



การลดปัญหาตะกร้าวในเหล็กคาร์บอนต่ำ 12L14 จากการขึ้นรูปด้วยวิธีขึ้นรูป

นายชาญณรงค์ ขาแท่น

โครงการวิจัยอุตสาหกรรมนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

พ.ศ. 2549

การลดปัญหาแตกร้าวในเหล็กคาร์บอนต่ำกลุ่ม 12L14 จากการขึ้นรูปด้วยวิธีตีขึ้นรูป

นายชาญณรงค์ ขาแท่น ค.อ.บ. (วิศวกรรมเครื่องกล)

โครงการวิจัยอุตสาหกรรมนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
พ.ศ. 2549

คณะกรรมการสอบโครงการวิจัยอุตสาหกรรม

..... ประธานกรรมการโครงการวิจัยอุตสาหกรรม
(ดร.พงษ์ศักดิ์ ถึงสุข)

..... กรรมการ
(รศ.ดร.เชาวลิต ลิ้มมณีวิจิตร)

..... กรรมการ
(ดร.ไพฑูรย์ ช่างทอง)

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

การลดปัญหาแตกร้าวในเหล็กคาร์บอนแห่งกลม 12L14 จากการขึ้นรูปด้วยวิธีขึ้นรูป

นายชาญณรงค์ ขาแท่น ค.อ.บ. (วิศวกรรมเครื่องกล)

โครงการวิจัยอุตสาหกรรมนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
พ.ศ. 2549

คณะกรรมการสอบโครงการวิจัยอุตสาหกรรม

..... ประธานกรรมการโครงการวิจัยอุตสาหกรรม
(ดร.พงษ์ศักดิ์ ถึงสุข)

..... กรรมการ
(รศ.ดร.เชาวลิต ลิ้มมณีวิจิตร)

..... กรรมการ
(ดร.ไพฑูรย์ ช่างทอง)

ณ เมืองสมุทร
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

หัวข้อโครงการวิจัยอุตสาหกรรม	การลดปัญหาแตกร้าวในเหล็กคาร์บอนแท่งกลม 12L14 จากการขึ้นรูปด้วยวิธีตีขึ้นรูป
หน่วยกิต	6
ผู้เขียน	นายชาญณรงค์ ชาแท่น
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.พงษ์ศักดิ์ ถึงสุข
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโลหการ
ภาควิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ
คณะ	วิศวกรรมศาสตร์
พ.ศ.	2549

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อลดปัญหาแตกร้าวที่เกิดขึ้นจากกระบวนการตีขึ้นรูปของเหล็กคาร์บอนแท่งกลม AISI 12L14 โดยจำลองกระบวนการตีขึ้นรูปด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อวิเคราะห์อิทธิพลของสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่มีผลต่อความเค้นหลักสูงสุด ซึ่งเป็นค่าสำหรับวิเคราะห์การแตกร้าวของชิ้นงาน โดยการจำลองได้สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างรัศมีของชิ้นงานกับสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน จากการวิเคราะห์แบบจำลองชิ้นงาน โดยใช้รัศมีของชิ้นงานจริงเท่ากับ 1.547 มิลลิเมตร พบว่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเท่ากับ 0.55 ดังนั้นสามารถบอกได้ว่าการตีขึ้นรูปชิ้นงานจริงมีค่าเท่ากับชิ้นงานจำลอง และจากการจำลองชิ้นงานที่สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานดังกล่าวพบว่า ความเค้นหลักสูงสุดที่เกิดขึ้นบริเวณขอบชิ้นงานหลังจากการขึ้นรูป มีค่าเท่ากับ 860 เมกะปาสคาล ซึ่งมีค่ามากกว่าความเค้นที่จุดวิกฤตของชิ้นงานเท่ากับ 540 เมกะปาสคาล และสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเท่ากับ 0.42 เมื่อเปรียบเทียบตำแหน่งรอยแตกร้าวของชิ้นงานจริงกับชิ้นงานจำลอง พบว่าเป็นบริเวณใกล้เคียงกัน จึงสามารถสรุปได้ว่าชิ้นงานจำลองมีแนวโน้มของการแตกร้าว ดังนั้นจึงทำการทดลองลดค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของแบบจำลองลง 3 ระดับ ได้แก่ 0.08 , 0.095 และ 0.13 ตามลำดับ พบว่าความเค้นหลักสูงสุดที่เกิดขึ้น มีค่าลดลงตามการลดค่าของสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน และสามารถสรุปได้ว่าการลดสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน ในกระบวนการตีขึ้นรูปนั้น มีผลทำให้การแตกร้าวที่เกิดขึ้นในการตีขึ้นรูปของเหล็กคาร์บอนแท่งกลม AISI 12L14 ลดลง และสามารถลดปัญหาการเกิดรอยแตกร้าวในชิ้นงานตีขึ้นรูป ด้วยการใช้สารหล่อลื่นได้ ซึ่งผลจากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ ยังสามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานที่สำคัญประกอบการพิจารณาเลือกสภาวะที่เหมาะสม ในการผลิตชิ้นงานโดยปราศจากรอยแตกร้าว และใช้เป็นข้อมูล

พื้นฐานในการพัฒนาการออกแบบ และควบคุมกระบวนการผลิตสำหรับกระบวนการตีขึ้นรูปต่อไป
ในอนาคต

คำสำคัญ : การวิเคราะห์วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ / กระบวนการตีขึ้นรูป / การแตกร้าว /
สัมประสิทธิ์ความเสียหาย / ความเค้นหลักสูงสุด

Special Research Studies Title	Decrease Problem of Cracking in Carbon Steel Wire Rods 12L14 by Forging Processes
Special Research Studies Credits	6
Candidate	Mr. Channarong Chathan
Special Research Studies Advisor	Dr. Pongsak Tuengsook
Program	Master of Engineering
Field of Study	Metallurgical Engineering
Department	Production Engineering
Faculty	Engineering
B.E.	2549

Abstract

The objective of the special research studies is to decrease problem of crack in the carbon steel wire rods AISI 12L14 during forging process. Therefore the simulation of the forging processes by the finite element method for analysis the influential of the friction coefficient which affected to the maximum principal stress, which for the analysis could generate crack. The simulated of the forging process for make the relationship diagram of the radian of the work piece and the friction coefficient. From the analysis the radian of the work piece equal 1.547 millimeters found that the friction coefficient is 0.55. Therefore the forging process of the work piece has the volume of work piece equal the model. And from simulate at the friction coefficient as mentioned found that the maximum principal stress at edge of the model after deformation has value is 860 megapascal Which more than the critical stress of the work piece at 540 megapascal and the friction coefficient equal 0.42. When compared the position of crack of the work piece and the model found that the position in the vicinity. So, the conclusion is the model could generate crack. Therefore the simulated of friction coefficient reduce of 3 factor that's 0.08 , 0.095 and 0.13 respectively. The result found that the maximum principal stress decreased following the friction coefficient reduced. Therefore the conclusion is that the reduced of the friction coefficient during the forging process, it can decreased could generate crack of the carbon steel wire rods AISI 12L14. From the study, it can decreased problem of crack in the work piece during forging process by used the lubricant for reduced the friction during forging process. Therefore the analysis of the data base of the finite

element method for considers selective the condition of the production without crack and part design development continues.

Keywords : Finite Element Method / Forging Deformation / Crack / Friction Coefficient /
Maximum Principal Stress

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำโครงการวิจัยอุตสาหกรรมนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ดร.พงษ์ศักดิ์ ถึงสุข ซึ่งเป็นอาจารย์ควบคุมการทำวิจัยที่กรุณาให้แนวคิดคำแนะนำ ตลอดจนแก้ไขปัญหาดังต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้ และเป็นผู้ที่ให้แนวคิดในการแก้ปัญหาอย่างเป็นระบบ และแนวคิดในการแก้ปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในระหว่างดำเนินงาน รวมไปถึงคณะกรรมการสอบทุกท่าน ประกอบด้วย และคณาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการทุกคนที่ให้คำแนะนำต่าง ๆ ให้แก่ผู้วิจัย และขอขอบคุณสถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทยที่ได้อนุเคราะห์ในการทำวิจัยนี้ พร้อมกับบุคคลที่เป็นกำลังใจให้กับข้าพเจ้ามาโดยตลอด ซึ่งมีส่วนผลักดันข้าพเจ้าให้ประสบผลสำเร็จ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง บิดาและมารดาของข้าพเจ้าที่เป็นผู้อุปการะ และเพื่อน ๆ ที่คอยให้ความสนับสนุน และให้คำปรึกษาในการทำโครงการวิจัยอุตสาหกรรมนี้

ความสำเร็จที่เกิดจากการศึกษาโครงการเฉพาะเรื่องนี้ ย่อมเป็นผลมาจากความกรุณาของท่านดังกล่าวข้างต้น ผู้วิจัยขอขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	๗
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	๘
กิตติกรรมประกาศ	๙
สารบัญ	๕
รายการตาราง	๑๑
รายการรูปประกอบ	๑๒
รายการสัญลักษณ์	๑๓
ประมวลศัพท์และคำย่อ	๑๔

บทที่

1. บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย	3
2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 กรรณวิธีการดีจิ้นรูป	4
2.2 กลศาสตร์การแตกหัก	8
2.3 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	16
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	28
3. ขั้นตอนดำเนินงานวิจัย	29
3.1 ศึกษาการสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์	29
3.2 ศึกษาการสร้างแบบจำลอง	29
3.3 หาลักษณะแบบจำลองที่เหมาะสม	33
3.4 การใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์และแสดงผล	34

3.5 การสรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	36
4. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	37
4.1 ผลการตรวจสอบประวัติการขึ้นรูปของวัสดุ AISI 12L14	37
4.2 ผลการหาขนาดของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยโปรแกรมจำลองเหตุการณ์ ณ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่าง ๆ	38
4.3 ผลการหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของชิ้นงานผลิตจริง	40
4.4 ผลการจำลองเหตุการณ์กระบวนการขึ้นรูปการตีขึ้นรูปด้วยโปรแกรม Marc2003	41
4.5 หาจุดต่อที่รับภาระความเค้นหลักสูงสุด	43
4.6 เปรียบเทียบความเค้นหลักสูงสุดของชิ้นงานจำลองกับชิ้นงานจริง	44
4.7 ผลการเปรียบเทียบความเค้นหลักสูงสุดในขอบเขตเงื่อนไขสัมประสิทธิ์ แรงเสียดทานต่างกัน	45
4.8 ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน กับความเค้นหลักสูงสุด	46
4.9 สรุปผลการหาความสัมพันธ์ระหว่างรูปร่างของชิ้นงาน ความเค้นหลักสูงสุด และสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน	47
5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	49
5.1 สรุปผล	49
5.2 ข้อเสนอแนะ	50
เอกสารอ้างอิง	51
ภาคผนวก	
ก การขึ้นรูปชิ้นงาน	53
ข สมบัติทางกลของวัสดุ	57
ค การป้อนค่าวัสดุ	63
ง ประมวลผลการทดลอง	67
ประวัติผู้วิจัย	72

รายการตาราง

ตาราง	หน้า
3.1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กคาร์บอนแท่งกลม AISI 12L14	30
3.2 สมบัติทางกลของเหล็กคาร์บอนแท่งกลม 12L14	30
4.1 เปรียบเทียบขนาดรูปร่างของชิ้นงานทดลองที่สัมผัสประสิทธิผลแรงเสียดทานต่างๆ	39
4.2 ตารางเปรียบเทียบการจำลองเหตุการณ์ขึ้นรูปกับค่าที่ได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเสียดทานกับขนาดของชิ้นงานจริง	40
ข.1 แสดงค่าทางเคมีของวัสดุ AISI 12L14	58

รายการรูปประกอบ

รูป	หน้า
2.1 แสดงกลไกของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของชิ้นงานกด	7
2.2 แสดงบริเวณการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง	7
2.3 แสดงการเกิดบริเวณต่าง ๆ ของการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง	7
2.4 ลักษณะของชิ้นงานที่เกิดการแตกหักแบบเปราะของวัสดุ	9
2.5 แสดงขั้นตอนการขยายตัวของโพรง (Void) ที่อยู่ภายในเนื้อของวัตถุ	11
2.6 แสดงลักษณะต่าง ๆ ของการเกิดการแตกของชิ้นงานขึ้นรูป	13
2.7 บล็อกไดอะแกรมวิธีการหาค่าวิกฤติของการแตกหักที่มาจากการทำการทดลองกับการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	15
2.8 ตัวอย่างชนิดของเอลิเมนต์	18
2.9 กราฟแสดงการเปรียบเทียบ Engineering Stress-Strain Curve กับ True Stress-Strain Curve	21
2.10 กราฟแสดงการหาสมการเส้นตรง เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ในสมการยกกำลัง	22
2.11 การวิเคราะห์ชิ้นงานที่มีลักษณะสมมาตร	23
2.12 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของสารหล่อลื่น 3 ชนิด	28
2.13 แสดงผลการเปรียบเทียบแรงที่เกิดจากการตีขึ้นรูปที่แรงเสียดทานต่าง ๆ	28
3.1 ชิ้นงานสามมิติโปรแกรม MSC.Marc2003	31
3.2 การวิเคราะห์โครงตาข่ายของแบบจำลอง	32
3.3 แสดงโครงตาข่ายเอลิเมนต์แบบสี่เหลี่ยม	33
3.4 แสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของสารหล่อลื่น 3 ชนิด	35
3.5 แสดงการป้อนค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานในชิ้นงานจำลอง	36
4.1 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทดลอง AISI 12L14	38
4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกับรัศมีของชิ้นงาน	40
4.3 แสดงชิ้นงานจำลองด้วยโปรแกรม MSC.Marc 2003 ที่สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเท่ากับ 0.55	41
4.4 แสดงทิศทางของความเค้นหลักสูงสุดที่กระทำต่อจุดต่อ	42
4.5 แสดงเปรียบเทียบชิ้นงานจริงกับชิ้นงานจำลองด้วยโปรแกรม MSC.Marc2003	42
4.6 กราฟแสดงความเค้นหลักสูงสุด (Principal Stress Max) ของแต่ละจุดต่อบริเวณผิวด้านนอกแนวตัดส่วนกลางชิ้นงาน	43

4.7	แสดงตำแหน่งของจุดต่อ 5116 , 5118 และ 5120 ในชิ้นงานจำลอง	43
4.8	กราฟแสดงความเค้นหลักสูงสุด (Principal Stress Max) ของจุดต่อ 5118 ที่สัมผัสประสิทธิ แรงเสียดทานเท่ากับ 0.55	44
4.9	กราฟเปรียบเทียบความเค้นระหว่างชิ้นงานจำลองที่สัมผัสประสิทธิแรงเสียดทาน เท่ากับ 0.55 กับชิ้นงานจริง	44
4.10	กราฟเปรียบเทียบความเค้นหลักสูงสุดที่สัมผัสประสิทธิแรงเสียดทานต่าง ๆ	45
4.11	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมผัสประสิทธิแรงเสียดทานกับความเค้นหลักสูงสุด	46
4.12	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมผัสประสิทธิแรงเสียดทาน รัศมีของชิ้นงานขึ้นรูป และความเค้นหลักสูงสุด	47
ก.1	เครื่อง Passing ขนาด 80 ตัน	54
ก.2	Punch-Die ของชิ้นงานทดลอง	54
ก.3	Punch และ Die ของชิ้นงานทดลองในขั้นตอนการขึ้นรูปที่ 1	55
ก.4	แสดงชิ้นงานในขั้นตอนการผลิตต่าง ๆ	56
ข.1	แสดงชิ้นงานทดสอบแรงดึง	59
ข.2	แสดงกราฟค่าความเค้นและความเครียดของวัสดุ AISI 12L14	59
ข.3	กราฟแสดงความเค้นจริงและความเครียดจริง	61
ข.4	กราฟแสดงค่า Log σ และค่า Log ϵ	61
ค.1	แสดงการป้อนค่า K และ n ในโปรแกรม MSC.Marc2003	64
ค.2	แสดงการป้อนค่าสมบัติทางกลของวัสดุในโปรแกรม MSC.Marc2003	64
ค.3	แสดงการป้อนกราฟความเค้นและความเครียดของวัสดุในโปรแกรม MSC.Marc2003	65
ค.4	แสดงการป้อนค่าสัมผัสประสิทธิแรงเสียดทานของวัสดุในโปรแกรม MSC.Marc2003	65
ค.5	แสดงการป้อนค่าสัมผัสประสิทธิแรงเสียดทานระหว่าง Die กับชิ้นงานทดลอง	66
ค.6	แสดงการคำนวณของโปรแกรม MSC.Marc2003	66
ง.1	เปรียบเทียบชิ้นงานจริงกับชิ้นงานจากการจำลองเหตุการณ์ด้วยโปรแกรม MSC.Marc2003 ที่สัมผัสประสิทธิแรงเสียดทาน 0.55	68
ง.2	แสดงความเค้นหลักสูงสุดที่สัมผัสประสิทธิแรงเสียดทาน 0.13	69
ง.3	แสดงความเค้นหลักสูงสุดที่สัมผัสประสิทธิแรงเสียดทาน 0.095	70
ง.4	แสดงความเค้นหลักสูงสุดที่สัมผัสประสิทธิแรงเสียดทาน 0.08	71

