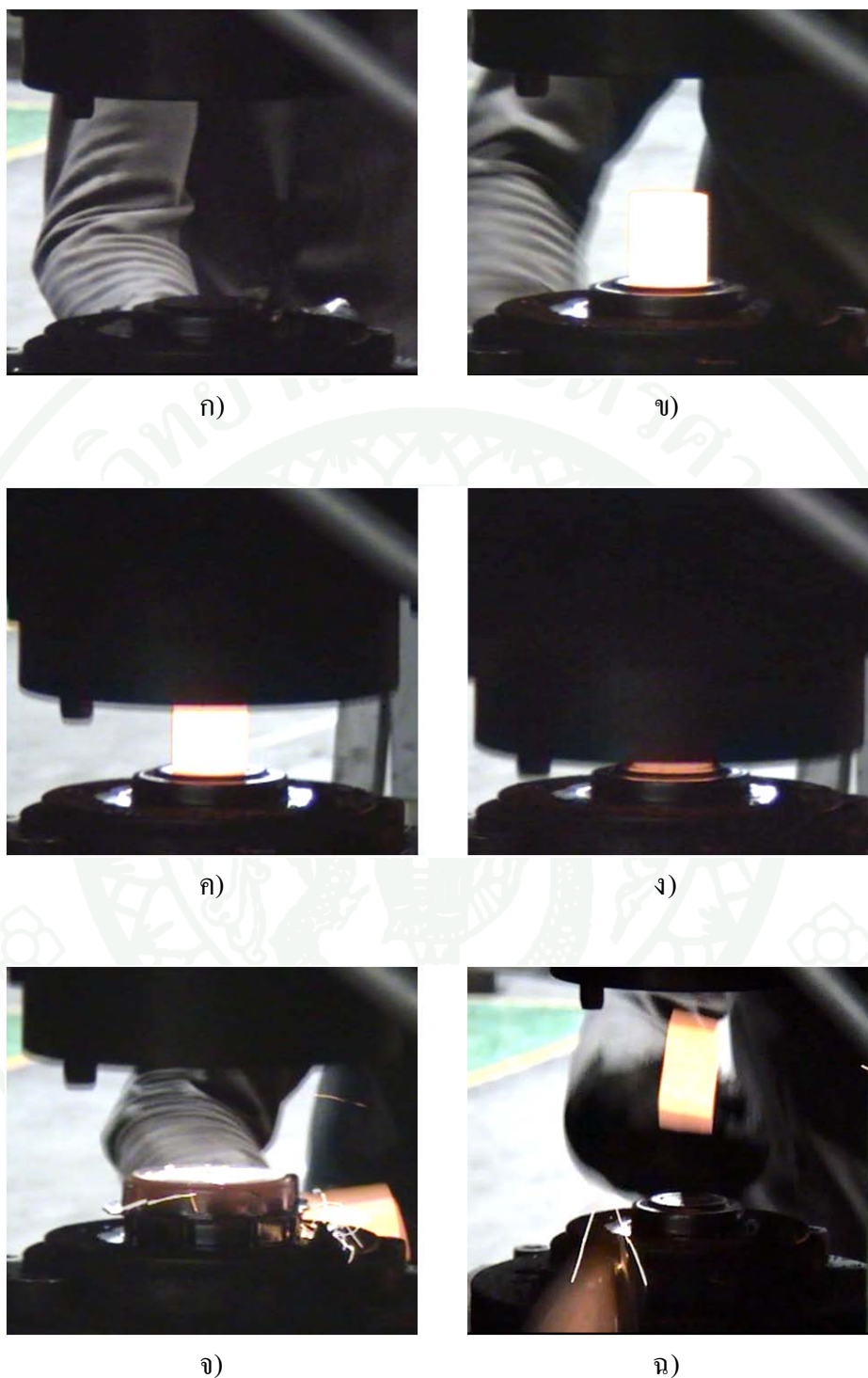


จ)



ฉ)

ภาพที่ 56 แสดงขั้นตอนทดลองทุบขึ้นรูปชิ้นงานล้นประตุน้ำ (GT50) ก) ฟันสารหล่อลื่นบนแม่พิมพ์ ข) นำ Billet วางลงบนแม่พิมพ์ ค) เริ่มการทุบขึ้นรูป ง) ขณะทำการทุบขึ้นรูป จ) ขึ้นรูปเสร็จสิ้น และ ฉ) นำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์



ภาพที่ 57 แสดงขั้นตอนทดลองทูปขึ้นรูปชิ้นงานฝาขันมาตรวัดน้ำ (HC15) ก) ฟันสารหล่อลื่นบนแม่พิมพ์ ข) นำ Billet วางลงบนแม่พิมพ์ ค) เริ่มการทูปขึ้นรูป ง) ขณะทำการทูปขึ้นรูป จ) ขึ้นรูปเสร็จสิ้น และ ฉ) นำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์

3.2 การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. ทำการติดตั้งแม่พิมพ์เข้ากับเครื่องอัด Mechanic Press ขนาด 250 ตันและ ปรับให้แม่พิมพ์ส่วนบนและส่วนล่างให้มีจุดศูนย์กลางร่วมกัน
2. ทำการปรับระยะการเคลื่อนที่ของเครื่อง Mechanic Press ให้ได้ระยะการกดเท่ากับครึ่งหนึ่งของชิ้นงาน หรือประมาณ 4.25 mm. นับจากผิวแม่พิมพ์เริ่มสัมผัสชิ้นทดสอบ
3. ให้ความร้อนแก่แม่พิมพ์ ที่อุณหภูมิ 150°C
4. ทาสารหล่อลื่นบริเวณผิวหน้าแม่พิมพ์ สารหล่อลื่น คือ กราไฟต์ผสมน้ำมันอัตราส่วน 1: 10
5. ให้ความร้อนแก่ชิ้นงานทดสอบที่อุณหภูมิ 650°C และเมื่อได้อุณหภูมิที่ต้องการแล้ว นำชิ้นงานออกจากเตาแล้วนำมาขึ้นแม่พิมพ์ในทันทีแล้วทำการวัดอุณหภูมิของชิ้นงานและแม่พิมพ์ซ้ำโดยการใช้เครื่องวัดอุณหภูมิแบบ Infrared Thermometer
6. ทำการขึ้นรูปชิ้นงานให้ได้ความสูงที่ 4.25 mm. จำนวน 3 ชิ้น ต่อเงื่อนไข
7. วัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของชิ้นงานหลังจากการทดสอบ แล้วนำค่าเส้นผ่านศูนย์กลางที่ได้มาคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (% Reduction in internal diameter, % RID) จากสมการ

$$\% \text{ Reduction in internal diameter} = \frac{d_0 - d_i}{d_0} (100\%) \quad (38)$$

เมื่อ d_0 คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของชิ้นงานก่อนกด
 d_i คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของชิ้นงานหลังการกดเสร็จสิ้น

8. วัดความสูงของชิ้นงานหลังการกดแล้วนำมาคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความสูง (% Reduction in height, % RH) จากสมการ

$$\% \text{ Reduction in height} = \frac{h_0 - h_i}{h_0} (100\%) \quad (39)$$

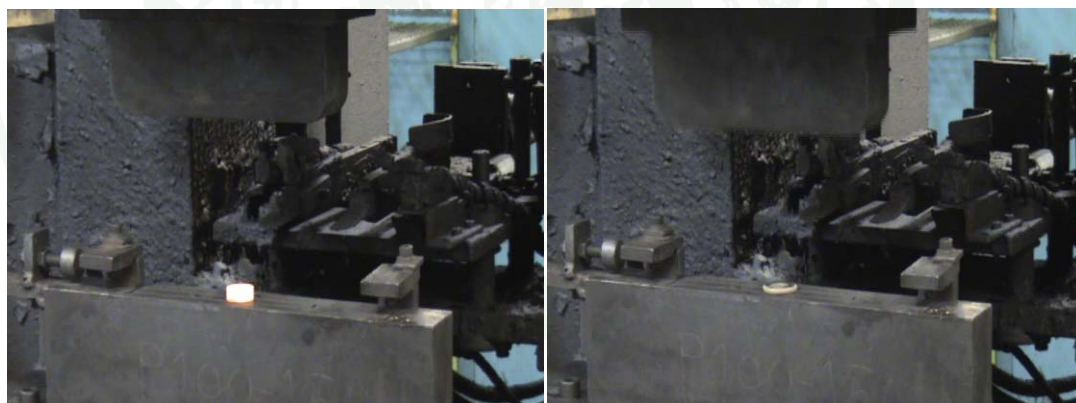
เมื่อ h_0 คือ ความสูงของชิ้นงานก่อนกด

h_i คือ ความสูงของชิ้นงานหลังการกดเสร็จสิ้น

9. นำค่า % Reduction in internal diameter และ % Reduction in height ไปอ่านค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหาย (m) จาก Calibration curve ในภาพที่ 60



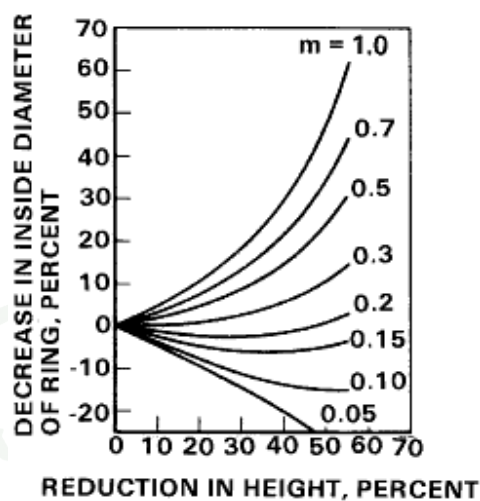
ภาพที่ 58 การติดตั้งแม่พิมพ์ที่ใช้ในการทดสอบ Ring Compression Test



ก)

ข)

ภาพที่ 59 ชิ้นงานขณะทำการทดสอบ Ring Compression Test ก) ชิ้นงานก่อนการทุบ และ ข) ชิ้นงานหลังการทุบ

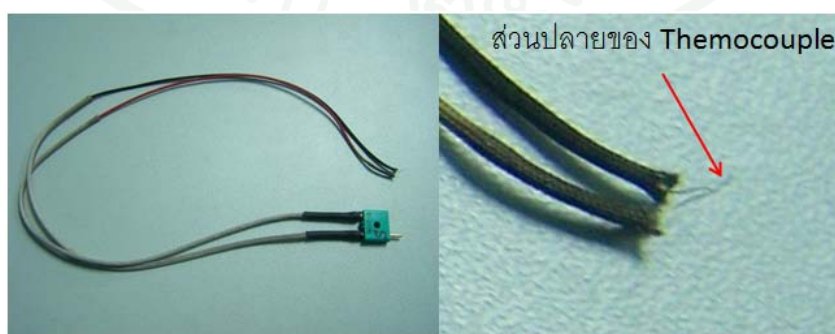


ภาพที่ 60 Calibration Curve สำหรับการประมาณค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (m)

3.3 การทดสอบสมบัติของทองเหลืองที่อุณหภูมิสูง

การทดสอบหาสมบัติทางกลของทองเหลือง มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

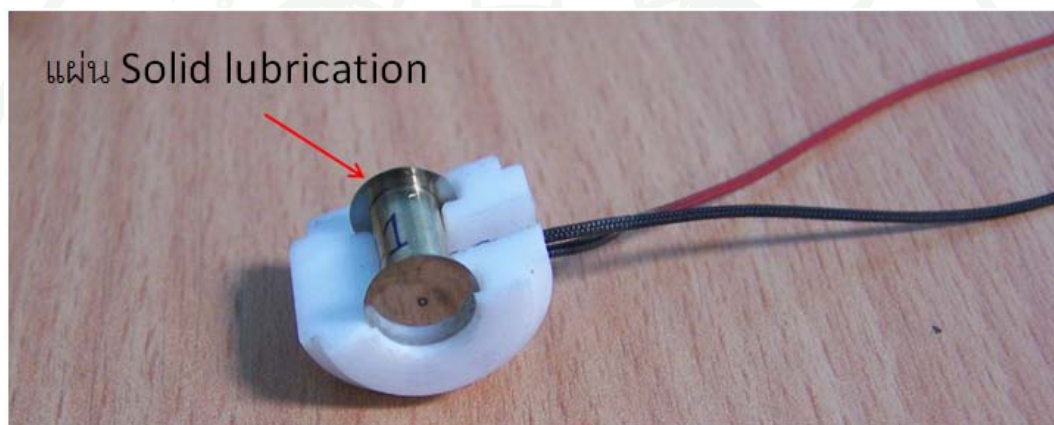
1. นำชิ้นงานไปติดตั้ง Thermocouple ซึ่งใช้เป็น sensor สำหรับวัดอุณหภูมิโดย Thermocouple ที่ใช้ในการทดลองได้แสดงในภาพที่ 61 และชิ้นงานที่ติด Thermocouple แล้วได้แสดงในภาพที่ 62
2. นำชิ้นงานที่ติดตั้ง Thermocouple แล้ว ไปติดแผ่น Solid lubrication ที่หัวและท้ายของแผ่นรองนี้ทำมาจากวัสดุโมลิบดีนัม และมีความหนาประมาณ 0.1 mm. โดยชิ้นงานที่ติดแผ่น Solid lubrication แล้วได้แสดงในภาพที่ 63



ภาพที่ 61 Thermocouple ที่ใช้ในการทดสอบหาสมบัติทางกลของทองเหลือง



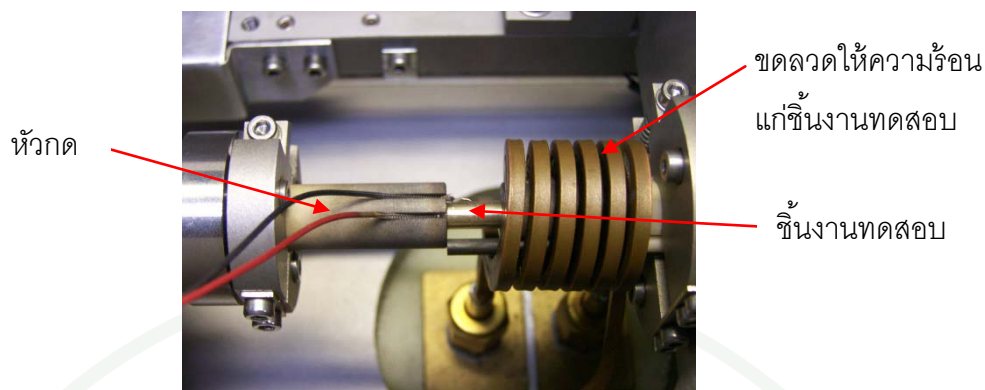
ภาพที่ 62 ชิ้นงานทดสอบที่ติดตั้ง Thermocouple แล้ว



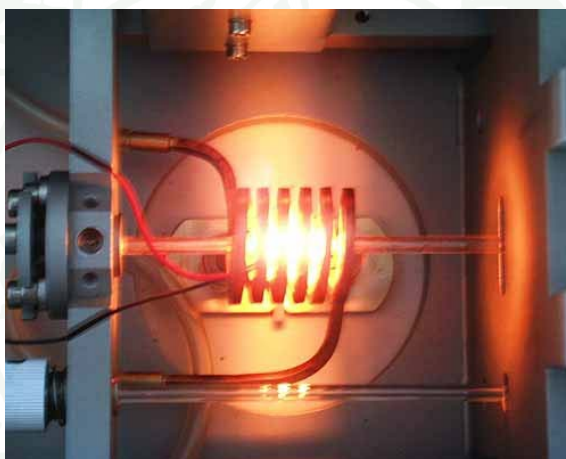
ภาพที่ 63 ชิ้นงานทดสอบที่ติดตั้งแผ่น Solid lubrication แล้ว

3. นำชิ้นงานทดสอบ (จากภาพที่ 63) ไปทดสอบด้วยเครื่องวัดการขูดตัวของวัสดุ โดยระยะห่างระหว่างหัวกดเท่ากับ 10 mm. และความเร็วในการกดเท่ากับ 55 mm/s โดยเริ่มต้นจากการให้ความร้อนจนชิ้นงานมีอุณหภูมิ 650°C ด้วยความเร็ว 10°C ต่อวินาที เมื่อความร้อนถึงอุณหภูมิที่ต้องการแล้ว ก็ทำการ Hold อุณหภูมิไว้ 30 วินาที เพื่อให้อุณหภูมิเท่ากันทั้งชิ้นงานทดสอบ จากนั้นจึงเริ่มทำการทดสอบ โดยเริ่มต้นจากแรงอัดเท่ากับ ศูนย์ นิวตัน (N) ทำการกดชิ้นงานทดสอบไปจนชิ้นงานขูดเหลือ 5 mm. (ภาพที่ 65) ในการทดสอบจะบันทึกผลการทดสอบเป็น ความสัมพันธ์ระหว่างเวลา แรงอัด (Force, F) ระยะทางที่กด ความเค้นจริงและความเครียดจริง และอุณหภูมิ

4. ทำการทดสอบตามขั้นตอน จนครบ 10 ชิ้นงานทดสอบ



ภาพที่ 64 แสดงการติดตั้งชิ้นงานทดสอบบนเครื่องวัดการยุบตัว



ภาพที่ 65 แสดงขณะการทดสอบวัสดุที่อุณหภูมิสูงในเครื่องวัดการยุบตัว

3.4 การวิเคราะห์โดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

เดช พุทธเจริญทอง (การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์) กล่าวว่าไว้ว่า ในการวิเคราะห์เพื่อหาผลเฉลยสำหรับปัญหาทางวิศวกรรมที่มีความซับซ้อน ซึ่งนิยมใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เนื่องจากสะดวกและรวดเร็วในการหาผลเฉลยของปัญหาด้วยวิธีการนี้จะใช้วิธีการแบ่งรูปทรงชิ้นงานออกเป็นเอลิเมนต์หรือส่วนย่อยๆ ซึ่งแต่ละเอลิเมนต์จะประกอบด้วยจุดต่อ (Node) ตั้งแต่ 2 จุดขึ้นไป กรรมวิธีการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์จะวิเคราะห์หาค่าของสมการ ที่ละเอลิเมนต์ แล้วนำมารวมกันเป็นโครงสร้างของระบบทั้งหมด แล้วจึงหาผลเฉลยของทั้งระบบต่อไป หลักการของไฟไนต์เอลิเมนต์จะแบ่งออกเป็น 7 ขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. แบ่งชิ้นงานออกเป็นส่วนย่อยๆ หรือเอลิเมนต์ การแบ่งชิ้นงานจริงออกเป็นเอลิเมนต์ให้สอดคล้องกับรูปร่างลักษณะของปัญหาซึ่งอาจจะเลือกใช้ขนาดและชนิดเอลิเมนต์ใดนั้นจะขึ้นอยู่กับดุลยพินิจของผู้วิเคราะห์ หลักสำคัญคือ การจัดและการเลือกใช้ขนาดและชนิดของเอลิเมนต์จะต้องใกล้เคียงกับพฤติกรรมจริงของปัญหานั้นๆ เอลิเมนต์ที่ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดคือ แบบสี่เหลี่ยม

2. การเลือกแบบจำลองการกระจัด (Displacement model) โดยทั่วไปมักเลือกแบบจำลองการกระจัดในลักษณะฟังก์ชัน หรือสมการพอลิโนเมียล เพราะสามารถเลือกจำนวนเทอมของพอลิโนเมียลให้สอดคล้องกับลักษณะการเปลี่ยนรูปของชิ้นงานได้ดีกว่า

3. ผลเฉลยจะมีความถูกต้องและแม่นยำเพียงใดนั้น ต้องคำนึงถึงการกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดต่อการกระจัด และความเค้นต่อความเครียด

4. การหาสทิฟเนสของเอลิเมนต์ อาจหาได้หลายวิธี สำหรับการวิเคราะห์โดยวิธีแปรผัน (Variational Method) จะใช้หลักการของงานสมมุติ (Principle of Virtual Work) โดยสมการสมดุลของแรงในเทอมของสทิฟเนสเมทริกซ์ และการกระจัดที่จุดต่อของเอลิเมนต์ สมการดังกล่าวจะเขียนอยู่ในรูปเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$\{f\} = [k]\{d\} \quad (40)$$

เมื่อ $\{f\}$ คือ เมทริกซ์ของแรงที่กระทำที่จุดต่อ
 $[k]$ คือ สทิฟเนสเมทริกซ์ของเอลิเมนต์
 $\{d\}$ คือ เมทริกซ์ของการกระจัดที่จุดต่อ

5. รวมสมการของระบบ เมื่อหาสทิฟเนสเมทริกซ์ และสมการของเอลิเมนต์แล้ว ขั้นตอนต่อไปต้องรวมสมการแต่ละเอลิเมนต์เข้าด้วยกันเป็นระบบ โดยใช้วิธีสทิฟเนสโดยตรง (Direct Stiffness Method) สมการรวมของระบบอยู่ในรูปของเมทริกซ์

$$\{F\} = [K]\{\bar{d}\} \quad (41)$$

เมื่อ $\{F\}$ คือ เมทริกซ์รวมของแรงที่จุดต่อต่างๆ
 $[K]$ คือ สทิฟเนสเมทริกซ์รวมของระบบ
 $\{\bar{d}\}$ คือ เมทริกซ์การกระจัดที่ต้องการทราบค่า

6. เงื่อนไขขอบ (Boundary Conditions) หลังจากการรวมสมการของระบบแล้ว ไม่สามารถหาผลเฉลยของระบบได้เนื่องจาก $[K]$ เป็นเมทริกซ์เอกฐาน จึงจำเป็นต้องกำหนดเงื่อนไขขอบลงในสมการรวมของระบบแล้วจึงจะสามารถหาการกระจัดที่จุดต่อได้

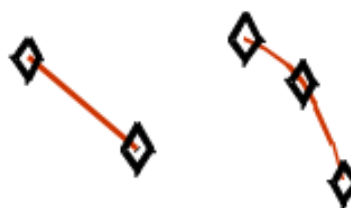
7. คำนวณค่าต่างๆ จากสมการรวมของระบบ หลังจากที่กำหนดเงื่อนไขขอบต่างๆ ที่ชิ้นงานถูกกระทำลงในสมการของระบบแล้วก็สามารถหาการกระจัดของแต่ละจุดต่อได้ จากนั้นสามารถหาผลเฉลยของความเค้นและความเครียดโดยประมาณได้

3.4.1 ชนิดของเอลิเมนต์และการแบ่งเอลิเมนต์

ก) ชนิดของเอลิเมนต์ ในการแบ่งชิ้นงานออกเป็นเอลิเมนต์หรือส่วนย่อยๆ จะพิจารณาจากรูปทรงของชิ้นงานเป็นหลักเอลิเมนต์ที่แบ่งควรจะเหมาะสมกับรูปทรงในแต่ละบริเวณซึ่งอาจแตกต่างกันออกไป เช่น ส่วนเว้า ส่วนโค้ง ส่วนที่มีรู เป็นต้น ชนิดของเอลิเมนต์สามารถแบ่งออกเป็น สามประเภท ตามมิติของปัญหา คือ เอลิเมนต์มิติเดียว เอลิเมนต์สองมิติ และเอลิเมนต์สามมิติ

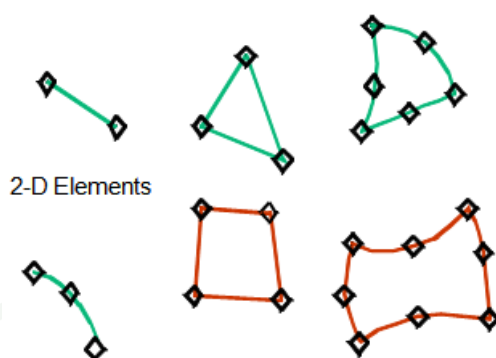
1. เอลิเมนต์หนึ่งมิติ (ภาพที่ 66) ใช้ในปัญหามิติเดียว เช่น ชิ้นส่วนที่มีแรงกระทำในแนวแกน ชิ้นส่วนที่รับแรงบิดหรือการโก่งของคาน เป็นต้น ในแต่ละเอลิเมนต์จะประกอบด้วยจุดต่อภายนอกหรืออาจมีจุดต่อภายในรวมก็ได้ เพื่อให้การวิเคราะห์ผลมีผลแม่นยำมากขึ้น

1-D Elements



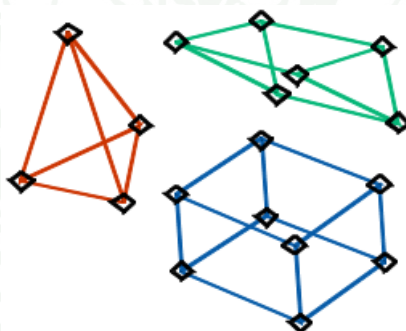
ภาพที่ 66 เอลิเมนต์มิติเดียว

2. เอลิเมนต์สองมิติ (ภาพที่ 67) นิยมใช้สำหรับปัญหาความเค้นระนาบและความเครียดระนาบ เอลิเมนต์จะเป็นรูปสามเหลี่ยมหรือสี่เหลี่ยมที่ประกอบด้วยด้านที่เป็นเส้นตรงและประกอบด้วยจุดต่อภายในหรืออาจมีจุดต่อภายนอกรวมด้วย



ภาพที่ 67 เอลิเมนต์สองมิติ

3. เอลิเมนต์สามมิติ (ภาพที่ 68) ใช้กับรูปทรงสามมิติทั่วไปที่มีทิศทางการเคลื่อนที่ทั้งสามแนวแกน รูปทรงของเอลิเมนต์จะมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมปริซึม รูปกรวย สามเหลี่ยม หรือปริซึม



ภาพที่ 68 เอลิเมนต์สามมิติ

ข) การแบ่งเอลิเมนต์ ที่เหมาะสมจะทำให้ประหยัดเวลาในการประมวลผลและลดความคลาดเคลื่อน โดยทั่วไปมีหลักในการแบ่งเอลิเมนต์ดังนี้

1. ไม่ควรใช้เอลิเมนต์ที่มีรูปร่างไม่สมมาตร หรือรูปร่างผิดปกติ เช่น เอลิเมนต์สามเหลี่ยมมุมป้านมาก และเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมที่มีด้านยาวมากๆ เป็นต้น
2. เลือกเอลิเมนต์ที่มีอัตราส่วนด้านกว้างต่อด้านยาวเข้าใกล้ 1 มากที่สุด
3. ใช้เอลิเมนต์ขนาดเล็กที่บริเวณจุดวิกฤตหรือจุดที่มีการเปลี่ยนรูปทรงมาก และใช้เอลิเมนต์ขนาดใหญ่ในบริเวณที่ไม่ใช่จุดวิกฤตหรือจุดที่ไกลออกไป

3.4.2 การหาสมการสทึฟเนสเมทริกซ์ของเอลิเมนต์

การสร้างสมการสทึฟเนสเมทริกซ์ของเอลิเมนต์มีความสำคัญต่อผลเฉลย โดยสมการสทึฟเนสเมทริกซ์ของเอลิเมนต์จะถูกสร้างขึ้นมาเพื่อให้สามารถจำลองแบบหรือปัญหาที่จะวิเคราะห์ได้อย่างถูกต้อง การสร้างสมการสทึฟเนสเมทริกซ์ของเอลิเมนต์สามารถทำได้ 3 วิธีดังนี้

1. วิธีการตรง เป็นวิธีที่ง่ายที่สุด สามารถหาสมการสทึฟเนสเมทริกซ์และสมการของแรงในเทอมของการกระจัดที่จุดต่อของเอลิเมนต์ได้ การหาสมการสทึฟเนสเมทริกซ์โดยใช้วิธีการตรง ใช้เงื่อนไขการสมดุลของแรงในเอลิเมนต์ ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้หาสมการสทึฟเนสเมทริกซ์ของเอลิเมนต์มิติเดียว
2. วิธีการแปรผัน เป็นวิธีการดั้งเดิมที่ใช้ในช่วงต้นๆ ของการพัฒนาวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งจะอาศัยหลักการของงานสมมุติ และหลักของพลังงานศักย์ต่ำสุด (Principle of Minimum Potential Energy)
3. วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้าง (Method of Weight Residuals) นิยมใช้ในกรณีที่ใช้พลังงานศักย์ต่ำสุดใช้ได้ไม่สะดวก เช่น ปัญหาการไหลของของเหลว การถ่ายเทความร้อน การเคลื่อนมวล (Mass Transport)

3.4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด

เมื่อเนื้อวัสดุได้รับแรงภายนอกมากระทำเป็นผลทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปภายในเนื้อวัสดุ ซึ่งจะเกิดความเค้นจากและความเค้นเฉือนเกิดขึ้น ($\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$) และความเครียดจากและความเครียดเฉือนเกิดขึ้น ($\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$) เมื่อนำมาเขียนสมการสามารถเขียนอยู่ในรูปเมทริกซ์ได้ดังนี้ (Rowe *et al.*, 1991)

$$\{\sigma\} = [D]\{\epsilon\} \quad (42)$$

หรือ

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix} = [D] \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} \quad (43)$$

เมื่อ $[D]$ คือ เมทริกซ์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด

เมทริกซ์ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในช่วงยืดหยุ่นดังนี้

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{31} \end{Bmatrix} = 2G \begin{bmatrix} \frac{1-\nu}{1-2\nu} & \frac{\nu}{1-2\nu} & \frac{\nu}{1-2\nu} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu}{1-2\nu} & \frac{1-\nu}{1-2\nu} & \frac{\nu}{1-2\nu} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu}{1-2\nu} & \frac{\nu}{1-2\nu} & \frac{1-\nu}{1-2\nu} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \end{Bmatrix} \quad (44)$$

การวิเคราะห์การเปลี่ยนรูปในช่วงพลาสติก ความเค้นและความเครียดจึงอยู่ในรูปของความเค้นและความเครียดเบี่ยงเบน ดังนี้

$$d\varepsilon'_{ij} = d\varepsilon'^e_{ij} + d\varepsilon'^p_{ij} \quad (45)$$

เมื่อแทนค่า $d\varepsilon'^e_{ij}$ และ $d\varepsilon'^p_{ij}$ จะได้

$$d\varepsilon'_{ij} = \frac{1}{2G} d\sigma'_{ij} + \sigma'_{ij} d\lambda \quad (46)$$

การหาส่วนประกอบความเครียดประสิทธิผลส่วนย่อยในช่วงของพลาสติก ในรูปความ
เค้นประสิทธิผล และสัดส่วนของความเครียดกับความเค้น สามารถเขียนได้ดังนี้

$$d\varepsilon^p = \frac{2}{3} \bar{\sigma} d\lambda \quad (47)$$

และสามารถเขียนสมการพลาสติกส่วนย่อยในรูปของเทนเซอร์ได้คือ

$$d\varepsilon_{ij}^p = \frac{3}{2} \frac{d\bar{\varepsilon}}{\bar{\sigma}} \sigma'_{ij} \quad (48)$$

หรือ

$$d\varepsilon_{ij} = \frac{3\sigma'_{kl} d\sigma'_{kl}}{2\bar{\sigma}} \quad (49)$$

เมื่อ σ'_{kl} เป็นความเค้นเบี่ยงเบนจากการแปลงพิศเฉพาะเป็นพิศรวม โดยที่ kl เป็น
Free Suffixes และ ij เป็น Dummy Suffixes ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นครากและ
ความเครียดพลาสติก ในรูปของสมการส่วนย่อย คือ

$$Y' = \frac{dY}{d\varepsilon^p} \quad (50)$$

เมื่อ Y' คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเค้นคราก เมื่อแทนค่าสมการที่ (47) และ (49)
ลงในสมการที่ (50) จะได้

$$Y' \left(\frac{2}{3} \bar{\sigma} d\lambda \right) = \frac{3\sigma'_{kl} d\sigma'_{kl}}{2\bar{\sigma}}$$

$$\frac{4}{9} \bar{\sigma}^2 Y' d\lambda = \sigma'_{kl} d\sigma'_{kl} \quad (51)$$

จากสมการที่ (46) ความเค้นส่วนย่อยเบี่ยงเบนมีค่าเท่ากับ

$$d\sigma'_{kl} = 2G(d\varepsilon'_{kl} - \sigma'_{kl} d\lambda) \quad (52)$$

แทนค่าสมการ (52) ลงในสมการที่ (51) จะได้

$$\begin{aligned}\frac{4}{9}\bar{\sigma}^2 Y' d\lambda &= \sigma'_{kl} \cdot 2G (d\varepsilon'_{kl} - d\lambda) \\ &= 2G \left(\sigma'_{kl} d\varepsilon'_{kl} - \frac{2}{3}\bar{\sigma}^2 d\lambda \right)\end{aligned}\quad (53)$$

$$\text{หรือ} \quad \left(\frac{2}{9}\bar{\sigma}^2 Y' + \frac{2}{3}G\bar{\sigma}^2 \right) d\lambda = G \cdot \sigma'_{kl} d\varepsilon'_{kl} \quad (54)$$

$$\text{หรือ} \quad d\lambda = \frac{\sigma'_{kl} d\varepsilon'_{kl}}{\frac{2}{3}\bar{\sigma}^2 \left(1 + \frac{Y'}{3G} \right)} \quad (55)$$

เพื่อความสะดวกกำหนดให้

$$S = \frac{2}{3}\bar{\sigma}^2 \left(1 + \frac{Y'}{3G} \right) \quad (56)$$

นำ $d\lambda$ ของสมการที่ (53) แทนในสมการที่ (46) จะได้

$$d\sigma'_{ij} = 2G \left(d\varepsilon'_{ij} - \frac{\sigma'_{ij} \sigma'_{kl} \varepsilon'_{kl}}{S} \right) \quad (57)$$

ค่าความเค้นเบี่ยงเบน คือ

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma_m \quad (58)$$

และค่าความเครียดเบี่ยงเบน คือ

$$\varepsilon'_{ij} = \varepsilon_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \varepsilon_{kk} \quad (59)$$

แทนค่าสมการ (58) และ (59) ลงในสมการที่ (57) จะได้

$$d\sigma'_{ij} - \delta_{ij}d\sigma^h = 2G \left(d\varepsilon_{ij} - \frac{\delta_{ij}d\varepsilon_{mm}}{3} - \frac{\sigma'_{ij}\sigma'_{kl}d\varepsilon'_{kl}}{S} \right) \quad (60)$$

ซึ่งสามารถจัดรูปใหม่ได้ดังนี้

$$d\sigma'_{ij} - \delta_{ij} \left(\frac{E}{3(1-2\nu)} \right) d\varepsilon_{mm} = 2G \left(d\varepsilon_{ij} - \frac{\delta_{ij}d\varepsilon_{mm}}{3} - \frac{\sigma'_{ij}\sigma'_{kl}d\varepsilon'_{kl}}{S} \right) \quad (61)$$

เมื่อ $\sigma'_{kl}d\varepsilon'_{kl} = \sigma'_{kl}d\varepsilon_{kl}$ จะได้รูปแบบความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดในรูปแบบเมทริกซ์ ดังนี้

$$d\sigma = ([D^e] - [D^p])d\varepsilon \quad (62)$$

โดยที่

$$[D^p] = \frac{2G}{S} \begin{bmatrix} \sigma'_{11}\sigma'_{11} & \sigma'_{11}\sigma'_{22} & \sigma'_{11}\sigma'_{33} & \sigma'_{11}\sigma'_{12} & \sigma'_{11}\sigma'_{23} & \sigma'_{11}\sigma'_{13} \\ \sigma'_{22}\sigma'_{11} & \sigma'_{22}\sigma'_{22} & \sigma'_{22}\sigma'_{33} & \sigma'_{22}\sigma'_{12} & \sigma'_{22}\sigma'_{23} & \sigma'_{22}\sigma'_{13} \\ \sigma'_{33}\sigma'_{11} & \sigma'_{11}\sigma'_{22} & \sigma'_{33}\sigma'_{33} & \sigma'_{33}\sigma'_{12} & \sigma'_{33}\sigma'_{23} & \sigma'_{33}\sigma'_{13} \\ \sigma'_{12}\sigma'_{11} & \sigma'_{12}\sigma'_{22} & \sigma'_{12}\sigma'_{33} & \sigma'_{12}\sigma'_{12} & \sigma'_{12}\sigma'_{23} & \sigma'_{12}\sigma'_{13} \\ \sigma'_{23}\sigma'_{11} & \sigma'_{23}\sigma'_{22} & \sigma'_{23}\sigma'_{33} & \sigma'_{23}\sigma'_{12} & \sigma'_{23}\sigma'_{23} & \sigma'_{23}\sigma'_{13} \\ \sigma'_{13}\sigma'_{11} & \sigma'_{13}\sigma'_{22} & \sigma'_{13}\sigma'_{33} & \sigma'_{13}\sigma'_{12} & \sigma'_{13}\sigma'_{23} & \sigma'_{13}\sigma'_{13} \end{bmatrix} \quad (63)$$

3.4.4 สมการไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Formulation)

สมการไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถสร้างได้หลายวิธี เช่นวิธีแปรผัน วิธีตรง และวิธีอื่นๆ ซึ่งในหลักของงานสมมุติที่ใช้สร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ จะต้องสร้างฟังก์ชันขึ้น แล้วทำการหาค่าต่ำสุดของฟังก์ชันและสทิเฟนสมเมทริกซ์ของเอลิเมนต์ สมการที่แทนแบบจำลองของวัสดุแบบแข็งเกร็งพลาสติกอธิบายว่าเมื่อวัสดุได้รับแรงกระทำที่พื้นผิว (S) และกำหนดให้

แรงกระทำที่พื้นผิววัสดุเป็น F_i ดังนั้น แรงที่กระทำภายนอกบนพื้นผิววัสดุสามารถเขียน (Kobayashi *et al.*, 1989) ได้ดังนี้

$$F_i = \sigma_{ij} n_{ij} \quad (64)$$

เมื่อ F_i คือ แรงภายนอก
 σ_{ij} คือ ความเค้นที่เกิดขึ้น
 n_j คือ ทิศทางที่แรงมากระทำกับวัสดุ

งานที่เกิดจากแรงภายนอก จะเริ่มเมื่อมีแรงมากระทำที่พื้นผิวของวัสดุเกิดการเปลี่ยนรูปเกิดขึ้นหรือมีการกระจัดเกิดขึ้น ถ้าวัสดุอยู่ในสภาวะสมดุล แรงภายนอกจะต้องเท่ากับแรงภายในซึ่งแรงต่อหน่วยเวลาที่กระทำบนพื้นผิวคือ

$$\int_S F_i w_j dS \quad (65)$$

เมื่อ w_j คือ ความเร็วที่กระทำบนพื้นผิววัสดุ

เมื่อนำสมการที่ (65) แทนลงในสมการที่ (64) จะได้

$$\int_S \sigma_{ij} n_j w_j dS \quad (66)$$

และเมื่อแปลงสมการเชิงพื้นผิว (dS) ให้เป็นสมการเชิงปริมาตร (dV) ทำให้สมการที่ (66) มีค่าเท่ากับ

$$\int_V \sigma_{ij} \frac{\partial w_j}{\partial x_j} dV \quad (67)$$

เนื่องจากแรงที่กระทำภายนอกย่อมเท่ากับพลังงานความเครียดที่เกิดจากการเปลี่ยนรูปภายในวัสดุ

$$U = W \quad (68)$$

เมื่อ U คือ พลังงานความเครียดภายใน
 W คือ พลังงานศักย์ที่เกิดขึ้นจากแรงภายนอก

เมื่อรวมพลังงานความเครียดภายในและพลังงานศักย์จากแรงภายนอกจากสมการที่ (68) ดังนั้น พลังงานศักย์รวม (Total Potential Energy) คือ

$$\Pi = U + W \quad (69)$$

และเมื่อนำสมการที่ (65) และ (67) ไปแทนสมการที่ (69) จะได้พลังงานศักย์รวม คือ

$$\int_V \sigma_{ij} \frac{\partial w_j}{\partial x_j} dV = \int_S F_i w_j dS \quad (70)$$

เนื่องจาก $\frac{\partial w_j}{\partial x_j}$ เป็นความเร็วที่กระทำบนพื้นผิววัสดุต่อแนวการเคลื่อนที่ ดังนั้นสมการอัตรางานสมมุติในวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ใหม่ คือ

$$\int_V \sigma_{ij} \dot{\epsilon}_{ij} dV = \int_S F_i \dot{w}_j dS \quad (71)$$

เมื่อแยกเทอมของความเค้นออกเป็นความเค้นเฉลี่ยหรือความเค้นไฮโดรสแตติกและความเค้นเบี่ยงเบนดังสมการที่ (72)

$$\sigma_{ij} = \sigma'_{ij} + \delta_{ij} \sigma_m \quad (72)$$

ซึ่งสามารถเขียนขึ้นใหม่ได้ดังนี้

$$\int_V (\sigma'_{ij} + \delta_{ij} \sigma_m) + \delta \dot{\epsilon}_{ij} dV - \int_S F_i \delta \dot{w}_j dS = 0 \quad (73)$$

แยกสภาพความเค้นที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปออกจากสภาพความเค้นเฉลี่ยและกำหนดให้ $\dot{\epsilon}_{ij} = \dot{\epsilon}_v$ ซึ่งเรียกว่าอัตราความเครียดเชิงปริมาตร เพื่อง่ายต่อการพิจารณาดังสมการที่ (74)

$$\int_V \sigma'_{ij} \delta \dot{\epsilon}_{ij} dV + \int_V \sigma_m \delta \dot{\epsilon}_{ij} dV - \int_S F_i \delta w_j dS = 0 \quad (74)$$

จากสมการข้างต้นสามารถเขียนในให้ง่ายแก่การพิจารณา โดยกำหนดให้อัตราความเครียดเชิงปริมาตร ($\dot{\epsilon}_v = 0$) และเนื่องจากความเค้นเบี่ยงเบนและความเค้นประสิทธิผล (Effective Stress) เป็นพฤติกรรมในช่วงพลาสติก $\sigma'_{ij} \delta \dot{\epsilon}_{ij} = \bar{\sigma} \delta \dot{\epsilon}$ ดังนั้นสมการที่ (74) จึงสามารถเขียนได้ใหม่เป็น

$$\int_V \sigma'_{ij} \delta \dot{\epsilon}_{ij} dV + \int_V \sigma_m \delta \dot{\epsilon}_v dV + \int_V \delta \sigma_m \dot{\epsilon}_v dV - \int_S F_i \delta w_j dS = 0 \quad (75)$$

จาก (75) เมื่อแทน $\int \lambda \dot{\epsilon}_v dV$ ลงในเทอมของความเค้นเฉลี่ย จากนั้นจึงเขียนให้อยู่ในรูปของงานสมมุติได้ดังนี้

$$\delta \Pi = \int_V \bar{\sigma} \delta \dot{\epsilon} dV + \int_V \lambda \dot{\epsilon}_v dV - \int_S F_i \delta w_j dS = 0 \quad (76)$$

โดย λ คือ ตัวคูณลากรางเจียน

เนื่องจากเมื่อมีแรงมากระทำกับวัสดุจนเกิดการเปลี่ยนรูป หรือเกิดการกระจัดขึ้นที่เนื้อวัสดุ จึงสมมุติให้ฟังก์ชันรูปร่างเป็นฟังก์ชันที่ประกอบจากจุดต่อ (หรือ node) ซึ่งแทนการเปลี่ยนรูปขนาดของชิ้นงาน และรวมเอลิเมนต์เหล่านั้นเข้าด้วยกันเพื่อประกอบเป็นสมการรวมของระบบ ดังนั้นฟังก์ชันรูปร่างจึงเขียนในรูปการกระจัดที่จุดต่อดังนี้

$$\{\phi\} = [N]\{d\} \quad (77)$$

Kobayashi และคณะ ได้เสนอว่าสมการที่ (76) เป็นสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ที่อธิบายแบบจำลองชิ้นงานที่มีพฤติกรรมเป็นแบบแข็งเกร็ง-พลาสติก และเพื่อหาสหสัมพันธ์จึงได้กำหนดให้เทอมแรกของสมการที่ (76) มีค่าเท่ากับ

$$\int_V \bar{\sigma} \delta \dot{\epsilon} dV = \int_V \left(\frac{\bar{\sigma}_0}{\dot{\epsilon}_0} \right) \dot{\epsilon} \delta \dot{\epsilon} dV \quad (78)$$

กำหนดให้อัตราความเครียดเชิงปริมาตร ($\dot{\epsilon}_V$) มีค่าเท่ากับ

$$\dot{\epsilon}_x + \dot{\epsilon}_y + \dot{\epsilon}_z \quad (79)$$

หรือ $\dot{\epsilon}_V = C^T w$ (80)

เมื่อ $C^T = \{1, 1, 1, 0\} \bar{B}$

$\{w\}$ คือ เมทริกซ์ของฟังก์ชันการกระจัดในเทอมต่อเวลา

$[\bar{B}]$ คือ เมทริกซ์ของอัตราความเครียด

จากสมการความเครียดประสิทธิผล $\dot{\epsilon}$ สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของอัตราความเครียดได้ ดังนี้

$$\dot{\epsilon} = \sqrt{\frac{2}{3}} \{ \dot{\epsilon}_{ij} \dot{\epsilon}_{ij} \}^{\frac{1}{2}} \quad (81)$$

หรือสามารถเขียนให้อยู่ในเทอมของเมทริกซ์ได้ ดังนี้

$$(\dot{\epsilon})^2 = \dot{\epsilon}^T D \dot{\epsilon} \quad (82)$$

และเมื่อนำสมการอัตราความเครียด $(\dot{\epsilon})^2 = [\bar{B}] \{w\}$ แทนลงในสมการที่จะได้

$$(\dot{\epsilon})^2 = w^T B^T D B w = w^T k w \quad (83)$$

เมื่อ $k = B^T D B$

และเมื่อแทนค่าสมการที่ (78), (80) และ (83) ลงในสมการที่ (76) จะได้สมการไฟไนต์เอลิเมนต์ ดังนี้

$$\frac{\partial \Pi}{\partial w} = \int_V \frac{\bar{\sigma}}{\bar{\epsilon}} k w dV + \int_V \lambda C^T dV - \int_S N F dS = 0 \quad (84)$$

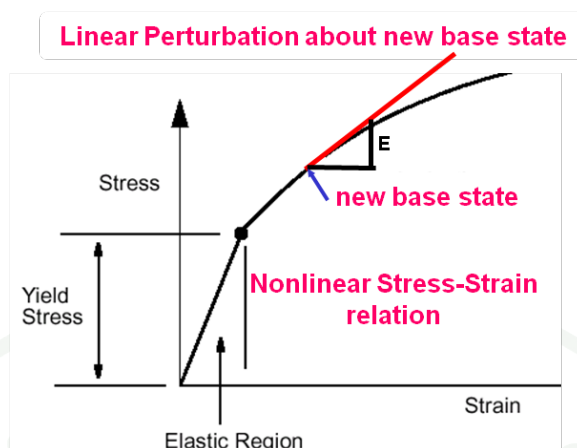
โดย k คือ สติฟเนสเมทริกซ์

3.4.5 ความไม่เชิงเส้นของกรรมวิธีทูปขึ้นรูป

ในงานวิจัยนี้เป็นปัญหาการทูปขึ้นรูปร้อน ซึ่งเป็นปัญหาไม่เชิงเส้น ทั้งนี้ จะพบกับพฤติกรรมไม่เชิงเส้นสามชนิด คือ ความไม่เชิงเส้นของวัสดุ ความไม่เชิงเส้นของรูปทรง และความไม่เชิงเส้นของเงื่อนไขขอบเขต เนื่องจากขณะทำการขึ้นรูปจากการทูปขึ้นรูปร้อนความเค้นที่เกิดขึ้น จะสูงกว่าความเค้นคราก จึงทำให้เกิดพฤติกรรมไม่เชิงเส้นของวัสดุ (Materials Nonlinearity) ในช่วงพลาสติก เมื่อความเค้นสูงขึ้นทำให้วัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของโครงสร้าง และการสูญเสียเสถียรภาพ ทำให้เกิดความไม่เชิงเส้นของรูปทรง (Geometric Nonlinearity) และในการขึ้นรูปนั้นจะมีการสัมผัสกันของ Billet กับแม่พิมพ์ทำให้ความเสียดทานซึ่งขึ้นอยู่กับแรงที่เกิดจากการสัมผัสทำให้เกิดพฤติกรรมไม่เชิงเส้นของเงื่อนไขขอบเขต (Nonlinear Boundary Conditions) โดยทั่วไปในการวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear) สามารถแบ่งตามพฤติกรรมที่เกิดขึ้นออกเป็น 3 รูปแบบดังนี้ (MSC.Marc Theory and User Information)

1. ความไม่เชิงเส้นของวัสดุ (Materials Nonlinearities) เป็นผลมาจากความสัมพันธ์แบบไม่เชิงเส้นระหว่างความเค้นและความเครียด เช่น ความสัมพันธ์แบบ Elastoplastic, Elasto-viscoplasticity หรือการคืบ (Creep) จากภาพที่ 69 เมื่อความเค้นมากกว่าค่าจุดคราก (Yield) ค่าอัตราส่วนระหว่างความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) หรือ Elastic Modulus จะมีค่าแตกต่างกันไปตามลักษณะของเส้นโค้ง และจะทำให้สมการสติฟเนสขึ้นอยู่กับการกระจัดโดยเขียนให้อยู่ในรูปเมทริกซ์ ดังนี้

$$\{f\} = [k(u)]\{d\} \quad (85)$$

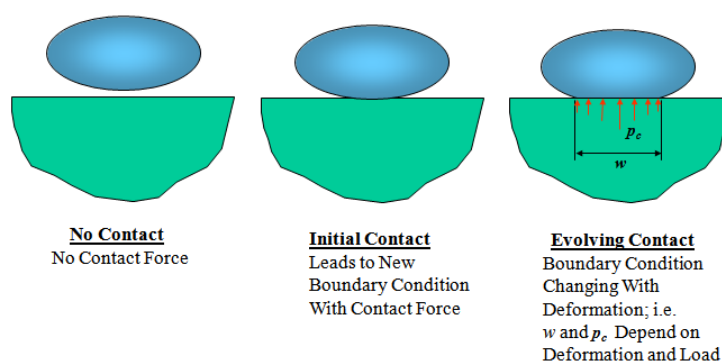


ภาพที่ 69 แสดงความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดในช่วงอีลาสติกและพลาสติก

2. ความไม่เชิงเส้นทางเรขาคณิต (Geometric Nonlinearities) เป็นผลมาจากความสัมพันธ์แบบไม่เชิงเส้นระหว่างความเครียดกับการกระจัด ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างมาก (Large Deformation) หรือ การหมุนอย่างมาก (Large Rotation) ซึ่งความไม่เชิงเส้นนี้ทำให้วัสดุเปลี่ยนพฤติกรรมของโครงสร้าง รวมไปถึงทำให้วัสดุสูญเสียเสถียรภาพ ทำให้แบบจำลองมีความคลาดเคลื่อนสูง และรูปแบบสมการสทิงเงสขึ้นอยู่กับการกระจัดตามสมการที่ (85) เช่นกัน

3. ความไม่เชิงเส้นของเงื่อนไขขอบเขต (Nonlinear Boundary Conditions) เป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงสถานะจนทำให้สมบัติของวัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงไป โดยทั่วไปความไม่เชิงเส้นชนิดนี้จะเกิดได้จาก การสัมผัส (Contact) ความไม่เชิงเส้นของจตุรองรับ (Non-linear Support) และ ความไม่เชิงเส้นของโหลด (Nonlinear Loading) ภาพที่ 70 แสดงความไม่เชิงเส้นของการสัมผัส ซึ่งมีรูปแบบของสมการสทิงเงสและแรงขึ้นอยู่กับการกระจัดซึ่งเขียนให้อยู่ในรูปเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$[k(u)]\{d\} = \{f(u)\} \quad (86)$$



ภาพที่ 70 แสดงความไม่เชิงเส้นที่เกิดจากการสัมผัส (Contact)

3.5 การสร้างแบบจำลองโดยใช้ CAD

งานวิจัยนี้ใช้ซอฟต์แวร์ CAD ชื่อ Pro/ENGINEER Wildfire 3 ทำการสร้างแบบจำลองแม่พิมพ์เป็นแบบพื้นผิว (Surface) ตามขนาดแม่พิมพ์จริง จากนั้นทำการ Export model เป็นไฟล์ข้อมูลของมาตรฐาน IGES (Initial Graphics Exchange Specification) เพื่อใช้ในซอฟต์แวร์ MSC.Marc ต่อไป

3.6 การสร้างแบบจำลองการทวบขึ้นรูปด้วย FEA

แบบจำลองบรรจุภัณฑ์ที่จำลองโดยใช้ CAD ที่ได้จากหัวข้อที่ 3.4 ซึ่งเป็นไฟล์ชิ้นงาน (Part file) ของซอฟต์แวร์ Pro/ENGINEER Wildfire 3 มีนามสกุล .prt ต้องทำการแปลงไฟล์ให้เป็นไฟล์มาตรฐาน IGES (Initial Graphics Exchange Specification) มีนามสกุล .iges เพื่อให้สามารถนำเข้า (Import) สู่ซอฟต์แวร์ CAE ได้ โดยซอฟต์แวร์ CAE ที่ใช้ได้แก่ซอฟต์แวร์ MSC.Marc

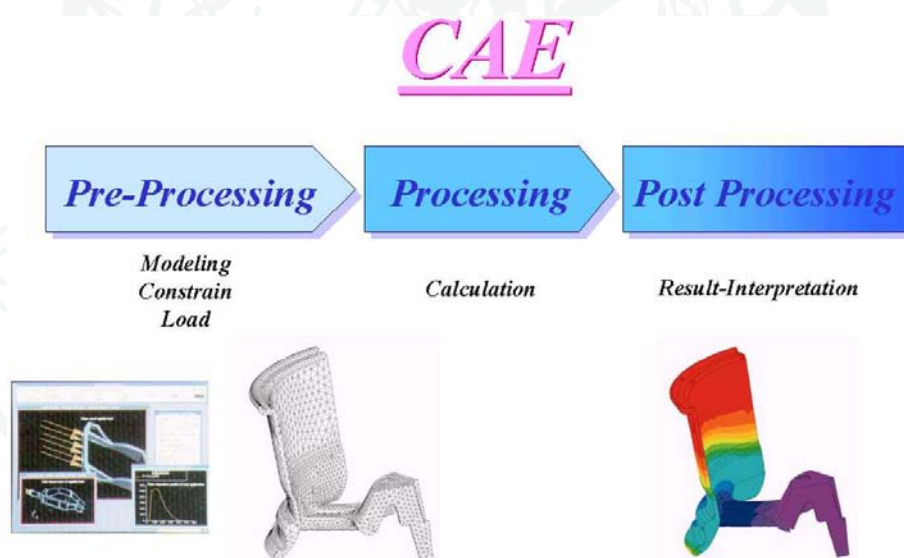
กระบวนการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis หรือ FEA) แบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอน ดังแสดงในภาพที่ 71 ซึ่งใช้ซอฟต์แวร์ MSC.Marc ทั้ง 3 ขั้นตอน โดยแต่ละขั้นตอนมีรายละเอียดดังนี้

ช่วงการเตรียมข้อมูล (Pre-Processing) เป็นการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Model หรือ FEM) โดยนำไฟล์ CAD ของแม่พิมพ์ นามสกุล .iges มากำหนดเป็น

Rigid body เพื่อใช้ขึ้นรูป และสร้างแบบจำลอง FEM ของชิ้นงาน (Billet) โดยสร้างโหนด (Node) บนผิวเพื่อใช้สร้างชิ้นประกอบ (Element) ที่เหมาะสม พร้อมกับกำหนดสมบัติ (Properties) ของวัสดุ (Materials) แล้วจึงกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions) และแรง หรือ โหลด (Load) ที่กระทำ เพื่อให้ตรงตามสภาวะการขึ้นรูปจริง

ช่วงการประมวลผล (Processing) ใช้การวิเคราะห์ FEA จากซอฟต์แวร์ MSC.Marc เพื่อประมวลผล หรือทำการคำนวณจากแบบจำลอง FEM ที่ได้กำหนดเงื่อนไขขอบเขต และ โหลด ไว้แล้วในช่วงการเตรียมข้อมูล

ช่วงหลังการประมวลผล (Post Processing) เป็นการนำผลที่ได้จากการคำนวณแสดงเป็นระดับชั้นสี (Contour) ของการเปลี่ยนรูปทรง (Deformation) ความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) เป็นต้น



ภาพที่ 71 ลำดับการวิเคราะห์โดยใช้ CAE

ที่มา : สัจจาทิพย์ (2545)

ผลการวิจัยและวิจารณ์

1. ผลการทดสอบการทุบขึ้นรูปด้วยเครื่องจักร

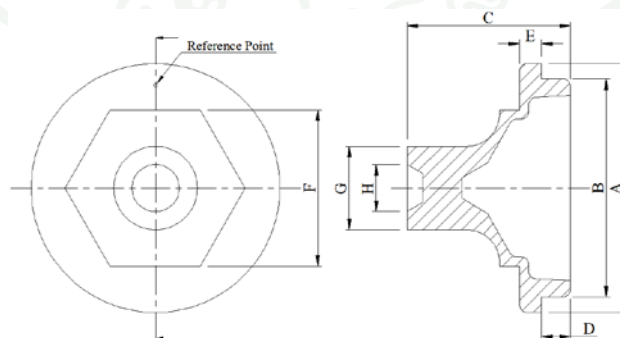
1.1 ผลการทดสอบการทุบขึ้นรูปชิ้นงานฝาประตุน้ำ (VC50)

ภาพแสดงชิ้นงานฝาประตุน้ำที่ได้จากกระบวนการทุบขึ้นรูป ได้แสดงในภาพที่ 72 และภาพวาดแสดงขนาดที่ใช้ในการบันทึกผลการทดสอบ เพื่อใช้เปรียบเทียบกับผล FEA ได้แสดงในภาพที่ 73 ข้อมูลทั่วไปของชิ้นงาน (Billet) ก่อนทดสอบการทุบขึ้นรูปได้แสดงในตารางที่ 6

ผลการทดสอบที่เป็นการวัดขนาดของชิ้นงานที่ทุบขึ้นรูปแล้วจำนวน 10 ชิ้น ได้แสดงในตารางที่ 7 โดยการทดสอบอยู่ภายใต้อุณหภูมิห้อง 41°C อุณหภูมิแม่พิมพ์ 135°C และสารหล่อลื่นเป็นกราไฟต์ผสมน้ำด้วยอัตราส่วน 1 ต่อ 10



ภาพที่ 72 ตัวอย่างชิ้นงานฝาประตุน้ำ (VC50) หลังการทุบขึ้นรูป ของ 3 ตัวอย่างชิ้นงาน



ภาพที่ 73 ตำแหน่งการตรวจวัดชิ้นงานฝาประตุน้ำ (VC50) หลังการทุบขึ้นรูป

ตารางที่ 6 แสดงข้อมูลของ Billet สำหรับทุบขึ้นรูปชิ้นงานฝาประตุน้ำ (VC50)

ชิ้นงานที่	เส้นผ่านศูนย์กลาง (mm)	น้ำหนัก (g)	ความสูง (mm)	อุณหภูมิ Billet (°C)
1	42.01	328.8	28.34	670
2	42.01	331.9	28.56	640
3	41.96	330.8	28.56	670
4	42.01	333.3	28.64	660
5	41.98	330.8	28.97	670
6	42.08	331.2	28.56	650
7	42.03	331.7	28.56	670
8	42.04	331.6	28.64	670
9	42.02	330.0	28.51	670
10	42.05	329.7	28.44	677

ตารางที่ 7 ผลการวัดขนาดของชิ้นงานหลังจากทุบขึ้นรูปของชิ้นงานฝาประตุน้ำ (VC50)

ชิ้นงานที่	ขนาด (mm) ที่ตำแหน่ง							
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	69.62	61	44.9	10.16	4.05	43.03	23.01	10.41
2	69.76	61.04	44.78	10.01	4.25	43	23.03	10.85
3	69.62	61.01	44.91	10.07	4.81	43.05	23	10.82
4	69.76	61.08	44.87	10.01	4.34	43.05	23.05	10.81
5	69.81	61.45	44.71	10	4.64	43.14	23.12	10.51
6	69.8	61.04	44.86	9.87	4.63	43.13	23	10.74
7	69.81	60.83	44.89	9.91	4.67	42.91	23.03	10.71
8	69.76	61.15	44.77	10.05	4.35	42.9	23	10.8
9	69.89	61.62	44.8	10.12	4.01	43.12	23.12	10.68
10	69.81	61.23	44.87	9.96	4.78	42.99	23.07	10.61

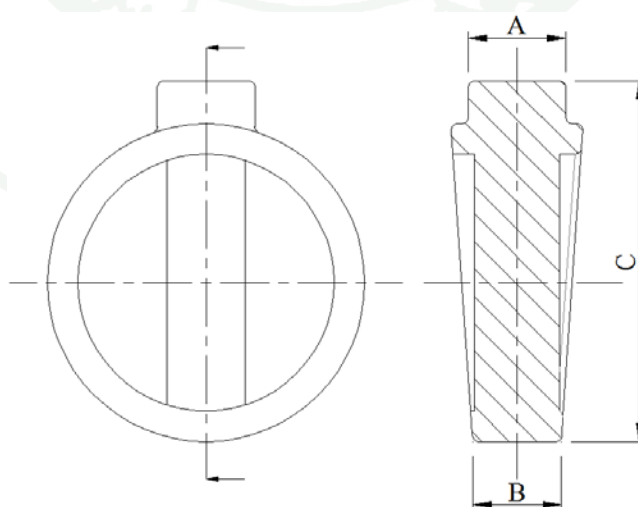
1.2 ผลการทดสอบการชุบขึ้นรูปชิ้นงานลึ้นประตุน้ำ (GT50)

ภาพแสดงชิ้นงานลึ้นประตุน้ำที่ได้จากกระบวนการชุบขึ้นรูป ได้แสดงในภาพที่ 74 และภาพวาดแสดงขนาดที่ใช้ในการบันทึกผลการทดสอบ เพื่อใช้เปรียบเทียบกับผล FEA ได้แสดงในภาพที่ 75 ข้อมูลทั่วไปของชิ้นงาน (Billet) ก่อนทดสอบการชุบขึ้นรูปได้แสดงในตารางที่ 8

ผลการทดสอบที่เป็นการวัดขนาดของชิ้นงานที่ชุบขึ้นรูปแล้วจำนวน 10 ชิ้น ได้แสดงในตารางที่ 9 โดยการทดสอบอยู่ภายใต้อุณหภูมิห้อง 41°C อุณหภูมิแม่พิมพ์ 120°C และสารหล่อลื่นเป็นกราไฟต์ผสมน้ำด้วยอัตราส่วน 1 ต่อ 10



ภาพที่ 74 ตัวอย่างชิ้นงานลึ้นประตุน้ำ (GT50) หลังการชุบขึ้นรูป ของ 3 ตัวอย่างชิ้นงาน



ภาพที่ 75 ตำแหน่งการตรวจวัดชิ้นงานลึ้นประตุน้ำ (GT50) หลังการชุบขึ้นรูป

ตารางที่ 8 แสดงข้อมูลของ Billet สำหรับการทุบขึ้นรูปชิ้นงานล้นประตุน้ำ (GT50)

ชิ้นงานที่	เส้นผ่านศูนย์กลาง (mm)	น้ำหนัก (g)	ความสูง (mm)	อุณหภูมิ Billet (°C)
1	44.72	264.0	20.08	640
2	44.66	267.8	20.43	620
3	44.62	268.8	20.43	670
4	44.57	269.6	20.52	656
5	44.66	269.7	20.48	650
6	44.7	270.8	20.62	620
7	44.64	268.4	20.43	640
8	44.66	266.3	20.24	670
9	44.64	268.0	20.36	650
10	44.60	263.0	20.06	670

ตารางที่ 9 ผลการวัดขนาดของชิ้นงานหลังจากทุบขึ้นรูปของชิ้นงานล้นประตุน้ำ (GT50)

ชิ้นงานที่	ขนาด (mm) ที่ตำแหน่ง		
	A	B	C
1	17.2	17.33	52.18
2	17.37	17.43	52.14
3	17.39	17.39	52.11
4	17.39	17.43	52.11
5	17.4	17.39	52.04
6	17.2	17.38	52.07
7	17.25	17.32	52.17
8	17.23	17.45	52.01
9	17.23	17.38	52.24
10	17.34	17.36	52.2