รายการสัญลักษณ์

a	=	ค่าคงที่
A_0	=	พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานเริ่มต้น
A_1	=	พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานหลังจากทำการขึ้นรูป
A_i	=	พื้นที่หน้าตัดใด ๆ
$[B_{ij}]$	=	เมทริกซ์ ขึ้นอยู่กับพิกัดหรือตำแหน่งของจุดต่อ
$\{d\}$	=	เมทริกซ์รวมของการกระจัด
$[D]$	=	เมทริกซ์ความเค้นและความเครียด
d_0	=	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในคอนเทนเนอร์
ds	=	พื้นที่บนเอลิเมนต์
$\{F\}$	=	แรงทั้งหมดที่กระทำบนเอลิเมนต์
$\{F\}$	=	เมทริกซ์รวมของแรงที่จุดต่อ
F_i	=	แรงดึงที่กระทำบนชิ้นทดสอบ
F_{id}	=	แรงในอุดมคติ
F_{FRS}	=	แรงจากการเสียดทานที่ผนังของคาย
F_{FRW}	=	แรงจากการเสียดทานที่ผนังของคอนเทนเนอร์
F_{Sh}	=	แรงจากความเค้นเฉือนในเนื้อวัสดุ
F_{tot}	=	แรงโดยรวมทั้งระบบ
K	=	ค่าสัมประสิทธิ์ความแข็งแรงของวัสดุ
$[K]$	=	สทียเฟนสมเมทริกซ์รวมของระบบ
L_1, L_2, L_3	=	ความยาวเดิม
$\Delta L_1, \Delta L_2, \Delta L_3$	=	ความยาวใด ๆ ที่เพิ่มขึ้น
n	=	ค่าตัวเลขยกกำลังหรือความเครียดแข็ง
$[N]$	=	ฟังก์ชันรูปร่าง
$\{P\}$	=	แรงภายนอกที่กระทำที่จุดต่อของเอลิเมนต์
$\{T\}$	=	โหนดที่กระจายหรือแรงดึงผิวบนพื้นที่ s ของเอลิเมนต์
$TiAl6V4$	=	วัสดุโลหะผสมไททานเนียมอัลลอย
W	=	พลังงานศักย์จากแรงภายนอก
W_b	=	งานเนื่องจากน้ำหนักของเอลิเมนต์
W_{id}	=	พลังงานในอุดมคติ
W_{FRS}	=	พลังงานจากการเสียดทานที่ผนังของคาย

W_{FRW}	=	พลังงานจากการเสียดทานที่ผนังของคอนเทนเนอร์
W_p	=	แรงที่กระทำเป็นจุด
W_s	=	งานเนื่องจากโหลกระจาย หรือแรงตึงผิว
W_{Sh}	=	พลังงานจากความเค้นเฉือนในเนื้อวัสดุ
W_{tot}	=	พลังงานรวมทั้งระบบ
U	=	พลังงานความเค้นและความเครียดภายในระบบ
V	=	ปริมาตรทั้งหมดของชิ้นงาน
$\tilde{\epsilon}$	=	สำหรับความเครียดจริง
$\mathcal{E}_p$	=	ค่าความเครียดพลาสติก
$\mathcal{E}_A$	=	อัตราส่วนลดลงของพื้นที่หน้าตัด
η	=	ค่าประสิทธิภาพในขบวนการอัดขึ้นรูป
σ_{fm}	=	ความเค้นเฉลี่ย
φ_{max}	=	เกรดในการอัดขึ้นรูป
$\{\phi\}$	=	ฟังก์ชันการกระจัดในรูปแบบของพิกัดรวม
Π	=	พลังงานรวมของระบบ
$\partial\Pi / \partial\{d\}$	=	การดิฟเฟอเรนเชียลของทุกการกระจัด

ประมวลศัพท์และคำย่อ

Anisotropy	=	คุณสมบัติทางกายภาพไม่เท่ากัน
Blanking	=	ขบวนการตัด
Boundary Condition	=	เงื่อนไขขอบ
Computer Aided Design (CAD)	=	การออกแบบโดยอาศัยคอมพิวเตอร์ช่วย
Castigliano's Theorem	=	ทฤษฎีของแคสติกลีโย
Center Burst, Chevron	=	การเกิดรอยแตกที่แกนกลางของชิ้นงาน
Cold Extrusion	=	ขบวนการอัดขึ้นรูปเย็น
Composite Material	=	วัสดุเชิงประกอบ
Compression Test	=	การทดสอบโดยการกด
Constitutive Relation	=	ความสัมพันธ์ ระหว่างความเค้นกับความเครียด ของวัสดุภายใต้แรงกระทำ
Constrain	=	เงื่อนไขบังคับ
Convergence	=	การบรรจบกันที่จุดหนึ่งหรือเส้นหนึ่ง
Damage	=	ความเสียหาย
Defects Formation	=	การเกิดความเสียหายหรือรอยแตก
Die	=	ดาย
Die Angle	=	มุมเอียงของดาย 2α
Dislocation	=	การเรียงตัวของผลึกที่ไม่สม่ำเสมอ
Dynamic	=	เกี่ยวกับการเคลื่อนที่
Elastic Region	=	บริเวณช่วงการยืดหยุ่น
Electro-Magnetic	=	แม่เหล็กไฟฟ้า
Engineering Stress-Strain Curve	=	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น และความเครียดเชิงวิศวกรรม
Finite Element Analysis (FEA)	=	การวิเคราะห์โดยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์
Finite Element Method (FEM)	=	วิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์
Fix	=	ขอบเขตแบบฟิกซ์ ดัดแน่น
Force or Flexibility Method	=	วิธีแรงหรือวิธียืดหยุ่น
Forging	=	ขบวนการขึ้นรูปด้วยการตีขึ้นรูป
Forming Limit Diagram (FLD)	=	ไดอะแกรมแสดงขอบเขตจำกัดในการแปรรูป
Fracture Criteria	=	เงื่อนไขการตัดสินใจในการเกิดความเสียหาย

Friction Coefficient	=	สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ผิวคายกับชิ้นงาน
Galerkin's Method	=	วิธีของกาเลอร์คิน
Gauss's Elimination Method	=	วิธีการกำจัดของเกาส์
Graph	=	แสดงแบบกราฟ
Graphic	=	แสดงแบบรูปภาพ
Heat Transfer	=	การถ่ายเทความร้อน
Hydrostatic Compression	=	สถานะความเค้นกดสูง
Hydrostatic Stress	=	ความเค้นกด
Hydrostatic Stress Criterion	=	ทฤษฎีสถานะของความเค้นกด
Inclusions	=	สิ่งปลอมปน
Isotropy	=	คุณสมบัติของวัสดุเท่ากันทุกทิศทาง
Iteration Method	=	วิธีการประมวลผลแบบซ้ำ ๆ
Large Deformation	=	การทำให้เปลี่ยนรูปมาก
Linearity	=	เป็นเส้นตรง
Maximum Principle Stress Criterion	=	ทฤษฎีความเค้นหลักสูงสุด
Microvoid	=	อนุภาควอยด์
Non-Linearity	=	ไม่เป็นเชิงเส้นตรง
Newton per millimeter square (N/mm ²)	=	นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร
Optimum Process Design	=	การออกแบบอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด
Parameters	=	ตัวแปรในทางสถิติ
Percent Area Reduction	=	อัตราส่วนลดลงของพื้นที่หน้าตัด
Percent Error	=	เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด
Pin	=	ขอบเขตแบบพิน
Power Law	=	สมการยกกำลัง
Principle of Minimum Potential Energy	=	หลักการของพลังงานศักย์ต่ำสุด
Principle of Virtual Work	=	หลักการของงานสมมุติ
Principle Stress Max	=	ความเค้นหลักสูงสุด
Process Parameters	=	ตัวแปรต่างๆในขบวนการ
Punch	=	พินซ์
Recrystallization	=	การจัดเรียงตัวของผลึกใหม่
Rigid	=	คุณสมบัติแข็ง
Safe Zone	=	บริเวณขอบเขตที่ปลอดภัยในการขึ้นรูป

Second Phase Particles	=	อนุภาคของวัสดุปลอมปน
Simulation	=	การทำแบบจำลอง
Slide	=	ขอบเขตแบบสไลด์
Static	=	ไม่มีการเคลื่อนที่
Steady State	=	สถานะเงื่อนไขคงที่
Strain Hardening	=	ความเครียดแข็งตกค้าง
Stress Relief	=	ความเค้นตกค้าง
Structural Mechanics	=	ปัญหาโครงสร้างเชิงกล
Superposition Method	=	วิธีซ้อนทับ
Support	=	จุดรองรับ
Symmetry	=	ขอบเขตแบบสมมาตร
Triangular	=	เอลิเมนต์แบบสามเหลี่ยม
True Stress-True Strain Curve	=	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นจริง และความเครียดจริง
Uni-Axial Tension Test	=	การทดสอบการดึงในแนวแกนเดียว
Variables	=	ผันแปรได้
Verify	=	การตรวจสอบ
Void Volume Fraction	=	อัตราส่วนของวอยด์ต่อปริมาตร
Von-Mises Stress	=	ความเค้นประสิทธิผล
Weighted Residuals Method	=	วิธีถ่วงน้ำหนักเศษตกค้าง
Work or Energy Method	=	วิธีงานหรือพลังงาน
Yielding	=	การคราก
Yielding Surface	=	บริเวณขอบเขตการคราก

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

จากปัจจุบันเทคโนโลยีการขึ้นรูปโลหะนั้น มีการขยายตัวอย่างรวดเร็ว อาทิเช่น การขึ้นรูปชิ้นส่วนยานยนต์ ชิ้นส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้า หรือแม้กระทั่งอุปกรณ์ในครัวเรือน ซึ่งในอนาคตมีแนวโน้มที่จะเติบโตอย่างต่อเนื่อง การพัฒนาเทคโนโลยีการขึ้นรูปให้สอดคล้องกับชิ้นงานที่มีความซับซ้อนมากขึ้น ความแข็งแรงสูงขึ้น ต้นทุนการผลิตที่ต่ำลง และใช้เวลาในการผลิตน้อยลง เพื่อให้ทันต่อความต้องการของผู้บริโภค โดยกรรมวิธีการขึ้นรูปโลหะนั้นมีมากมายหลายวิธี อาทิเช่น การตีขึ้นรูป การอัดขึ้นรูปหรือการดึงขึ้นรูป เป็นต้น ซึ่งการออกแบบชิ้นงานต่าง ๆ จะต้องมีความถูกต้องแม่นยำ และเลือกใช้วัสดุที่เหมาะสม อันนำไปสู่การความได้เปรียบในด้านการพัฒนาเทคโนโลยีการขึ้นรูป ในปัจจุบันที่มีคุณภาพสูงแต่ต้นทุนการผลิตต่ำ ซึ่งรวมถึงการลดปัญหาจากการผลิต เช่น การขึ้นรูปโลหะที่ผิดจากแบบทั้งขนาดและรูปร่างที่ไม่ตรงตามแบบ หรือปัญหาการแตกร้าวของวัสดุจากการขึ้นรูป ซึ่งปัญหาดังกล่าวมีผลกระทบต่อต้นทุน และเวลาในการผลิตที่มากขึ้นตามปริมาณของของเสียที่เกิดขึ้น

เพื่อความได้เปรียบทางเทคโนโลยี ทางผู้ออกแบบจึงได้มีการนำเอาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เข้ามาใช้ในการออกแบบขั้นตอนในการขึ้นรูปวัสดุ และแก้ไขปัญหาดังกล่าว ที่เกิดจากการผลิต โดยการจำลองปัญหาเพื่อทำนายเหตุการณ์ที่จะเกิดขึ้นก่อนการผลิตจริง โดยการใช้โปรแกรมจำลองเหตุการณ์นี้สามารถลดค่าใช้จ่ายในการทดสอบและรวดเร็วในการแก้ปัญหา เนื่องจากสามารถมองเห็นพฤติกรรม การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุได้ทันทีจากการจำลอง เพียงแต่เปลี่ยนแปลงค่าเงื่อนไขต่าง ๆ ของปัญหาที่จำลองจากโปรแกรม เช่น การเปลี่ยนแปลงวัสดุ รูปร่างชิ้นงาน ค่าสมบัติทางกลวัสดุ เป็นต้น ซึ่งโปรแกรมที่นิยมใช้ในปัจจุบันก็คือโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยมีความแม่นยำในการวิเคราะห์ ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้จำลองพฤติกรรมของวัสดุ เมื่อมีแรงกระทำทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ดังนั้นในการศึกษาปัญหาและแนวทางการแก้ไขการแตกร้าวของงานวิจัย อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างจากการขึ้นรูปด้วยการตีขึ้นรูป โดยใช้โปรแกรมแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ เพื่อจำลองเหตุการณ์การเปลี่ยนแปลงรูปร่างวัสดุและผลกระทบจากการขึ้นรูป และนำไปแก้ไขปัญหาดังกล่าวที่เกิดขึ้นจากการขึ้นรูปจริง ซึ่งเป็นการแก้ไขปัญหาที่รวดเร็วและเสียค่าใช้จ่ายน้อยกว่าการทดสอบจริง โดยการกำหนดค่าตัวแปรต่าง ๆ ให้ใกล้เคียงกับสถานะการผลิตชิ้นงานจริง

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาโปรแกรมแบบจำลองพฤติกรรม การเปลี่ยนแปลงรูปร่างจากการขึ้นรูปด้วยการตีขึ้นรูป
2. เพื่อศึกษาพฤติกรรม การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเหล็กคาร์บอนแท่งกลม 12L14 จากการขึ้นรูปด้วยการตีขึ้นรูป
3. เพื่อศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการแตกร้าวในเหล็กคาร์บอนแท่งกลม 12L14 ด้วยโปรแกรมจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์
4. เพื่อลดปัญหาการแตกร้าวจากการขึ้นรูปด้วยการตีขึ้นรูปของเหล็กคาร์บอนแท่งกลม 12L14

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาทำความเข้าใจเกี่ยวกับโปรแกรมจำลองพฤติกรรม การเปลี่ยนแปลงรูปร่างจากการขึ้นรูปด้วยการตีขึ้นรูป
2. ศึกษากระบวนการขึ้นรูปของเหล็กด้วยเครื่อง Pressing
3. ศึกษาการตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการแตกร้าวจากการขึ้นรูปด้วยการตีขึ้นรูป
4. นำโปรแกรมจำลองเข้ามาจำลองการขึ้นรูปของเหล็กคาร์บอนแท่งกลม 12L14 เพื่อหาค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่มีอิทธิพลต่อการแตกร้าว
5. ทดลองผลิตชิ้นงานโดยใช้ตัวแปรที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาข้อมูลเบื้องต้น
 - ศึกษาปัญหาการแตกร้าวของเหล็กคาร์บอนแท่งกลม 12L14
 - ศึกษาสาเหตุการแตกร้าวในเหล็กคาร์บอนแท่งกลม 12L14 จากการขึ้นรูปด้วยการตีขึ้นรูป
2. ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับอิทธิพลของการเกิดการแตกร้าวในเหล็กคาร์บอนแท่งกลมที่ขึ้นรูปด้วยการตีขึ้นรูป

3. วิเคราะห์ปัญหาและตั้งสมมติฐานของอิทธิพล ที่มีผลทำให้เกิดการแตกร้าวในเหล็กคาร์บอน
แท่งกลมที่ขึ้นรูปด้วยการตีขึ้นรูป
4. สร้างแบบจำลองของชิ้นงานโดยใช้โปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์ MSC.Marc
5. เปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองทางโปรแกรมกับการทดลองผลิตงานจริง
6. สรุปผลงานวิจัย

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

1. เพื่อเป็นพื้นฐานการวิเคราะห์ปัญหาในการขึ้นรูปโลหะ
2. เพื่อความเข้าใจในพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงรูปร่างจากการขึ้นรูปโลหะ
3. เพื่อเป็นการพัฒนาการใช้เทคโนโลยีในการวิเคราะห์ปัญหาในการขึ้นรูปโลหะ

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กรรมวิธีการตีขึ้นรูป

2.1.1 คำจำกัดความและกระบวนการขึ้นรูป

งานตีขึ้นรูปเป็นกระบวนการขึ้นรูป โดยการใช้แรงกดในแม่พิมพ์ขึ้นรูป โดยอาศัยการจำกัดช่องไหล ล้นของเนื้อโลหะ เพื่อให้เกิดมิติของรูปร่างชิ้นงานที่ต้องการ ซึ่งประกอบไปด้วยกระบวนการต่าง ๆ ที่รวมอยู่ในตัวดังนี้ [1]

1. การตีขึ้น การตีขึ้นเนื้อโลหะจะไหลไปในแนวตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของเครื่องมือออกไป ในทิศทางของครีบ ความสูงของชิ้นงานจะลดลง ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างไปตามต้องการ [1]
2. การตีแผ่ เมื่อชิ้นงานถูกตีขึ้นให้เนื้อวัสดุชิ้นงานติดกับผนังของเครื่องมือ เนื้อโลหะจะเริ่มแผ่ขยายออกไปทางครีบ ทำให้เกิดความฝืดสูงระหว่างชิ้นงานกับหลักแบบเครื่องมือ ซึ่งทำให้ต้องใช้แรงในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างสูง [1]
3. การตีขึ้นรูปสูง เป็นกระบวนการสุดท้ายของงานตีขึ้นรูป เนื้อโลหะจะไหลสวนทางกับการเคลื่อนที่ของเครื่องมือซึ่งมีทิศทางตั้งฉากกับครีบ ความสูงของชิ้นงานเริ่มเพิ่มขึ้น ซึ่งในช่วงนี้จะมีทั้งการตีแผ่ และการตีขึ้นรูปสูง [1]

2.1.2 ลักษณะและการใช้งาน

การตีขึ้นรูปจากเหล็กแผ่นปลายด้านหนึ่งของเหล็กเส้นจะถูกเผาให้ร้อน และนำไปตีขึ้นรูปในแม่พิมพ์ หลังจากตีขึ้นรูปเรียบร้อยแล้ว ชิ้นงานจะถูกตัดแยกจากเหล็กเส้น หลังจากนั้นชิ้นงานจึงถูกนำไปตัดครีบออก ข้อดี คือ จั๊งานได้ด้วยมือเปล่าโดยไม่ต้องใช้เครื่องมือ ใช้เวลาน้อย วางได้ตรงตำแหน่งที่ต้องการ ข้อเสียเปรียบ คือ เปอร์เซ็นต์การใช้เนื้อวัสดุต่ำ คือ มีเนื้อวัสดุสูญเสียสูง เหมาะสำหรับกับงานยาวที่มีน้ำหนักสองถึงสามกิโลกรัม [1]

การตีขึ้นรูปจากเหล็กก้อน วัสดุดิบจะถูกตัดด้วยเลื่อย หรือกรรไกรตามขนาดความโต หรือปริมาณที่ต้องการ การขึ้นรูปจะกระทำด้วยแรงกดตามแนวยาวของเส้นเม็ดเกรน ข้อดีของชิ้นงานสำเร็จ คือ จะได้ชิ้นงานที่มีแนวเส้นเม็ดเกรนขนานกับแนวเส้นขอบของชิ้นงานสำเร็จ ส่วนใหญ่จะมีรูปร่างกลมแบน [1]

การตีขึ้นรูปตามแนวขวาง คือ การขึ้นรูปโดยใช้แรงกดขวางกับเส้นเม็ดเกรน ตัวอย่างที่มองเห็นได้ชัด คือ การตีเพลาช้อเหวี่ยงซึ่งเริ่มต้นด้วยวัสดุเส้นหน้าตัดผืนผ้า ผ่านการตีขึ้นรูปหลายขั้นตอน จนเป็นเพลาช้อเหวี่ยง ช้อเลียเปรียบ คือ ต้องเผื่อเนื้อวัสดุตีไว้มาก [1]

การตีจากวัสดุดิบที่ตัดชอยเพื่อให้รูปร่างใกล้เคียง รูปร่างของวัสดุดิบจะถูกตัดชอย เพื่อให้ได้รูปร่างใกล้เคียง โดยแทบที่จะไม่มีเนื้อวัสดุดิบสูญเสีย หลังจากนั้นจะนำมาตีขึ้นหรือตัดเพื่อให้ได้รูปร่างที่ใกล้เคียงมากขึ้น และท้ายสุดจะถูกตีขึ้นรูปในแม่พิมพ์ [2] ข้อดี คือ เปอร์เซ็นต์สูญเสียเนื้อวัสดุต่ำ ปริมาตรวัสดุดิบแน่นอน คริบน้อย ใช้เวลาในการตีขึ้นรูปน้อย ทั้งนี้เนื่องจากการแผ่ขยายของเนื้อน้อยนั่นเอง ช้อเลีย คือ เส้นแนวเม็ดเกรนจะไม่เหมือนกับขึ้นที่สำเร็จด้วยการตีขึ้นรูปร้อนอย่างเป็นลำดับขั้น ดังนั้นการตีด้วยวิธีนี้ จึงเหมาะกับชิ้นส่วนที่รับแรงไม่สูงนัก เช่น การตีมีด ตีประแจ เป็นต้น [1]

2.1.3 การเปรียบเทียบงานตีขึ้นรูปกับการผลิตด้วยกรรมวิธีอื่น ๆ

ข้อดี

1. ได้คุณสมบัติทางกลที่ดีกว่า
2. สามารถจัดโพรงภายใน (Porosity) ที่อยู่ในชิ้นงานออกได้เกือบหมด
3. มีความสามารถในการรับแรงสูง
4. เกรนที่หยาบจะถูกทำให้ละเอียดขึ้น
5. ลดการเสียเนื้อโลหะในการขึ้นรูป
6. ได้ผิวสำเร็จค่อนข้างดี มีความเที่ยงตรงสูง
7. ปราศจากข้อบกพร่องภายในวัสดุ (Internal Defect)
8. Productivity สูง
9. วัสดุดิบเกือบทุกชนิดสามารถตีขึ้นรูปได้ [1]

ข้อเสีย

1. ในงานตีขึ้นรูปร้อนความร้อนทำให้เกิด Oxidation หรือ Scaling
2. ต้นทุนของเครื่องมือและการดูแลสูง
3. รูปร่างที่ซับซ้อนมีรูปร่างภายในไม่สามารถขึ้นรูปได้
4. โดยทั่วไปราคาของงานที่ถูกตีขึ้นรูปจะราคาสูงกว่างานหล่อ [1]

2.1.4 การแบ่งกลุ่มของงานตีขึ้นรูปแบ่งตามอุณหภูมิในการทำงาน งานตีขึ้นรูปร้อนมีลักษณะดังนี้

1. ไม่เกิดสภาวะงานเครียดแข็ง
2. วัสดุที่มีความยืดหยุ่นสูง สามารถขึ้นรูปได้ง่าย
3. แรงที่ใช้ในการขึ้นรูปต่ำ
4. ผิวสำเร็จและมีมิติเที่ยงตรงต่ำ
5. การทำระบบอัตโนมัติยากกว่า [2]

งานตีขึ้นรูปเย็นมีลักษณะดังนี้

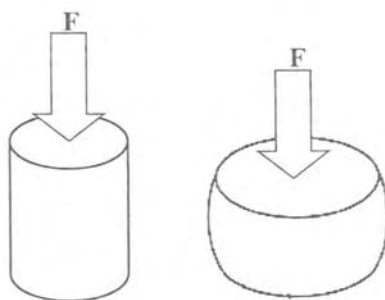
1. แรงที่ใช้ในการขึ้นรูปสูง
2. เกิดงานเครียดแข็งทำให้ค่าความแข็งแรงของชิ้นงานสูงขึ้น
3. ได้ผิวสำเร็จดี ลดขั้นตอนการตกแต่งผิว
4. ได้มิติชิ้นงานที่เที่ยงตรง ค่า Formability จำกัด ใช้ได้เฉพาะ Low and Medium Carbon Steel, Low Alloy, Copper and Light Metal [2]

2.1.5 แบ่งตามลักษณะของแม่พิมพ์

1. แม่พิมพ์ชนิดเปิด (Open Die Forging)
2. แม่พิมพ์ชนิดปิด (Close Die Forging) แบ่งออกเป็น
 - แม่พิมพ์ชนิดปิดแบบไม่มีครีป (Close Die Forging without Flash)
 - แม่พิมพ์ชนิดปิดแบบมีครีป (Close Die Forging with Flash)
3. แบ่งตามจำนวน Cavity มี Multi Impression Die [2]

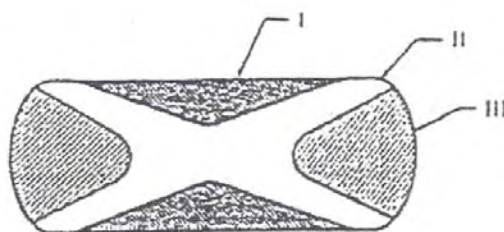
2.1.6 การตีขึ้นรูป

สำหรับในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะทำการวิจัยประเภทของการตีขึ้นรูปแบบตีขึ้นรูป (Upsetting) ในรูปแบบของการตีขึ้นรูปงานก้อน (Bulk Forging) ในลักษณะการตีขึ้นรูปแบบงานเย็น (Cold Forging) โดยใช้ประเภทลักษณะของแม่พิมพ์ที่ใช้เป็นแบบเปิด (Open Die Forging) โดยทำการจำลองเหตุการณ์ในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างขณะขึ้นงานถูกกด [2] หรือที่เรียกว่าการตีขึ้นรูป ซึ่งในอุตสาหกรรมที่มีผลิตภัณฑ์อยู่มากมาย และในกระบวนการผลิตก็จะมีปัญหาการแตกหักของชิ้นงานเกิดขึ้นมากมาย ซึ่งเป็นแรงจูงใจของผู้วิจัยที่จะทำการศึกษการแตกหักเหล่านั้น ซึ่งจะทำให้เราสามารถทำนายการแตกหักที่เกิดขึ้นได้ เพื่อป้องกันการเกิดการแตกหักของชิ้นงานที่ตีขึ้นรูป จะมีกลไกในการเปลี่ยนแปลงรูปขึ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 2.1 [2]



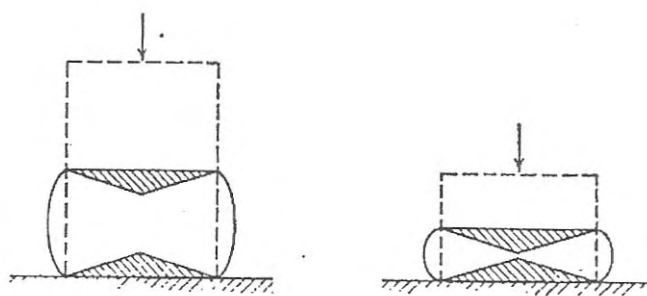
รูปที่ 2.1 แสดงกลไกของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของชิ้นงานกด [2]

สำหรับระหว่างการกดชิ้นงาน จะเกิดบริเวณการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของชิ้นงานบริเวณต่าง ๆ ดังต่อไปนี้ [2]



รูปที่ 2.2 แสดงบริเวณการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง [2]

1. ส่วนที่ I เป็นส่วนบนและล่างของชิ้นงานทดสอบที่สัมผัสกับแม่พิมพ์กด เรียกบริเวณนี้ว่า Dead Metal Zone (DMZ) [5]
2. ส่วนที่ II เป็นส่วนที่เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างมากที่สุด โดยจะมีบริเวณแถบรอยเฉือน (Shear Band) จะเกิดที่ผิวด้านนอกของ Dead Metal Zone ใกล้ผิวสัมผัส (Contact Surface) [5]
3. ส่วนที่ III เป็นส่วนนอกของชิ้นงานทดสอบ อยู่ใกล้ผิวด้านนอกของการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง อันเนื่องมาจากการกด ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นบริเวณการเกิดการป่องที่ผิว (Bulge Surface) ซึ่งเกิดจากความเสียดทาน [5]



รูปที่ 2.3 แสดงการเกิดบริเวณต่าง ๆ ของการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง [2]

2.2 กลศาสตร์การแตกหัก

การเสียหายของวัสดุนั้น สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ เสียหายโดยการคราก (Yield) และโดยการแตกหัก (Cleavage) การเสียหายสองประเภทนี้ ต่างกันโดยสิ้นเชิง การครากเป็นปรากฏการณ์ของ Plastic Deformation คือ โมเลกุลของวัสดุเกิดการลื่นไถล (Slip) ไปบนระนาบ (Slip Plane) เป็นการเปลี่ยนรูปร่างแต่ไม่เปลี่ยนขนาด ($\nu \leq 0.5$) การครากเป็นการวิบัติที่ค่อย ๆ เกิดขึ้น การสังเกตเห็นได้ล่วงหน้าเช่น แอ่น ยืดออก เกิดคอคอน [2] แต่การแตกหักเป็นปรากฏการณ์ที่โมเลกุลถูกดึงแยกออกจากกันในแนวตั้งฉากกับทิศทางแรง โดยแรงดึงนั้นเอาชนะ Cohesive Force ของวัสดุ เป็นการเสียหายของวัสดุอย่างกะทันหัน โดยเราสามารถแบ่งกระบวนการของการเกิดการแตกหักออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรก Crack Initiation : เป็นช่วงที่เกิดการขยายตัวของตำหนิหรือช่องว่าง (Void) ที่อยู่ในเนื้อวัสดุ และส่วนที่สอง Crack Propagation : เมื่อการขยายตัวของตำหนิหรือช่องว่างที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียงกัน จนทำให้ขยายตัวมาพบกันและเกิดการรวมกัน นอกจากนี้ ยังสามารถจำแนกการแตกหักเป็น 2 ประเภท คือ [2]

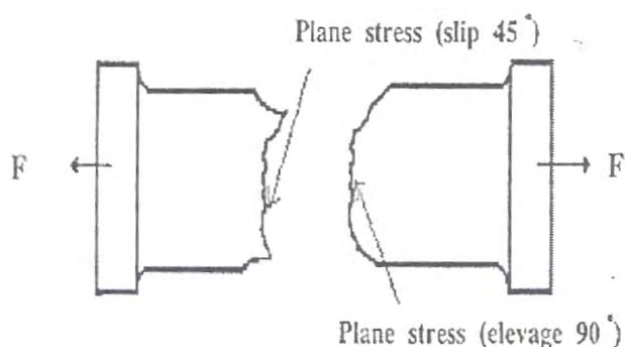
2.2.1 การแตกหักแบบเปราะ (Brittle Fracture)

การแตกหักที่มีลักษณะการเกิดการขยายตัวของรอยแตกอย่างรวดเร็ว และมีการเสียรูปแบบพลาสติกเกิดขึ้นน้อยมาก ๆ เนื่องจากการแตกหักที่เกิดขึ้นในงานขึ้นรูปโลหะ จะไม่ค่อยพบว่ามีลักษณะเป็นการแตกหักแบบเปราะมากนัก ดังนั้นในงานวิจัยฉบับนี้ จะกล่าวถึงเฉพาะเนื้อหาของการแตกหักแบบเหนียวเท่านั้น สำหรับการแตกหักแบบเปราะนั้น จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและขยายรอยแตกออกไปอย่างเฉียบพลัน เราจะไม่มีโอกาสสังเกตเห็นล่วงหน้าเลย เพราะความเสียหายยังอยู่ในช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้น ซึ่งจะใช้คุณสมบัติของ Plastic Deformation น้อยมาก ในการอธิบายปรากฏการณ์ของการแตกหักแบบเปราะ ดังนั้น การเกิดการแตกหักแบบเปราะ จึงอันตรายมากในโครงสร้างขนาดใหญ่ ๆ หรือเครื่องจักรกลใหญ่ ๆ ถ้าว่าแตกหักแบบเปราะ มิได้หมายความว่า เป็นการแตกหักที่เกิดขึ้นในวัสดุเปราะเท่านั้น [2] วัสดุเหนียวก็มีโอกาสเกิดการแตกหักแบบเปราะได้ ถ้าอยู่ในเงื่อนไขที่เหมาะสม เช่น ใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ มีอัตราการเกิดภาระสูงและรูปทรงหนา ปกติอุณหภูมิไม่เป็นปัญหาสำคัญนักสำหรับเมืองร้อนอย่างประเทศเรา แต่อัตราการเกิดภาระและรูปทรงจะสำคัญมากในการส่งเสริมให้เกิดการแตกหักแบบเปราะ โดยเฉพาะเครื่องจักรกลที่มีความเร็วรอบสูง หรือมีภาระกระแทกและมีรูปทรงหนาแน่นของการแตกหักเสียหายของโครงสร้างหรือเครื่องจักรกลขนาดใหญ่ ๆ ย่อมก่อให้เกิดอันตรายอย่างใหญ่หลวง และมักจะส่งผลกระทบต่อโครงสร้างข้างเคียง การที่วัสดุเสียหายโดยการครากนั้น เราสังเกตเห็นได้ง่าย ตัวอย่างเช่น เผลาที่ครากจะแอ่น เมื่อหมุนก็จะแกว่งทำให้สั่นสะเทือน เกิดเสียงดังให้เราารู้สึกถึงความผิดปกติ และแก้ไขได้ทัน แต่การเสียหายแบบแตกหักแบบเปราะนั้น จะเกิดขึ้นทันทีทันใดโดยไม่มีการเตือนล่วงหน้าเลย [5]