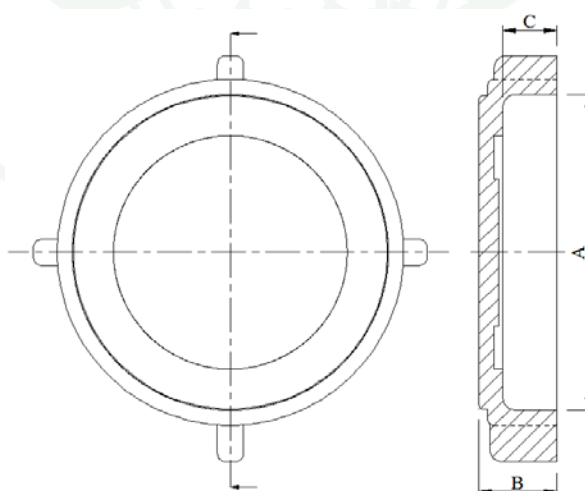
1.3 ผลการทดสอบการทุบขึ้นรูปชิ้นงานฝาขันมาตรวัดน้ำ (HC15)

ภาพแสดงชิ้นงานฝาขันมาตรวัดน้ำที่ได้จากกระบวนการทุบขึ้นรูป ได้แสดงในภาพที่ 76 และภาพวาดแสดงขนาดที่ใช้ในการบันทึกผลการทดสอบ เพื่อใช้เปรียบเทียบกับผล FEA ได้แสดงในภาพที่ 77 ข้อมูลทั่วไปของชิ้นงาน (Billet) ก่อนทดสอบการทุบขึ้นรูปได้แสดงในตารางที่ 10

ผลการทดสอบที่เป็นการวัดขนาดของชิ้นงานที่ทุบขึ้นรูปแล้วจำนวน 10 ชิ้น ได้แสดงในตารางที่ 11 โดยการทดสอบอยู่ภายใต้อุณหภูมิห้อง 42°C อุณหภูมิแม่พิมพ์ 170°C และสารหล่อลื่นเป็นกราไฟต์ผสมน้ำด้วยอัตราส่วน 1 ต่อ 10



ภาพที่ 76 ตัวอย่างชิ้นงานฝาขันมาตรวัดน้ำ (HC15) หลังการทุบขึ้นรูป ของ 3 ตัวอย่างชิ้นงาน



ภาพที่ 77 ตำแหน่งการตรวจวัดของชิ้นงานฝาขันมาตรวัดน้ำ (HC15) หลังการทุบขึ้นรูป

ตารางที่ 10 แสดงข้อมูลของ Billet สำหรับการทุบขึ้นรูปชิ้นงานฝาชั้นมาตรวัดน้ำ (HC15)

ชิ้นงานที่	เส้นผ่านศูนย์กลาง (mm)	น้ำหนัก (g)	ความสูง (mm)	อุณหภูมิ Billet (°C)
1	33.70	353.2	47.30	650
2	33.66	350.4	47.17	660
3	33.65	351.2	47.03	650
4	33.68	349.6	47.00	646
5	33.71	355.9	47.65	670
6	33.69	350.0	46.74	631
7	33.65	350.5	46.84	630
8	33.68	349.6	47.02	643
9	33.77	0.3528	47.15	640
10	33.71	0.3513	46.97	635

ตารางที่ 11 ผลการวัดขนาดของชิ้นงานหลังจากทุบขึ้นรูปของชิ้นงานฝาชั้นมาตรวัดน้ำ (HC15)

ชิ้นงานที่	ขนาด (mm) ที่ตำแหน่ง		
	A	B	C
1	71.95	19.38	12.44
2	72.46	19.85	12.52
3	71.73	19.65	12.35
4	72.14	19.86	12.31
5	72.1	19.56	12.44
6	72.17	19.32	12.49
7	71.96	19.48	12.6
8	71.99	19.57	12.39
9	71.98	19.64	13.01
10	72.03	19.88	12.33

2. ผลการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหาย

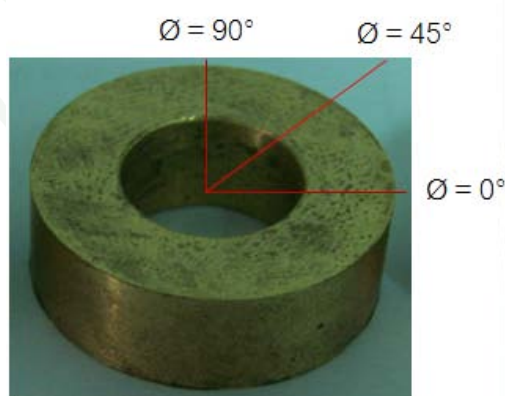
ชิ้นงานทดสอบเป็นวัสดุทองเหลือง CuZn40Pb2 ตามมาตรฐาน DIN 17660 ทดสอบที่อุณหภูมิ 650°C ขนาดของชิ้นงานก่อนและหลังการทดสอบ Ring compression test ได้แสดงในตารางที่ 12 และ 13 ตามลำดับ โดย ID คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน และ H คือ ความสูงของชิ้นงาน ภาพที่ 78 แสดงรูปชิ้นงานก่อนและหลังจากการทดสอบ Ring compression test ในการทดสอบ Ring Compression Test ได้ทดสอบทั้งในกรณีที่ไม้ใช้สารหล่อลื่นและใช้สารหล่อลื่นผลคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (% RID) และเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความสูง (% RH) ในตารางที่ 13 นำไปใช้หาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายได้จาก Calibration curve ในภาพที่ 60 ค่าเฉลี่ย % RID และ % RH จากตารางที่ 13 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหาย (m) เมื่อไม้ใช้สารหล่อลื่นเท่ากับ 0.7 และเมื่อใช้สารหล่อลื่น (อัตราส่วน 1:10) เท่ากับ 0.5

ตารางที่ 12 แสดงขนาดชิ้นงานก่อนการทดสอบ Ring compression test ที่อุณหภูมิ 650°C

ชิ้นทดสอบที่	ตำแหน่ง	$\theta = 0^\circ$ (mm)	$\theta = 45^\circ$ (mm)	$\theta = 90^\circ$ (mm)	เฉลี่ย (mm)
1	ID	11.93	11.95	11.93	11.94
	H	8.39	8.37	8.37	8.38
2	ID	12.61	12.65	12.64	12.63
	H	8.37	8.35	8.33	8.35
3	ID	12.7	12.55	12.69	12.64
	H	8.37	8.35	8.35	8.36
4	ID	12.62	12.58	12.62	12.61
	H	8.36	8.36	8.36	8.36
5	ID	12.62	12.61	12.6	12.61
	H	8.34	8.34	8.34	8.34
6	ID	12.56	12.62	12.62	12.6
	H	8.39	8.37	8.37	8.38

ตารางที่ 13 แสดงขนาดชิ้นงานหลังการทดสอบ Ring compression test ที่อุณหภูมิ 650°C

ชิ้น ทดสอบที่	แม่พิมพ์	สารหล่อ ลื่น	จุด ที่วัด	$\theta = 0^\circ$ (mm)	$\theta = 45^\circ$ (mm)	$\theta = 90^\circ$ (mm)	เฉลี่ย (mm)	(1) %RID (2) % RH
1	ชุบแข็ง	ไม่ใช้	ID	4.81	4.76	4.66	4.74	60.26 (1)
			H	4.22	4.24	4.24	4.23	49.52 (2)
2	ชุบแข็ง	ไม่ใช้	ID	4.5	4.59	4.58	4.55	63.93 (1)
			H	4.28	4.3	4.28	4.29	48.63 (2)
3	ชุบแข็ง	ไม่ใช้	ID	4.95	5.04	4.9	4.96	60.75 (1)
			H	4.23	4.21	4.21	4.22	49.52 (2)
4	ชุบแข็ง	1:10	ID	6.5	6.45	6.43	6.46	48.77 (1)
			H	4.23	4.23	4.23	4.23	49.4 (2)
5	ชุบแข็ง	1:10	ID	6.48	6.66	6.37	6.5	48.43 (1)
			H	4.22	4.24	4.22	4.23	49.28 (2)
6	ชุบแข็ง	1:10	ID	6.4	6.5	6.3	6.4	49.21 (1)
			H	4.24	4.24	4.24	4.24	49.4 (2)



ก)



ข)

ภาพที่ 78 แสดงตัวอย่าง ชิ้นงานก่อน ก) และหลัง ข) การทดสอบ Ring compression test เมื่อใช้สารหล่อลื่น 1:10

3. ผลการทดสอบหาสมบัติของทองเหลืองที่อุณหภูมิ 650°C

การทดสอบหาสมบัติทางกลของทองเหลือง CuZn40Pb2 เป็นการทดสอบแรงอัด (Compression Test) เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด (Stress–Strain diagram หรือ Flow curve) การทดสอบได้กระทำโดยใช้เครื่องวัดการยุบตัว (Dilatometer) ทำการบันทึกแรงอัดและการเคลื่อนที่ทุก 0.02 วินาที ซึ่งงานภายหลังการทดสอบเสร็จสิ้นแล้วได้แสดงในภาพที่ 79 กราฟแสดงแรงและระยะทางของ 10 ชิ้นงานที่อุณหภูมิ 650°C ได้แสดงในภาพที่ 80 กราฟของ ensemble average และ SD ของทั้ง 10 ชิ้นงานได้แสดงในภาพที่ 81 ผลการทดสอบแรงอัดและระยะกด ของค่าเฉลี่ยและ SD แบบ ensemble ของแรงได้แสดงเป็นกราฟของ $\text{avg} \pm \text{SD}$ ในภาพที่ 82 ก) และค่าเฉลี่ยพร้อมค่าสูงสุดและต่ำสุด ได้แสดงในภาพที่ 82 ข)

ผลการทดสอบหาสมบัติทางกล แสดงเป็นกราฟของความเค้นจริงและความเครียดจริง ($\bar{\sigma}$ vs $\bar{\epsilon}$) ของทั้ง 10 ชิ้นงาน ได้แสดงในภาพที่ 83 กราฟแสดงผล ensemble average และ SD ของ $\bar{\sigma}$ vs $\bar{\epsilon}$ ของทั้ง 10 ชิ้นงาน ได้แสดงในภาพที่ 84 และ 85 ค่าเฉลี่ยพร้อมค่าสูงสุดและต่ำสุด ในภาพที่ 86 ในช่วง Linear elastic ของ $\bar{\sigma}$ vs $\bar{\epsilon}$ ในภาพที่ 87 คำนวณได้ค่า $E = 85,437 \text{ MPa}$ และ $\bar{\sigma}_y = 163.35 \text{ MPa}$

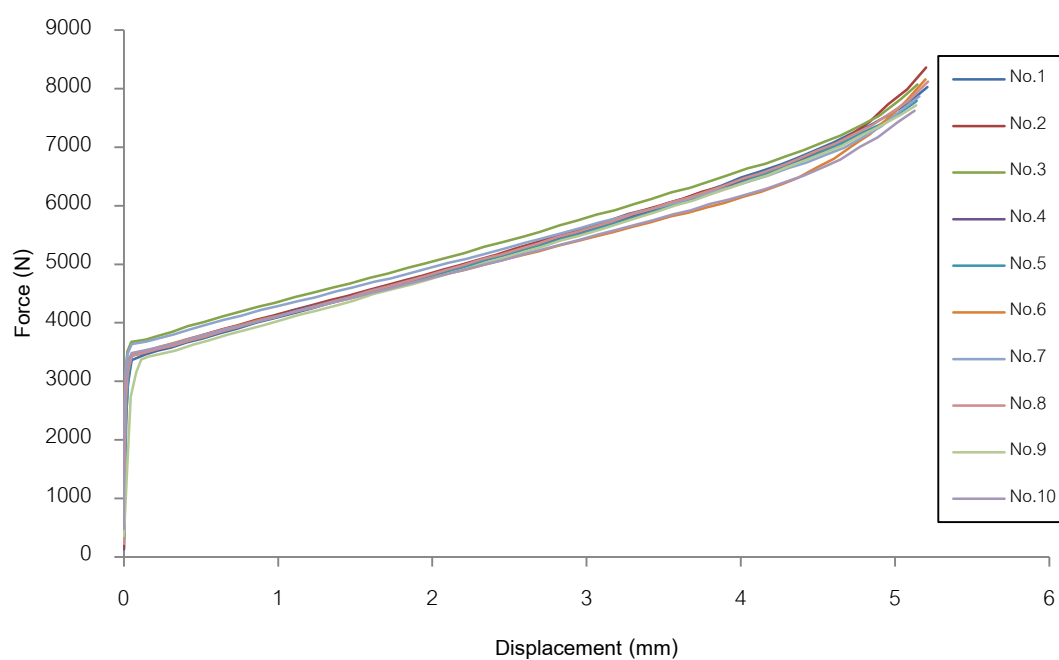
กราฟผลของ ensemble average ของ ความเค้นจริงและความเครียดจริง เมื่อพลอตลงบนกราฟ Log – Log ได้แสดงในภาพที่ 88 เมื่อวิเคราะห์ตามสมการที่ 10 ถึง 15 ได้ผลคือ ค่า $K = 207.348$ และ $n = 0.03837$ ดังนั้น สมบัติทางกลของทองเหลือง มีค่าความเค้นจริง $\bar{\sigma}$ ดังนี้

$$\bar{\sigma} = \begin{cases} 85,437\bar{\epsilon} & ; \bar{\sigma} < \bar{\sigma}_y \text{ MPa} \\ 207.348\bar{\epsilon}_p^{0.03837} & ; \bar{\sigma} > \bar{\sigma}_y \text{ MPa} \end{cases} \quad (87)$$

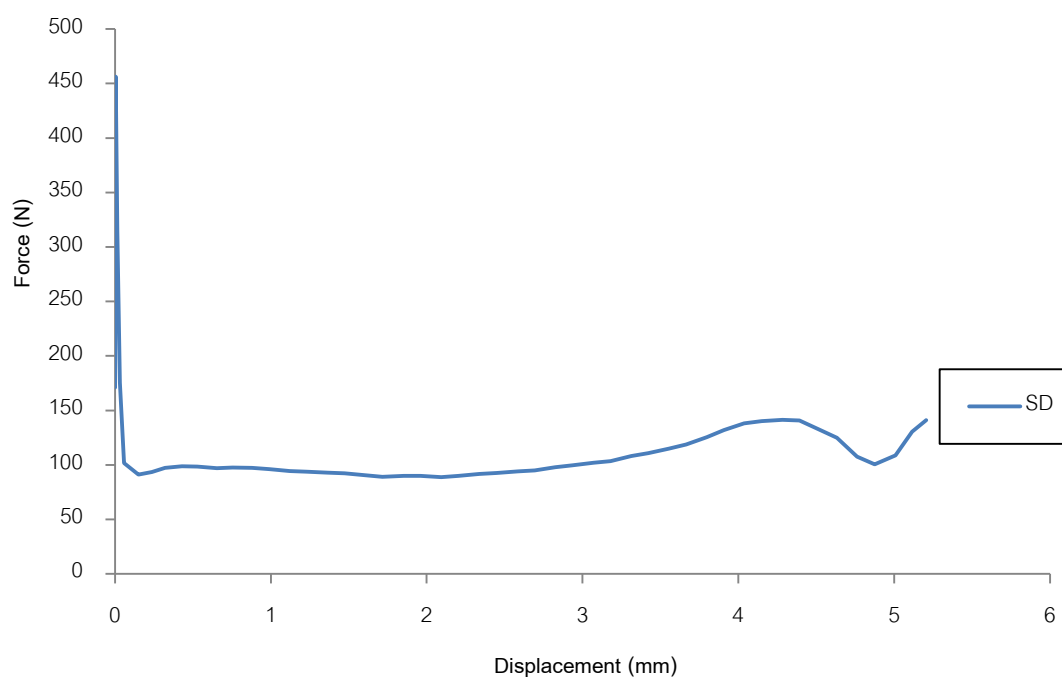
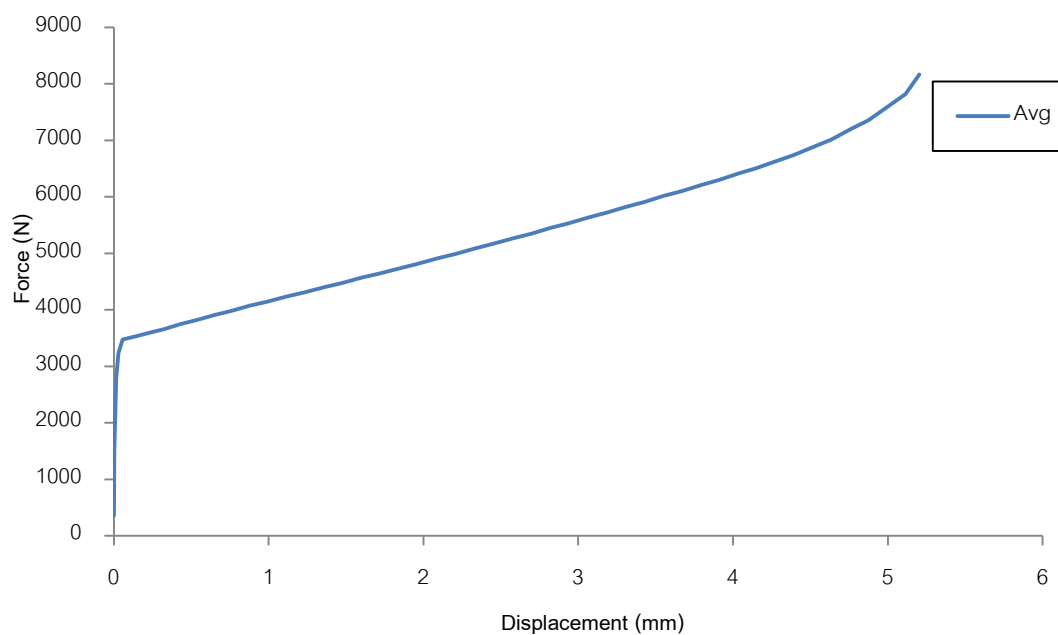
ผลการเปรียบเทียบในช่วง Plastic ของค่าความเค้นจริงจากสมการ (88) เปรียบเทียบกับข้อมูลดิบของภาพที่ 87 ได้แสดงเป็นเส้นสีแดงในภาพที่ 89 และ เปรอ์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนได้แสดงในภาพที่ 90



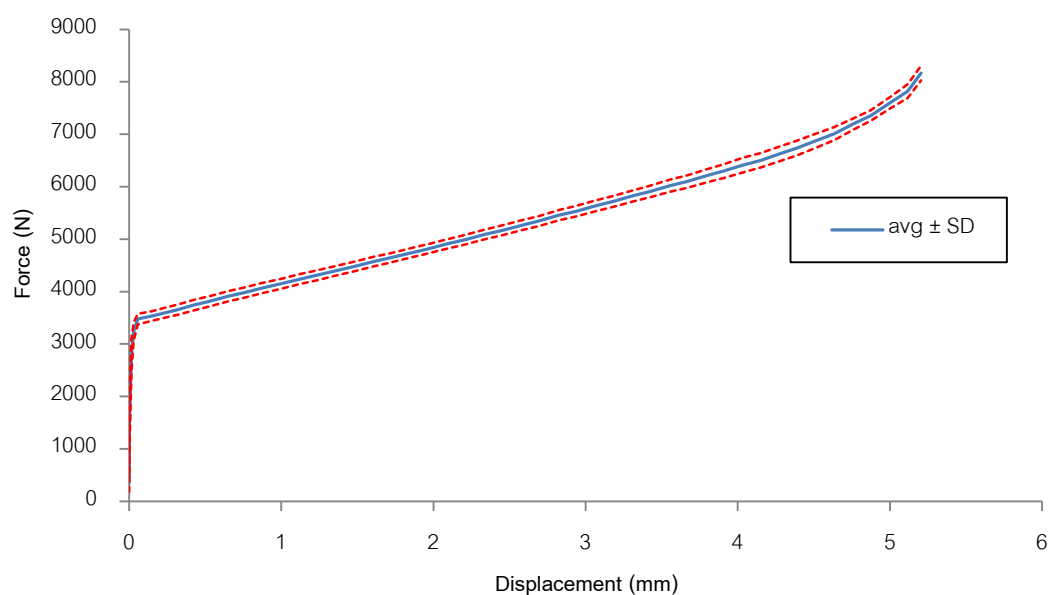
ภาพที่ 79 แสดงชิ้นงานหลังจากการทดสอบแรงอัดที่อุณหภูมิ 650°C



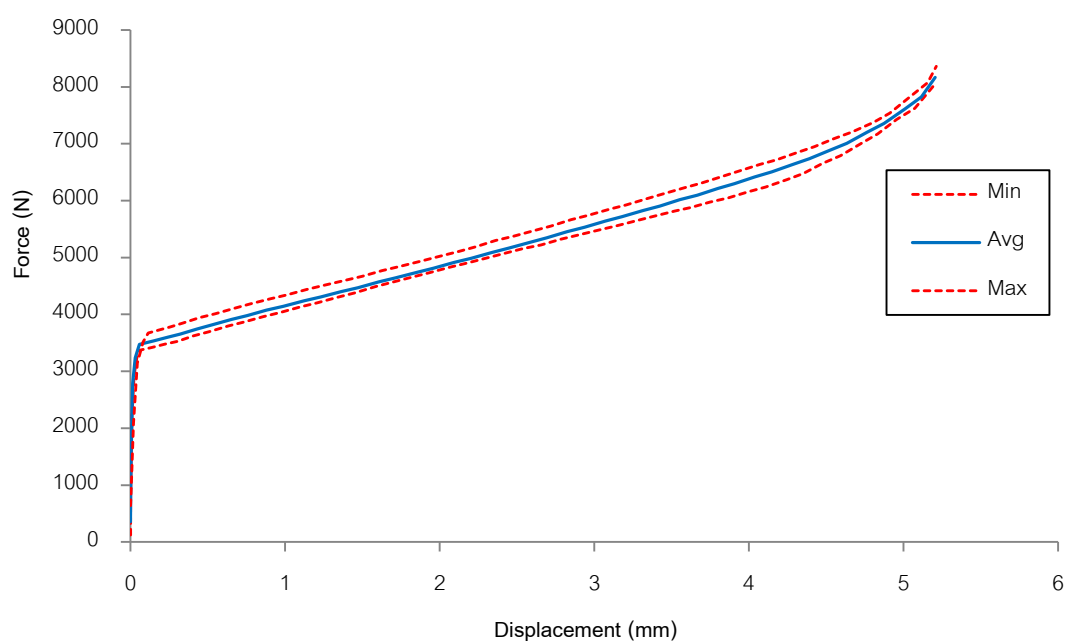
ภาพที่ 80 กราฟแสดงผลการทดสอบ แรงกดและระยะทาง ของ 10 ชิ้นงาน ที่อุณหภูมิ 650°C



ภาพที่ 81 กราฟแสดง ensemble average (ภาพบน) และ ensample SD (ภาพล่าง) ของการทดสอบแรงกดและระยะทางจากทั้ง 10 ชิ้นงาน

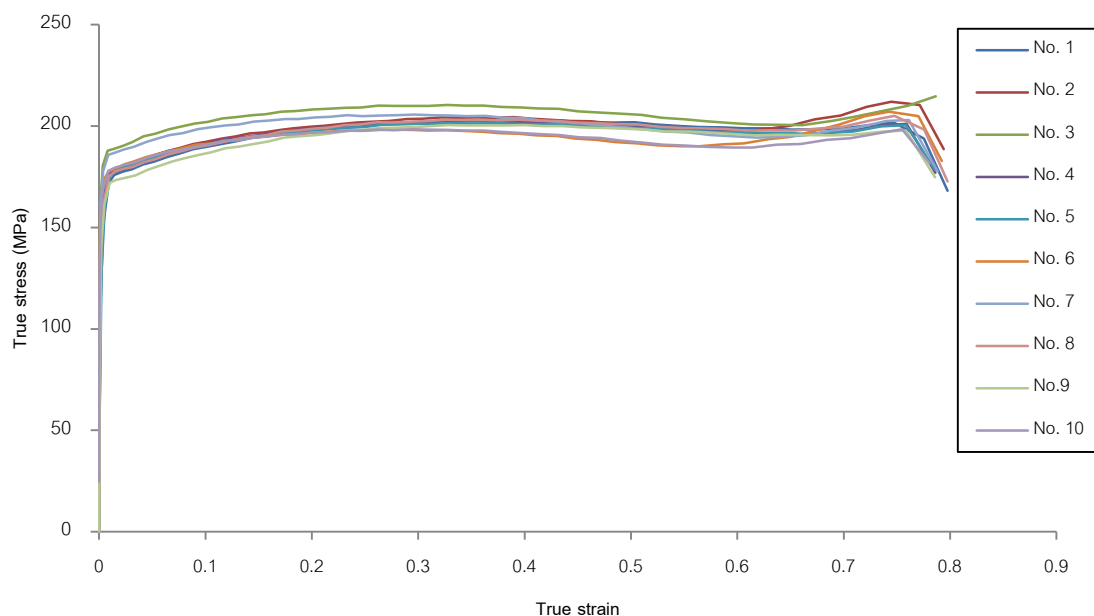


ก)

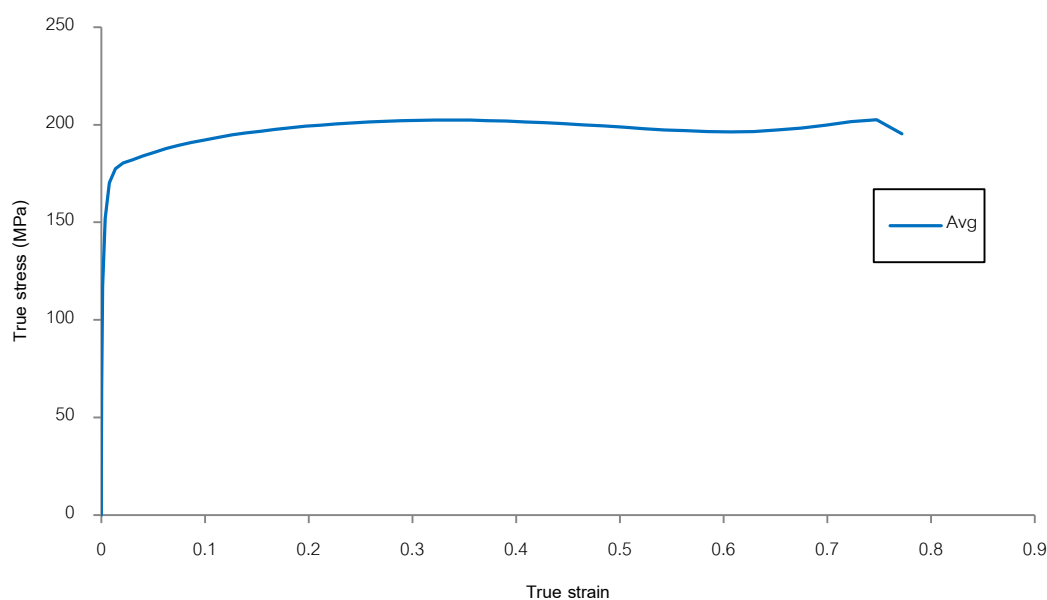


ข)

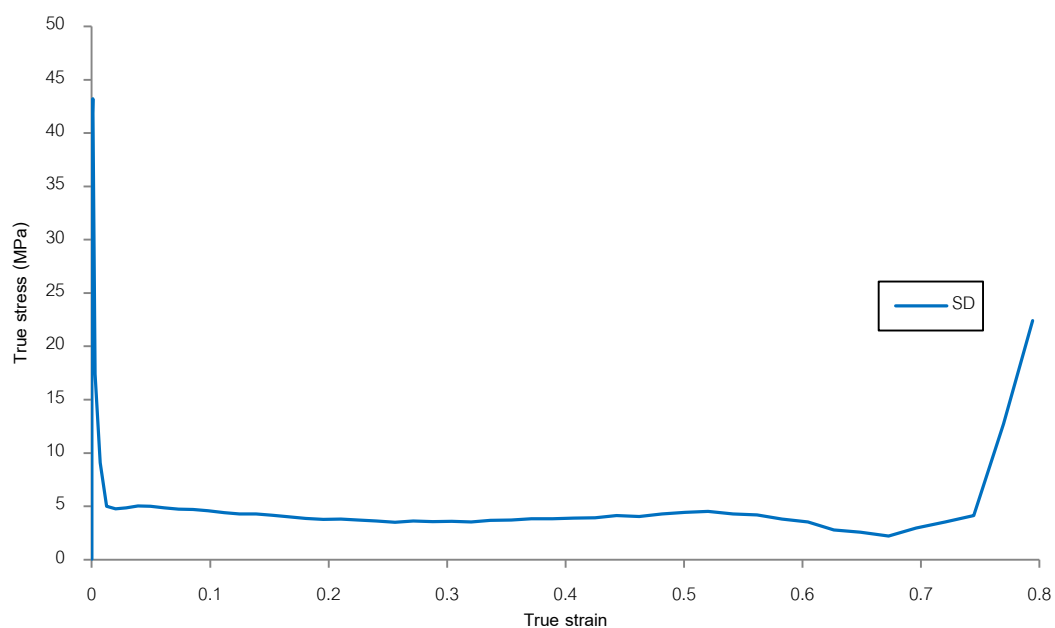
ภาพที่ 82 กราฟแสดงผลการทดสอบแรงกดกับระยะทางกด โดย ก) ensemble average และขอบเขตของ SD ($\text{avg} \pm \text{SD}$) และ ข) ensemble average และค่าสูงสุด (Max) และต่ำสุด (Min) ของผลการทดสอบแรงกดกับระยะทางกด



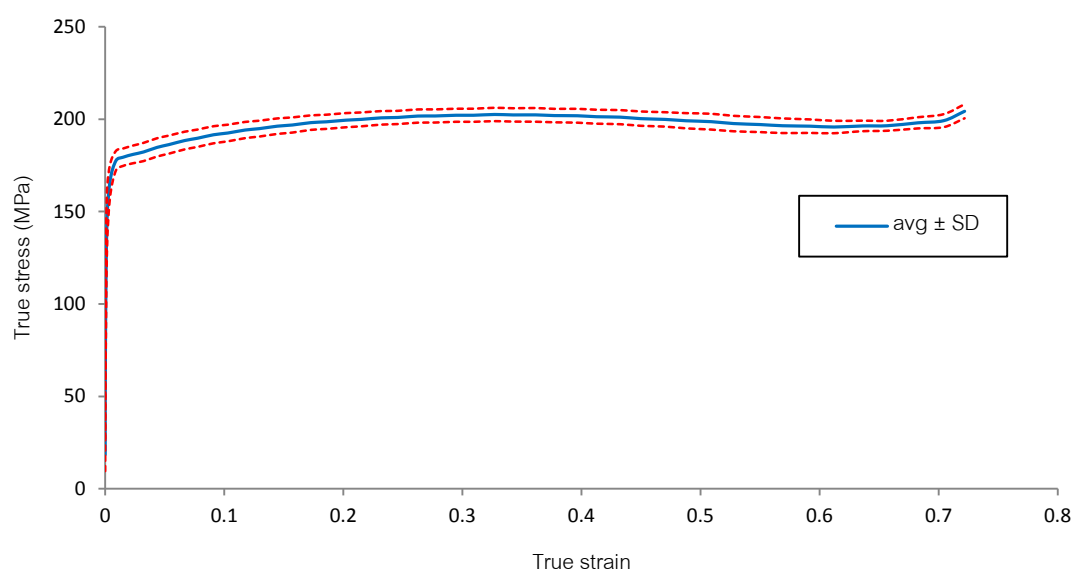
ภาพที่ 83 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นจริงและความเครียดจริงที่บันทึกได้
ในขณะที่ทำการทดสอบของชิ้นงานทั้งหมดจำนวน 10 ชิ้น ที่อุณหภูมิ 650°C



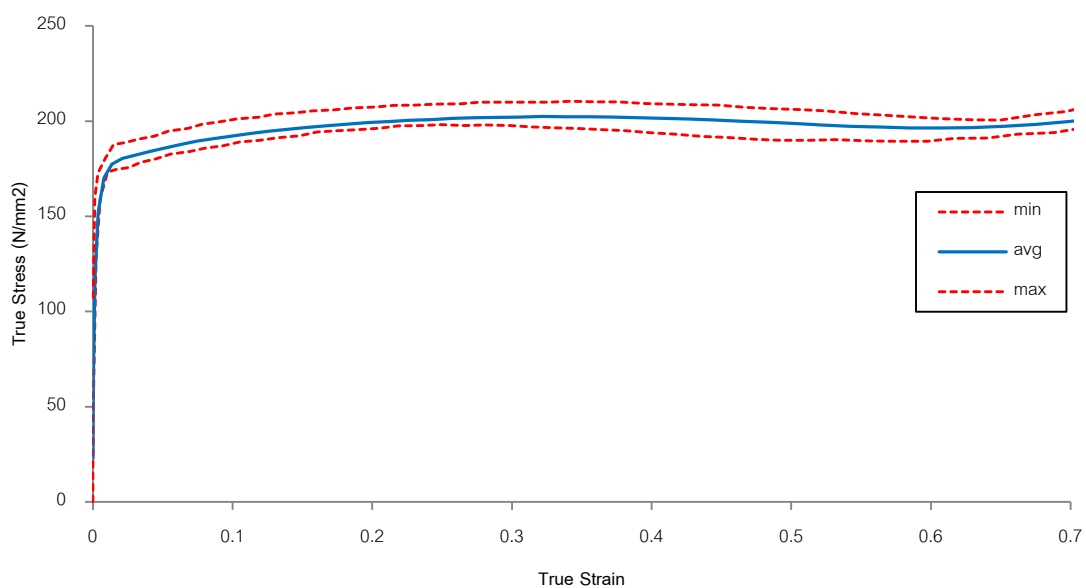
ภาพที่ 84 กราฟแสดง ensemble average จาก 10 ชิ้นงาน ของ True stress กับ True strain



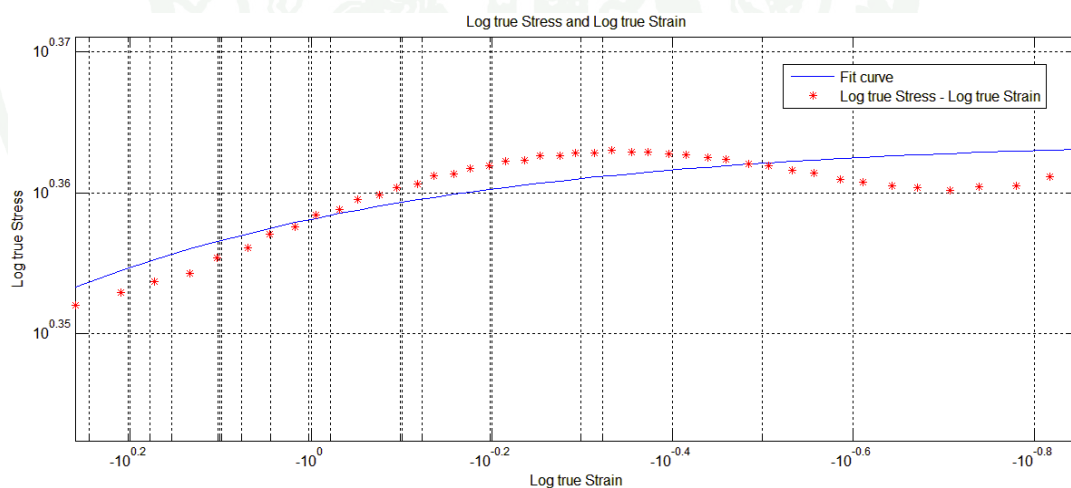
ภาพที่ 85 กราฟแสดง ensample SD ของ 10 ชิ้นงาน ของ True stress กับ True strain



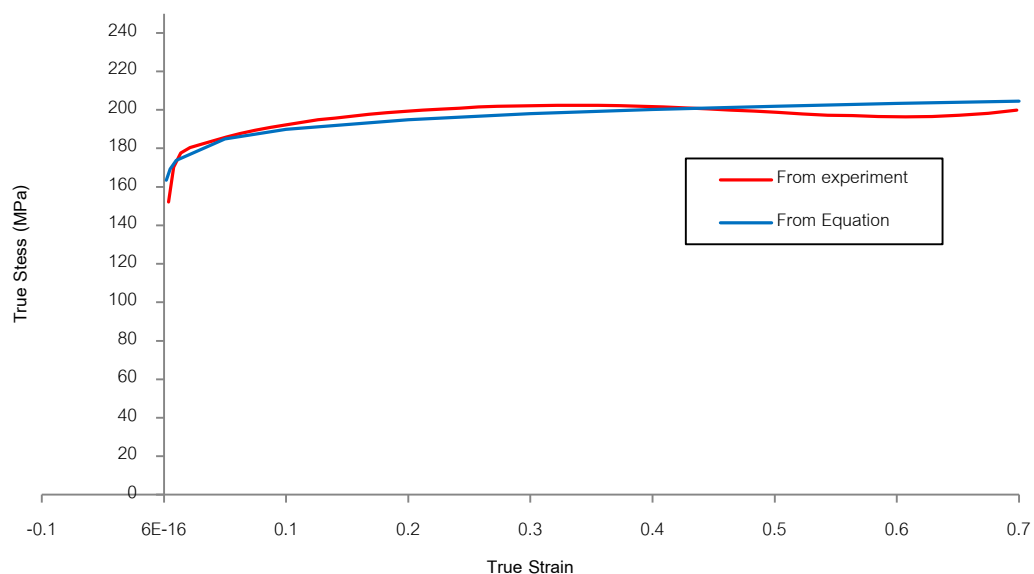
ภาพที่ 86 กราฟแสดง ensample average และขอบเขต SD ($\text{avg} \pm \text{SD}$) ของ True stress กับ True strain



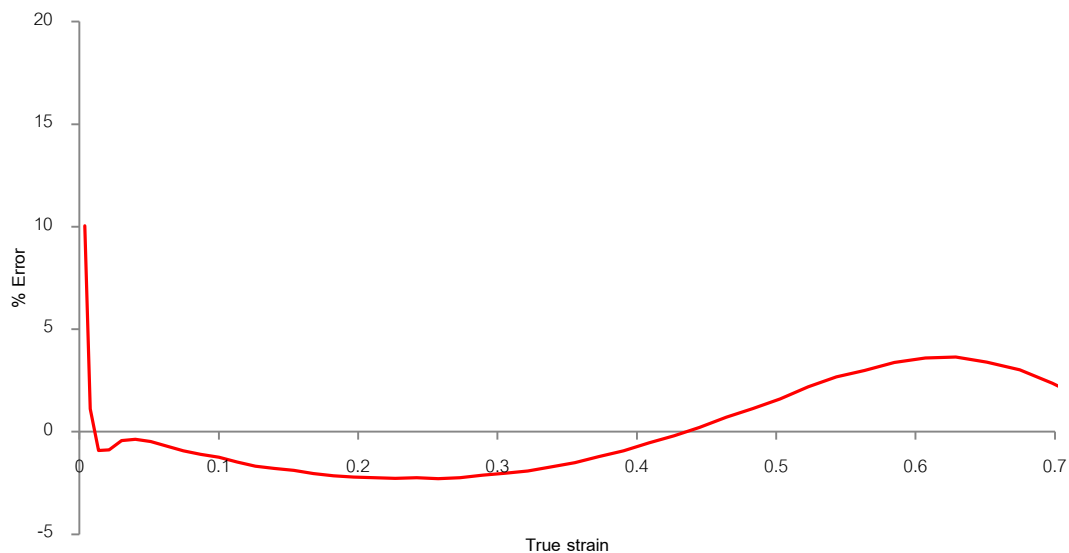
ภาพที่ 87 กราฟแสดง ensemble average และค่าสูงสุด (Max) และต่ำสุด (Min) ของ True stress กับ True strain



ภาพที่ 88 กราฟแสดง ensemble average ของ ความเค้นจริงและความเครียดจริงบนกราฟ Log – Log เปรียบเทียบกับสมการที่ (88)



ภาพที่ 89 แสดงการเปรียบเทียบค่าความเค้นจริงในช่วง Plastic ระหว่าง ensemble average ของข้อมูลดิบกับสมการที่ (88)



ภาพที่ 90 แสดงเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของสมการที่ (88) เมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลดิบ (ของภาพที่ 84)

4. ผลการสร้างแบบจำลอง CAD ของแม่พิมพ์

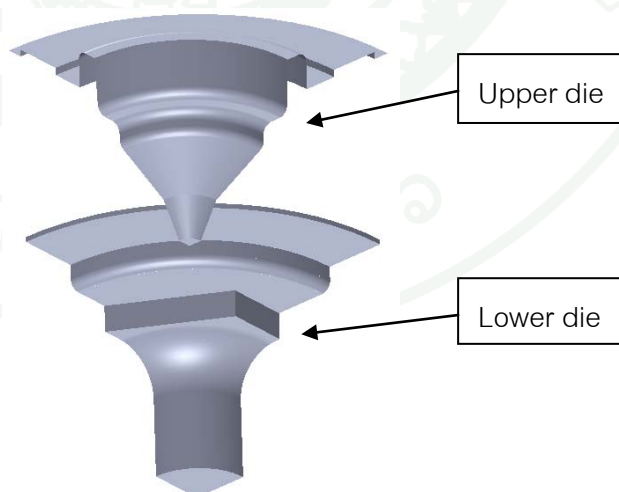
แบบจำลองของแม่พิมพ์ ใช้ซอฟต์แวร์ CAD (Pro/ENGINEER Wildfire 3) ในการขึ้นรูปเป็นแบบจำลองแบบพื้นผิว หรือ Surface โดยผลการสร้างแบบจำลองของแม่พิมพ์ต่างๆ มีรายละเอียดดังนี้

4.1 แบบ CAD ของแม่พิมพ์ขึ้นงานฝาประตุน้ำ (VC50)

เนื่องจากรูปทรงของชิ้นงานฝาประตุน้ำ (VC50) มีความสมมาตรจึงสามารถสร้างแบบ CAD ของแม่พิมพ์เป็นชนิดพื้นผิว (Surface model) แบบ 1/4 ส่วนของแม่พิมพ์จริง โดยภาพ 3 มิติของแม่พิมพ์ (Upper die และ Lower die) ได้แสดงในภาพที่ 91

4.2 แบบ CAD ของแม่พิมพ์ขึ้นงานล้นประตุน้ำ (GT50)

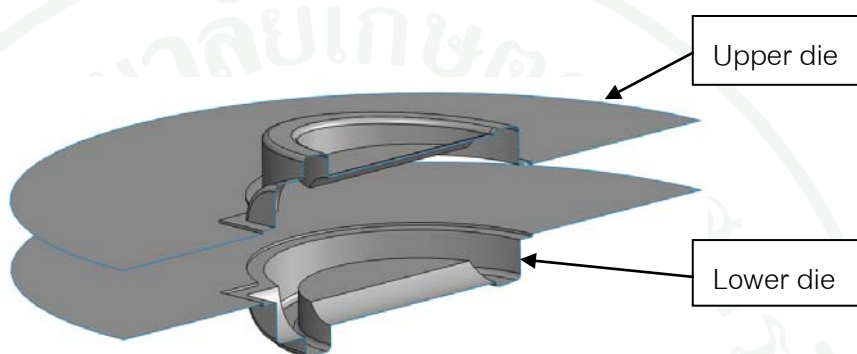
เนื่องจากรูปทรงของชิ้นงานล้นประตุน้ำ (GT50) มีความสมมาตรซ้ายขวาจึงสามารถสร้างแบบ CAD พื้นผิวแบบ 1/2 ส่วนของแม่พิมพ์จริง โดยภาพ 3 มิติของแม่พิมพ์ (Upper die และ Lower die) ได้แสดงไว้ในภาพที่ 92



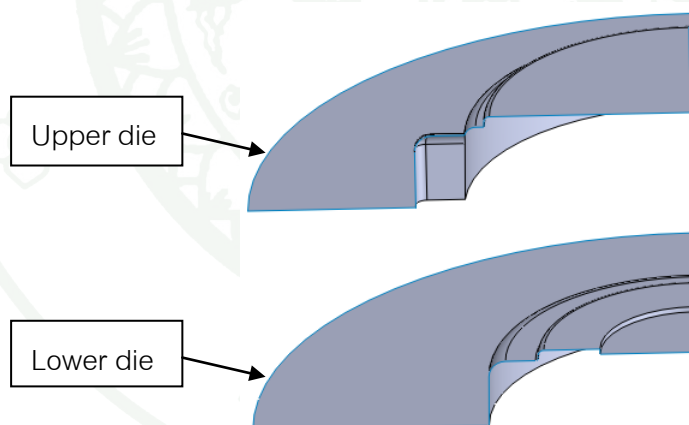
ภาพที่ 91 Surface model ของแม่พิมพ์ฝาประตุน้ำ (VC50)

4.3 แบบ CAD ของแม่พิมพ์ชิ้นงานฝาชั้นมาตรวัดน้ำ (HC15)

เนื่องจากรูปร่างของชิ้นงานฝาชั้นมาตรวัดน้ำ (HC15) มีความสมมาตรจึงสามารถแบบ CAD ชนิดพื้นผิวของแม่พิมพ์แบบ 1/4 ส่วนของแม่พิมพ์จริง โดยภาพ 3 มิติของแม่พิมพ์ (Upper die และ Lower die) ได้แสดงไว้ในภาพที่ 93



ภาพที่ 92 Surface model ของแม่พิมพ์ชิ้นประตุน้ำ (GT50)



ภาพที่ 93 Surface model ของแม่พิมพ์ฝาชั้นมาตรวัดน้ำ (HC15)

5. ผลการสร้างแบบจำลอง FEM

ผลการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ FEM สำหรับจำลองการทอบขึ้นรูปทองเหลือง โดยใช้ซอฟต์แวร์ MSC. Marc ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ มีดังต่อไปนี้

5.1 ผลการสร้างแบบจำลองการกดขึ้นงานรูปทรงกระบอกตันแบบ 2 มิติ

การสร้างแบบจำลองการกดขึ้นงานทองเหลืองมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้เปรียบเทียบผลการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลการทดสอบกดขึ้นงานทองเหลืองที่อุณหภูมิ 650°C ที่มีรูปทรงที่ไม่ซับซ้อน ผลที่ได้จะนำมาใช้ศึกษาความแม่นยำในการจำลองแบบ FEM

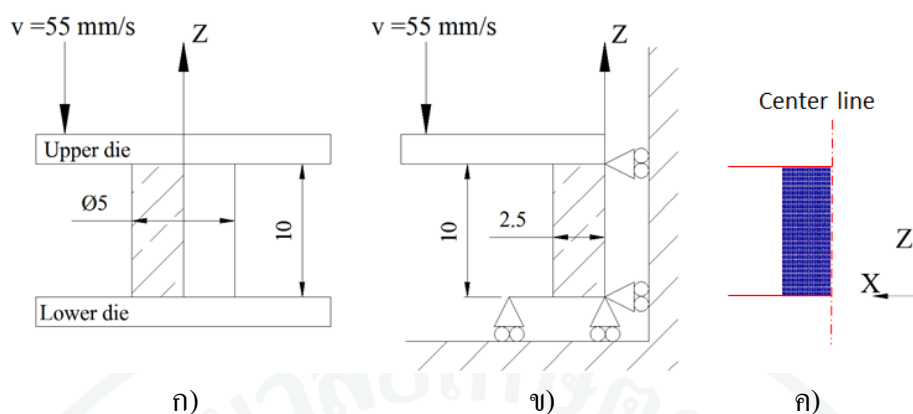
1. ผลการสร้าง Mesh

แบบจำลอง FEM รูปทรงกระบอกของชิ้นงานทองเหลืองได้สร้างตามแกนกลาง (Center line) รูปทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 mm. และความยาว 10 mm. โดยกำหนดเอลิเมนต์เป็นแบบ 2 มิติบนระนาบ XZ (ภาพที่ 94) ชนิดของเอลิเมนต์เป็นสี่เหลี่ยมมี 8 nodes (Eight-Node Quadrilateral Element) จำนวนเอลิเมนต์ทั้งหมดเท่ากับ 128 เอลิเมนต์ และมีจำนวน 433 nodes

2. ผลการกำหนด Constrain

การกำหนด Constrain หรือการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions) เป็นการกำหนดเงื่อนไขการเคลื่อนที่ของ Upper die และ Lower die เป็นวัสดุ Rigid body ที่ขอบหรือเส้น Curve ที่สัมผัสชิ้นงาน และให้ Upper die กดให้ความสูงของชิ้นงานลดลง 50% (ตามสภาวะการทดสอบจริง) และ กำหนด Boundary condition สมมาตรรอบแกน Z

ในการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นี้ได้สรุปเป็นตารางของการกำหนดตัวแปรต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 14



ภาพที่ 94 ผลการสร้างแบบจำลอง FEM การกดขึ้นงานรูปทรงกระบอกตันแบบ 2 มิติ
 ก) ขึ้นงานจริง ข) ขึ้นงานแบบสมมาตรรอบแกน Z และ ค) การ Mesh ของ
 แบบจำลองแบบสมมาตรรอบแกน Z

ตารางที่ 14 การกำหนดตัวแปรสำหรับการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์การกดขึ้นงานทองเหลือง
 CuZn40Pb2 รูปทรงกระบอกตันแบบ 2 มิติ ที่อุณหภูมิ 650°C

Analysis Options	FEA Program	MSC Marc
	Die Material Type	Rigid
	Punch Velocity (mm/s)	55
	Number of Steps	10
	Time per Step (sec)	0.0103
Contact	Iteration Method	Full Newton-Raphson
	Friction Models	Shear (Arctangent)
	Relative Velocity Threshold	1
	Coefficient of Friction (m)	0.5 or 0.7(dry)
Material	Material Plasticity Procedure	Nonlinear Elastic-Plastic
	Modulus of Elasticity (E, MPa)	85,437
	Yield Stress (MPa)	163.35
	Poisson's Ratio	0.33
	Plastic $\bar{\sigma} - \bar{\epsilon}$ Model (MPa)	$207.35(\epsilon_p)^{0.0384}$

5.2 ผลการสร้างแบบจำลองการกดชิ้นงานรูปทรงกระบอกตันแบบ 3 มิติ

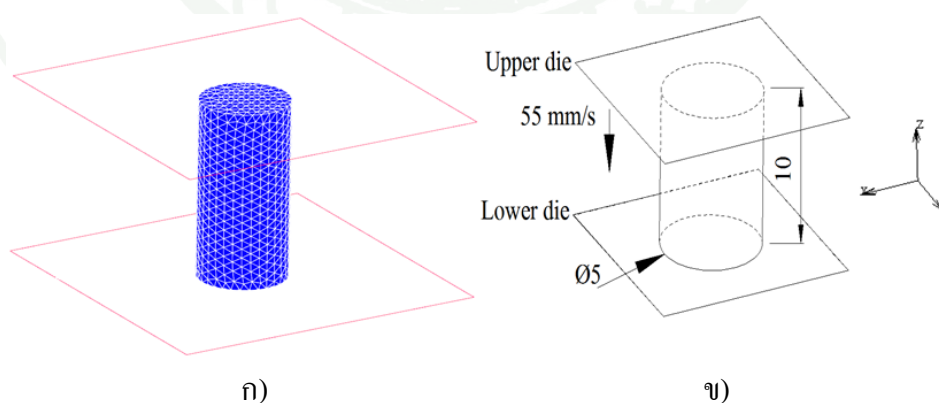
การสร้างแบบจำลอง FEM แบบ 3 มิติ มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบกับ
จำลองแบบ 2 มิติ และจากผลการทดสอบจริง

1. ผลการสร้าง Mesh

แบบจำลอง FEM 3 มิติ ของชิ้นงานทองเหลืองรูปทรงกระบอก มีขนาดเส้น
ผ่านศูนย์กลาง 5 mm. และความยาว 10 mm. ชนิดของเอลิเมนต์เป็นแบบ Four-Node Tetrahedron
จำนวนเอลิเมนต์ทั้งหมดเท่ากับ 13,071 เอลิเมนต์ และมีจำนวน 2,601 nodes (ภาพที่ 95)

2. ผลการกำหนด Constrain

กำหนดสมบัติของ Upper die และ Lower die เป็นพื้นผิว (Surface) สำหรับ
ใช้กดให้ความสูงของชิ้นงานลดลง 50% เนื่องจากทั้ง Upper die และ Lower die มีความแข็งแรง
มากกว่าทองเหลือง จึงสามารถกำหนดให้เป็น Rigid Body และในขณะกดกำหนดให้ Upper die
เคลื่อนที่ลงด้วยความเร็ว 55 mm/sec เงื่อนไขการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ใช้ตัวแปรเดียวกัน
กับการกดชิ้นงานรูปทรงกระบอกตันแบบ 2 มิติ (ตารางที่ 14)



ภาพที่ 95 ผลการสร้างแบบจำลอง FEM การกดชิ้นงานรูปทรงกระบอกตันแบบ 3 มิติ ก) แสดง
การ Mesh และ ข) แสดงการกำหนด Upper die และ Lower die ในการกดชิ้นงาน
ทองเหลือง

5.3 ผลการสร้างแบบจำลอง FEM สำหรับการทดสอบ Ring Compression Test

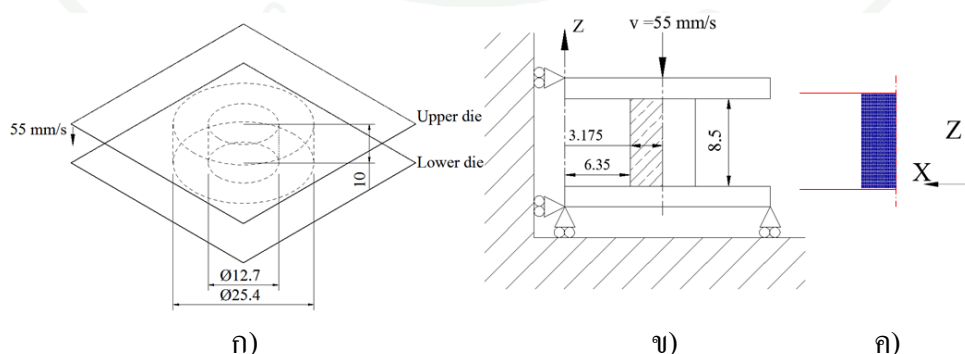
การสร้างแบบจำลอง FEM สำหรับการทดสอบ Ring test มีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ศึกษา ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและเปรียบเทียบกับผลการทดลอง

1. ผลการสร้าง Mesh

เนื่องจากรูปทรงของชิ้นงานทดสอบ Ring compression test เป็นรูปทรงกระบอก กลวง จึงสามารถสร้างแบบจำลอง 2 มิติ บนระนาบ XZ โดยแบบจำลองเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า (ภาพที่ 96) กว้าง 3.175 mm. และสูง 8.5 mm. และห่างจากแกนกลาง 6.35 mm. กำหนดเอลิเมนต์ เป็นแบบ Eight-node Distorted Quadrilateral Element จำนวนเอลิเมนต์ทั้งหมดเท่ากับ 560 เอลิเมนต์ และมีจำนวน 1,777 nodes

2. ผลการกำหนด Constrain

กำหนดสมบัติของ Upper die และ Lower die ให้เป็นพื้นผิว สำหรับใช้กดให้ความสูงของชิ้นงานลดลง 50% เนื่องจาก Upper die และ Lower die มีความแข็งแรงมากกว่าทองเหลือง จึงสามารถกำหนดให้เป็น Rigid Body และในขณะกดกำหนดให้ Upper die เคลื่อนที่ลงด้วยความเร็ว 55 mm/sec เงื่อนไขการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ใช้ตัวแปรเดียวกันกับแบบจำลองการกดชิ้นงานทองเหลืองรูปทรงกระบอกตันแบบ 2 มิติ (ตารางที่ 14)



ภาพที่ 96 ผลการสร้างแบบจำลองการทดสอบ Ring compression test ก) แสดงขนาดชิ้นงานจริง ข) ชิ้นงานแบบ 2 มิติ และ ค) การ Mesh ของชิ้นงาน

5.4 ผลการสร้างแบบจำลอง FEM การทอบขึ้นรูปชิ้นงานฝาประตุน้ำ (VC50)

1. ผลการสร้าง Mesh

แบบจำลอง FEM ของชิ้นงานคืบหรือ Billet รูปทรงกระบอกมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 42 mm. และสูง 28 mm. ได้กำหนดใช้ 1/4 ส่วน เช่นเดียวกับแบบ CAD แบบพื้นผิวของแม่พิมพ์ (จากหัวข้อ 4.1 แบบ CAD ของแม่พิมพ์ขึ้นงานฝาประตุน้ำ (VC50)) การ mesh ของชิ้นงาน Billet ได้กำหนดเอลิเมนต์เป็นแบบ Four-Node Tetrahedron Element เพื่อให้สามารถปรับปรุงสภาพของเอลิเมนต์ด้วยวิธี Adaptive mesh หรือการ remesh เอลิเมนต์จากการเสียรูปของเอลิเมนต์ในขณะวิเคราะห์ จำนวนเอลิเมนต์ทั้งหมดเท่ากับ 43,687 เอลิเมนต์ และมี 8,234 nodes (ภาพที่ 97)

2. ผลการกำหนด Constrain

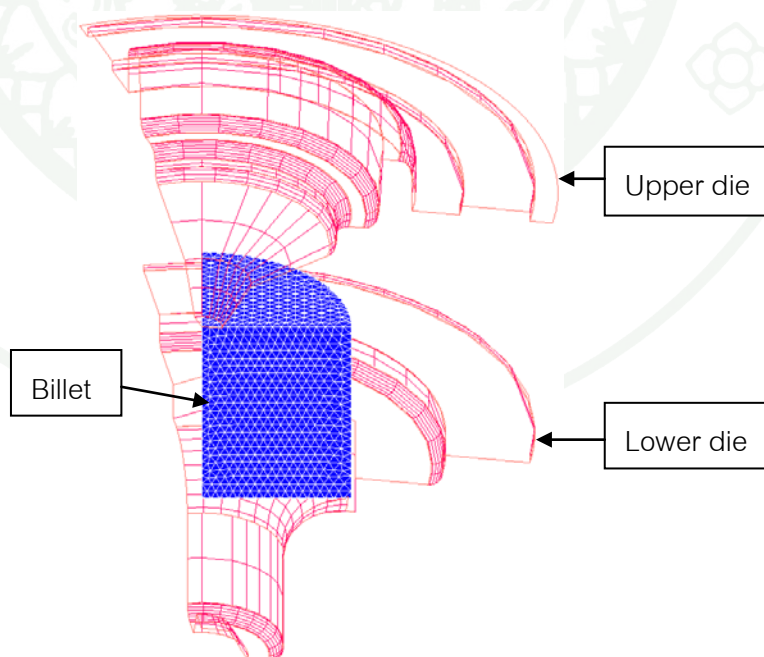
การจำลองการทอบขึ้นรูปได้กำหนดให้ Punch หรือ Upper die เคลื่อนที่ลงในแนวแกน z ด้วยความเร็ว 55 mm/s และไปถึงระยะต่ำสุดเท่ากับ 38.4 mm. วัสดุของแบบพื้นผิวของ Upper die และ Lower die จากแบบ CAD กำหนดเป็นแบบ Rigid ตัวแปรต่างๆ ได้สรุปในตารางที่ 15

ตารางที่ 15 การกำหนดตัวแปรในการจำลองการทอบขึ้นรูปชิ้นงาน Billet รูปทรงกระบอกตัน แบบ 3 มิติ ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

	FEA Program	MSC Marc
Analysis Options	Die Material Type	Rigid
	Punch Velocity (mm/s)	55
	Number of Steps	Adaptive (Multi-Criteria)
	Iteration Method	Full Newton-Raphson

ตารางที่ 15 (ต่อ)

	Remeshing	Global remeshing, Patran Tetra
	Min. Element Edge Length After Remeshing	0.1
Analysis Options	Geometric Properties	Reduced Integration
Contact	Friction Models	Shear (Arctangent)
	Relative Velocity Threshold	1
	Coeffecient of Friction (m)	0.5 or 0.7(dry)
Material	Material Plasticity Procedure	Nonlinear Elastic-Plastic
	Modulus of Elasticity (E, MPa)	85,437
	Yield Stress (MPa)	163.35
	Poisson's Ratio	0.33
	Plastic $\bar{\sigma} - \bar{\epsilon}$ Model (MPa)	$207.35(\epsilon_p)^{0.0384}$



ภาพที่ 97 แสดงผลการสร้าง FEM ของแม่พิมพ์และชิ้นงาน Billet ของฝาประตุน้ำ (VC50)

5.5 ผลการสร้างแบบจำลอง FEM การทอบขึ้นรูปชิ้นงานล้นประตุน้ำ (GT 50)

1. ผลการสร้าง Mesh

แบบจำลอง FEM ของ Billet รูปทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 44.7 mm. ความสูง 20.5 mm. ได้กำหนดใช้ 1/2 ส่วน เช่นเดียวกับแบบ CAD ของแม่พิมพ์ขึ้นงาน (จากหัวข้อ 4.2 แบบ CAD ของแม่พิมพ์ขึ้นงานล้นประตุน้ำ (GT50)) การ Mesh ของชิ้นงาน Billet ได้กำหนดเอลิเมนต์เป็นแบบ Four-Node Tetrahedron Element เพื่อให้สามารถปรับปรุงสภาพของเอลิเมนต์ด้วยวิธี Adaptive mesh จำนวนเอลิเมนต์ทั้งหมดเท่ากับ 44,717 เอลิเมนต์ และมี 8,645 nodes (ภาพที่ 98)

2. ผลการกำหนด Constrain

การจำลองการทอบขึ้นรูปได้กำหนดให้ Upper die เคลื่อนที่ลงในแนวแกน z ด้วยความเร็ว 55 mm/s และไปถึงระยะต่ำสุดเท่ากับ 12.5 mm. วัสดุของแบบพื้นผิวของ Upper die และ Lower die จากแบบ CAD กำหนดเป็นแบบ Rigid ตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ ได้ใช้เงื่อนไขเดียวกับตารางที่ 15

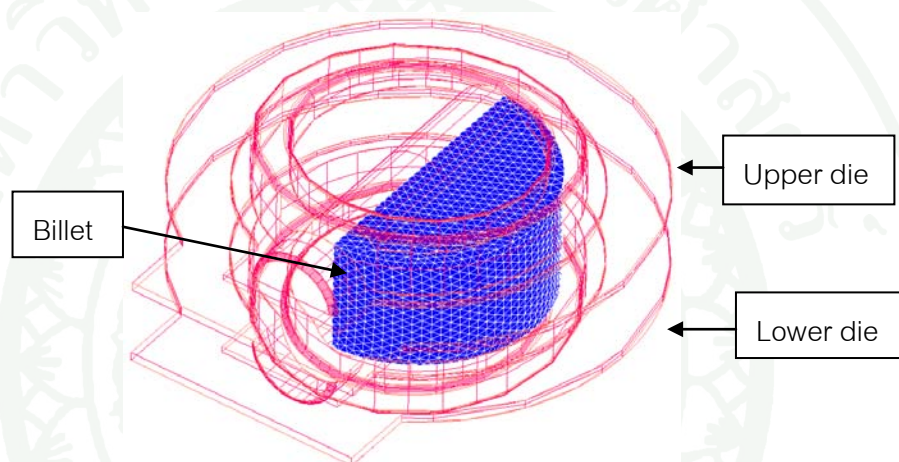
5.6 ผลการสร้างแบบจำลอง FEM การทอบขึ้นรูปชิ้นงานฝาขันมาตรวัดน้ำ (HC15)

1. ผลการสร้าง Mesh

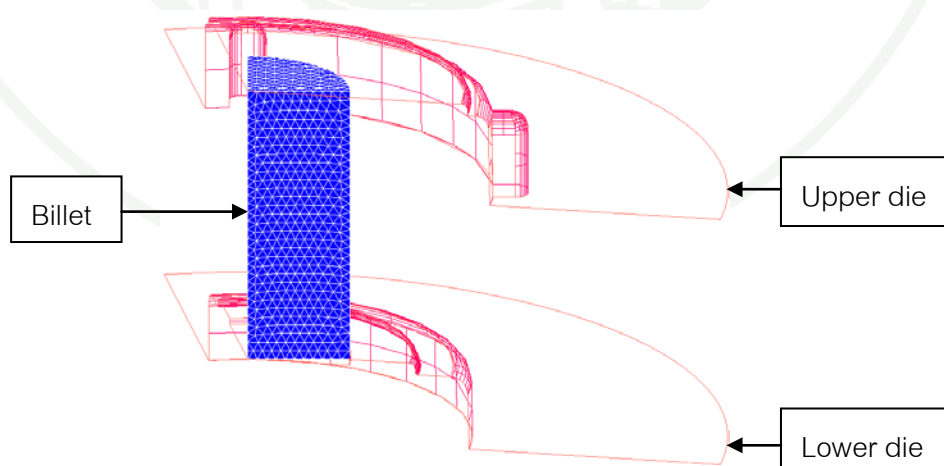
แบบจำลอง FEM ของ Billet รูปทรงกระบอกมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 47 mm. ความสูง 33.7 mm. ได้กำหนดใช้ 1/4 ส่วน เช่นเดียวกับแบบ CAD ของแม่พิมพ์ขึ้นงานฝาขันมาตรวัดน้ำ การ Mesh ของชิ้นงาน Billet ได้กำหนดให้เอลิเมนต์เป็นแบบ Four-Node Tetrahedron Element เพื่อให้สามารถปรับปรุงสภาพของเอลิเมนต์ด้วยวิธี Adaptive mesh จำนวนเอลิเมนต์ทั้งหมดเท่ากับ 23,468 เอลิเมนต์ และมี 4,661 nodes (ภาพที่ 99)