กลศาสตร์แตกหัก จะพยายามอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความเหนียว ความเค้น และขนาดข้อบกพร่องที่ยอมรับได้ ในการวิเคราะห์พฤติกรรมทางกลของแต่ละระบบ จำเป็นอย่างยิ่งที่นักวิเคราะห์หรือนักออกแบบ จะต้องทราบว่ามุมมองใด สามารถอธิบายข้อมูลแต่ละชุด หรือการวิบัติในแต่ละกรณีได้ดีที่สุด เพราะไม่ว่าจะเป็นแนวทางในระดับอะตอม ระดับโครงสร้างจุลภาค หรือระดับเนื้อต่อเนื่อง ล้วนแล้วแต่มีข้อจำกัดของตัวเอง [5]

โดยทั่วไปมีแนวทางหลักสองแนวทาง ที่แตกต่างกันอย่างชัดเจนในการวิเคราะห์การวิบัติ หรือการออกแบบ เพื่อหลีกเลี่ยงการวิบัติ คือ แนวทางของวิศวกรโครงสร้าง (Structure Engineer) และแนวทางของวิศวกรวัสดุ (Material Engineer) วิศวกรโครงสร้างมักจะเริ่มต้นด้วยการมีวัสดุและระดับภาระใช้งานอยู่ในมือ กระบวนการออกแบบจึงเป็นการหารายละเอียดของขนาด เพื่อให้แน่ใจว่าความเค้นที่เกิดขึ้นนั้นต่ำกว่าความเค้นครากของวัสดุ (Yield Stress) โดยสมมติว่าการผลิตนั้นจะสมบูรณ์ทุกอย่างไม่มีข้อบกพร่อง ส่วนการออกแบบสำหรับวิศวกรวัสดุ คือ การเลือกใช้วัสดุและระดับความเค้นที่เหมาะสมสำหรับอุณหภูมิใช้งาน และอัตราการเกิดภาระ เพื่อป้องกันการแตกหัก ซึ่งจะต้องคำนึงอยู่เสมอว่าความไม่ต่อเนื่องในโครงสร้างใหญ่ ๆ มีอยู่หรือเกิดขึ้นได้เอง ถ้ามีภาระ วัฏจักรหรือสภาวะแวดล้อมที่กัดกร่อน [5]

เมื่อชิ้นงานรับภาระจะมีทั้งความเค้นเฉือน (Shear Stress, τ) และความเค้นดัดฉาก (Normal Stress, σ) ซึ่งความเค้นทั้งสองประเภทนี้ ควบคุมการเกิดการวิบัติ 2 แบบ คือ การคราก (Yielding) และการแตกหัก (Cleavage) ซึ่งสะท้อนพฤติกรรมแบบ “เหนียว” และ “เปราะ” ของวัสดุตามลำดับ การวิบัติแบบเปราะเกิดในช่วงยืดหยุ่นก่อนการคราก [5] ดังนั้นการแตกหักแบบเปราะ จึงมีโอกาสดังกล่าวความเค้นต่ำกว่าความเค้นคราก ($\sigma < \sigma_{ys}$) ดังนั้นทฤษฎีการออกแบบใช้การครากเป็นเกณฑ์วิบัติ จึงไม่ปลอดภัยเพียงพอในการป้องกันการแตกหัก การวิบัติแตกหักแบบเปราะจะเกิดอย่างเฉียบพลัน การนำกลศาสตร์แตกหักมาใช้ออกแบบ ทำให้เราต้องคำนึงถึงสภาพจริงในเรื่องของวัสดุ สภาพแวดล้อมและการใช้งาน ขนาดรูปร่างของชิ้นงานและการผลิต [2]



รูปที่ 2.4 ลักษณะของชิ้นงานที่เกิดการแตกหักแบบเปราะของวัสดุ [2]

วัสดุเหนียวก็มีโอกาสเกิดการแตกหักแบบเปราะได้ ถ้าอยู่ในเงื่อนไขที่เหมาะสม ดังเช่นในสภาวะหรือสภาพแวดล้อม เช่น อุณหภูมิต่ำมาก ๆ หรืออัตราภาระที่เกิดขึ้นตอนใช้งาน เป็นต้น

นอกจากนั้นขนาดรูปร่างก็มีผลต่อสภาพความเค้นระนาบ หรือความเครียดระนาบ ซึ่งจะกำหนดความแข็งแรงใช้งาน และกำหนดการควบคุมคุณภาพของการผลิต ตลอดจนการลงทุนด้านการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย ปัจจัยเหล่านี้มีส่วนสัมพันธ์กันทั้งหมด ดังนั้นจึงถือว่ากลศาสตร์ของการแตกหักของวัสดุเป็นหัวใจของการออกแบบอย่างแท้จริง

2.2.2 การแตกหักแบบเหนียว (Ductile Fracture)

การแตกหักมีการเกิดเสีรูปร่างแบบพลาสติก อย่างเห็นได้ชัดก่อนหรือระหว่างเกิดการขยายตัวของรอยแตก และร่องรอยของการเสีรูปร่างแบบพลาสติก นั้นก็สามารถเห็นได้จากผิวของการแตกหัก [5]

การแตกหักแบบเหนียวในโลหะเกิดจากตำหนิหรือโพรงขนาดเล็กที่มีอยู่ในเนื้อโลหะ และเมื่อมีแรงมากระทำต่อวัตถุจะทำให้โพรงเหล่านี้ เกิดการขยายตัวจนเกิดความเสียหายขึ้น เราสามารถแบ่งการขยายตัวของโพรงเหล่านี้ เมื่อมีแรงกระทำออกได้เป็นดังนี้ [5]

Nucleation

เมื่อมีแรงมากระทำจนเกิดการเสีรูปร่างจะทำให้เกิด Stress Concentration และ Strain Concentration ที่บริเวณรอบ ๆ ของโพรงเหล่านี้ และเมื่อการเกิดการเสีรูปร่างจนถึงค่าวิกฤตค่าหนึ่ง จะทำให้เกิดการ Nucleation ของโพรงขึ้นในเนื้อของวัตถุดังรูปที่ 2.5 ข [5]

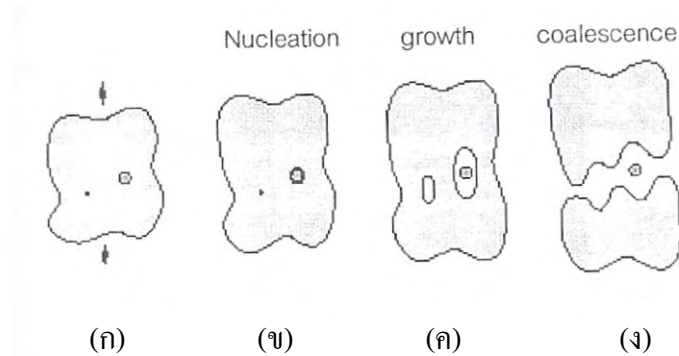
Growth

เมื่อวัตถุอยู่ภายใต้อิทธิพลของ Plastic Deformation อย่างต่อเนื่อง ทำให้โพรงที่อยู่ภายในเกิดการขยายขนาดขึ้นดังรูปที่ 2.5 ค โดยอัตราการขยายตัวของโพรง จะขึ้นอยู่กับลักษณะของการเสีรูปร่างและความเค้นที่มากระทำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งความเค้นในส่วนของ Hydrostatic Stress จะถือว่ามอิทธิพลอย่างมาก ต่อการขยายตัวของโพรงและเพื่อความสะดวกในกล่าวถึง ค่าอิทธิพลตัวนี้จะนิยามให้มันอยู่ในรูปของตัวแปรไร้มิติ โดยจะเรียกชื่อว่าค่า Triaxiality ซึ่งมีนิยามว่าเป็นค่าอัตราส่วนระหว่าง Hydrostatic Stress ต่อ Equivalent Stress [5]

$$\text{Triaxiality} = \frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}} \quad (2.1)$$

Coalescence

ในขณะเกิดกระบวนการขยายตัวของโพรง เมื่อการขยายตัวเกิดมากขึ้น จนทำให้โพรงที่อยู่ในบริเวณเดียวกันขยายตัวมาพบกันและเกิดเป็นช่องว่าง หรือความเสียหายที่ใหญ่ขึ้น ซึ่งเราเรียกว่าการเกิด Void Coalescence ดังรูปที่ 2.2 ง [5]



รูปที่ 2.5 แสดงขั้นตอนการขยายตัวของโพรง (Void) ที่อยู่ภายในเนื้อของวัตถุ [5]

2.2.3 การแตกหักแบบเหนียวในกระบวนการตีขึ้นรูปเย็น (Ductile Fracture in Cold

Forging)

การแตกหักแบบเหนียวในกระบวนการตีขึ้นรูปเย็นแบ่งได้ 3 แบบ มีการแตกร้าวที่ผิว (Free Surface Cracks) การแตกร้าวที่เกิดขึ้นภายใน (Internal Cracks) และสุดท้าย การร้าวที่ผิวโดยการสัมผัสกับเครื่องมือ (Tool Contacting Surface Cracks) [5]

การแตกร้าวที่ผิว

การแตกร้าวที่ผิวจะสังเกตได้ในงานขึ้นรูปแบบตีเย็นและตีห้วน (Heading) เพราะว่าจะเกิดความเค้นบีบทางด้านแรงดึงขึ้น ในระหว่างการเสียรูป ดังแสดงในรูป 2.6 ก และ ข และจะเกิดขึ้นในกระบวนการอัดขึ้นรูปแท่งกลมแบบเดินหน้า ดังแสดงในรูป 2.6 ฉ อันเนื่องมาจากการหล่อลื่นที่ไม่ดีระหว่างชิ้นงานและแม่พิมพ์ [5]

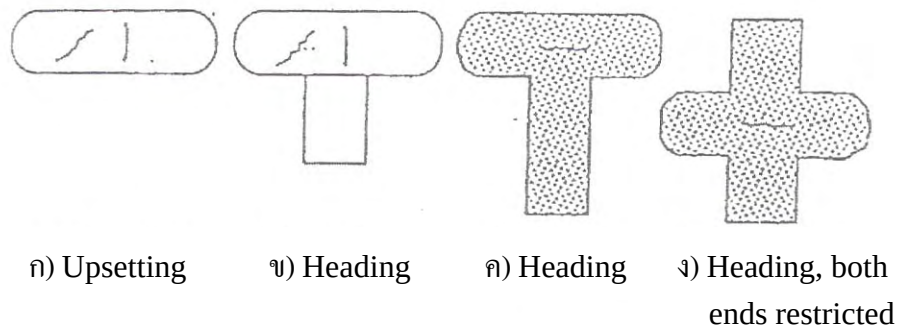
การแตกร้าวภายใน

จะเป็นการแตกร้าวที่เกิดขึ้นภายในเนื้อวัสดุ ที่เราไม่สามารถสังเกตได้ เกิดจากความเค้นแรงดึงเป็น การเสียรูปจากเนื้อเกรนในวัตถุไม่เป็นเนื้อเดียวกัน [5] จะเกิดในกระบวนการอัดขึ้นรูปแท่งแบบเดินหน้าจะเป็นการแตกแบบรูปตัววี ดังรูปที่ 2.6 ข และอีกกรณีจะเป็นการแตกที่เกิดจากการตีห้วนขึ้นรูป ดังแสดงในรูป 2.6 ค ส่วนรูปที่ 2.6 ง จะเป็นกรณีการฉีกขาดภายในที่เกิดจากความเค้นดก้างและความเค้นจากความร้อน ส่วนอีกกรณีการแตกหักภายใน จะเกิดขึ้นในกระบวนการขึ้นรูปแบบอัด

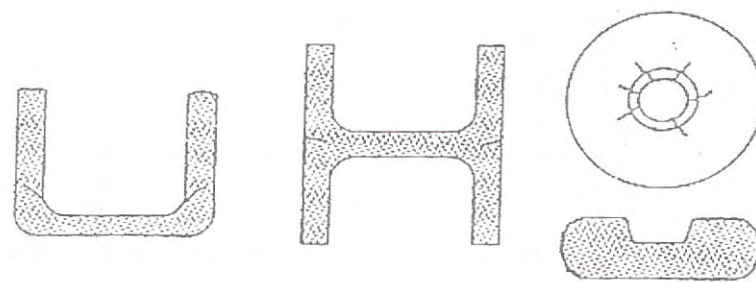
ขึ้นรูปแท่งกลม ในทิศทางตรงกันข้าม ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ฉ เป็นการไหลตัวของเนื้อโลหะในทิศทางตรงกันข้าม โดยความเค้นจากแรงดึงจะส่งผ่านไปตรงจุดที่โลหะไหลตัว และแยกตัวออกจนเกิดการแตกหักแบบเหนียวขึ้น [5]

การแตกหักที่เกิดจากการสัมผัสกับเครื่องมือ

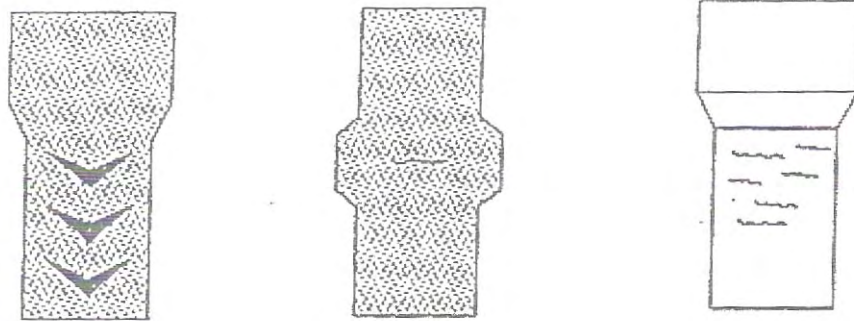
จะเกิดขึ้นในกระบวนการอัดขึ้นรูปด้วย แบบถอยหลังและการตีเจาะขึ้นรูป จะเป็นการแตกตามเส้นรอบวง โดยจะสังเกตได้จากการอัดขึ้นรูปด้วยแบบ 1 ขั้นตอน และ 2 ขั้นตอน กระบวนการที่เกิดขึ้นเมื่อผนังด้านล่างของถ้วย บางกว่าผนังด้านข้างของถ้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.6 จ และ ฉ ส่วนการแตกตามแนวรัศมีเกิดขึ้น ในกระบวนการตีเจาะขึ้นรูป โดยจะแสดงดังรูปที่ 2.6 ข [5]



ก) Upsetting ข) Heading ค) Heading ง) Heading, both
ends restricted



จ) Single Cup ฉ) Double cup ช) Pierce upsetting
Backward extrusion Extrusion



ซ) Forward extrusion ฌ) Simultaneous
rod extrusion ญ) Forward extrusion

รูปที่ 2.6 แสดงลักษณะต่าง ๆ ของการเกิดการแตกของชิ้นงานขึ้นรูป [5]

2.2.4 การทำนายการแตกหักที่เกิดขึ้นในกระบวนการขึ้นรูปโลหะ

ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ จะกล่าวถึงการวิเคราะห์การแตกหักแบบเหนียวเท่านั้น สำหรับปรากฏการณ์การแตกหักแบบเหนียวนี้ เป็นส่วนหนึ่งของกระบวนการเสียรูปแบบพลาสติกในโลหะ ซึ่งสามารถที่จะเกิดขึ้นได้ทั้งในการอัดขึ้นรูปและการตีขึ้นรูป เกณฑ์การแตกหักที่ใช้ทำนายการแตกหักที่ใช้ทำนายการแตกหักแบบเหนียว ในกระบวนการขึ้นรูปโลหะนั้น มีหลายเกณฑ์ที่สามารถจะทำนายได้ว่าเมื่อไหร่ที่โลหะจะเปลี่ยนแปลงรูปแล้วเกิดการแตกหัก ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จะพูดถึงความสัมพันธ์ของเกณฑ์การแตกหักที่ใช้ทำนายโดยอาศัยการค้นคว้าข้อมูลจากหนังสือ งานวิจัย และบทความต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง โดยเน้นเกณฑ์การแตกหักในลักษณะที่เราสามารถ ที่จะทำนายได้ว่าเมื่อไหร่ที่โลหะจะเปลี่ยนรูปและเกิดการแตกหักในกระบวนการขึ้นรูป [5]