2. ผลการกำหนด Constrain

การจำลองการทอขึ้นรูปได้กำหนดให้ Upper die เคลื่อนที่ลงในแนวแกน z ด้วยความเร็ว 55 mm/s และไปถึงระยะต่ำสุดเป็นระยะทาง 41.5 mm. วัสดุของแบบพื้นผิวของ Upper die และ Lower die จากแบบ CAD กำหนดเป็นแบบ Rigid ในการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ตัวแปรต่างๆ ได้สรุปในตารางที่ 15



ภาพที่ 98 แสดงผลการสร้าง FEM ของแม่พิมพ์และชิ้นงาน Billet ของลึ้นประตุน้ำ (GT 50)



ภาพที่ 99 แสดงผลการสร้าง FEM ของแม่พิมพ์และชิ้นงาน Billet ของฝ้านมาตรวัดน้ำ (HC15)

6. ผลการวิเคราะห์ FEA ของการทุบขึ้นรูป

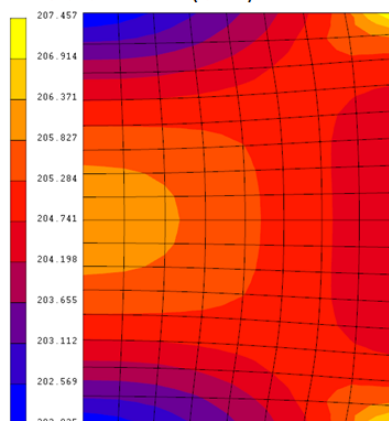
6.1 ผลการจำลองการกดขึ้นงานทองเหลืองรูปทรงกระบอกตันแบบ 2 มิติ

แบบจำลอง FEM แบบ 2 มิติ ของชิ้นงานทองเหลืองรูปทรงกระบอกตัน (จากผลการวิจัยหัวข้อ 5.1 ผลการสร้างแบบจำลองการกดขึ้นงานรูปทรงกระบอกตันแบบ 2 มิติ) ได้นำมาใช้จำลองการกดโดยใช้ FEA วิเคราะห์ ตามเงื่อนไขในตารางที่ 14 ภาพแสดงระดับชั้นสีของความเค้น Von Mises ความเครียดแบบ Total equivalent plastic strain ระยะการเคลื่อนที่แบบ magnitude และขนาดในแนวแกนหรือแนวรัศมี ได้แสดงในภาพที่ 100

เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ความเค้นจากภาพที่ 100 ก) พบว่า ความเค้นสูงสุด (สีเหลือง) เท่ากับ 207.46 MPa เกิดขึ้นที่มุมหรือขอบเส้นรอบวงของผิวบนและผิวล่างของชิ้นงานทรงกระบอก ซึ่งเป็นตำแหน่งเดียวกับที่เกิดความเครียดสูงสุด (สีเหลือง ของภาพ 100 ข)) magnitude ของระยะการเคลื่อนที่ของตำแหน่งภายในชิ้นงาน (ภาพ 100 ค)) มีค่าสูงสุดเท่ากับ 5.316 mm. ที่ขอบบนของชิ้นงาน ซึ่งไม่เท่ากับระยะกดที่ 5 mm. เนื่องด้วยมีการเปลี่ยนแปลงขนาดตามแนวเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงาน (ภาพที่ 100 ง)) รัศมีที่เปลี่ยนไปสูงสุดเท่ากับ 1.133 mm. เกิดที่กึ่งกลางของความสูง เวลาที่คอมพิวเตอร์ใช้วิเคราะห์ เท่ากับ 3 วินาที

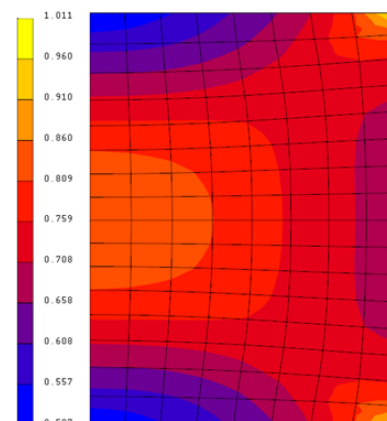
ภาพที่ 101 แสดงกราฟระหว่างแรงกับระยะทางที่กด โดยเป็นการเปรียบเทียบระหว่างผล FEA กับผลการทดสอบ เมื่อให้ความเร็วในการกดเท่ากับ 55 mm/s กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (% Error) ระหว่างผลจาก FEA ที่ต่างกับผลการทดลองได้แสดงในภาพที่ 102 โดยมีค่ามากที่สุด -14.96% และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ -5.04%

Von Mises Stress (MPa)



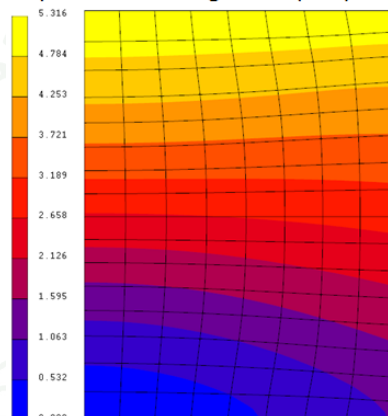
ก)

Strain



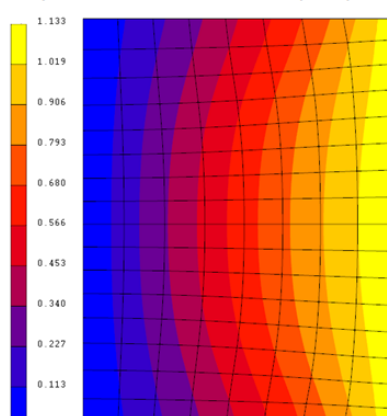
ข)

Displacement : Magnitude (mm)



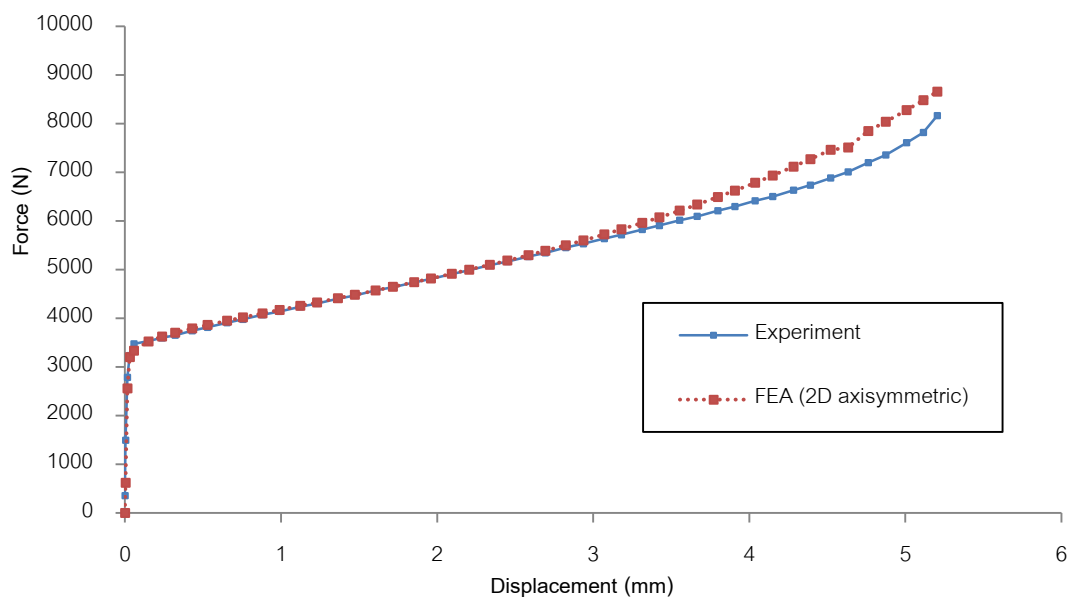
ค)

Displacement : X Direction (mm)

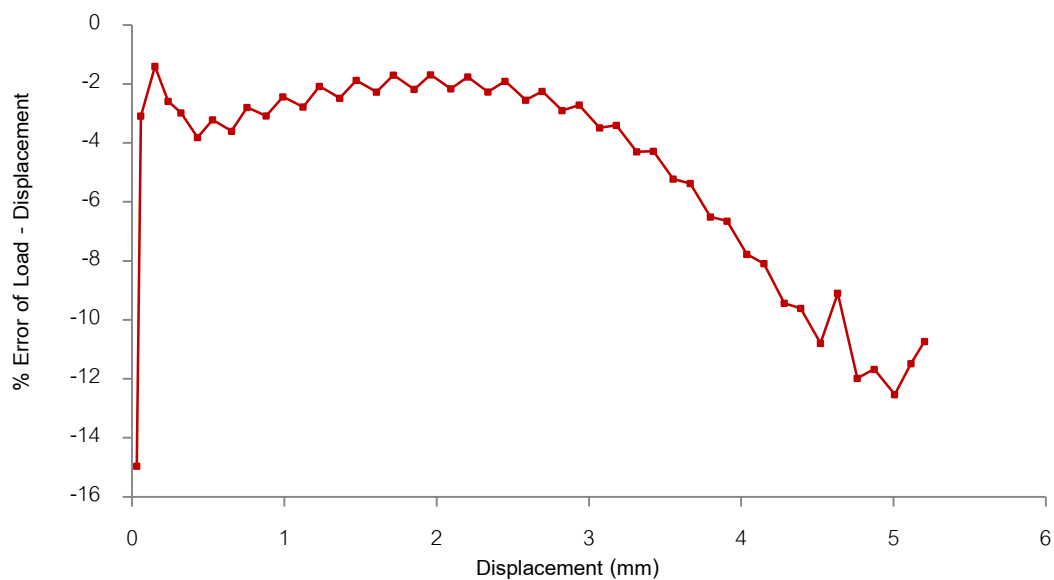


ง)

ภาพที่ 100 ผลการจำลองการกดที่ระยะ 5 mm ของแบบ FEM แบบ 2 มิติ โดย ก) ความเค้น Von Mises ข) Magnitude ของการเคลื่อนที่ ค) ความเครียดแบบ Total Equivalent Plastic Strain และ ง) ขนาดของชิ้นงานในแนวนอน (แกน X)



ภาพที่ 101 กราฟของแรงและระยะกด เปรียบเทียบผล FEA และผลการทดสอบจริง



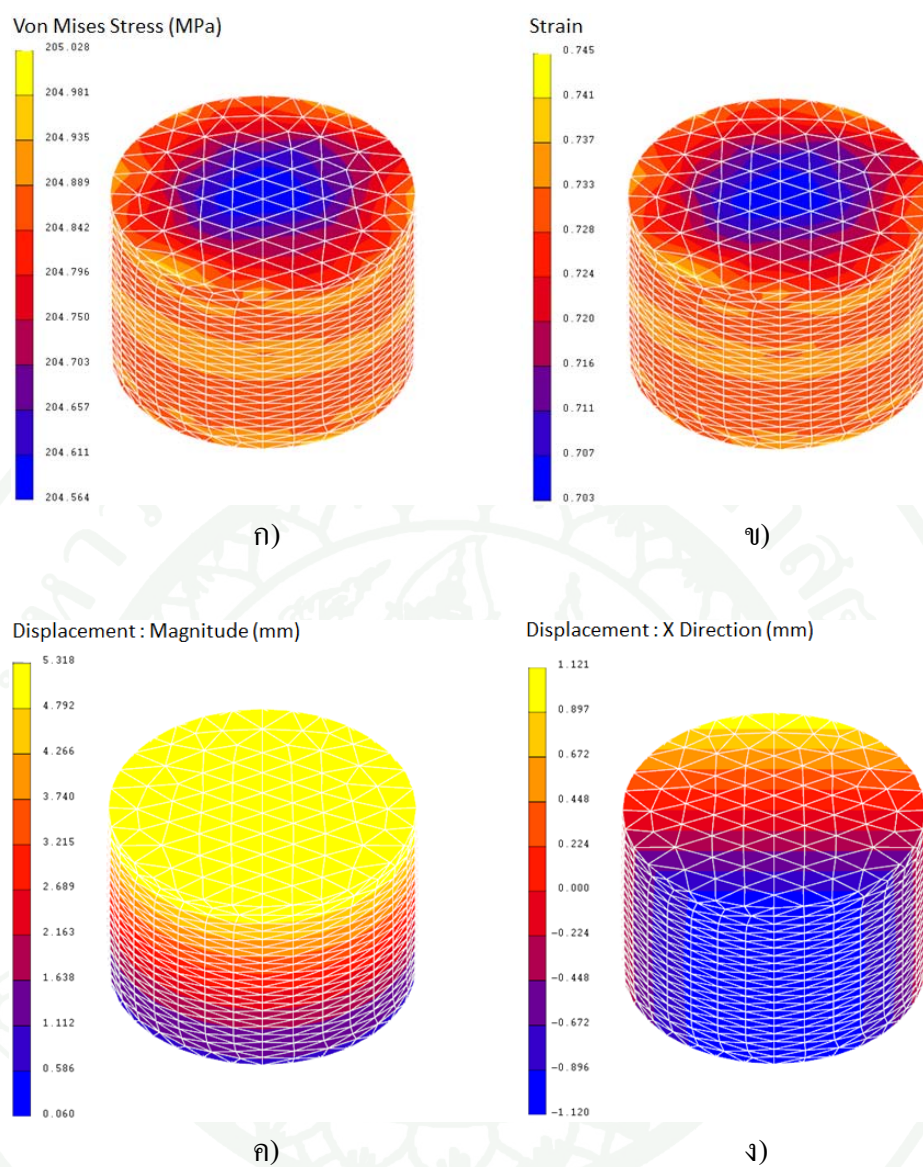
ภาพที่ 102 เปอร์เซนต์ความคลาดเคลื่อน (% Error) ของผล FEA เมื่อเทียบกับผลการทดลอง
ของการทดสอบการกด

6.2 ผลการจำลองการกดชิ้นงานทองเหลืองรูปทรงกระบอกตันแบบ 3 มิติ

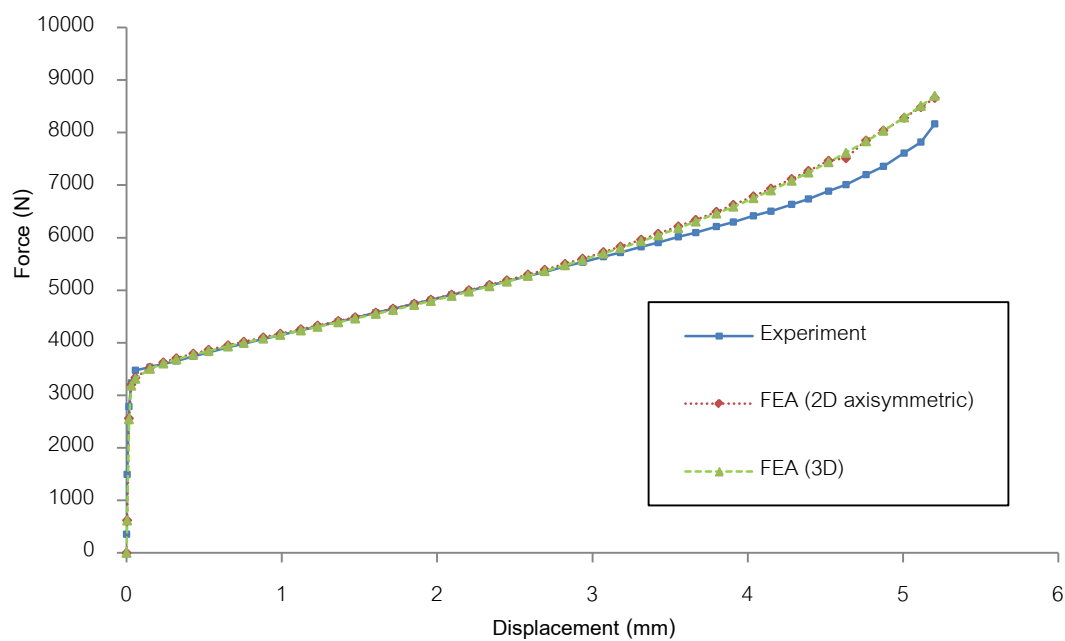
แบบจำลอง FEM แบบ 3 มิติ ของชิ้นงานทองเหลืองรูปทรงกระบอกตัน (จากผลการวิจัยหัวข้อ 5.2 ผลการสร้างแบบจำลองการกดชิ้นงานรูปทรงกระบอกตันแบบ 3 มิติ) ได้นำมาใช้จำลองการกดโดยใช้ FEA วิเคราะห์ ตามเงื่อนไขในตารางที่ 14 ภาพแสดงระดับชั้นสีของความเค้น Von Mises ความเครียดแบบ Total equivalent plastic strain ระยะการเคลื่อนที่แบบ magnitude และขนาดในแนวแกนหรือแนวรัศมี ได้แสดงในภาพที่ 103

เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ความเค้นจากภาพที่ 103 ก) พบว่า ความเค้นสูงสุด (สีเหลือง) เท่ากับ 205.028 MPa เกิดขึ้นที่มุมหรือขอบเส้นรอบวงของผิวบนและผิวด้านของชิ้นงานทรงกระบอก ซึ่งเป็นตำแหน่งเดียวกับที่เกิดความเครียดสูงสุด (สีเหลือง ของภาพ 103 ข)) magnitude ของระยะการเคลื่อนที่ของตำแหน่งภายในชิ้นงาน (ภาพ 103 ค)) มีค่าสูงสุดเท่ากับ 5.318 mm. ที่ขอบบนของชิ้นงาน ซึ่งไม่เท่ากับระยะกดที่ 5 mm. เนื่องด้วยมีการเปลี่ยนแปลงขนาดตามแนวเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงาน (ภาพที่ 103 ง)) รัศมีที่เปลี่ยนไปสูงสุดเท่ากับ 1.121 mm. เกิดที่กึ่งกลางของความสูง เวลาที่คอมพิวเตอร์ใช้วิเคราะห์ เท่ากับ 18 วินาที

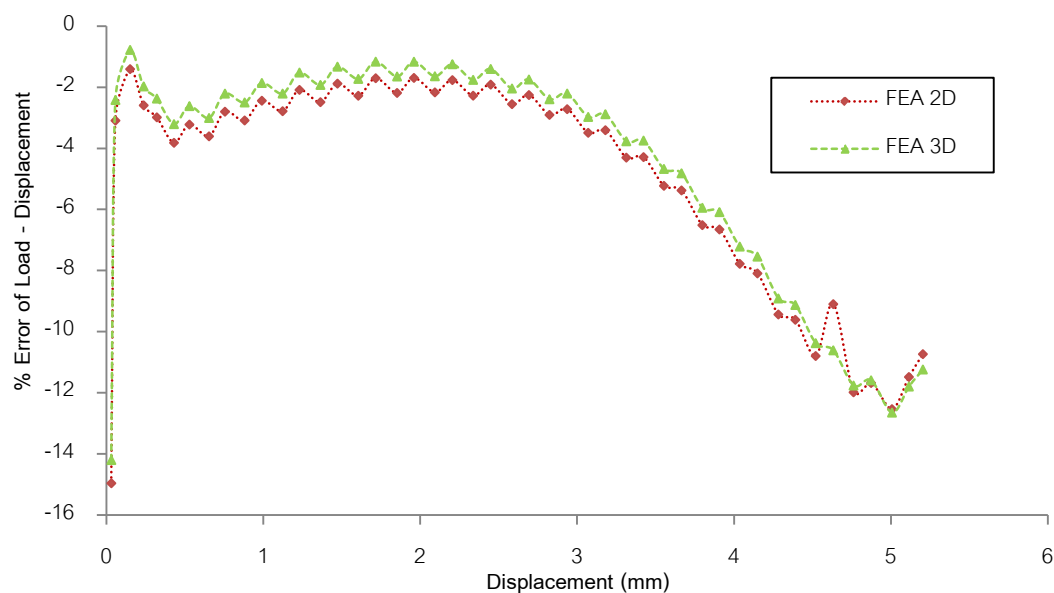
ภาพที่ 104 แสดงกราฟระหว่างแรงกับระยะทางที่เกิด โดยเป็นการเปรียบเทียบระหว่างผล FEA กับผลการทดสอบ เมื่อให้ความเร็วในการกดเท่ากับ 55 mm/s กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (% Error) ระหว่างผลจาก FEA ที่ต่างกับผลการทดลองได้แสดงในภาพที่ 105 โดยมีค่ามากที่สุด -14.2% และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ -4.6%



ภาพที่ 103 ผลการจำลองการกดที่ระยะ 5 mm ของแบบ FEM 3 มิติ โดย ก) ความเค้น Von Mises ข) Magnitude ของการเคลื่อนที่ ค) ความเครียดแบบ Total Equivalent Plastic Strain และ ง) ขนาดของชิ้นงานในแนวนอน (แกน X)



ภาพที่ 104 กราฟของแรงและระยะกด เปรียบเทียบผล FEA และผลการทดสอบจริง



ภาพที่ 105 เปอร์เซนต์ความคลาดเคลื่อน (% Error) ของผล FEA เมื่อเทียบกับผลการทดลองของการทดสอบการกด

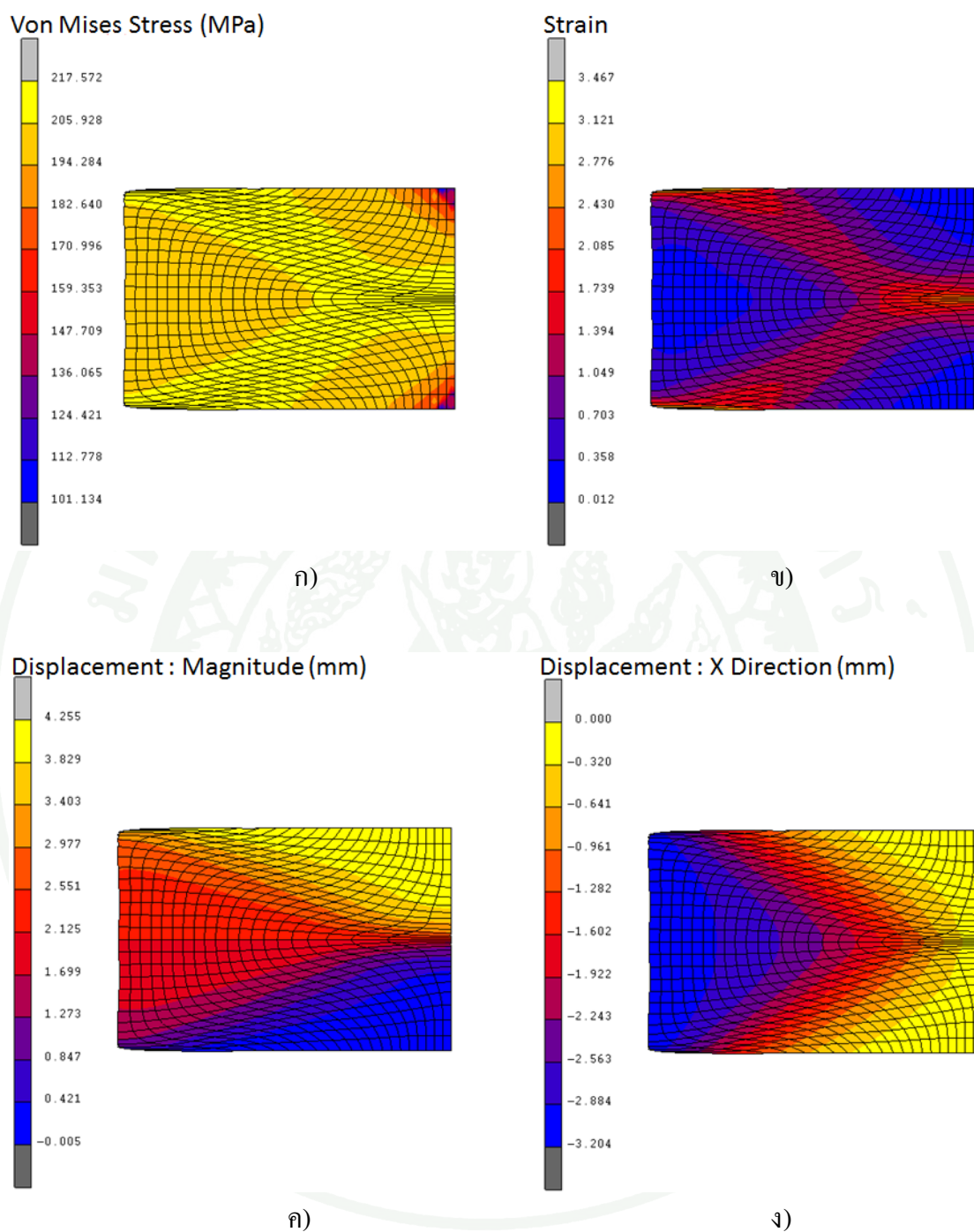
6.3 ผลการจำลองการทดสอบ Ring Compression Test

แบบจำลอง FEM แบบ 2 มิติ ของชิ้นงานสำหรับการทดสอบ Ring Compression Test (จากผลการวิจัยหัวข้อ 5.3 ผลการสร้างแบบจำลอง FEM สำหรับการทดสอบ Ring compression test) ได้นำมาใช้จำลองการกดโดยใช้ FEA วิเคราะห์ ตามเงื่อนไขในตารางที่ 14 ภาพแสดงระดับชั้นสีของ ความเค้น Von Mises ความเครียดแบบ Total equivalent plastic strain ระยะการเคลื่อนที่แบบ magnitude และขนาดในแนวแกนหรือแนวรัศมี ได้แสดงในภาพที่ 106

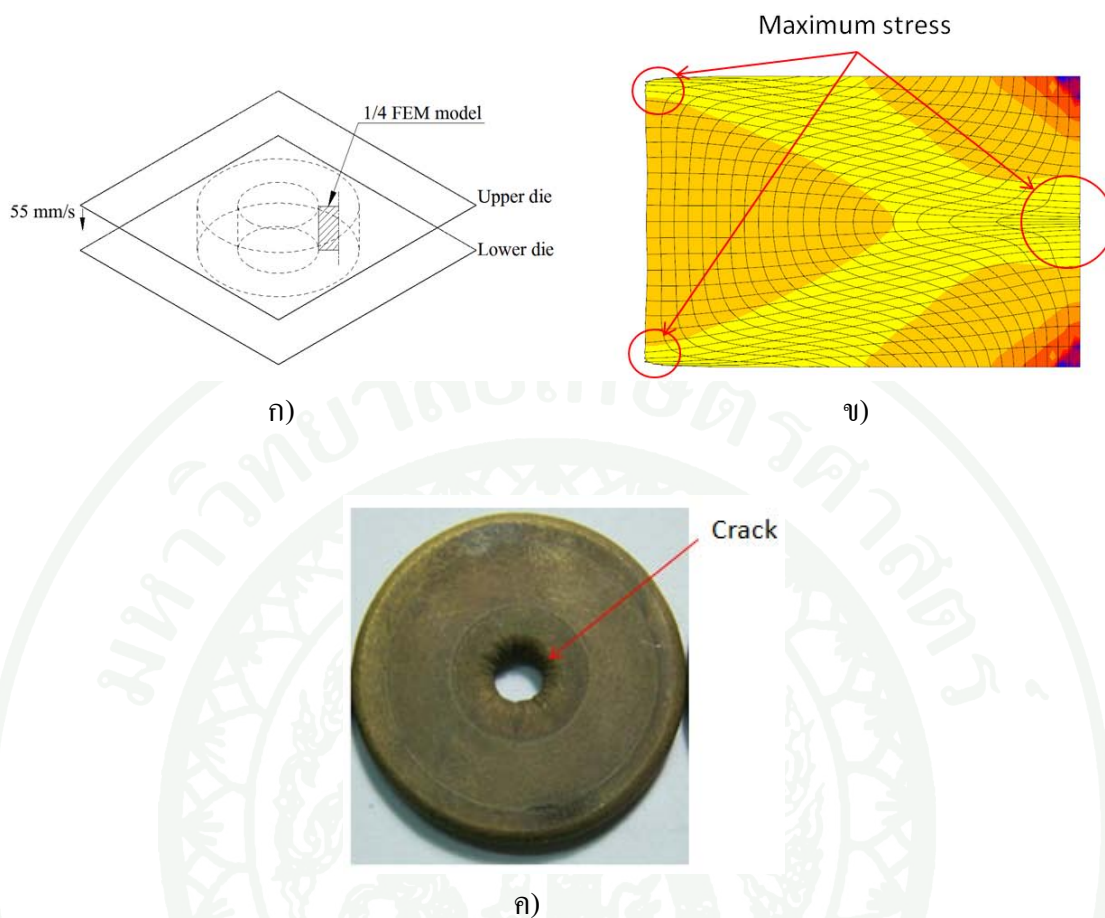
เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ความเค้นจากภาพที่ 106 ก) พบว่า ความเค้นสูงสุด (สีเหลือง) เท่ากับ 217.572 MPa เกิดขึ้นที่มุมหรือขอบเส้นรอบวงของผิวบนและผิวด้านของชิ้นงานทรงกระบอก ซึ่งเป็นตำแหน่งเดียวกับที่เกิดความเครียดสูงสุด (สีเหลือง ของภาพที่ 106 ข)) magnitude ของระยะการเคลื่อนที่ของตำแหน่งภายในชิ้นงาน (ภาพที่ 106 ค)) มีค่าสูงสุดเท่ากับ 4.255 mm. ที่ขอบบนของชิ้นงาน ซึ่งไม่เท่ากับระยะกดที่ 4.25 mm. เนื่องด้วยมีการเปลี่ยนแปลงขนาดตามแนวเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงาน (ภาพที่ 106 ง)) รัศมีที่เปลี่ยนไปสูงสุดเท่ากับ 3.204 mm. เกิดที่กึ่งกลางของความสูง เวลาที่คอมพิวเตอร์ใช้วิเคราะห์ เท่ากับ 192 วินาที

ทั้งนี้จากค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางวงในหลังจากการทดสอบ Ring compression test มีค่า 6.45 mm. (ตารางที่ 13) เมื่อเปรียบเทียบกับผล FEA (ภาพที่ 104 ง)) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 6.408 mm. โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (% Error) เท่ากับ 0.65%

ภาพที่ 107 แสดงตำแหน่งที่เกิดรอยย่นของชิ้นทดสอบ โดยพิจารณาจากผล FEA บริเวณที่เกิดความเค้นสูงสุด ซึ่งพบว่าเอลิเมนต์เกิดความเสียหายค่อนข้างมาก ซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมการเสียรูปของชิ้นทดสอบจริง ณ บริเวณที่เกิดรอยย่นขึ้น



ภาพที่ 106 ผลการจำลองการกดที่ระยะ 4.25 mm ของแบบ FEM 2 มิติ โดย ก) ความเค้น Von Mises ข) Magnitude ของการเคลื่อนที่ ค) ความเครียดแบบ Total Equivalent Plastic Strain และ ง) ขนาดของชิ้นงานในแนวนอน (แกน X)