คำอธิบายที่ชัดเจนเกี่ยวกับการแตกหักแบบเหนียวก็ คือ ข้อจำกัดของการไหลของเนื้อวัสดุ แบบพลาสติก คือ ถ้าเกินข้อจำกัดของความเป็นอันหนึ่งอันเดียวกันของการตีขึ้นรูปนั้น ก็คือ การถูกทำลายโดยการเริ่มต้นการแตกหักในโลหะ แน่นอนเป็นการยากที่จะพิสูจน์ เพราะว่าการแตกหักจะไวต่อตัวแปรมากมาย และยากที่จะทำการทดลอง ทำให้เกณฑ์การแตกหักที่ได้มีการเขียนเป็นทฤษฎีขึ้นมานั้น มีความคลาดเคลื่อนในการทำนาย หรืออธิบายเรื่องการแตกหักได้ไม่ชัดเจน กับสภาวะบางอย่างได้ [5]

2.2.5 จุดวิกฤติของการแตกหักเสียหาย

ค่าของการแตกหัก (Damage Value)

เกณฑ์การแตกหักแบบเหนียวที่กล่าวจะเป็นตัวแทนของรูปแบบเงื่อนไขดังนี้ [5]

$$\int F(\text{deformation history}) d\bar{\epsilon} = C \quad (2.2)$$

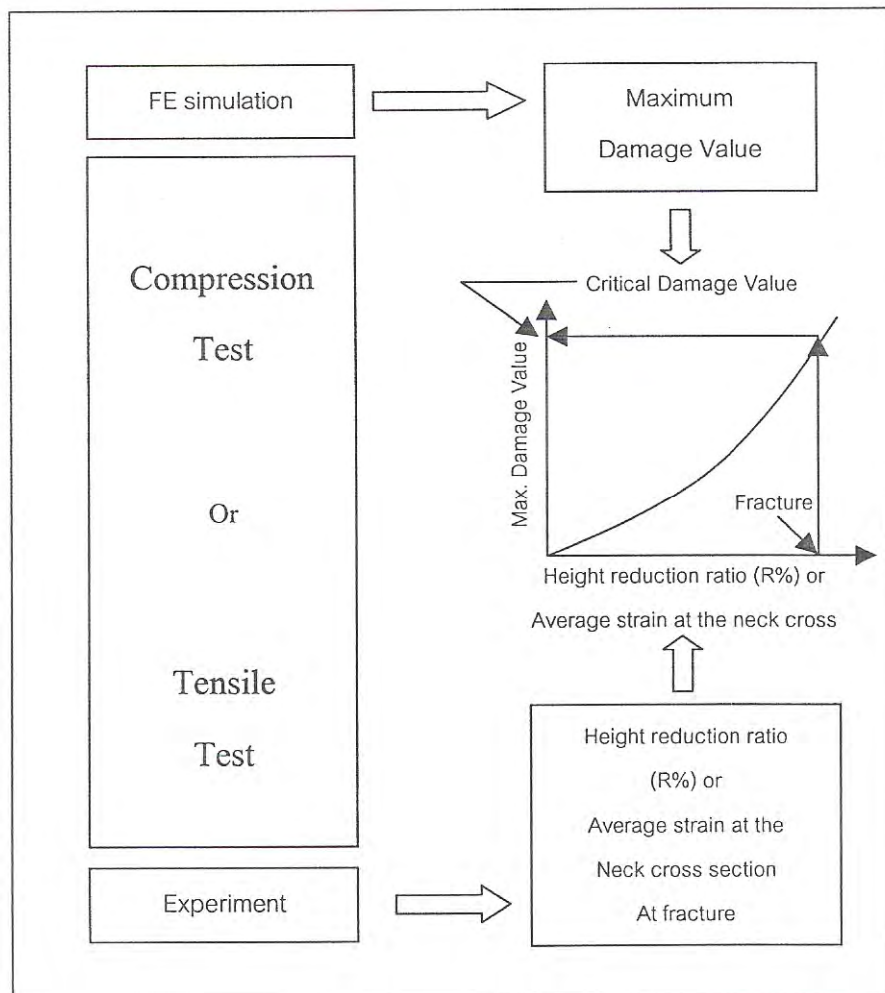
เมื่อ $\bar{\epsilon}$ คือ Effective Strain

C คือ Damage Value

ค่าของการแตกหักนี้ คือ ค่าตรงจุดที่เกิดการเสียรูปของชิ้นงาน [6] และสามารถหาจากค่าอินทิเกรตสมการที่ (2.2) เป็นค่าสมมติที่บอกปริมาณของความเสียหาย จะไม่ลดลงในระหว่างกระบวนการตีขึ้นรูปขึ้นอย่างต่อเนื่องกัน โดยปราศจากการอบอ่อนระหว่างกระบวนการ ดังนั้นการอินทิเกรตสมการการแตกหักแบบเหนียวนี้ ค่าที่ได้จะมากกว่าศูนย์เสมอ

ค่าวิกฤติของการแตกหัก (Critical Damage Value)

สมมติฐานพื้นฐานของเกณฑ์การแตกหักแบบเหนียวในรูปแบบของสมการ (2.2) ก็คือ การแตกหักแบบเหนียวจะเกิดขึ้นเมื่อ ค่าสูงสุดของการแตกหักในชิ้นงานเกินค่าวิกฤติ หรือ “Critical Damage Value” สำหรับวัสดุที่มีเนื้อเดียวกันค่าของ Critical Damage Value สามารถที่จะพิจารณาได้จากค่าคงที่ของวัสดุ ก็เปรียบเสมือนกับค่า Yield Stress หรือ Tensile Strength ดังนั้นความแตกต่างของเกณฑ์การแตกหักแบบเหนียว นำไปสู่ความแตกต่างของค่า Damage Value ค่า Critical Damage Value ก็มีลักษณะเช่นเดียวกัน [6] ที่จะให้ความแตกต่างของเกณฑ์การแตกหักแบบเหนียว ซึ่งก็คือความแตกต่างกันของชนิดวัสดุด้วย เราสามารถดูรูปภาพที่ 2.7 เพื่อความเข้าใจต่อกระบวนการ [6]



รูปที่ 2.7 บล็อกไดอะแกรมวิธีการหาค่าวิกฤติของการแตกหักที่มาจากการทำการทดลองกับการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ [5]

2.3 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ทฤษฎีในการวิเคราะห์ขบวนการขึ้นรูปโลหะ ที่ได้มีการพัฒนาและเป็นที่นิยมนั้น 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) [4] เนื่องจากได้มีการพัฒนานำคอมพิวเตอร์มาช่วย ในการประมวลผลทางคณิตศาสตร์ จึงทำให้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นที่นิยมใช้กันมาก [10] และสะดวกในการวิเคราะห์ปัญหาทางวิศวกรรมศาสตร์ อย่างกว้างขวาง ซึ่งวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้มีการเริ่มต้น โดยในปี ค.ศ.1940 ได้มีการเริ่มนำแนวคิดทางไฟไนต์เอลิเมนต์มาใช้วิเคราะห์ปัญหาความเค้นในมิติเดียว เช่นความเค้นในท่อนโลหะและคาน แต่ในช่วงนั้นยังไม่เป็นที่นิยมแพร่หลาย ต่อมาในปี ค.ศ.1954 เครื่องคอมพิวเตอร์ได้รับการพัฒนา ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น การวิเคราะห์โครงสร้างโดยวิธีไฟไนต์ เอลิเมนต์จึงได้รับความนิยมมากขึ้น โดย Turner , Clough , Martins และ Topp [5] ได้นำวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาวิเคราะห์ปัญหาสองมิติเป็นครั้งแรก โดยแสดงวิธีการหาสทิเฟนสมเมทริกซ์ของเอลิเมนต์สองมิติแบบสามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยม ในปัญหาโครงข้อหมุนของเอลิเมนต์คาน ซึ่งสมมุติเป็นฟังก์ชันการกระจัดเรียกกัน โดยทั่วไปวิธีสทิเฟนสโดยตรงและรวมสทิเฟนสมเมทริกซ์ของเอลิเมนต์ทั้งหมดเข้าด้วยกัน เป็นสทิเฟนสมเมทริกซ์ของโครงสร้างทั้งระบบ ในปี ค.ศ. 1960 Clough ได้พัฒนานำวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ มาใช้วิเคราะห์ปัญหาความเค้นระนาบในงานวิจัยเป็นครั้งแรก โดยใช้เอลิเมนต์ชนิดสามเหลี่ยมมุมฉาก [5] ซึ่งการเปลี่ยนรูปของวัสดุอยู่ในช่วงยืดหยุ่น โดยมีความเครียดและการกระจัดน้อย ต่อมาทฤษฎีของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ได้รับความสนใจมากขึ้นและได้พัฒนาใช้หลักการต่าง ๆ ซึ่งสามารถวิเคราะห์ปัญหาที่มีการเปลี่ยนรูปของวัสดุอยู่ในช่วงไม่ยืดหยุ่นเชิงเส้นได้ โดยมีความเครียดและการกระจัดมาก ปัจจุบันวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้รับความนิยมอย่างกว้างขวาง ซึ่งมีการนำวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จัดพิมพ์เป็นหนังสือมากมาย และมีการสอนในหลักสูตรการเรียนในมหาวิทยาลัยต่าง ๆ วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้รับการพัฒนาและประยุกต์ในการวิเคราะห์ปัญหาทางโครงสร้าง ถึงความดัน การไหลตัวของลมหรือของเหลว การนำความร้อน การเปลี่ยนรูปของโลหะก้อนหรือโลหะแผ่น การสั่นสะเทือนพลังสนามแม่เหล็ก ปฏิกริยาของอนุภาคทางชีวและเคมี [10] ซึ่งมีประโยชน์มากทางด้านการศึกษา [5]

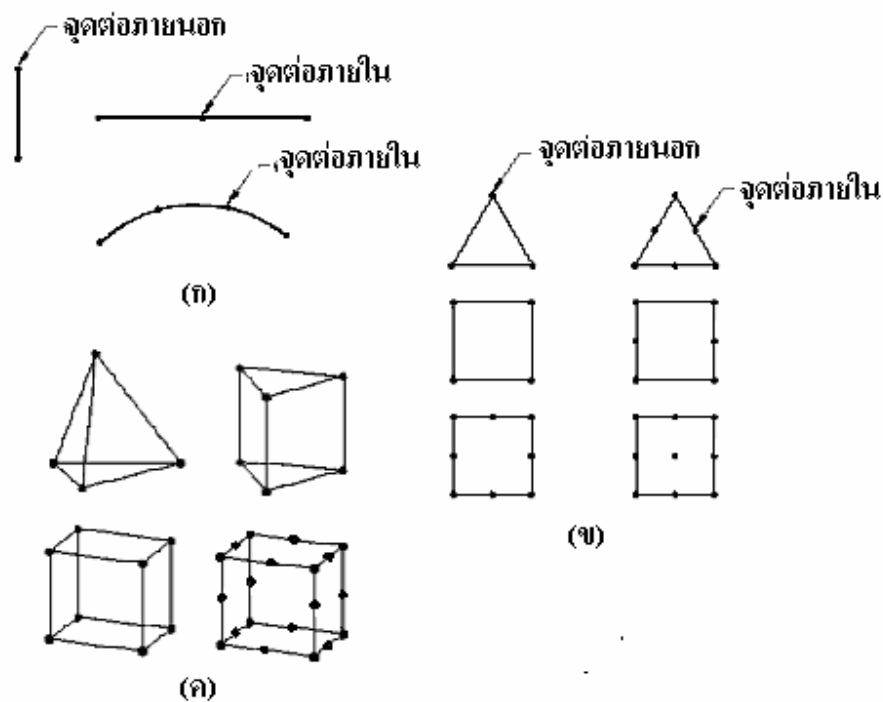
สมการไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ขบวนการอัดขึ้นรูปโลหะ สามารถหาได้จากวิธีพื้นฐาน 2 วิธีคือ วิธีแรงหรือวิธียืดหยุ่น (Force or Flexibility Method) และวิธีการกระจัดหรือวิธีสทิเฟนส (Displacement or Stiffness Method) วิธีแรกสามารถจะหาแรงภายในและแรงปฏิกิริยาได้ โดยอาศัยสมการสมดุลของแรงตามเงื่อนไขการจัด ส่วนวิธีที่สองสามารถจะหาการกระจัดที่สมมุติขึ้น โดยมีเงื่อนไขของความต่อเนื่องของเอลิเมนต์ที่แต่ละจุดต่อ หรือที่บริเวณขอบสัมผัสกันก่อนและหลังไหลดกระทำซึ่งมีความต่อเนื่องกัน ดังนั้นสมการสมดุลจะเขียนอยู่ในเทอมของการกระจัดของแต่ละ

จุดต่อ และค่าของการกระจัดสามารถหาได้ โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการกระจัด การวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จะนิยมใช้วิธีที่สองมากกว่าทั้งนี้ เพราะสามารถหาสมการสมดุลและผลเฉลยได้สะดวกกว่า รวมทั้งโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป ทางการค้าส่วนมากที่ใช้ในการวิเคราะห์นิยมใช้วิธีการกระจัด [5]

หลักการทั่วไปของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ คือ การแบ่งโครงสร้างออกเป็นส่วนย่อย ๆ เรียกว่า ไฟไนต์เอลิเมนต์ ฟังก์ชันการกระจัด (Displacement Function) ซึ่งนำมาแทนเอลิเมนต์และเป็นฟังก์ชันต่อเนื่อง ในแต่ละเอลิเมนต์จะเชื่อมโยงกันด้วยจุดต่อและเส้นขอบหรือผิวรอบ เอลิเมนต์ที่สัมผัสกัน โดยอาศัยการกำหนดคุณสมบัติทางกลที่ถูกต้อง ให้กับวัสดุที่ใช้ทำโครงสร้างหรือชิ้นงาน เราสามารถหาการกระจัด ความเค้น และความเครียดที่เกิดขึ้นที่จุดต่อต่าง ๆ ของเอลิเมนต์ที่ประกอบกัน เป็นโครงสร้างหรือชิ้นงาน [10] ซึ่งเป็นขั้นตอนทั่วไปที่คล้ายกันดังต่อไปนี้

2.3.1 การแบ่งโครงสร้างของแบบจำลองเป็นเอลิเมนต์ย่อยและการเลือกชนิดของ เอลิเมนต์

ในการสร้างแบบจำลองการ แบ่งโครงสร้างของแบบจำลองให้เป็นเอลิเมนต์ย่อย จะต้องคำนึงถึง รูปร่างและความสอดคล้องกับลักษณะของโครงสร้างเดิมให้มากที่สุด คือ บริเวณที่เป็นส่วนเว้า ส่วนโค้ง มีรู หรือบริเวณที่มีการเปลี่ยนรูปร่างมาก จำเป็นต้องแทนด้วยเอลิเมนต์ที่มีขนาดเล็กเพียงพอที่จะให้ผลการวิเคราะห์ได้ถูกต้องแม่นยำ ส่วนบริเวณที่มีการเปลี่ยนรูปร่างน้อยก็อาจจะแทนด้วยเอลิเมนต์ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ถ้าแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ประกอบด้วยจำนวนเอลิเมนต์มากเกินไปจนความจำเป็นก็จะทำให้ใช้เวลาในการประมวลผลนาน แต่ถ้าจำนวนของเอลิเมนต์มีน้อย หรือมีขนาดใหญ่ก็จะทำให้ผลที่ได้ไม่ถูกต้องแม่นยำเพียงพอ ส่วนการเลือกใช้ชนิดของเอลิเมนต์ จะต้องคำนึงถึงรูปร่าง ลักษณะของโครงสร้างและการกระทำของแรง เช่น ชนิดเอลิเมนต์ในปัญหามิติเดียว สองมิติ สามมิติ หรือแบบแกนสมมาตร ดังตัวอย่างเอลิเมนต์แสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ตัวอย่างชนิดของเอลิเมนต์