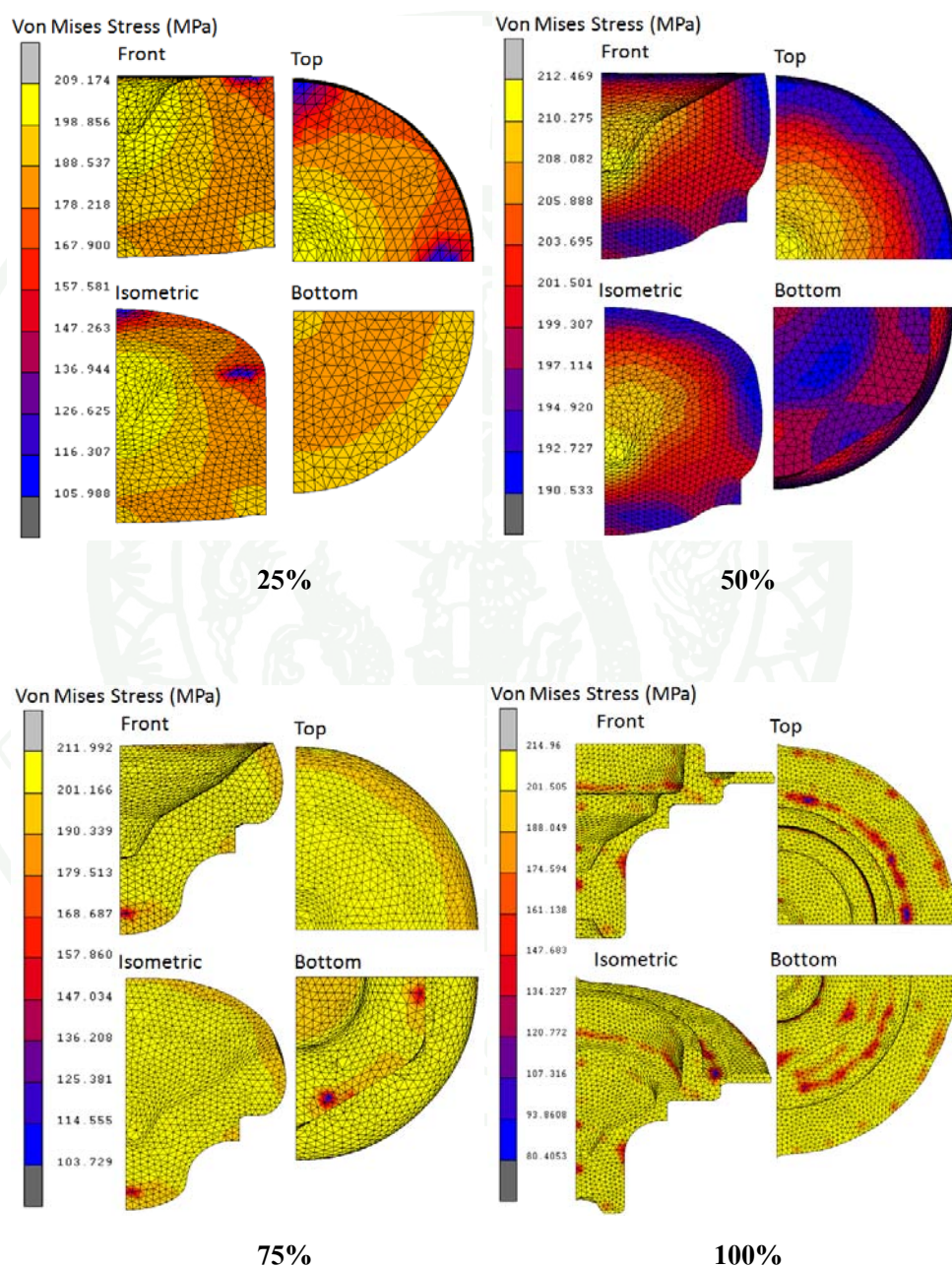


ภาพที่ 107 ก) แสดงตำแหน่งชิ้นงานสำหรับสร้างแบบจำลอง FEM ข) ผล FEA แสดงบริเวณที่เกิด Maximum stress และ ค) บริเวณที่เกิดรอยร้าวของชิ้นทดสอบจริง

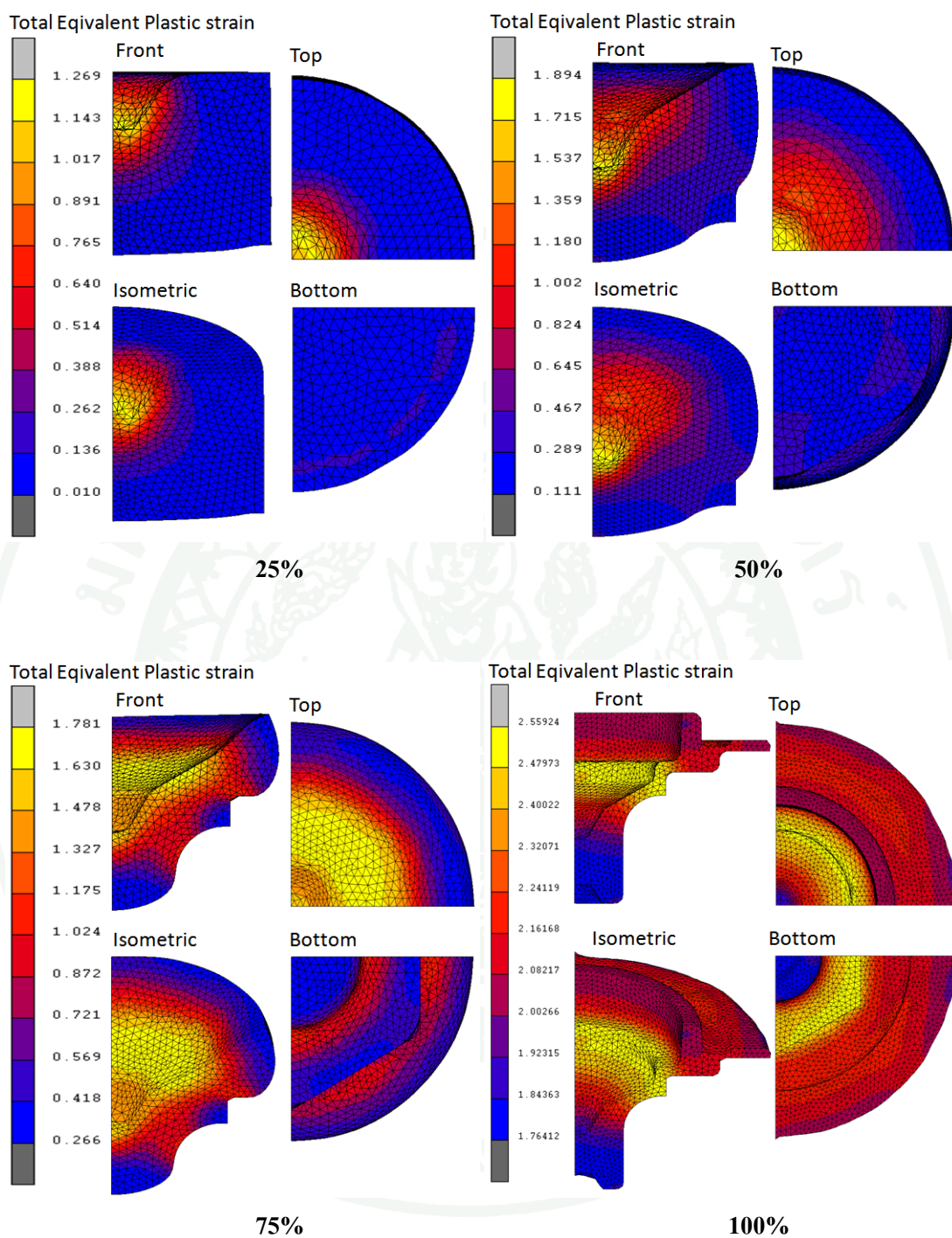
6.4 ผลการจำลองการทุบขึ้นรูปชิ้นงานฝาประตุน้ำ (VC50)

ผลการวิเคราะห์ FEA แสดงระดับขั้นสี่ของความเค้น (Von Mises Stress) เมื่อชิ้นงานถูกทุบลงไปที่ระยะสุดท้ายเท่ากับ 38.4 mm. (ได้แสดงในภาพที่ 108) โดยมีความเค้นในช่วง 201.51 ถึง 214.96 MPa เกิดในเนื้อของชิ้นงาน ในภาพที่ 109 และ 110 แสดง Total Equivalent Plastic Strain และความเค้นอัดในทิศทางการกระดะยะสุดท้าย ตามลำดับ เวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์เท่ากับ 19,764 วินาที

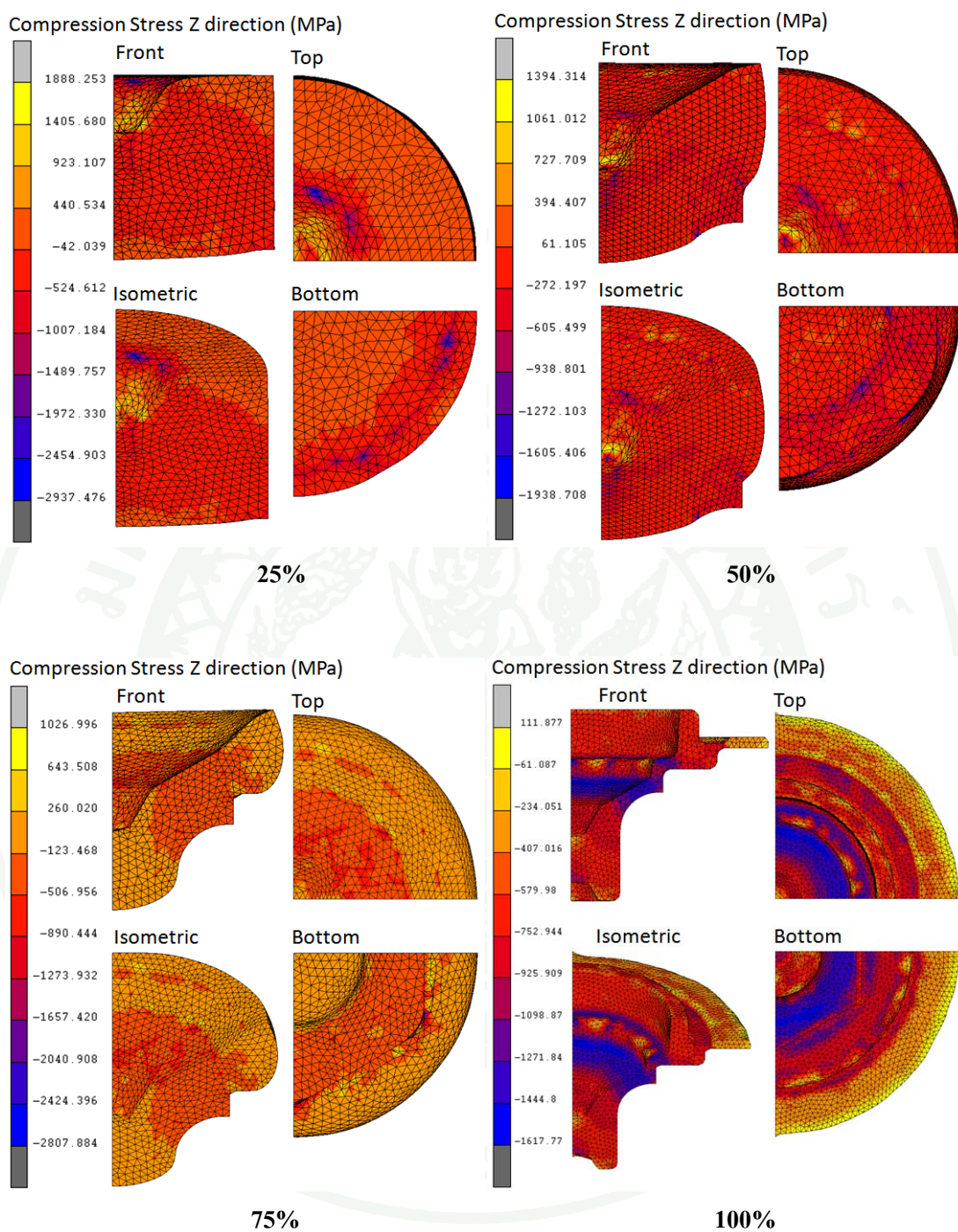
ผลการเปรียบเทียบขนาดที่อ้างอิง 8 จุด (จุด A ถึง H ในภาพที่ 71) จากผล FEA และจากการวัดขนาดจริง ได้สรุปในตารางที่ 16 โดยพบว่าตำแหน่งที่มีความคลาดเคลื่อนมากที่สุดคือที่ตำแหน่ง H (-2.67%) และมีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ ($|\% Error|_{avg}$) เท่ากับ 1.17%



ภาพที่ 108 แสดงความเค้น Von Mises ของฝาประตุน้ำ (VC50) เมื่อถูกทุบที่ระยะ 25% (9.6 mm), 50% (19.2 mm), 75% (28.79 mm) และ 100% (38.4 mm)



ภาพที่ 109 แสดงค่า Total Equivalent Plastic Strain ของฝาประตุน้ำ (VC50) เมื่อถูกทุบที่
ระยะ 25% (9.6 mm), 50% (19.2 mm), 75% (28.79 mm) และ 100% (38.4 mm)



ภาพที่ 110 แสดงความเค้นอัดในทิศทางการกดของฝาประตุน้ำ (VC50) เมื่อถูกทุบที่ระยะ 25% (9.6 mm), 50% (19.2 mm), 75% (28.79 mm) และ 100% (38.4 mm)

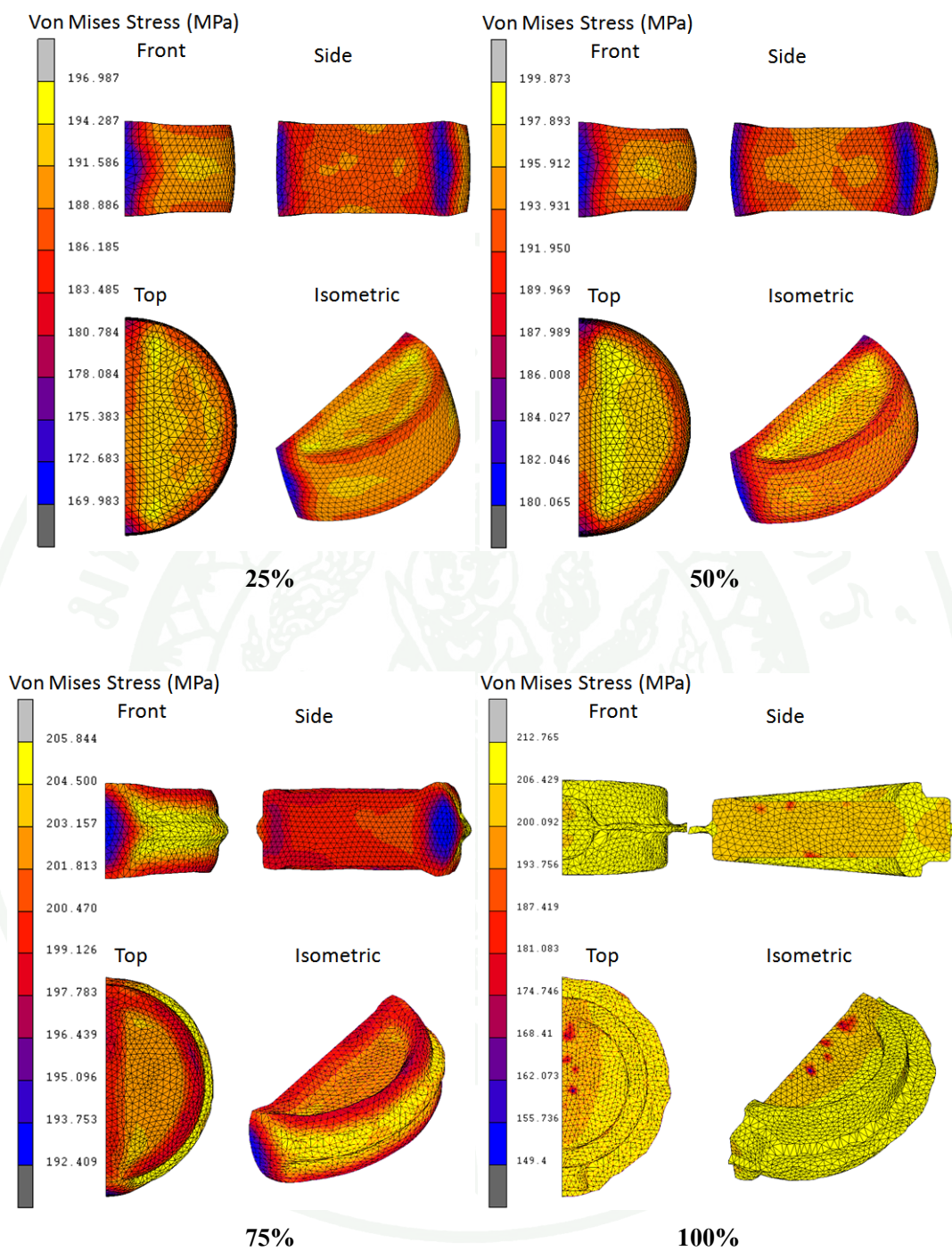
ตารางที่ 16 เปรียบเทียบขนาดจริงกับผล FEA ของชิ้นงานฝาประตุน้ำ (VC50)

ขนาดอ้างอิง	ขนาด (mm.)		% Error
	ชิ้นงานจริง	ผล FEA	
A	69.764	68.49	1.81
B	61.145	60	1.87
C	44.836	44.98	-0.32
D	10.016	10	0.16
E	4.453	4.35	2.31
F	43.032	43	0.07
G	23.043	23	0.18
H	10.694	10.98	-2.67
		เฉลี่ย	0.43

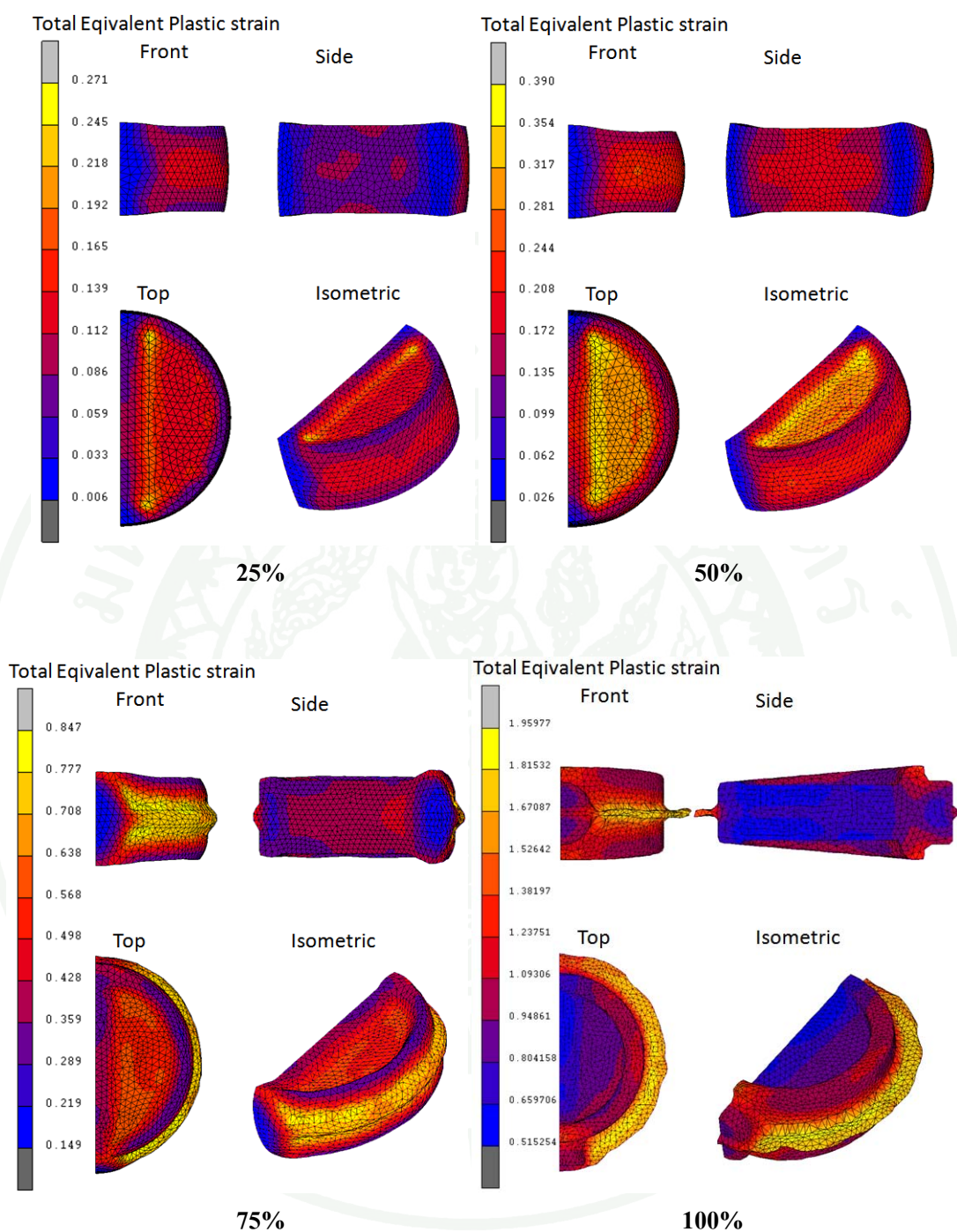
6.5 ผลการจำลองการทวบชิ้นรูปชิ้นงานล้นประตุน้ำ(GT 50)

ผลการวิเคราะห์ FEA แสดงระดับชั้นสีของความเค้น (Von Mises Stress) เมื่อชิ้นงานถูกทุบลงไปที่ระยะสุดท้ายเท่ากับ 12.5 mm. (ได้แสดงในภาพที่ 111) โดยมีความเค้นในช่วง 206.429 ถึง 212.765 MPa เกิดในเนื้อของชิ้นงาน ในภาพที่ 112 และ 113 แสดง Total Equivalent Plastic Strain และความเค้นอัดในทิศทางการกระดะยะสุดท้าย ตามลำดับ เวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์เท่ากับ 5,522 วินาที

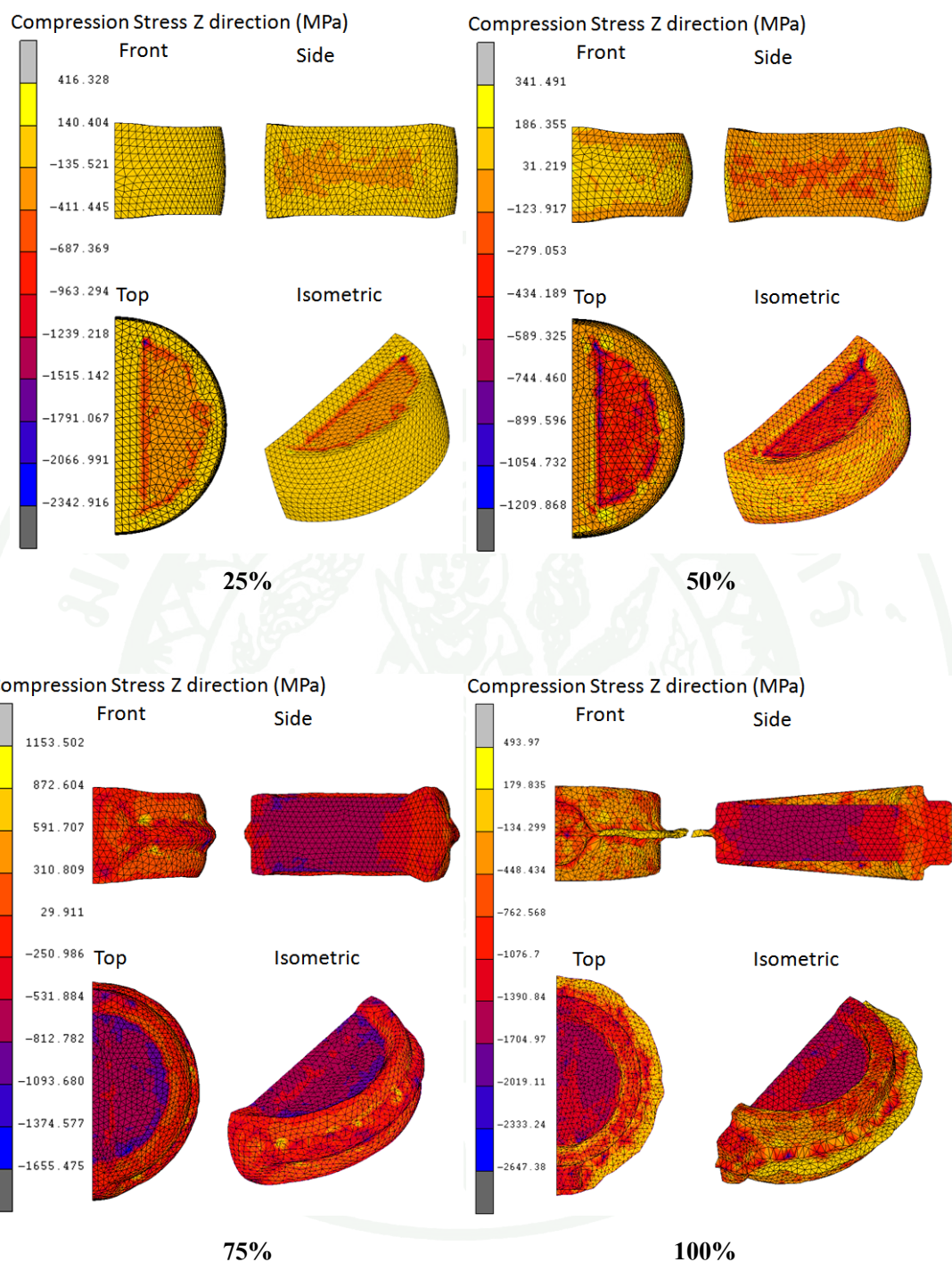
ผลการเปรียบเทียบขนาดที่อ้างอิง 3 จุด (จุด A ถึง C ในภาพที่ 73) จากผล FEA และจากการวัดขนาดจริง ได้สรุปในตารางที่ 17 โดยพบว่าตำแหน่งที่มีความคลาดเคลื่อนมากที่สุดคือที่ตำแหน่ง B (13.72%) และมีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ ($|\% Error|_{avg}$) เท่ากับ 7.18%



ภาพที่ 111 แสดงความเค้น Von Mises ของล้นประตุน้ำ (GT 50) เมื่อถูกทุบที่ระยะ 25% (3.12 mm), 50% (6.24 mm), 75% (9.36 mm) และ 100% (12.5 mm)



ภาพที่ 112 แสดง Total Equivalent Plastic Strain ของลึ้นประตุน้ำ (GT 50) เมื่อถูกทุบ
ที่ระยะ 25% (3.12 mm), 50% (6.24 mm), 75% (9.36 mm) และ 100% (12.5 mm)



ภาพที่ 113 แสดงความเค้นอัดในทิศทางการกดของลิ้นประตุน้ำ (GT 50) เมื่อถูกทุบที่ระยะ 25% (3.12 mm), 50% (6.24 mm), 75% (9.36 mm) และ 100% (12.5 mm)

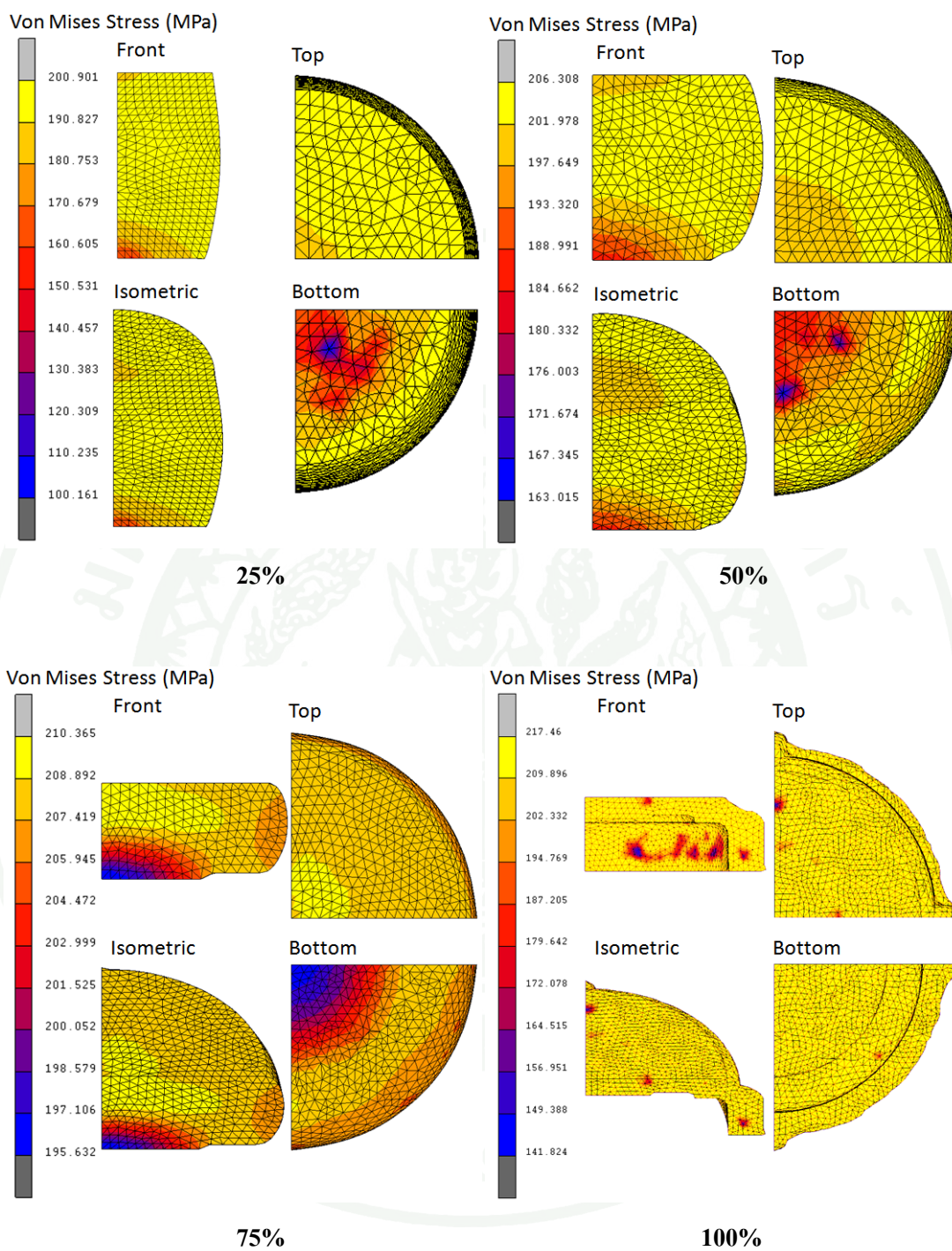
ตารางที่ 17 เปรียบเทียบขนาดจริงกับผล FEA ของชิ้นงานล้นประตุน้ำ (GT50)

ขนาดอ้างอิง	ขนาด (mm.)		% Error
	ชิ้นงานจริง	ผล FEA	
A	17.3	15.99	7.57
B	17.386	15	13.72
C	52.127	52	0.24
		เฉลี่ย	7.18