(ก) เอลิเมนต์มิติเดียว

(ข) เอลิเมนต์ 2 มิติ

(ค) เอลิเมนต์ 3 มิติ [5]

ซึ่งจำเป็นต้องเลือกฟังก์ชันภายในเอลิเมนต์ ให้สอดคล้องกับจำนวนจุดต่อของเอลิเมนต์ หรือให้สอดคล้องกับระดับความเสรีของเอลิเมนต์ เช่น ฟังก์ชันเชิงเส้น หรือฟังก์ชันพอลิโนเมียล ซึ่งอาจจะ เป็นพอลิโนเมียลยกกำลังหนึ่ง ยกกำลังสอง หรือยกกำลังสาม ซึ่งฟังก์ชันพอลิโนเมียลให้ความ สะดวกในการวิเคราะห์มากกว่าฟังก์ชันอนุกรมทางเลขาคณิตชนิดอื่น ๆ เพื่อความสะดวกและง่ายใน การประมวลผล หรือแก่สมการทางคณิตศาสตร์โดยคอมพิวเตอร์ จึงนิยามจัดฟังก์ชันดังกล่าวในรูป ของเมทริกซ์ ซึ่งเป็นฟังก์ชันรูปร่างของโครงสร้างโดยรวม [5]

2.3.2 การกำหนดคุณสมบัติของวัสดุโดยความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ของวัสดุที่ทำการวิเคราะห์

คุณสมบัติของวัสดุที่ทำการวิเคราะห์ ซึ่งเขียนอยู่ในรูปกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและ ความเครียดจริง หรือเรียกอีกชื่อว่า Flow Curve ซึ่งมีลักษณะเป็นเชิงเส้น หรือไม่เชิงเส้น โดย มีความสำคัญในการนำมาใช้ในการคำนวณเพื่อช่วยให้ทำนายผลได้ถูกต้องแม่นยำ ในการวิเคราะห์ วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จะกำหนดให้วัสดุของแบบจำลองมีคุณสมบัติเท่ากันทุกทิศทาง ซึ่งจะแตกต่าง

จากพฤติกรรมของวัสดุจริง เนื่องจากวัสดุจริงมีการเรียงตัวของผลึกไม่เท่ากันทุกทิศทาง ทำให้วัสดุมีคุณสมบัติแบบ Anisotropy โดยที่กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจริงของวัสดุสามารถหาได้จากการทดสอบดึง หรือการทดสอบกด ในการทดสอบแรงดึง ชิ้นทดสอบชนิดหน้าตัดกลม หรือชนิดหน้าตัดสี่เหลี่ยมจะถูกแรงกระทำโดยการดึงหรือกดเพิ่มแรง (F) อย่างช้า ๆ และควบคุมความเร็วให้ชิ้นทดสอบเปลี่ยนรูปอย่างสม่ำเสมอตามแนวแกน แล้ววัดค่าแรงและระยะการเปลี่ยนรูปของชิ้นทดสอบ จนกระทั่งชิ้นทดสอบเกิดความเสียหาย หรือขาดออกจากกันผลการทดสอบที่ได้จะนำไปหาคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุชิ้นทดสอบ ซึ่งความเค้นที่เกิดภายในวัสดุสามารถหาได้ โดยนำแรงภายนอก F_i ในแต่ละช่วงของการทดสอบหารด้วยพื้นที่หน้าตัดเริ่มต้นของชิ้นงาน [6]

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

โดย F_i คือ แรงดึงหรือโหด A_0 คือ พื้นที่หน้าตัดเดิมของชิ้นทดสอบ และ σ คือ ความเค้นเฉลี่ย หรือ ความเค้นเชิงวิศวกรรม ซึ่งมีทิศทางตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัด A_0 สำหรับความเครียดเชิงวิศวกรรม สามารถคำนวณได้จากความยาวที่เปลี่ยนไปหารด้วยความยาวเดิมของชิ้นทดสอบ [2]

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L_i - L_0}{L_0} \quad (2.4)$$

โดย ΔL คือ ความยาวที่เปลี่ยนไป L_0 คือ ความยาวเดิมของชิ้นทดสอบ L_i คือ ความยาวขณะใดขณะหนึ่งและ ε คือ ความเครียดเฉลี่ย เป็นความเครียดเชิงวิศวกรรม ซึ่งมีทิศทางเดียวกับทิศทางของแรง F ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้พื้นที่หน้าตัดและความยาวเดิมของชิ้นทดสอบ เรียกว่า กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเชิงวิศวกรรม ซึ่งในการทดสอบจริงในขณะที่ยกระดับความเค้นในชิ้นงานทดสอบเพิ่มเลยความเค้นคราก σ_0 พื้นที่หน้าตัดและความยาวของชิ้นงานทดสอบจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องจนเกิดคอคอดและขาดออกจากกันในที่สุด ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด สามารถหาได้โดยใช้พื้นที่หน้าตัดและความยาวที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละขณะ ซึ่งเรียกว่า กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นจริงและความเครียดจริง หรือเรียกอีกชื่อว่า Flow Curve ซึ่งแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมของวัสดุในช่วงการเปลี่ยนรูปถาวร ถ้าให้ $\tilde{\sigma}$ เป็นความเค้นจริงและ $\tilde{\varepsilon}$ เป็นความเครียดจริง ดังนั้น [6]

$$\tilde{\sigma} = \frac{F_i}{A_i} = \sigma \left(\frac{A_0}{A_i} \right) \quad (2.5)$$

โดย A_i คือ พื้นที่หน้าตัดใด ๆ A_o คือ พื้นที่หน้าตัดเริ่มต้น σ คือ ความเค้นเฉลี่ย F_i คือ แรงดึงที่กระทำบนชิ้นทดสอบ สำหรับความเครียดจริง $\tilde{\varepsilon}$ สามารถหาได้โดยพิจารณาที่ความยาวใด ๆ ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งหาได้จากการอินทิเกรตความยาว dL_i ใด ๆ [6]

$$\tilde{\varepsilon} = \int_{L_o}^{L_i} \frac{dL_i}{L_i} = \ln \frac{L_i}{L_o} \quad (2.6)$$

ในกรณีการขึ้นรูปโลหะปริมาตรก่อนและหลังการขึ้นรูปจะเกิดการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ดังนั้น จะสมมุติให้ปริมาตรไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งก่อนและหลังการขึ้นรูปทำให้มีปริมาตรเท่าเดิม [6]

$$A_o L_o = A_i L_i \quad (2.7)$$

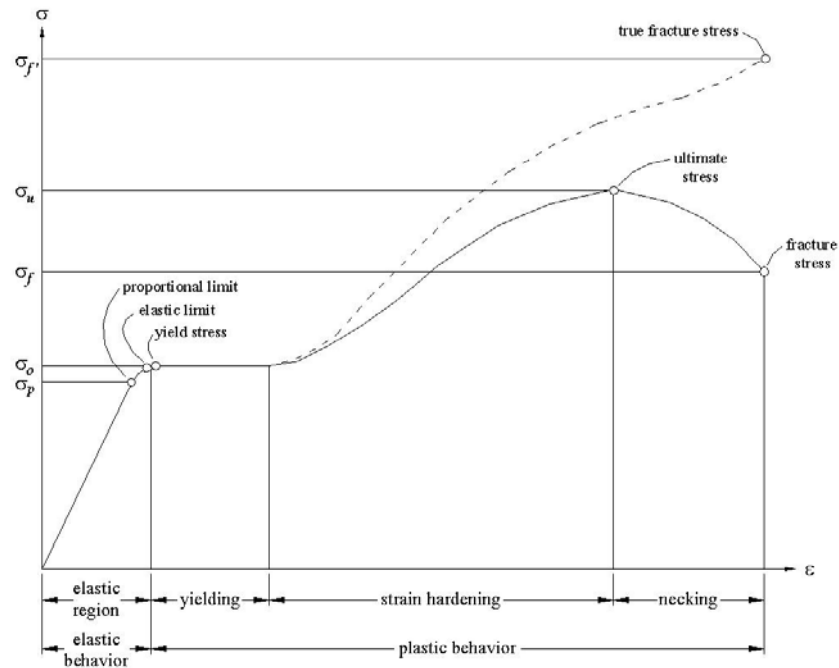
$$\frac{A_o}{A_i} = \frac{L_i}{L_o} = \frac{L_o + \Delta L}{L_o} = 1 + \varepsilon \quad (2.8)$$

ดังนั้นความเค้นจริงและความเครียดจริง หาโดยสมมุติฐานให้ปริมาตรก่อนและหลังการขึ้นรูปคงที่ [6]

$$\tilde{\sigma} = \sigma(1 + \varepsilon) \quad (2.9)$$

$$\tilde{\varepsilon} = \ln \frac{A_o}{A_i} = 2 \ln \frac{d_o}{d_i} \quad (2.10)$$

โดย d_i คือ เส้นผ่านศูนย์กลางใด ๆ d_o คือ เส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้นของชิ้นงานทดสอบตัวอย่างกราฟในรูปที่ 2.9 แสดงการเปรียบเทียบระหว่าง True Stress True Strain Curve และ Engineering Stress-Strain Curve ซึ่งคุณสมบัติของวัสดุในรูปแบบกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ความเค้นจริงและความเครียดจริง สามารถเขียนในรูปของสมการยกกำลัง เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณและวิเคราะห์การเปลี่ยนรูปของโครงสร้างอื่น ๆ [2]



รูปที่ 2.9 กราฟแสดงการเปรียบเทียบ Engineering Stress-Strain Curve กับ True Stress-Strain Curve [6]

สำหรับค่ายังมอดูลัส E สามารถหาได้จากช่วงการยืดหยุ่น เริ่มต้นของชิ้นงาน โดยการหาความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด คือ [6]

$$E = \frac{\sigma_b - \sigma_a}{\epsilon_b - \epsilon_a} \quad (2.11)$$

สำหรับค่าตัวเลขยกกำลัง หรือความเครียดแข็ง n และค่าสัมประสิทธิ์ความแข็งแรงของวัสดุ K สามารถหาได้โดยทำการใส่ค่า $\log$ เข้าไปในสมการยกกำลังซึ่งทำให้สามารถได้สมการใหม่คือ [6]

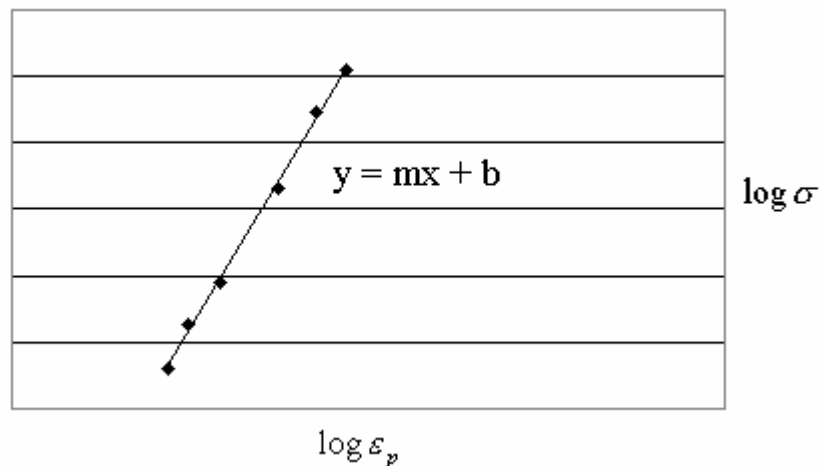
$$\sigma = K\epsilon_p^n \quad (2.12)$$

$$\log \sigma = n \log \epsilon_p + \log K \quad (2.13)$$

โดยที่ค่าความเครียดพลาสติก ϵ_p สามารถหาได้ คือ [6]

$$\epsilon_p = \epsilon - \frac{\sigma}{E} \quad (2.14)$$

จากสมการ $\log$ ที่ได้สามารถเขียนในรูปสมการเส้นตรงในแกน X และ Y ได้เช่น $y = mx + b$ โดย $y = \log \sigma$, $x = \log \epsilon$, $m = n$ และ $b = \log K$ สำหรับ K สามารถหาได้โดย $K = 10^b$ [6] ดังนั้นถ้าวาดจุดระหว่าง $\log \sigma$ และ $\log \epsilon$ ลงบนแกน X-Y จะได้กราฟเส้นตรง แสดงในรูปที่ 2.10 ดังนั้นการหากราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด มีความจำเป็นเพื่อการคำนวณหาสมการคอนสทิทิวทีฟ และมีความสำคัญในการกำหนดคุณสมบัติของวัสดุ ในแบบจำลองวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ต่อไป



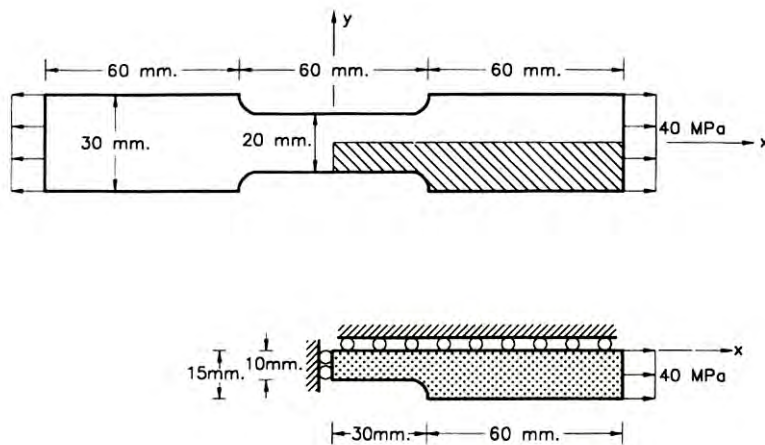
รูปที่ 2.10 กราฟแสดงการหาสมการเส้นตรง เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ในสมการยกกำลัง [6]

2.3.3 การกำหนดเงื่อนไขขอบ

ในการวิเคราะห์แก้สมการรวมของระบบโครงสร้าง สามารถรวมสมการของแต่ละเอลิเมนต์เข้าด้วยกันด้วยวิธีซ้อนทับ (Superposition Method) หรือเรียกว่าวิธีสทิฟเนสโดยตรง (Direct Stiffness Method) โดยอาศัยหลักการสมดุลของแรงที่จุดต่อของเอลิเมนต์ ที่ต่อเนื่องของโครงสร้าง [9] เขียนในรูปของเมทริกซ์ได้ คือ

$$\{F\} = [K]\{\bar{d}\} \quad (2.15)$$

ซึ่ง $\{F\}$ คือ เมทริกซ์รวมของแรงที่จุดต่อ $[K]$ คือ สทิฟเนสเมทริกซ์รวมของระบบและ $\{\bar{d}\}$ คือ เมทริกซ์รวมของการกระจัด ซึ่งอาจจะทราบค่าเพียงบางค่าเท่านั้น จึงจำเป็นต้องอาศัยเงื่อนไขขอบ (Boundary Condition) หรือเงื่อนไขบังคับ (Constrain) หรือ จุดรองรับ (Support) เพื่อช่วยให้เมทริกซ์สามารถหาค่าการกระจัดในจุดต่อที่ต้องการได้ ตัวอย่างชนิดเงื่อนไขขอบต่าง ๆ คือแบบฟิกซ์ (Fix) แบบสไลด์ (Slide) แบบพิน (Pin) แบบอิสระ (Free) และแบบสมมาตร (Symmetry) [5] ตัวอย่างการวิเคราะห์ชิ้นงานที่มีลักษณะสมมาตรแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 การวิเคราะห์ชิ้นงานที่มีลักษณะสมมาตร [5]

2.3.4 การหาการกระจัดของระบบ

สมการที่ใช้ในการคำนวณวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งมีลักษณะดังกล่าวสามารถศึกษาค้นคว้าเพิ่มเติมได้จากหนังสือไฟไนต์เอลิเมนต์ทั่วไป [4] [5] เนื่องจากในการศึกษาโครงการเฉพาะเรื่องนี้ ผู้วิจัยได้ประยุกต์ใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์สำเร็จรูป MSC.Marc 2003 ในการวิเคราะห์ขบวนการตีขึ้นรูปโลหะ ดังนั้นผู้วิจัยจะขอกล่าวถึง สมการที่สำคัญและพบเห็นเป็นส่วนมาก ในการอธิบายการคำนวณวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ [9]

การวิเคราะห์วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ นิยมแบ่งโครงสร้างออกเป็นเอลิเมนต์ย่อย ๆ แล้วพิจารณาแบบจำลอง ซึ่งประกอบด้วยจุดต่อในระนาบของแกน X และ Y แบบปัญหา 2 มิติ (i, j) หรือในระนาบของแกน X Y และ Z แบบปัญหา 3 มิติ (i, j, k) โดยที่ $\{d_n\}$ เป็นฟังก์ชันของจุดใด ๆ และ $\bar{u}_n, \bar{v}_n, \bar{w}_n$ เป็นตำแหน่งบนแกน X Y และ Z ซึ่งสามารถแสดงในรูปแบบการกระจัด คือ [5]

$$\{d_n\} = \{\bar{u}_n, \bar{v}_n, \bar{w}_n\} \quad (2.16)$$

ซึ่งสามารถเขียนในรูปของสมการแบบปัญหา 2 มิติ เอลิเมนต์สี่เหลี่ยม [5]

$$\{\phi\} = \begin{cases} \bar{u}(x, y) = a_1 + a_2x + a_3y + a_4x^2 + a_5xy + a_6y^2 \\ \bar{v}(x, y) = a_7 + a_8x + a_9y + a_{10}x^2 + a_{11}xy + a_{12}y^2 \end{cases} \quad (2.17)$$

โดย a คือ ค่าคงที่และ $\{\phi\}$ คือ ฟังก์ชันการกระจัดในรูปแบบของพิกัดรวม และสามารถเขียนอยู่ในรูปของฟังก์ชันรูปร่าง $[N]$ คือ [5]

$$\{\phi\} = \begin{cases} \bar{u}(x, y) = N_i \bar{u}_i + N_j \bar{u}_j + N_k \bar{u}_k \\ \bar{v}(x, y) = N_i \bar{v}_i + N_j \bar{v}_j + N_k \bar{v}_k \end{cases} = [N] \{\bar{d}\} \quad (2.18)$$

อย่างไรก็ตามผลรวมของ $N_i + N_j + N_k = 1$ เสมอ เพราะว่าจุด x และ y ดังกล่าวอยู่ในตำแหน่งใด ๆ บนผิวของเอลิเมนต์

2.3.5 การหาค่าความเค้นและความเครียด

ในการวิเคราะห์โครงสร้างหรือชิ้นส่วนต่าง ๆ จำเป็นต้องทราบถึงค่าความเค้น ความเครียด และความเค้นเฉือนในเนื้อวัสดุ เพื่อให้การออกแบบอยู่ในช่วงที่มีความปลอดภัย หรือในช่วงที่ยอมรับได้ หรือเพื่อทำการวิจัยและศึกษาความเป็นไปได้ในงานดังกล่าว ซึ่งสามารถแสดงค่าความเค้น ที่ทำนายได้และเป็นไป ตามความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจริงของวัสดุ ที่ทำการวิเคราะห์ ในกรณีของความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและการกระจัด สามารถหาได้โดยอาศัยพื้นฐานความรู้ทางด้านกลศาสตร์ของแข็ง [9] ซึ่งเขียนอยู่ในรูปของเมทริกซ์ โดยสามารถทราบความเครียดได้จากการดิฟเฟอเรนเชียล สมการฟังก์ชันการกระจัดในขั้นตอนที่ 2.3.4 และอาศัยพื้นฐานความรู้ทางด้านกลศาสตร์ของแข็ง คือ

$$\{\varepsilon\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \partial \bar{u} / \partial x \\ \partial \bar{v} / \partial y \\ \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \beta_i & 0 & \beta_j & 0 & \beta_k & 0 \\ 0 & \gamma_i & 0 & \gamma_j & 0 & \gamma_k \\ \gamma_i & \beta_i & \gamma_j & \beta_j & \gamma_k & \beta_k \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \bar{u}_i \\ \bar{v}_i \\ \bar{u}_j \\ \bar{v}_j \\ \bar{u}_k \\ \bar{v}_k \end{Bmatrix} = [B_i \quad B_j \quad B_k] \begin{Bmatrix} \bar{d}_i \\ \bar{d}_j \\ \bar{d}_k \end{Bmatrix} \quad (2.19)$$

สามารถเขียนในรูปของเมทริกซ์ที่ง่ายขึ้นได้ [5]

$$\{\varepsilon_i\} = [B_{ij}] \{\bar{d}_j\} \quad (2.20)$$

ซึ่งเมทริกซ์ $[B_{ij}]$ จะขึ้นอยู่กับพิกัดหรือตำแหน่งของจุดต่อและไม่ขึ้นอยู่กับพิกัด x และ y ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด จากผลที่ได้จากฟังก์ชันการกระจัดในโครงสร้าง หรือชิ้นงานที่ทำการวิเคราะห์ คือ [5]

$$\{\sigma\} = [D] \{\varepsilon\} \quad (2.21)$$

ซึ่ง $[D]$ เรียกว่า เมทริกซ์ความเค้นและความเครียดดั่งนั้น [5]

$$\{\sigma\} = [D][B]\{\bar{d}\} \quad (2.22)$$

ความเค้นสามารถหาได้จากเมทริกซ์ความเค้นและความเครียด เมทริกซ์พิกัดหรือตำแหน่งของจุดต่อ และเมทริกซ์ของการกระจัด [5]

2.3.6 การหาสมการรวมของระบบและสทึฟเนสเมทริกซ์รวมของเอลิเมนต์

สมการรวมของระบบโครงสร้าง สามารถหาได้จากการรวมสมการของแต่ละเอลิเมนต์ โดยวิธีซ้อนทับ (Superposition Method) หรือเรียกว่า วิธีสทึฟเนสโดยตรง (Direct Stiffness Method) ซึ่งอาศัยหลักการสมดุลของแรงที่จุดต่อของเอลิเมนต์ และการต่อเนื่องของโครงสร้างเขียนในรูปเมทริกซ์คือ [5]

$$\{F\} = [K]\{\bar{d}\} \quad (2.23)$$

$$\begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ * \\ * \\ F_n \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & * & * & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} & * & * & K_{2n} \\ * & * & * & * & * \\ * & * & * & * & * \\ K_{m1} & K_{m2} & * & * & K_{mn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ * \\ * \\ d_n \end{Bmatrix} \quad (2.24)$$

โดยที่ $\{F\}$ คือ เมทริกซ์แรงที่กระทำที่จุดต่อของเอลิเมนต์ $[K]$ คือ สทึฟเนสเมทริกซ์รวมของเอลิเมนต์ และ $\{\bar{d}\}$ คือ เมทริกซ์ของการกระจัดรวมของระบบ ซึ่งสามารถทราบค่าได้โดยอาศัยเงื่อนไขขอบเพื่อช่วยให้สามารถหาเมทริกซ์การกระจัดที่แต่ละจุดต่อได้ เช่น ในขั้นตอนที่ 2.3.3 และ 2.3.4 ในการหาสมการสทึฟเนสเมทริกซ์ สามารถหาได้หลายวิธี เช่น วิธีสมดุลโดยตรง (Direct Equilibrium Method) โดยจะหาสทึฟเนสเมทริกซ์ได้ด้วยการสมดุลของแรงในเอลิเมนต์ เช่น ในปัญหามานสปริง ท่อนโลหะ เพลลา และคานเป็นต้น วิธีเวทเรซิดิว (Weighted Residuals Method) ซึ่งนิยมใช้กันมาก เช่น ทฤษฎีของกาเลอร์กิน (Galerkin's Method) มักจะใช้ในกรณีวิธีพลังงานศักย์ต่ำสุด แต่ไม่เหมาะที่จะใช้ในปัญหาการไหลของของเหลว การถ่ายเทความร้อน การเคลื่อนของมวล เป็นต้น และวิธีงานหรือพลังงาน (Work or Energy Method) จะอาศัยหลักของงานสมมุติ (Principle of Virtual Work) หรือหลักของพลังงานศักย์ต่ำสุด (Principle of Minimum Potential Energy) หรือทฤษฎีของ

แคสติกเลียโน (Castigliano's Theorem) [9] ซึ่งวิธีพลังงานต่ำสุด เป็นที่นิยมอย่างกว้างขวางในการวิเคราะห์โครงสร้างช่วงยืดหยุ่นและเปลี่ยนรูป แสดงโดยสมการ [5]

$$\Pi = U + W \quad (2.25)$$

ซึ่ง Π คือ พลังงานรวมของระบบ U คือ พลังงานความเค้นและความเครียดภายในระบบ และ W คือ พลังงานศักย์จากแรงภายนอก ซึ่งพลังงานความเค้นและความเครียดในระบบประกอบด้วย

$$U = \frac{1}{2} \int_V \{\mathcal{E}\}^T \{\sigma\} dV = \frac{1}{2} \int_V \{\mathcal{E}\}^T [D] \{\mathcal{E}\} dV = \frac{1}{2} \int_V \{d\}^T [B]^T [D] [B] \{d\} dV \quad (2.26)$$

โดยที่ $\mathcal{E}$ คือ ความเครียด σ คือ ความเค้น dV คือ ปริมาตรของเอลิเมนต์ $[D]$ คือ เมทริกซ์ความเค้นและความเครียด $\{d\}$ คือ การกระจัดที่จุดต่อของเอลิเมนต์ และ $[B]$ คือ เมทริกซ์ของจุดต่อและพลังงานศักย์จากแรงภายนอกประกอบด้วย [5]

$$W = W_b + W_p + W_s \quad (2.27)$$

$$W_b = - \int_V \{\phi\} \{X\} dV = - \{d\}^T [N]^T \{X\} dV \quad (2.28)$$

$$W_p = - \{d\}^T \{P\} \quad (2.29)$$

$$W_s = - \int_V \{\phi\}^T \{T\} ds = - \{d\}^T [N] \{T\} ds \quad (2.30)$$

โดยที่ W_b คือ งานเนื่องจากน้ำหนักของเอลิเมนต์ W_p คือ แรงที่กระทำเป็นจุด และ W_s คือ งาน เนื่องจากโหลดกระจาย หรือแรงดึงผิว โดยที่ $\{\phi\}$ คือ ฟังก์ชันของการกระจัด และ $\{X\}$ คือ ความหนาแน่นจำเพาะของวัสดุ $[N]$ คือ ฟังก์ชันรูปร่าง $\{d\}$ คือ การกระจัดที่จุดต่อของเอลิเมนต์ และ $\{P\}$ คือ แรงภายนอกที่กระทำที่จุดต่อของเอลิเมนต์ $\{T\}$ คือ โหลดที่กระจายหรือแรงดึงผิวบนพื้นที่ s ของเอลิเมนต์ และ ds คือ พื้นที่บนเอลิเมนต์ ดังนั้นพลังงานรวมของระบบ คือ [5]

$$\Pi = \frac{1}{2} \int_V \{d\}^T [B]^T [D] [B] \{d\} dV - \{d\}^T [N]^T \{X\} dV - \{d\}^T \{P\} - \{d\}^T [N] \{T\} ds \quad (2.31)$$

กำหนดให้ $\{F\}$ เท่ากับแรงทั้งหมดที่กระทำบนเอลิเมนต์ [5]

$$\{F\} = \int_V [N]^T \{X\} dV + \{P\} + [N]^T \{T\} ds \quad (2.32)$$

ดังนั้นจะได้สมการพลังงานรวมแรง คือ [5]

$$\Pi = \frac{1}{2} \{d\}^T \int_V [B]^T [D] [B] \{d\} dV - \{d\}^T \{F\} \quad (2.33)$$

พลังงานศักย์รวมต่ำสุดสามารถหาได้โดยการดิฟเฟอเรนเชียลทุกการกระทำ $\partial \Pi / \partial \{d\} = 0$ คือ [5]

$$\frac{\partial \Pi}{\partial \{d\}} = \int_V [B]^T [D] [B] \{d\} dV - \{F\} = 0 \quad (2.34)$$

$$\{F\} = \int_V [B]^T [D] [B] \{d\} dV \quad (2.35)$$

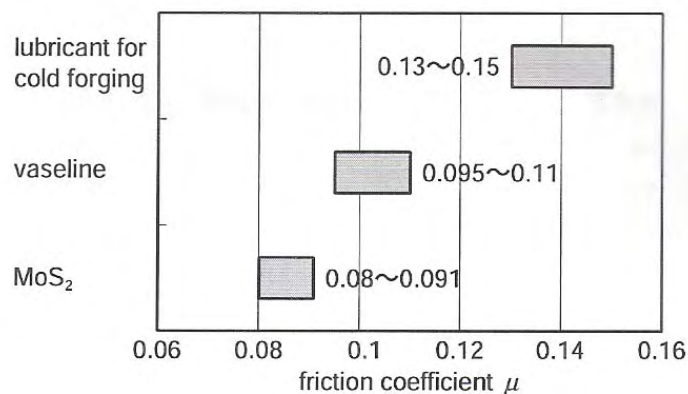
หรือสามารถเขียนในรูปแบบเมทริกซ์ คือ ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับสมการ 2.35 [5]

$$\{F\} = [K] \{d\} \quad (2.36)$$

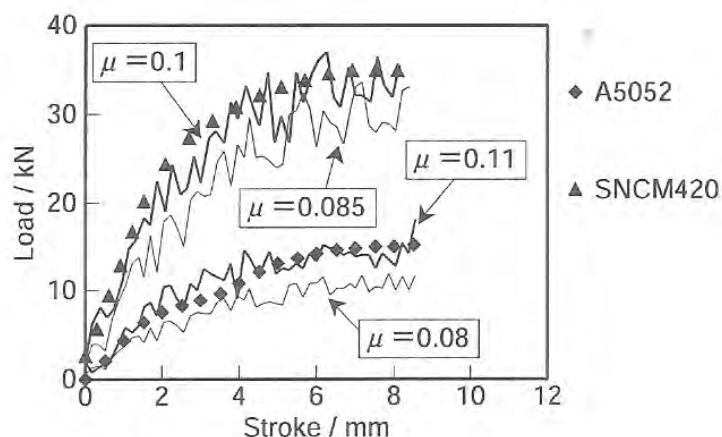
โดยที่ $[K]$ คือ ที่ฟิเนสเมทริกซ์รวมของเอลิเมนต์ การแก้สมการสที่ฟิเนสเมทริกซ์ของเอลิเมนต์ และสมการของแรง โดยการแก้สมการพีชคณิตของแต่ละเอลิเมนต์พร้อม ๆ กัน อาจจะใช้วิธีของเกาส์ (Gauss's Elimination Method) หรือวิธีสมมุติ (Iteration Method) เพื่อให้เข้าใจง่ายและสามารถเห็นผลการคำนวณแบบเมทริกซ์ จึงนิยมแปลความหมายของตัวเลขในรูปแบบกราฟฟิกและเจดสีต่าง ๆ ซึ่งจะบอกถึงขนาดโดยแถบสีลาเบล (Contour Label) รวมทั้งในรูปแบบกราฟ เพื่อเป็นประโยชน์และสะดวกในการวิเคราะห์ผลในขั้นต่อไป [5]

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษาของ Takasu , Kasai และ Nakasaki ได้ทำการทดลองเปรียบเทียบอัตราเสียดทานระหว่าง สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกับโหลด ที่เกิดจากการขึ้นรูปด้วยวิธีขึ้นรูปเย็น (Cold Forging) ของ อะลูมิเนียม A5052 และ Steel SNCM420 โดยนำค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (Friction Coefficients) ที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบสารหล่อลื่น จำนวน 3 ชนิด อันได้แก่ MoS_2 , Vaseline และ Lubricant for Cold Forging ดังแสดงในรูปที่ 2.12 [6] ไปทำการทดลองขึ้นรูปอะลูมิเนียมเกรด A5052 และเหล็กเกรด SNCM420 ด้วยวิธีขึ้นรูปเย็น ซึ่งผลการทดลองพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน มาก จะมีอัตราผลต่อโหลดที่ใช้ในการขึ้นรูปจะมากตามไปด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.13 [6] โดยจากการศึกษาของ Takasu , Kasai และ Nakasaki สามารถที่จะนำตัวแปรที่มีอัตราผลต่อโหลดที่ใช้ในการขึ้นรูปไปประยุกต์เพื่อแก้ปัญหการแตกร้าวของชิ้นงานได้ต่อไป



รูปที่ 2.12 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของสารหล่อลื่น 3 ชนิด [6]



รูปที่ 2.13 แสดงผลการเปรียบเทียบแรงที่เกิดจากการขึ้นรูปที่แรงเสียดทานต่าง ๆ [6]