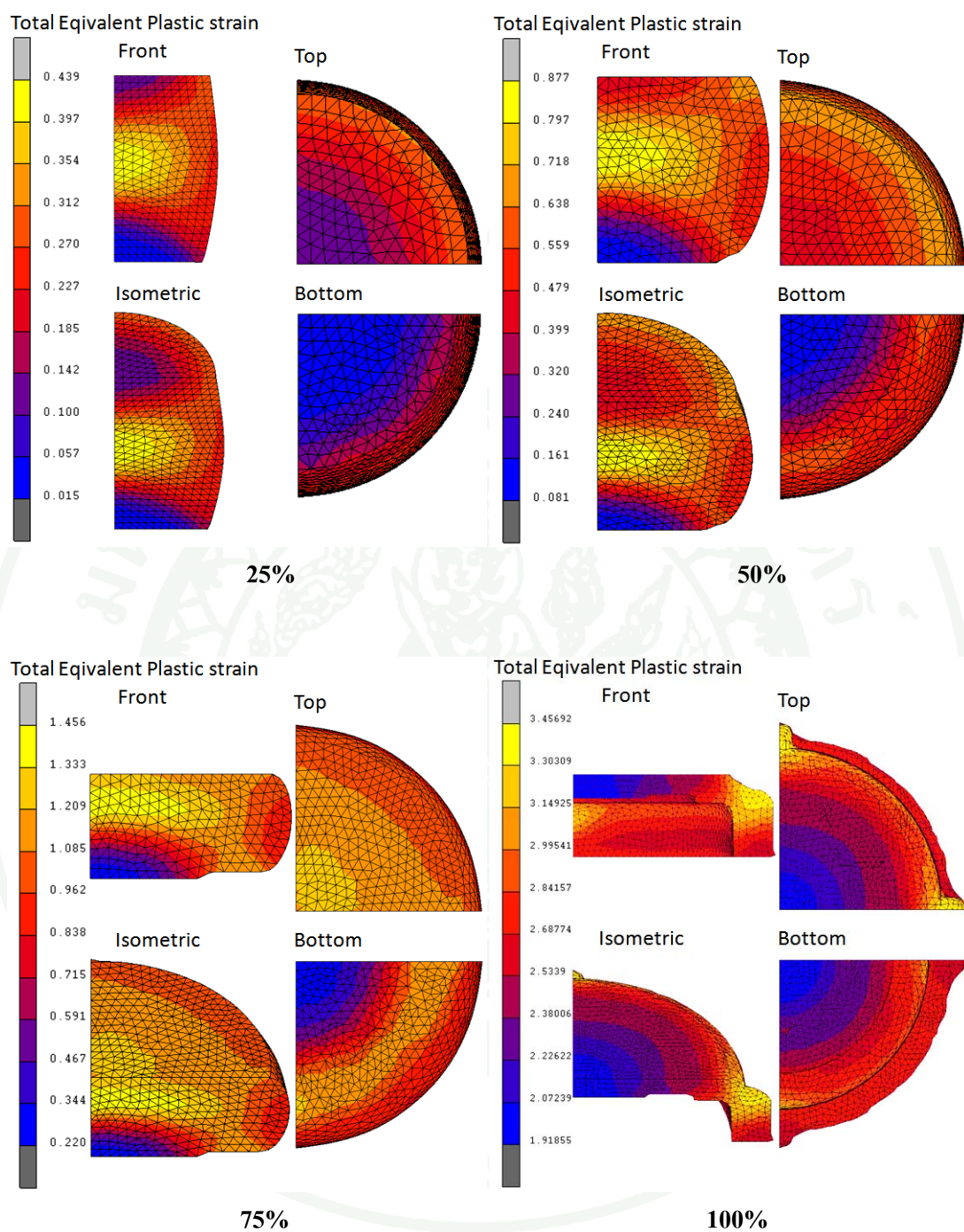
6.5 ผลการจำลองการทวบขึ้นรูปชิ้นงานฝาขัณมาตรวัดน้ำ (HC15)

ผลการวิเคราะห์ FEA แสดงระดับชั้นสีของความเค้น (Von Mises Stress) เมื่อชิ้นงานถูกทวบลงไปทีระยะสุดท้ายเท่ากับ 41.5 mm. (ได้แสดงในภาพที่ 114) โดยมีความเค้นในช่วง 209.896 ถึง 217.46 MPa เกิดในเนื้อของชิ้นงาน ในภาพที่ 115 และ 116 แสดง Total Equivalent Plastic Strain และความเค้นอัดในทิศทางกรกระยะสุดท้าย ตามลำดับ เวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์เท่ากับ 5,539 วินาที

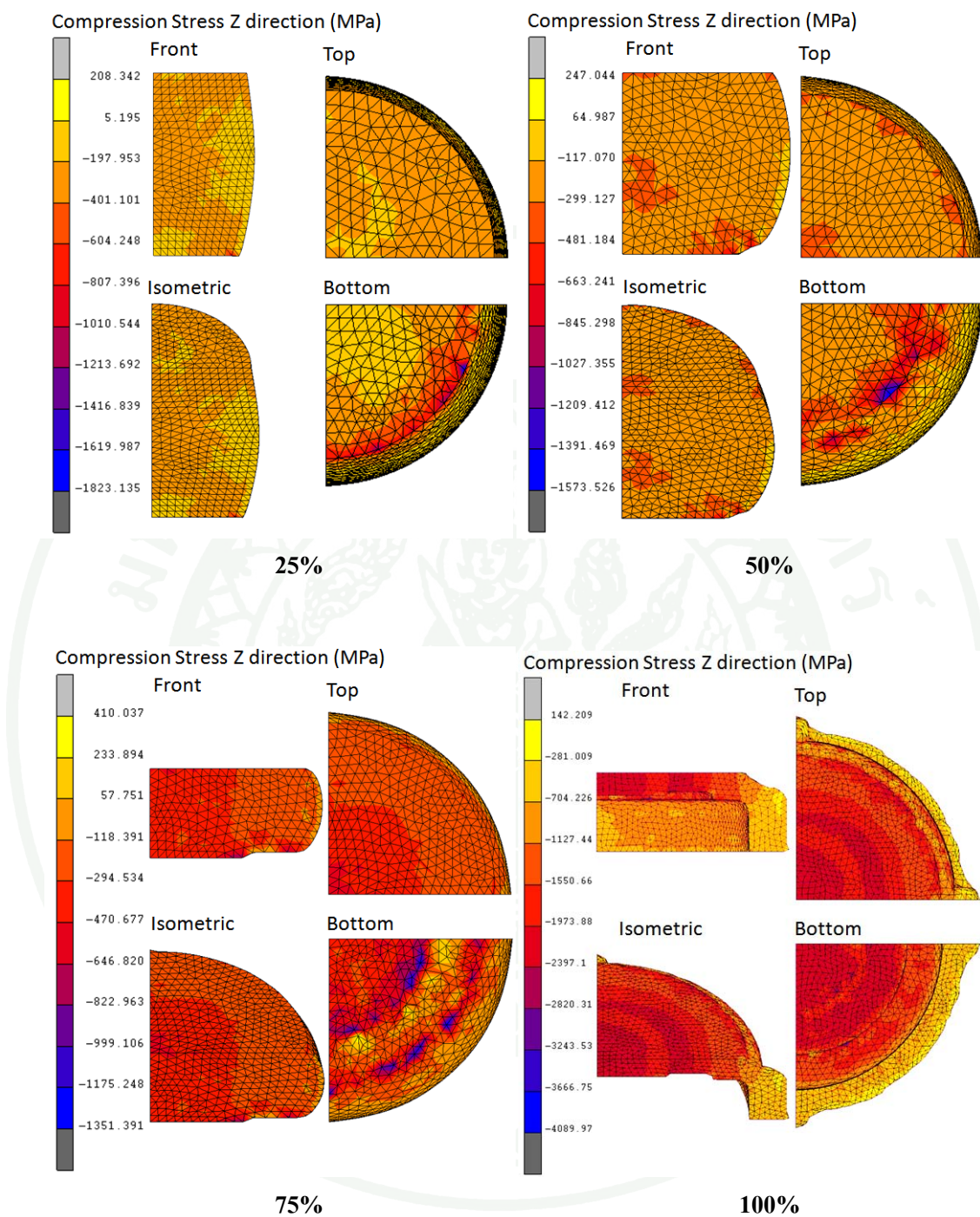
ผลการเปรียบเทียบขนาดที่อ้างอิง 3 จุด (จุด A ถึง C ในภาพที่ 75) จากผล FEA และจากการวัดขนาดจริง ได้สรุปในตารางที่ 18 โดยพบว่าตำแหน่งที่มีความคลาดเคลื่อนมากที่สุดคือที่ตำแหน่ง B (3.15%) และมีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ ($|\% Error|_{avg}$) เท่ากับ 2.04%



ภาพที่ 114 แสดงความเค้น Von Mises ของฟลันช์มาตรฐานน้ำ (HC 15) เมื่อถูกทุบที่ระยะ 25% (10.38 mm), 50% (20.76 mm), 75% (31.14 mm) และ 100% (41.5 mm)



ภาพที่ 115 แสดงค่า Total Equivalent Plastic Strain ของฟลักซ์มาตรฐานวัดน้ำ (HC 15) เมื่อถูก
 ทุบที่ระยะ 25% (10.38 mm), 50% (20.76 mm), 75% (31.14 mm) และ 100%
 (41.5 mm)



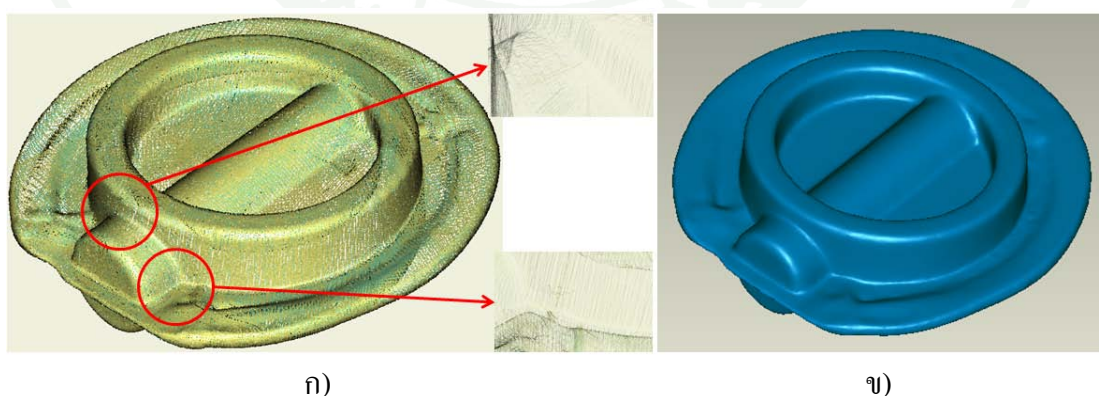
ภาพที่ 116 แสดงความเค้นอัดในทิศทางกรกดของฟ้านมาตรวัดน้ำ (HC 15) เมื่อถูกทุบที่
ระยะ 25% (10.38 mm), 50% (20.76 mm), 75% (31.14 mm) และ 100% (41.5 mm)

ตารางที่ 18 เปรียบเทียบขนาดจริงกับผล FEA ของชิ้นงานฝาขันมาตรวัดน้ำ (HC15)

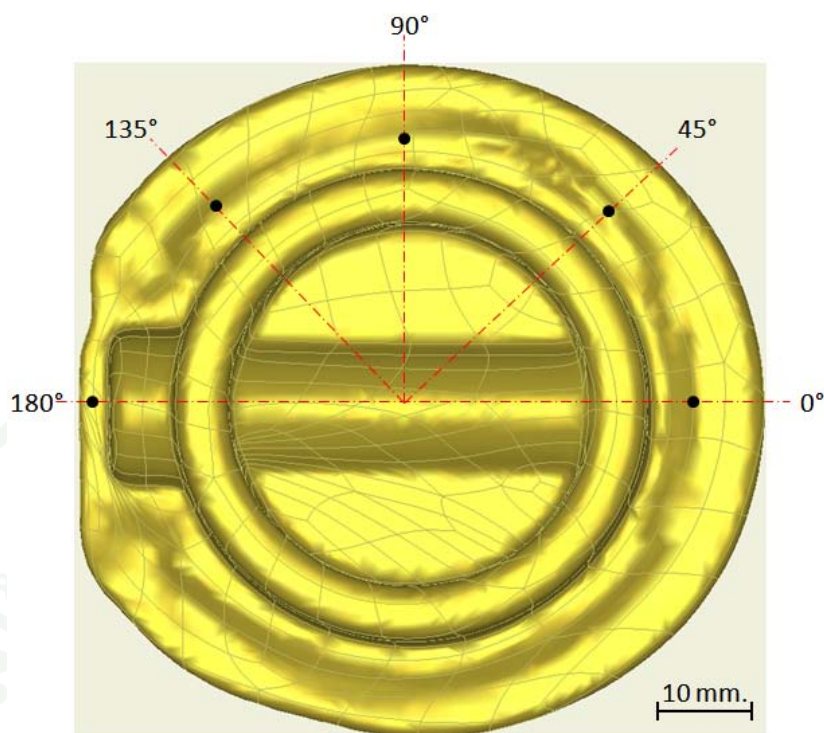
ขนาดอ้างอิง	ขนาด (mm.)		% Error
	ชิ้นงานจริง	ผล FEA	
A	72.051	73.996	-2.7
B	19.619	19	3.15
C	12.488	12.45	0.27
		เฉลี่ย	0.24

7. ผลเปรียบเทียบขนาดของชิ้นงานลิ้นประตูล้ำ (GT50) จาก FEA และการสแกน

นอกจากการเปรียบเทียบขนาดที่อ้างอิง 3 จุด (จุด A ถึง C ในภาพที่ 73) จากผล FEA และจากการวัดขนาดจริงแล้ว ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเปรียบเทียบความหนาของครีบบนของชิ้นงานเพื่อตรวจสอบความแม่นยำของผล FEA โดยในภาพที่ 117 ก) แสดง Point cloud ที่ได้จากการสแกนสามมิติผิวของชิ้นงาน ภาพที่ 117 ข) แสดงพื้นผิวที่ได้จากการ Wrap Surfaces จาก Point cloud โดยในภาพที่ 118 แสดงตำแหน่งในการวัดความหนาครีบบน ผลการเปรียบเทียบความหนาครีบบนที่ตำแหน่งต่างๆ ของชิ้นงานจริงจำนวนหนึ่งชิ้นกับผล FEA ได้แสดงในตารางที่ 19 โดยมีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 16.903%



ภาพที่ 117 ก) Point cloud และ ข) ผิวของชิ้นงานลิ้นประตูล้ำ (GT50)



ภาพที่ 118 ตำแหน่งการวัดความหนาของครีป (ที่จุดสีดำ)

ตารางที่ 19 ผลเปรียบเทียบความหนาครีปที่ 5 ตำแหน่ง ของชิ้นงานจริงกับผล FEA

จุดอ้างอิง	ขนาด (mm.)		% Error
	ชิ้นงานจริง	ผล FEA	
$\theta = 0^\circ$	0.98	1.152	-17.54
$\theta = 45^\circ$	2.4	2.246	6.41
$\theta = 90^\circ$	3	1.8124	39.29
$\theta = 135^\circ$	2.97	2.2961	22.69
$\theta = 180^\circ$	3	1.1903	33.65
		เฉลี่ย	16.903

8. ผลการประยุกต์เพื่อหาขนาดของ Billet ที่เหมาะสมสำหรับชิ้นงานล้นประตุน้ำ (GT50)

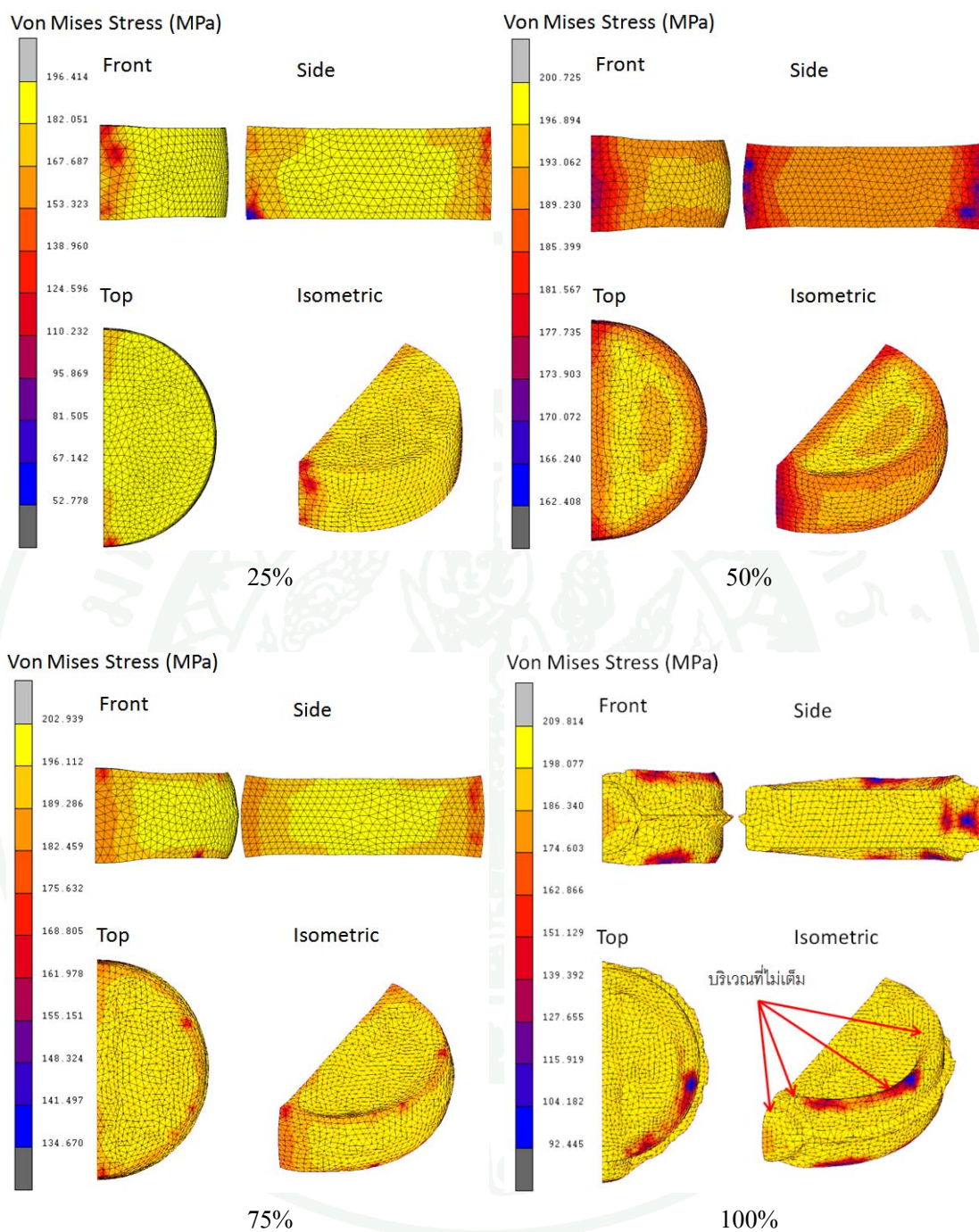
แบบจำลองของ Billet จำนวน 4 ขนาด ได้ใช้จำลองการทุบขึ้นรูป เพื่อตรวจสอบชิ้นงานที่ได้จากแบบจำลองที่มีความสมบูรณ์ทางด้านรูปทรงของผลิตภัณฑ์ และใช้น้ำหนักน้อยลง เพื่อจุดมุ่งหมายในการลดของเสีย เพิ่มผลผลิต ลดการใช้พลังงานในการผลิต

ขนาดของ Billet ที่ใช้ในการจำลองได้กำหนดจากน้ำหนักของชิ้นงานจริง โดยจะกำหนดให้เป็น 1.05 ,1.1 ,1.15 และ 1.2 เท่าของน้ำหนักชิ้นงานจริง โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 44.65 mm. และความสูงเท่ากับ 17.30, 18.13, 18.95 และ 19.78 mm. ตามลำดับ

8.1 ผลการจำลองการทุบขึ้นรูปชิ้นงานล้นประตุน้ำ (GT50) โดยใช้น้ำหนัก 1.05 เท่า

แบบจำลอง FEM ของ Billet น้ำหนัก 1.05 เท่า เป็นรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 44.65 mm. และสูง 17.30 mm. ได้จำลองโดยใช้ 1/2 ส่วน การ Mesh ของ Billet ได้กำหนดเอลิเมนต์เป็นแบบ Four-Node Tetrahedron Element เพื่อให้สามารถใช้ Adaptive mesh ได้จำนวนเอลิเมนต์ทั้งหมดเท่ากับ 38,387 เอลิเมนต์ และ 7,450 nodes ในการจำลองใช้ขั้นตอนตามผลการวิจัยและวิจารณ์หัวข้อที่ 5.5 ผลการสร้างแบบจำลอง FEM การทุบขึ้นรูปชิ้นงานล้นประตุน้ำ (GT50) และได้กำหนดตัวแปรต่างๆ โดยใช้เงื่อนไขของตารางที่ 15

ผลการวิเคราะห์ FEA ที่ 4 ระยะทุบที่ 25%, 50%, 75% และ 100% (9.3 mm) แสดงระดับชั้นสีของความเค้น Von Mises Stress (ได้แสดงในภาพที่ 119) เมื่อชิ้นงานถูกทุบลงไปทีละระยะสุดท้ายเท่ากับ 9.3 mm. มีความเค้นในช่วง 198.077 ถึง 209.814 MPa เวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์เท่ากับ 2,020 วินาที โดยจากผลวิเคราะห์พบว่าชิ้นงานไม่ได้รูปทรงเนื่องจากโลหะไหลตัวเข้าแม่พิมพ์ไม่เต็ม ดังนั้น Billet น้ำหนัก 1.05 เท่า หรือที่ความสูง 17.30 mm. มีขนาดเล็กเกินไปนำไปใช้ขึ้นรูปไม่ได้

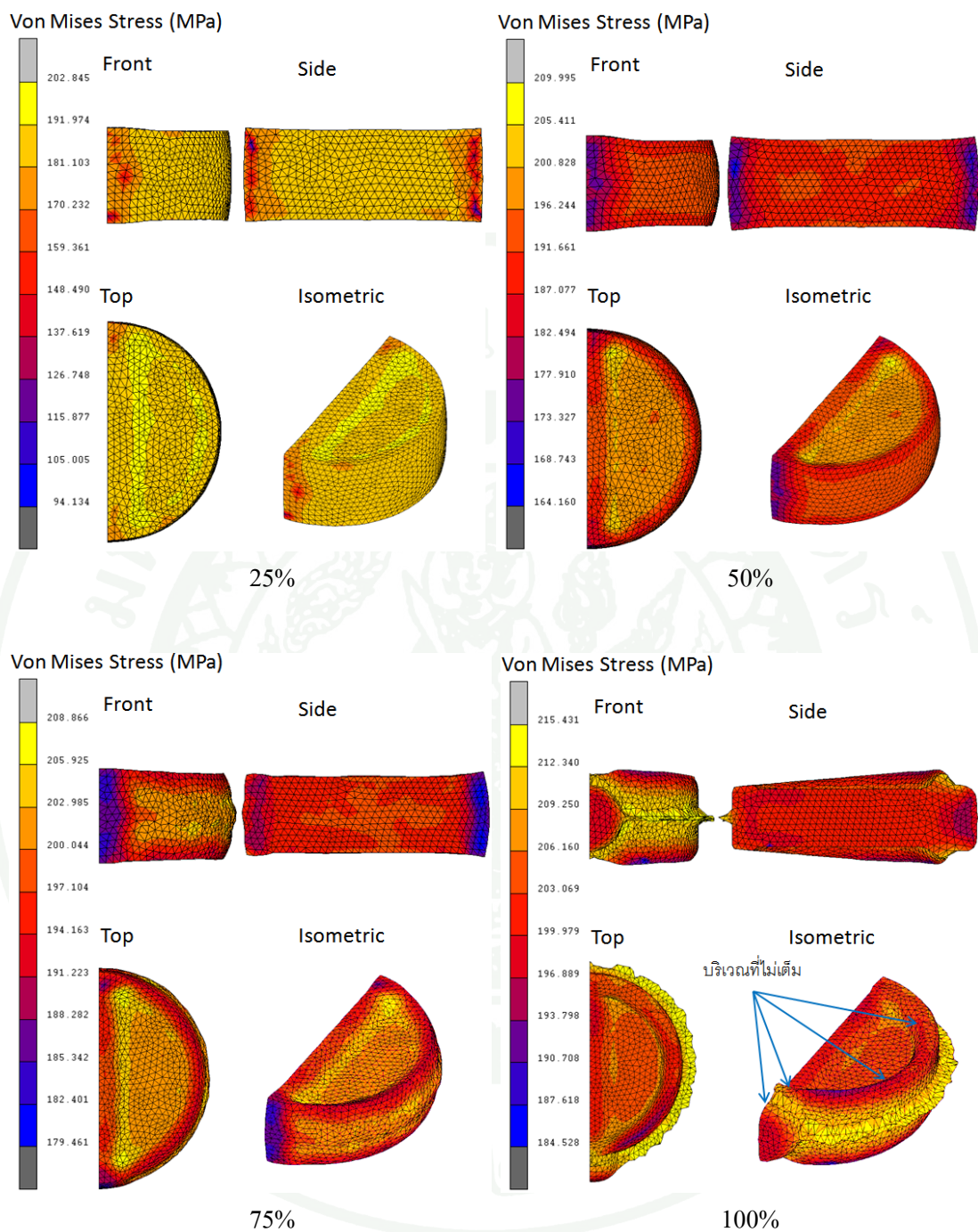


ภาพที่ 119 แสดงความเค้น Von Mises ของ Billet ที่น้ำหนัก 1.05 เท่า ในขณะที่ถูกทุบที่ระยะ 25% (2.325 mm), 50% (4.65 mm), 75% (6.975 mm) และ 100% (9.3 mm)

8.2 ผลการจำลองการชุบขึ้นรูปชิ้นงานลึ้นประตุน้ำ (GT50) โดยใช้น้ำหนัก 1.1 เท้า

แบบจำลอง FEM ของ Billet น้ำหนัก 1.1 เท้า เป็นรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 44.65 mm. และสูง 18.13 mm. ได้จำลองโดยใช้ 1/2 ส่วน การ Mesh ของ Billet ได้กำหนดเอลิเมนต์เป็นแบบ Four-Node Tetrahedron Element เพื่อให้สามารถใช้ Adaptive mesh ได้จำนวนเอลิเมนต์ทั้งหมดเท่ากับ 40,419 เอลิเมนต์ และ 7,839 nodes ในการจำลองลงใช้ขั้นตอนตามผลการวิจัยและวิจารณ์หัวข้อที่ 5.5 ผลการสร้างแบบจำลอง FEM การชุบขึ้นรูปชิ้นงานลึ้นประตุน้ำ (GT50) และได้กำหนดตัวแปรต่างๆ โดยใช้เงื่อนไขของตารางที่ 15

ผลการวิเคราะห์ FEA ที่ 4 ระยะชุบที่ 25%, 50%, 75% และ 100% (10.13 mm) แสดงระดับชั้นสีของความเค้น Von Mises Stress (ได้แสดงในภาพที่ 120) เมื่อชิ้นงานถูกทุบลงไปทีละระยะสุดท้ายเท่ากับ 10.13 mm. มีความเค้นในช่วง 212.34 ถึง 215.431 MPa เวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์เท่ากับ 4,088 วินาที โดยจากผลวิเคราะห์พบว่าชิ้นงานไม่ได้รูปทรงเนื่องจากโลหะไหลเข้าแม่พิมพ์ไม่เต็ม ดังนั้น Billet ขนาด 1.1 เท้า ไม่สามารถใช้ขึ้นรูปได้เนื่องจากมีขนาดเล็ก แต่บริเวณที่ไม่เต็มมีปริมาตรน้อยกว่าของขนาด 1.05 เท้า

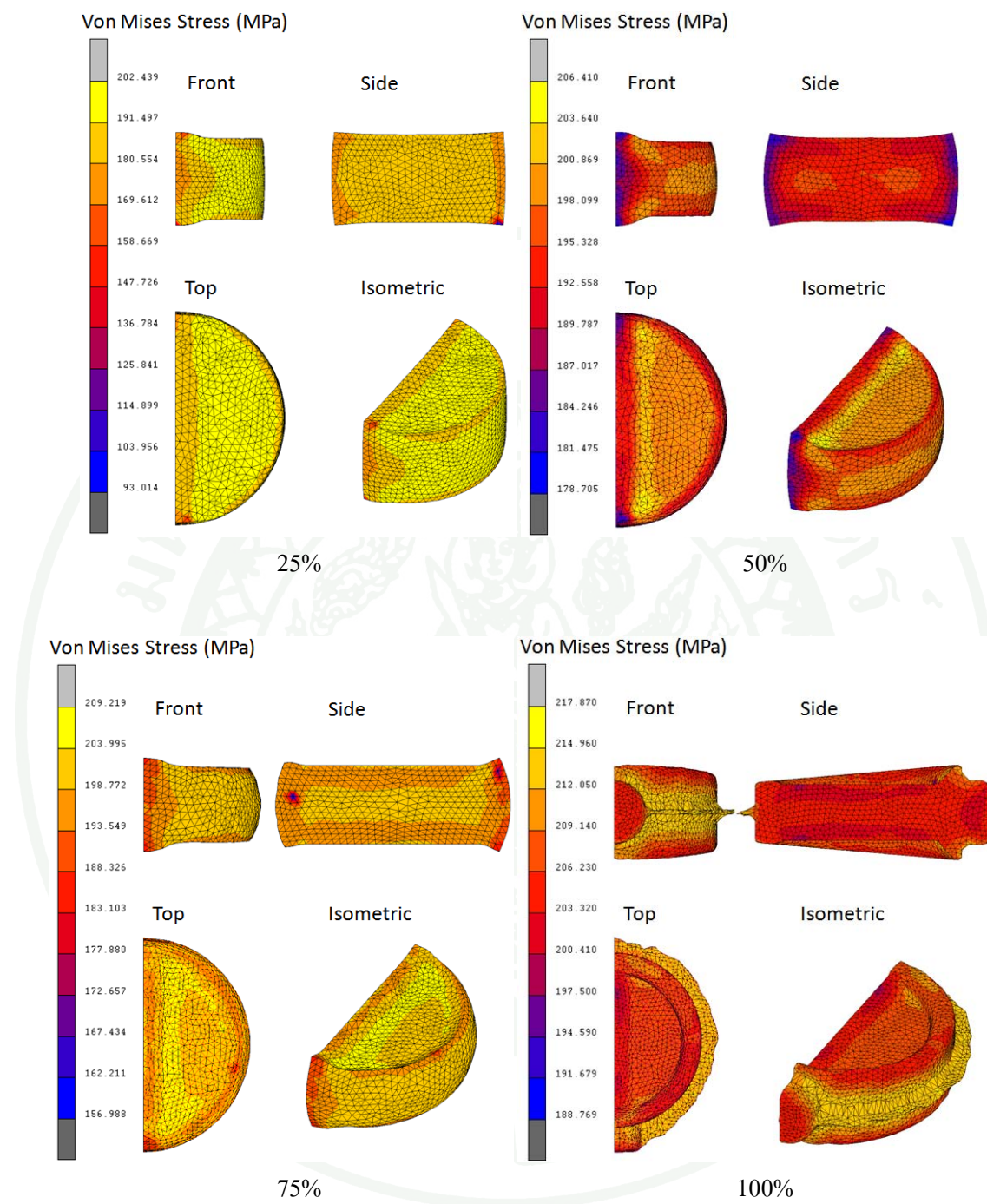


ภาพที่ 120 แสดงความเค้น Von Mises ของ Billet ที่น้ำหนัก 1.1 เท่า ในขณะที่ถูกทุบที่ระยะ 25% (2.53 mm), 50% (5.06 mm), 75% (7.59 mm) และ 100% (10.13 mm)

8.3 ผลการจำลองการทุบขึ้นรูปชิ้นงานล้นประตุน้ำ (GT50) โดยใช้น้ำหนัก 1.15 เท่า

แบบจำลอง FEM ของ Billet น้ำหนัก 1.15 เท่า เป็นรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 44.65 mm. และสูง 18.95 mm. ได้จำลองโดยใช้ 1/2 ส่วน การ Mesh ของ Billet ได้กำหนดเอลิเมนต์เป็นแบบ Four-Node Tetrahedron Element เพื่อให้สามารถใช้ Adaptive mesh ได้จำนวนเอลิเมนต์ทั้งหมดเท่ากับ 42,399 เอลิเมนต์ และ 8,211 nodes ในการจำลองใช้ขั้นตอนตามผลการวิจัยและวิจารณ์หัวข้อที่ 5.5 ผลการสร้างแบบจำลอง FEM การทุบขึ้นรูปชิ้นงานล้นประตุน้ำ (GT50) และได้กำหนดตัวแปรต่างๆ โดยใช้เงื่อนไขของตารางที่ 15

ผลการวิเคราะห์ FEA ที่ 4 ระยะทุบที่ 25%, 50%, 75% และ 100% (10.95 mm) แสดงระดับชั้นสีของความเค้น Von Mises Stress (ได้แสดงในภาพที่ 121) เมื่อชิ้นงานถูกทุบลงไปทีละระยะสุดท้ายเท่ากับ 10.95 mm. มีความเค้นในช่วง 214.96 ถึง 217.870 MPa เวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์เท่ากับ 4,468 วินาที ผลจากการวิเคราะห์ FEA พบว่าชิ้นงานมีความสมบูรณ์ในรูปร่าง ทองเหลืองสามารถไหลเข้าแม่พิมพ์ได้เต็ม

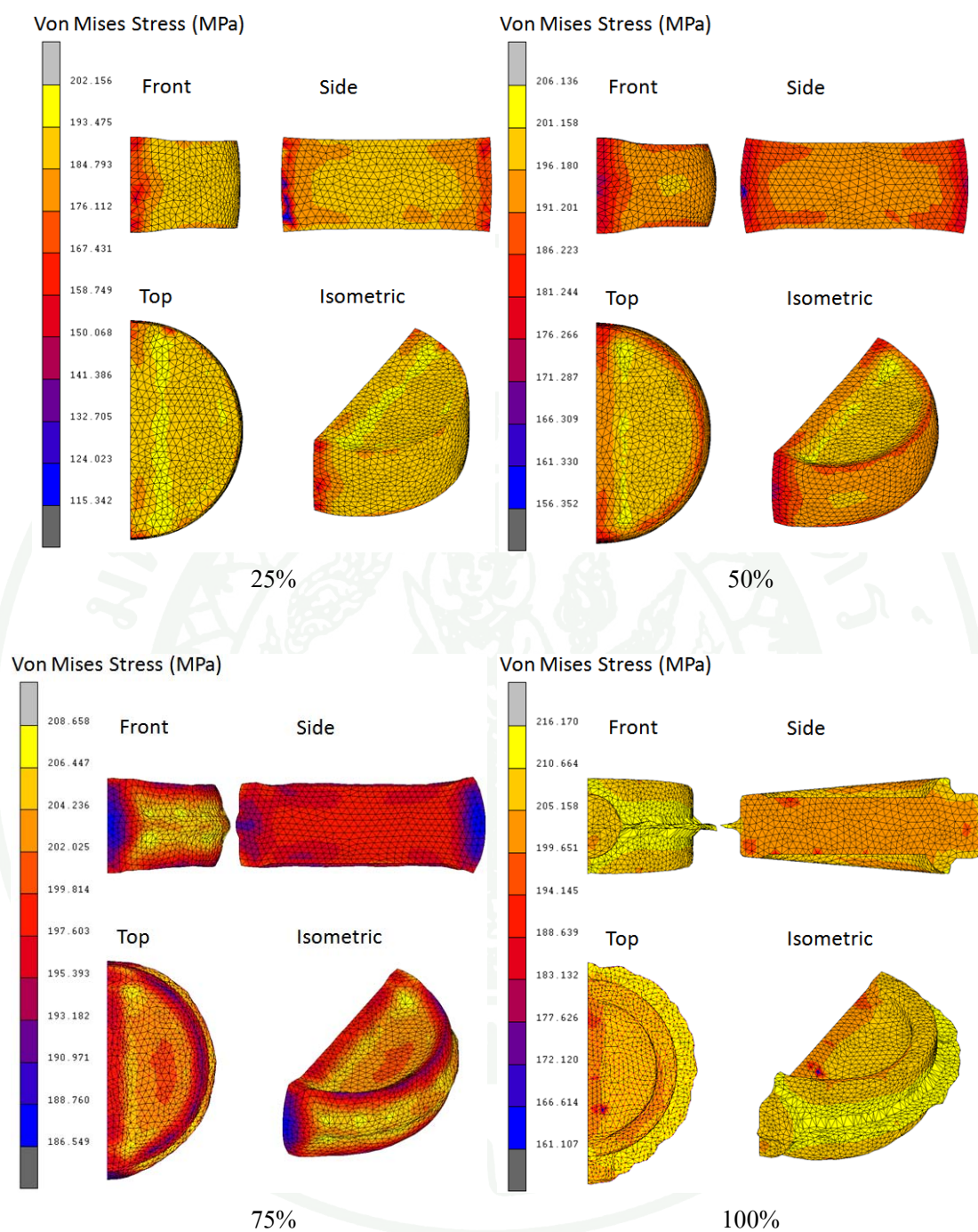


ภาพที่ 121 แสดงความเค้น Von Mises ของ Billet น้ำหนัก 1.15 เตา ในขณะที่ถูกทุบที่ระยะ 25% (2.73 mm), 50% (5.47 mm), 75% (8.21 mm) และ 100% (10.95 mm)

8.4 ผลการจำลองการทุบขึ้นรูปชิ้นงานล้นประตุน้ำ (GT50) โดยน้ำหนัก 1.2 เท่า

แบบจำลอง FEM ของ Billet น้ำหนัก 1.2 เท่า เป็นรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 44.65 mm. ความสูง 19.78 mm. ได้จำลองโดยใช้ 1/2 ส่วน การ Mesh ของ Billet ได้กำหนดเอลิเมนต์เป็นแบบ Four-Node Tetrahedron Element เพื่อให้สามารถใช้ Adaptive mesh ได้จำนวนเอลิเมนต์ทั้งหมดเท่ากับ 43,424 เอลิเมนต์ และ 8,379 nodes ในการจำลองใช้ขั้นตอนตามผลการวิจัยและวิจารณ์หัวข้อที่ 5.5 ผลการสร้างแบบจำลอง FEM การทุบขึ้นรูปชิ้นงานล้นประตุน้ำ (GT50) และได้กำหนดตัวแปรต่างๆ โดยใช้เงื่อนไขของตารางที่ 15

ผลการวิเคราะห์ FEA ที่ 4 ระยะทุบที่ 25%, 50%, 75% และ 100% (11.78 mm) แสดงระดับชั้นสีของความเค้น Von Mises Stress (ได้แสดงในภาพที่ 122) เมื่อชิ้นงานถูกทุบลงไปทีละระยะสุดท้ายเท่ากับ 11.78 mm. มีความเค้นในช่วง 210.664 ถึง 216.170 MPa เวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์เท่ากับ 4,914 วินาที ผลจากการวิเคราะห์ FEA พบว่าชิ้นงานมีความสมบูรณ์ในรูปร่าง ทองเหลืองสามารถไหลเข้าแม่พิมพ์ได้เต็ม



ภาพที่ 122 แสดงความเค้น Von Mises ของ Billet น้ำหนัก 1.2 ตัน ในขณะที่ถูกทุบที่ระยะ 25% (2.945 mm), 50% (5.89 mm), 75% (8.835 mm) และ 100% (11.78 mm)

8.5 การเปรียบเทียบผล FEA กับการทดสอบทุบขึ้นรูปชิ้นงานจริงจาก Billet 4 ขนาด

จากผลการจำลองการขึ้นรูปตามข้อ 8.1 ถึง 8.4 จึงได้เลือก Billet ที่มีน้ำหนัก 1.1, 1.15 และ 1.2 เท่า ไปทดสอบการทุบขึ้นรูปจริงขนาดละ 3 ชิ้น โดยข้อมูลของ Billet ที่ใช้ในการทดสอบได้แสดงในตารางที่ 20 ผลจากการทดสอบพบว่าผลสอดคล้องกับผล FEA โดย ชิ้นงานที่ 1 ถึง 3 ที่มีน้ำหนัก 1.1 เท่า จากการทุบขึ้นรูปจริง ได้ชิ้นงานที่ไม่สมบูรณ์ทั้ง 3 ชิ้น ดังแสดงในภาพที่ 123 และภาพที่ 124 แสดงตำแหน่งที่เกิดความบกพร่องของชิ้นงานขึ้นรูปประตุน้ำ (GT50) ที่ได้จากการทดสอบการทุบขึ้นรูปจริงของน้ำหนัก 1.1 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับผล FEA

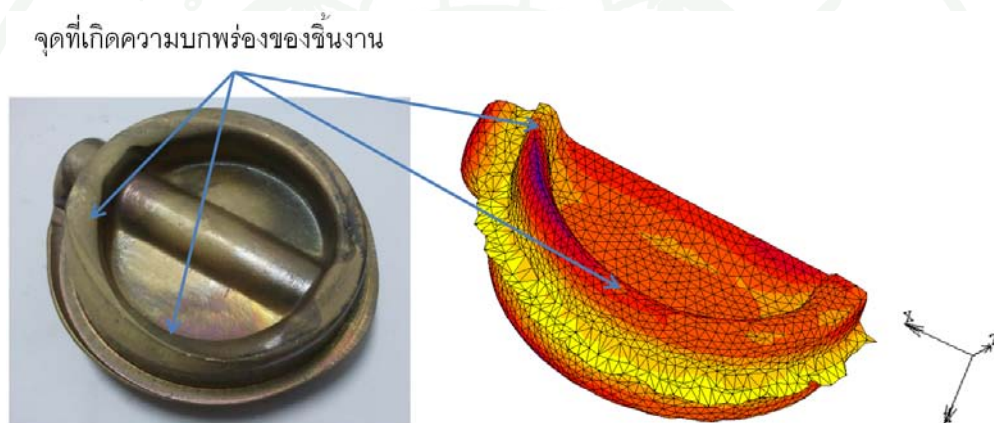
ชิ้นงานที่ 4 ถึง 9 ซึ่งมีน้ำหนัก 1.15 และ 1.2 เท่า ได้ชิ้นงานที่มีความสมบูรณ์ มีทองเหลืองไหลเข้าเต็มแม่พิมพ์ ดังแสดงในภาพที่ 125 และ 126 ดังนั้นเมื่อใช้ Billet ที่มีน้ำหนัก 1.15 เท่าในการผลิตจริงทำให้สามารถลดเนื้อวัสดุลงได้ถึง 14.907 กรัมต่อชิ้น หรือคิดเป็น 5.57% ต่อชิ้น

ตารางที่ 20 แสดงข้อมูล Billet สำหรับการทดสอบการทุบขึ้นรูปที่น้ำหนัก 1.1, 1.15 และ 1.2 เท่าของชิ้นงานขึ้นรูปประตุน้ำ (GT50)

ค่าเผื่อน้ำหนัก	ชิ้นงานที่	เส้นผ่านศูนย์กลาง (mm)	น้ำหนัก (g)	ความสูง (mm)	อุณหภูมิ Billet (°C)
1.1	1	44.72	241.6	18.28	660
	2	44.69	241.5	18.28	640
	3	44.70	241.5	18.30	670
1.15	4	44.72	252.5	19.1	650
	5	44.72	252.6	19.11	670
	6	44.71	253.1	19.15	660
1.2	7	44.71	263.7	19.96	650
	8	44.71	263.9	19.97	640
	9	44.72	261.6	19.93	650



ภาพที่ 123 ชิ้นงานล้นประตุน้ำ (GT50) ที่ได้จากการทดสอบการทุบขึ้นรูปจาก Billet น้ำหนัก 1.1 เตะ



ภาพที่ 124 เปรียบเทียบตำแหน่งที่เกิดความบกพร่องของชิ้นงานล้นประตุน้ำ (GT50) ที่ได้จากการทดสอบการทุบขึ้นรูปกับผล FEA ของ Billet น้ำหนัก 1.1 เตะ



ภาพที่ 125 ชิ้นงานล้นประตุน้ำ (GT50) ที่ได้จากการทดสอบการทุบขึ้นรูปจาก Billet น้ำหนัก 1.15 เตะ



ภาพที่ 126 ชิ้นงานลึ้นประตุน้ำ (GT50) ที่ได้จากการทดสอบการทุบขึ้นรูปจาก Billet น้ำหนัก 1.2 เท่า

9. วิจัย

9.1 การทดสอบขึ้นรูปขึ้นงาน

9.1.1 การทดสอบทุบขึ้นรูปร้อนขึ้นงานทองเหลืองทั้ง 3 แบบ คือ ฝาประตุน้ำ (VC50) ลึ้นประตุน้ำ (GT50) และฝาขันมาตรวัดน้ำ (HC15) ต้องให้ความร้อนแก่ Billet โดยใช้เตาเผา (Heating furnace) (ภาพที่ 30) จากการศึกษพบว่าเตาเผาที่ใช้ ไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิ Billet ให้สม่ำเสมอเท่ากันทุกชิ้นได้ โดยมีความคลาดเคลื่อน $\pm 50^{\circ}\text{C}$ นอกจากนี้การวัดอุณหภูมิขึ้นงานโดยใช้ Infrared Thermometer (ภาพที่ 47) มีความไวในการอ่านค่าและต้องควบคุมระยะทางให้สม่ำเสมอ อุณหภูมิของ Billet ที่ใช้ในการวิจัยคือ $650^{\circ}\pm 50^{\circ}\text{C}$ และอุณหภูมิแม่พิมพ์เท่ากับ $150^{\circ}\pm 50^{\circ}\text{C}$

9.1.2 สารหล่อลื่นที่ใช้ในการทุบขึ้นรูป มีผลกระทบต่อการใช้หล่อตัวของโลหะในโพรงแม่พิมพ์และแรงในการทุบขึ้นรูป งานวิจัยนี้ได้ศึกษาอัตราส่วนที่ใช้และพบค่าที่เหมาะสม คือ ใช้กราไฟต์ผสมน้ำด้วยอัตราส่วน 1:10

9.1.3 เครื่องทุบขึ้นรูปในงานวิจัยนี้เป็นแบบ Mechanical press ในการทดลองจึงไม่สามารถควบคุมความเร็วในการทุบขึ้นรูปให้คงที่ได้ ดังนั้นสภาพการณ์ในขณะทุบขึ้นรูปจริงจึงต่างกับที่กำหนดในวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จึงเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อความคลาดเคลื่อนในการทำนายพฤติกรรมการเสียรูป

9.1.4 ตำแหน่งการวาง Billet บนแม่พิมพ์ มีผลต่อการไหลของโลหะในแม่พิมพ์ ในทางปฏิบัติผู้วิจัยต้องวาง Billet บนแม่พิมพ์อย่างรวดเร็วเพื่อลดการสูญเสียความร้อนของ Billet และต้องใช้คีมจับชิ้นงาน จึงเป็นผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนของการวางตำแหน่ง เพื่อลดปัญหาดังกล่าว ก่อนการทดสอบจริงจึงต้องมีการฝึกปฏิบัติให้มีความแม่นยำ

9.2 การทดสอบหาสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

9.2.1 อุณหภูมิชิ้นงานในขณะที่ทำการทดสอบอยู่ที่ 650 ± 50 °C โดยความร้อนของชิ้นงานใช้เตาเผา (Heating furnace) อบให้ได้อุณหภูมิสูงกว่า 10 °C เพื่อชดเชยความร้อนที่สูญเสียจากการทดสอบที่ทำในอุณหภูมิ (650°C) และในขณะที่ทดสอบใช้ Infrared Thermometer วัดอุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิถึงกำหนดจึงเริ่มทำการทดสอบ

9.2.2 ในการทดสอบพบว่าความหยาบผิวของแม่พิมพ์ มีผลกระทบอย่างมากต่อความเสียดทาน ดังนั้นจึงควรมีการตรวจสอบค่าความหยาบผิวของแม่พิมพ์ในแต่ละช่วงของการทดสอบ เพื่อควบคุมให้ความหยาบผิวแม่พิมพ์มีสภาวะใกล้เคียงกับสภาวะเริ่มต้นในทุกๆ ครั้งของการทดสอบ และได้ใช้สารหล่อลื่นเป็นกราไฟต์ผสมกับน้ำ อัตราการผสม 1:10

9.3 การทดสอบหาสมบัติทางกล

การทดสอบหาสมบัติทางกลของทองเหลือง CuZn40Pb2 ที่อุณหภูมิ 650°C และใช้ความเร็วในการอัดคงที่ ที่ 55 mm/s จากการทดสอบ 10 ชิ้นงาน ค่าความเครียดจริงและความเค้นจริงในช่วงพลาสติก มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 0.49% จากผลการทดสอบนี้ทำให้ทราบสมบัติทางกลของทองเหลือง ทั้งในช่วง Elastic และ Plastic เพื่อใช้ในการคำนวณทางไฟไนต์เอลิเมนต์ต่อไป

9.4 การวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์

9.4.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสมบัติทางกลของทองเหลืองได้นำมาประเมินความเที่ยงตรง โดยเปรียบเทียบผล FEA ของชิ้นงานทองเหลืองรูปทรงกระบอกตัน เมื่อชิ้นงานถูกกดให้ความสูงลดลง 50% พบความคลาดเคลื่อนของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นจริงและ

ความเครียดจริง จากผล FEA เทียบกับผลการทดสอบโดยเฉลี่ยเท่ากับ 3% เมื่อแบบจำลองเป็นแบบ 3 มิติและ 3.12% เมื่อเป็นแบบ 2 มิติ ทั้งนี้การคำนวณแบบ 2 มิติ เร็วกว่าแบบ 3 มิติ 6 เท่า (3 วินาที เมื่อเทียบกับ 18 วินาที สำหรับแบบ 3 มิติ)

9.4.2 ผลการจำลองการทอขึ้นรูปร้อนแม่พิมพ์โดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ได้ใช้ซอฟต์แวร์ MSC.MARC และกำหนดเอลิเมนต์ให้สามารถปรับจำนวนเพิ่มได้หรือ Adaptive mesh เพราะรูปทรงในกระบวนการทอขึ้นรูปเกิดการเปลี่ยนรูปทรงไปจากเดิมมาก ซึ่งช่วยให้ผลการวิเคราะห์ FEA มีแม่นยำมากกว่า

สรุป

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาและทดสอบ ตัวแปรที่มีผลต่อความแม่นยำในการนำ FEA แบบไม่เชิงเส้นมาใช้ในการจำลองการทวบขึ้นรูปร้อนของทองเหลือง CuZn40Pb2 โดยได้ศึกษาจากผลิตภัณฑ์ของบริษัท อาซาฮี – ไทย อัดลอย จำกัด ที่มีการดำเนินการผลิตจำหน่ายในปัจจุบัน คือ ชิ้นงาน ฝาประตุน้ำ (VC50) ลื่นประตุน้ำ (GT50) และ ฝาขันมาตรวัดน้ำ (HC15) และได้สรุปแนวทางและลำดับขั้นตอนที่เหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้กับผลิตภัณฑ์ทองเหลืองอื่นๆ ของโรงงานได้ โดยงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ ในการใช้ซอฟต์แวร์ FEA พื้นฐานที่ไม่ใช่ซอฟต์แวร์ที่พัฒนาโดยตรงเพื่อใช้สำหรับงานทวบขึ้นรูปเพียงอย่างเดียว ผลจาก FEA สามารถคาดการณ์ พฤติกรรมการเสียรูป และรูปทรงสุดท้ายของชิ้นงานหลังการทวบขึ้นรูป จึงทำให้ทราบข้อบกพร่องที่อาจเกิดขึ้นต่อชิ้นงานได้ก่อนการผลิตจริง และทำให้ลดการสูญเสียเวลาจากแก้ไข ปรับปรุงแม่พิมพ์และลดการสูญเสียของวัสดุ และต้นทุนในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ ชิ้นงานที่ได้จากการทดลองขึ้นรูปจริง ถูกนำไปตรวจสอบคุณภาพ หรือขนาด เพื่อประเมินความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น เมื่อเทียบกับผล FEA ซึ่งขนาดที่วัดได้โดยประมาณของชิ้นงานตัวอย่างทั้ง 3 ชิ้นงาน พบความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง -2.7% ถึง 13.72% ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการขนาดของเอลิเมนต์มีความละเอียดไม่พอ จึงทำให้การวัดระยะห่างระหว่าง node มีความคลาดเคลื่อนค่อนข้างสูง อีกทั้งมีการแก้ไขแม่พิมพ์ในบางจุด ทำให้ขนาดที่วัดได้มีความคลาดเคลื่อนไป

ผลการทดสอบจากงานวิจัยนี้สามารถสรุปได้ดังนี้

1. การทดสอบหาสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ได้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (μ) ในกรณีที่ไม่ใช้สารหล่อลื่นเท่ากับ 0.7 และเมื่อใช้สารหล่อลื่นในอัตราส่วน 1:10 เท่ากับ 0.5
2. สมบัติทางกลของทองเหลือง CuZn40Pb2 ที่อุณหภูมิ 650°C และใช้ความเร็วในการกดคงที่ที่ 55 m/s ได้ค่า $E = 85,437 \text{ MPa}$ ในช่วง Linear Elastic และความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นจริงและความเครียดจริงในช่วง Plastic เท่ากับ $\bar{\sigma} = 207.348\bar{\epsilon}_p^{0.03837} \text{ MPa}$
3. การสร้างแบบจำลอง FEM ของการทวบขึ้นรูปชิ้นงาน ฝาประตุน้ำ (VC50), ลื่นประตุน้ำ (GT50) และ ฝาขันมาตรวัดน้ำ (HC15) เนื่องจากแบบจำลองมีรูปร่างสมมาตรกันจึงได้สร้างแบบจำลองเพียง 1/4 และ 1/2 ส่วน เพื่อลดจำนวนของเอลิเมนต์และเวลาในการประมวลผล โดย

แบบจำลอง FEM ของ Billet ได้กำหนดสมบัติของเอลิเมนต์ให้เป็น Deformable body และ Mesh เป็นแบบ Tetrahedron 4 nodes (Four-Node Tetrahedron Element) เพื่อสะดวกสำหรับการ Adaptive mesh เมื่อเอลิเมนต์มีการเสียรูปมาก พื้นผิวของแม่พิมพ์กำหนดให้เป็น Rigid body และกำหนด Boundary condition ให้มีการ contact ระหว่าง ผิวของชิ้นงานและของแม่พิมพ์ สมบัติของเอลิเมนต์ของชิ้นงานทองเหลือง CuZn40Pb2 ที่อุณหภูมิ 650°C ได้กำหนดเป็นแบบ Isotropic แบบไม่เชิงเส้น (หรือ Non-Linear) โดยประมาณความสัมพันธ์ของความเค้นจริงและความเครียดจริงเป็นแบบ Elastic – Plastic

4. ผลการจำลอง FEA การกดชิ้นงานทองเหลืองรูปทรงกระบอกตันแบบ 2 มิติ เมื่อเปรียบเทียบข้อมูลแรงและระยะที่กดที่ได้จากการทดสอบแรงกดของทองเหลือง CuZn40Pb2 ที่อุณหภูมิ 650°C ที่ความเร็วในการกดเท่ากับ 55 mm/s พบค่าเฉลี่ยของ Error เท่ากับ -5.04% นอกจากนี้ผลจาก FEA แสดงความเค้นสูงสุดซึ่งเกิดขึ้นที่มุมหรือขอบตามแนวเส้นรอบวงของผิวบนและผิวล่างของชิ้นทดสอบ มีค่าเท่ากับ 207.46 MPa ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความเค้นจริงสูงสุดที่ได้จากการทดสอบแรงกด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 204.35 MPa โดยมี Error เท่ากับ -1.52%

5. ผลการจำลอง FEA การกดชิ้นงานทองเหลืองรูปทรงกระบอกตันแบบ 3 มิติ เมื่อเปรียบเทียบข้อมูลแรงและระยะที่กดที่ได้จากการทดสอบแรงกดของทองเหลือง CuZn40Pb2 ที่อุณหภูมิ 650°C ที่ความเร็วในการกดเท่ากับ 55 mm/s พบค่าเฉลี่ยของ Error เท่ากับ -4.6% นอกจากนี้ผลจาก FEA แสดงความเค้นสูงสุดซึ่งเกิดขึ้นที่มุมหรือขอบตามแนวเส้นรอบวงของผิวบนและผิวล่างของชิ้นทดสอบ มีค่าเท่ากับ 205.028 MPa ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความเค้นจริงสูงสุดที่ได้จากการทดสอบแรงกด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 204.35 MPa โดยมีเป็น Error เท่ากับ -0.33% แบบจำลอง 3 มิติ ให้ผลที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองจริงได้ดีกว่าแบบ 2 มิติ แต่แบบจำลอง 3 มิติ มีจำนวนเอลิเมนต์ที่มากกว่า จึงใช้เวลาในการประมวลผลมากกว่า

6. ผลการจำลอง FEA การทดสอบ Ring compression test ได้ใช้ค่า Interface friction factor (m) เท่ากับ 0.5 (ค่าที่ได้จากการทดสอบ Ring Compression Test) พบว่าผลที่ได้สอดคล้องกันกับการทดสอบจริง โดยสังเกตเปรียบเทียบความเค้นสูงสุดและการเสียรูปของเอลิเมนต์ ต่างเกิดขึ้นที่มุมหรือขอบตามแนวเส้นรอบวงของรูใน กับการเกิดรอยยับบริเวณขอบของเส้นรอบวงของรู เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางรูในจากการทดสอบ มีขนาด 6.45 mm. เมื่อเทียบกับแบบจำลอง FEA มีค่า 6.408 mm. หรือมีความคลาดเคลื่อนประมาณ 0.85%

7. ผลการจำลอง FEA การทบขึ้นรูป 3 ชิ้นงาน 3 รูปแบบ พบว่ารูปร่างของชิ้นงานที่ได้จาก FEA มีความใกล้เคียงกับชิ้นงานที่ได้จากการทดลองขึ้นรูปโดยเฉลี่ยอยู่ในช่วง 1.17% ถึง 7.18%

8. ผลการสแกนพื้นผิวของชิ้นงานขึ้นรูป (GT50) เพื่อวัดเปรียบเทียบความหนาครีบกจากพื้นผิวชิ้นงานจริงกับผล FEA พบว่าทั้ง 5 ตำแหน่งที่วัดมีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 16.903% โดยค่าความคลาดเคลื่อนมีสาเหตุจากขนาดของเอลิเมนต์บริเวณครีบกไม่ละเอียดพอ และจำนวนชิ้นงานในการสแกนเพียงหนึ่งชิ้น เนื่องจากค่าใช้จ่ายในการสแกนต่อหนึ่งชิ้น มีราคาสูง

9. จากผล FEA เพื่อหาขนาด Billet ของชิ้นงานขึ้นรูป (GT50) เพื่อลดน้ำหนักวัสดุ พบว่ามีผลสอดคล้องกับการทดสอบทบขึ้นรูปจริง โดยขนาด Billet ที่น้ำหนัก 1.15 เท่า สามารถลดน้ำหนักลงได้ถึง 14.907 กรัมต่อชิ้น หรือ 5.57% ต่อชิ้น เมื่อเปรียบเทียบกับปัจจุบันที่ทำการผลิตโดยใช้น้ำหนัก 267.64 กรัม

10. งานวิจัยนี้ได้ดำเนินการโดยเน้นการประยุกต์ใช้เทคโนโลยี CAD/CAE โดยใช้ซอฟต์แวร์ FEA พื้นฐานทั่วไป (ที่ไม่ใช่ซอฟต์แวร์เฉพาะสำหรับงานทบขึ้นรูป) ที่มีราคาเหมาะสมและมีความเป็นไปได้ที่ผู้ประกอบการขนาดกลางและเล็กทั่วไปในประเทศสามารถจัดซื้อและนำไปใช้งานได้เองอย่างมีประสิทธิภาพ ผลที่ได้จากการจำลองการทบขึ้นรูปจากงานวิจัยนี้ ทำให้ผู้ประกอบการไม่จำเป็นต้องลงทุนซื้อซอฟต์แวร์เฉพาะงานเพิ่ม จึงเป็นการลดต้นทุนในการวิจัยและพัฒนาของผู้ประกอบการ และซอฟต์แวร์ FEA พื้นฐานนี้ยังสามารถนำไปใช้วิเคราะห์อื่นๆ ได้หลากหลาย เช่น วิเคราะห์ความแข็งแรงของแม่พิมพ์และผลิตภัณฑ์ที่ออกแบบ

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

คมสันต์ งามขำ. 2550. ชีตจำกัดการขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิต SUS 304 จากการเปลี่ยน
ความหนา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.

ชาญ ถนัดงาน. 2547. เทคโนโลยีการขึ้นรูปโลหะ พื้นฐานและการขึ้นรูปโลหะแผ่น. พิมพ์ครั้งที่ 1
สำนักพิมพ์ ศูนย์ผลิตตำราเรียนสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, กรุงเทพฯ.

ชาญรินทร์ สาตราภัย. 2550. การหดตัวของทองเหลือง CuZn40Pb2 ภายหลังการชุบขึ้นรูปร้อน.
วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

เดช พุทธเจริญทอง, 2541. การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์, ศูนย์สื่อเสริมกรุงเทพ, กรุงเทพฯ.

_____, 2548. ทฤษฎีพลาสติกซิตีและการเปลี่ยนรูปถาวร, พิมพ์ครั้งที่ 1, ศูนย์สื่อเสริมกรุงเทพ,
กรุงเทพฯ.

รุ่งโรจน์ ตรงธรรมกิจ. 2544. จำลองการดัดขึ้นรูปขาคอนเนคเตอร์ในงานพรีซิชชันสแตมพิงโดยวิธี
ไฟไนต์เอลิเมนต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

สัจจาทิพย์ ทศนียพันธุ์. 2545ก. การจัดระบบ CAD/CAM/CAE ให้เหมาะสมกับธุรกิจ ตอนที่ 1.
ไฟฟ้าและอุตสาหกรรม 9 (1): 106-111.

_____. 2545ข. การจัดระบบ CAD/CAM/CAE ให้เหมาะสมกับธุรกิจ ตอนที่ 2. ไฟฟ้าและ
อุตสาหกรรม 9 (2): 73-79.

_____. 2545ค. โซลิตโมเดล เทคโนโลยีที่แท้จริงสำหรับการออกแบบ. วิศวกรรม สาร 55 (7):
37-43.

- Altan T., N. Gracious and S. Gangshu. 2002. **Cold and Hot Forging: Fundamentals And Applications.** ASM. Ohio.
- Behrens, B.A. 2008. Finite element analysis of die wear in hot forging processes. **Journal of Manufacturing Technology.** 57 : 305-308.
- Cheng, L. and Z. Liwen. 2008. 3D FEM simulation of the multi-stage forging process of a gas turbine compressor blade. **Journal of Materials Processing Technology.** 198: 463-470.
- Dieter, G.E. 1988. **Mechanical Metallurgy.** McGraw-Hill, New York.
- Dowling, N.E. 1999. **Mechanical Behavior of Materials.** Prentice Hall, New Jersey.
- He, Y., Z. Mei and L. Yuli. 2002. A 3D rigid–viscoplastic FEM simulation of the isothermal precision forging of a blade with a damper platform. **Journal of Materials Processing Technology.** 122: 45-50.
- Jang-Ping W.B., L. Fu-Lung, H. Bing-Chuan and Y. Chang-Chia. 2008. A new experimental approach to evaluate friction in ring test. **journal of materials processing technology.** 197: 68-76.
- Johnson, W. and P.B. Mellor, 1973, **Engineering Plasticity,** Ellis Horwood, London.
- Kobayashi, S., S.I. Oh and T. Altan. 1989. **Metal Forming and The Finite-Element Method.** Oxford University press, Oxford.
- Lin, H. and H. Xinghui. 2008. 3D FE modeling simulation of cold rotary forging of a cylinder work piece. **Journal of Materials and Design.**

Mamalis, A.G., D.E. Manolakos and A.K. Baldoukas. 1996. Simulation of the precision forging of bevel gears using implicit and explicit FE techniques. **Journal of Materials Processing Technology**. 57:164-171.

MSC.Software Corporation. 2003. **MSC.Marc Theoy and User Information**. MSC. Software Corporation, USA.

Muammer, K.A., V.A. Victor, W.B. Thomas and T. Altan. 1996. Application of the finite element method to predict material flow and defects in the semi-solid forging of A356 aluminum alloys. **Journal of Materials Processing Technology**. 59: 106-112.

Rowe, G.W., C.E.N. Sturgess, P. Hartley and I. Pillinger. 1991. **Finite-Element Plasticity and Metal Forming Analysis**, Cambridge University Press, New York.

Vazquez, V. and T. Altan. 2000. Die design for ashless forging of complex parts. **Journal of Materials Processing Technology**. 98: 81-89.

William, F.H. and R.M. Caddell. 2007. **Metal forming mechanics and metallurgy**. Cambridge University Press, New York.

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล

นายกิติกร คำมูล

วัน เดือน ปี ที่เกิด

วันที่ 17 ตุลาคม 2525

สถานที่เกิด

อำเภอแม่สาย จังหวัดเชียงราย

ประวัติการศึกษา

ประถมศึกษาจากโรงเรียนครุฑราษฎร์วิทยา

มัธยมศึกษาตอนต้นจากโรงเรียนแม่สายประสิทธิ์ศาสตร์

ประกาศนียบัตรวิชาชีพ สาขาวิชาช่างยนต์ จาก

วิทยาลัยเทคนิคเชียงราย

วศ.บ. (วิศวกรรมการผลิต) สถาบันเทคโนโลยี

พระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน

วิศวกรออกแบบเครื่องกล แผนกวิจัยและพัฒนา

สถานที่ทำงานปัจจุบัน

บริษัท อาซาฮี-ไทย อัลลอย จำกัด พ.ศ. 2549 - ปัจจุบัน

ทุนการศึกษาที่ได้รับ

สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) (พ.ศ. 2552-2555)