บทที่ 3 ขั้นตอนดำเนินงานวิจัย

กรณีศึกษาวิจัยนี้ เพื่อหาสาเหตุและค่าตัวแปรที่มีผลกระทบต่อการแตกร้าว อันเนื่องมาจาก ขบวนการขึ้นรูปโลหะด้วยวิธีขึ้นรูปในเหล็กคาร์บอนต่ำ 12L14 ตามมาตรฐาน AISI โดยอาศัยการวิเคราะห์ด้วยวิธีแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งนำไปสู่การทำนายการเกิดการแตกร้าว ในวัสดุ แล้วนำผลวิเคราะห์ไปสร้างกราฟ แสดงขอบเขตที่ปลอดภัยในขบวนการขึ้นรูปโลหะด้วยการตีขึ้นรูป โดยไม่เกิดการแตกร้าวในวัสดุ และแสดงถึงตัวแปรที่มีผลกระทบต่อการขึ้นรูปโลหะ เช่น สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (Friction coefficient (μ)) ที่ผิวชิ้นงานกับผิวแม่พิมพ์ ความเค้นของอัตราส่วนลดลงของพื้นที่หน้าตัด (Stress of area reduction ratio) ซึ่งสามารถนำค่าตัวแปรที่ได้ไปเป็นข้อมูลพื้นฐานในการออกแบบขบวนการขึ้นรูปวัสดุและรูปร่างของชิ้นงาน โดยนำผลจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ไปทดลองขึ้นรูปงานจริงเพื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลอง ซึ่งสามารถบ่งบอกความเป็นไปได้ของการนำแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์มาใช้ เพื่อลดเวลาและค่าใช้จ่ายในการทดลอง สำหรับงานวิจัยนี้ได้แบ่งขั้นตอนทำงานออกเป็นดังต่อไปนี้

3.1 ศึกษาการสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์

ในการศึกษาวิจัยนี้ ทางผู้วิจัยได้ทำการเลือกใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งมีชื่อทางการค้าว่า MSC.Marc 2003 โดยภายในโปรแกรมประกอบไปด้วย โปรแกรมย่อยที่ทำงานร่วมกันหลาย ๆ ฟังก์ชัน ซึ่งมีประสิทธิภาพในการวิเคราะห์ทางด้านวิศวกรรม เช่น การวิเคราะห์งานด้านเชิงกล (Structural Mechanics) การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer) และปัญหาเกี่ยวกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Electro-Magnetic) โดยโปรแกรม MSC.Marc 2003 ถูกออกแบบให้สามารถใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาแบบเชิงเส้น (Linear) หรือแบบไม่เชิงเส้น (Non-Linear) รวมทั้งปัญหาแบบไม่มีการเคลื่อนที่ (Static) และแบบเคลื่อนที่ (Dynamic) ได้เป็นอย่างดี ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาแบบจำลองพฤติกรรมของวัสดุที่อยู่ในสภาวะเงื่อนไขคงที่ (Steady State) และเป็นการจำลองที่มีเอลิเมนต์เกิดการเปลี่ยนรูปมาก (Large Deformation)

3.2 ศึกษาการสร้างแบบจำลอง

ในกรณีงานวิจัยฉบับนี้ ผู้วิจัยได้เลือกใช้โปรแกรมสำเร็จรูปไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งมีชื่อเรียกทางการค้า MSC.Marc 2003 โดยภายในโปรแกรมประกอบไปด้วย โปรแกรมย่อยที่ทำงานร่วมกันหลาย ๆ โปรแกรม ซึ่งมีประสิทธิภาพในการวิเคราะห์ปัญหาทางด้านวิศวกรรม เช่น การวิเคราะห์ งานด้านโครงสร้างเชิงกล (Structural Mechanics) การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer) และปัญหาสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Electro-Magnetic) โดย Marc ถูกออกแบบให้สามารถใช้ในการวิเคราะห์ปัญหา

แบบเชิงเส้น (Linear) หรือแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Non-Linear) รวมทั้งปัญหาแบบไม่มี การเคลื่อนที่ (Static) และ แบบเคลื่อนที่ (Dynamic) ได้เป็นอย่างดี ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการจำลองพฤติกรรมของ วัสดุที่อยู่ในสภาวะเงื่อนไขคงที่ (Steady State) และเป็นการจำลองที่เอลิเมนต์เกิดการเปลี่ยนรูปมาก (Large Deformation)

3.2.1 กำหนดคุณสมบัติวัสดุ

เนื่องจากปัญหาจากการขึ้นรูปด้วยวิธีขึ้นรูปนั้น วัสดุที่นำมาขึ้นรูป คือ เหล็กคาร์บอนแท่งกลมเกรด 12L14 ตามมาตรฐาน AISI ซึ่งมีส่วนผสมทางเคมีและค่าคุณสมบัติทางกลดังแสดงในตารางที่ 3.1 และตารางที่ 3.2 โดยเกรดเหล็กนั้น ถูกกำหนดตามข้อกำหนดของความปลอดภัยของผู้ใช้งาน (RoHS) คือ จะต้องไม่มีสารประกอบต้องห้าม ที่มีผลกระทบต่อร่างกายมนุษย์อันได้แก่ โครเมียม 6^+ ($Cr6^+$) แคดเมียม (Cd) ตะกั่ว (Pb) และปรอท (Hg) จึงมีความจำเป็นจะต้องยึดเกรดเหล็กนี้ เป็นหลักใน งานวิจัยนี้

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กคาร์บอนแท่งกลม AISI 12L14

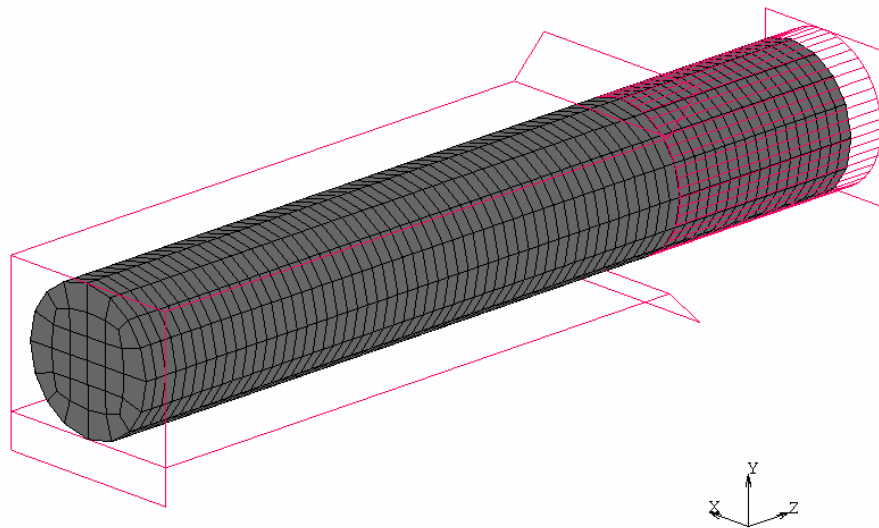
Standard	Specifications	C	Si	Mn	S	P	Ni	Cr	Mo	Pb
AISI	12L14	0.15	0.10	0.85	0.26	0.04	-	-	-	-

ตารางที่ 3.2 สมบัติทางกลของเหล็กคาร์บอนแท่งกลม 12L14

Materials	AISI 12L14
Density	8.03 kg/m ³
Elastic Modulus	210 GPa
Poisson's ratio	0.3

3.2.2 เงื่อนไขขอบ (Boundary Condition) ของแบบจำลอง

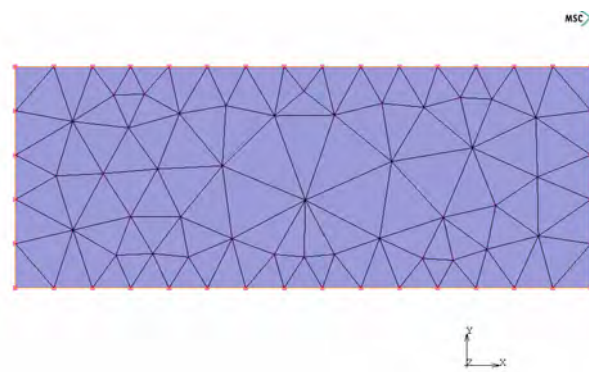
เนื่องด้วยการจำลองเหตุการณ์ของงานวิจัยนี้ ผู้ทำวิจัยได้กำหนดรูปแบบชิ้นงานเป็นแบบ 3 มิติ เสมือนจริง จึงไม่มีการกำหนดเงื่อนไขขอบในชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 3.1



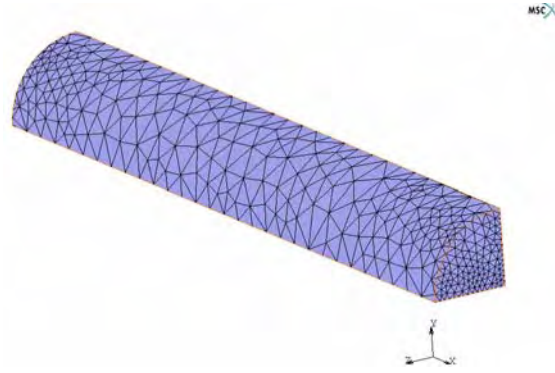
รูปที่ 3.1 ชิ้นงานสามมิติโปรแกรม MSC.Marc2003

3.2.3 การสร้างโครงตาข่ายของแบบจำลอง

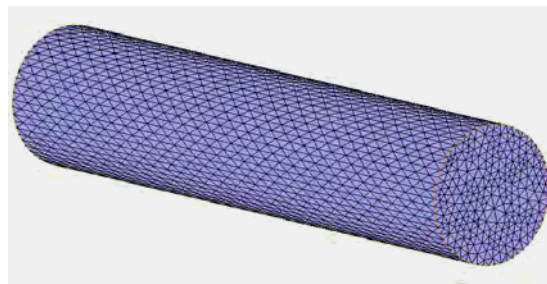
ในการสร้างโครงตาข่ายเอลิเมนต์ของแบบจำลอง เพื่อการวิเคราะห์วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ สามารถทำได้ในรูปแบบปัญหา 2 มิติ หรือปัญหา 3 มิติ และแบบแกนสมมาตร ชนิดของเอลิเมนต์ที่ใช้มีแบบสามเหลี่ยม สี่เหลี่ยม และแบบพีระมิด เช่นตัวอย่าง แสดงในรูปที่ 3.2 ซึ่งขนาดและจำนวนของเอลิเมนต์ที่ใช้ คุณสมบัติของวัสดุที่กำหนด และสภาพเงื่อนไขขอบเขต ต้องสอดคล้องกัน เพื่อช่วยให้สามารถทำนายผลได้ใกล้เคียงกับการทดลองจริงมากที่สุด



(ก)



(ข)

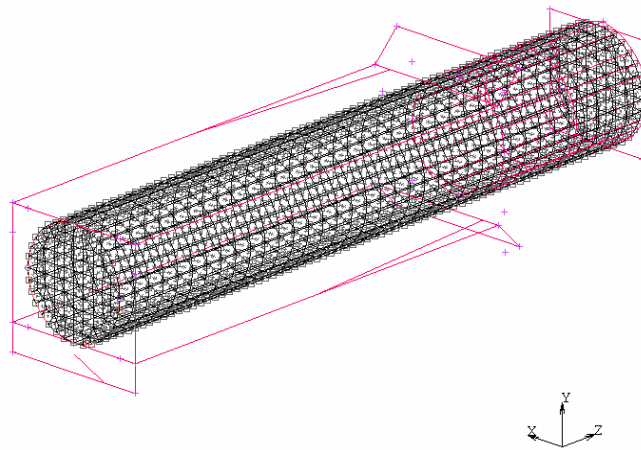


(ค)

รูปที่ 3.2 การวิเคราะห์โครงสร้างของแบบจำลอง

- (ก) โครงตาข่ายเอลิเมนต์สามเหลี่ยม 2 มิติแบบสมมาตร
- (ข) โครงตาข่ายเอลิเมนต์แบบสามเหลี่ยมพีระมิด 3 มิติ
แบบสมมาตร
- (ค) โครงตาข่ายเอลิเมนต์แบบสามเหลี่ยมพีระมิด 3 มิติ
แบบเหมือนจริง

ซึ่งทางผู้วิจัยได้เลือกรูปแบบปัญหาแบบ 3 มิติ และชนิดเอลิเมนต์แบบสี่เหลี่ยม เนื่องจากง่ายในการสร้างโครงตาข่ายเอลิเมนต์แบบรูปแบบ 3 มิติ เมื่อเปรียบเทียบกับโครงตาข่ายอื่นๆมีผลการจำลองเหตุการณ์ที่ใกล้เคียงกันดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แสดงโครงตาข่ายเอลิเมนต์แบบสี่เหลี่ยม

3.3 หาดลักษณะแบบจำลองที่เหมาะสม

การวิเคราะห์วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ สามารถทำได้ในรูปแบบปัญหา 2 มิติ (2D) หรือแบบปัญหา 3 มิติ (3D) และแบบสมมาตร (Symmetry) เช่น แสดงในรูปที่ 3.2 ซึ่งการวิเคราะห์ปัญหาแบบ 3 มิติ สามารถแสดงผลให้เข้าใจง่าย และรูปร่างใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด แต่ใช้เวลาในการประมวลผลนาน ส่วนการวิเคราะห์ปัญหาแบบ 2 มิติ และแบบสมมาตร สามารถแสดงผลให้เห็นได้เฉพาะส่วนหนึ่งของชิ้นงาน ดังนั้นการวิเคราะห์ผลให้ได้ถูกต้องใกล้เคียงกับความเป็นจริง ขึ้นอยู่กับขนาดของเอลิเมนต์ที่ใช้ คุณสมบัติของวัสดุที่กำหนด และสภาพเงื่อนไขขอบเขตที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการเปรียบเทียบตามสมมติฐาน และตามเทคนิคทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้ดังนี้

3.3.1 หาชนิดเอลิเมนต์ที่เหมาะสม

การหาชนิดเอลิเมนต์ที่เหมาะสม จำเป็นต้องเปรียบเทียบแบบจำลองเอลิเมนต์ ที่มีจำนวนจุดต่อในแต่ละเอลิเมนต์ที่แตกต่างกัน เนื่องจากเอลิเมนต์ที่มีจำนวนจุดต่อมากกว่า จะให้ผลการกระจัดใกล้เคียงกับผลเฉลยแม่นยำตรงมากกว่า เช่น การกำหนดการวิเคราะห์ให้แบบจำลอง ที่มีเอลิเมนต์ต่างชนิดกัน และมีจำนวนเอลิเมนต์ที่เท่ากัน แล้วทำการเปรียบเทียบความถูกต้องของผลลัพธ์ที่ได้ กับผลการทดลอง ซึ่งชนิดของเอลิเมนต์ที่ให้ผลลัพธ์ถูกต้องแม่นยำกว่า จะเป็นเอลิเมนต์ที่เหมาะสมในการใช้วิเคราะห์ผลต่อไป โดยในการวิเคราะห์นี้ได้ทำการเปรียบเทียบเอลิเมนต์แบบสามเหลี่ยม (Triangular) 3 จุดต่อ แบบสี่เหลี่ยม (Quadratic) 4 จุดต่อ และแบบพีระมิดทรงเพชร (Tetrahedral) 4 จุดต่อ เพื่อศึกษาถึงผลลัพธ์ดังกล่าวว่า เมื่อใช้เอลิเมนต์แต่ละชนิดในการวิเคราะห์นั้น ให้ผลที่แม่นยำหรือแตกต่างกันหรือไม่อย่างไร

3.3.2 หาจำนวนเอลิเมนต์และขนาดที่เหมาะสม

เทคนิคทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ในการกำหนดขนาดของเอลิเมนต์ ควรจะกำหนดให้บริเวณที่มีลักษณะเป็นส่วนโค้งเว้าของชิ้นงาน หรือมีการเปลี่ยนรูปมาก แทนด้วยเอลิเมนต์ที่มีขนาดเล็กเพียงพอที่จะทำให้ผลการวิเคราะห์ได้ถูกต้องแม่นยำ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องสร้างโครงร่างตาข่าย ให้เอลิเมนต์บริเวณส่วนโค้งมีขนาดเล็กลง แล้วค่อย ๆ ใหญ่ขึ้น เมื่อไกลบริเวณส่วนโค้งออกไป และทำเช่นเดียวกันกับในบริเวณที่มีการเปลี่ยนรูปมาก ในโครงสร้างที่มีเอลิเมนต์ขนาดเล็ก และมีจำนวนเอลิเมนต์ที่ใช้มากเกินไป ก็จะทำให้ใช้เวลาในการประมวลผลนาน และถ้าใช้เอลิเมนต์ที่มีขนาดใหญ่ โดยมีจำนวนเอลิเมนต์ที่น้อยเกินไป ก็จะทำให้ผลการวิเคราะห์ที่ได้คลาดเคลื่อนจากผลการทดลอง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเปรียบเทียบระยะเวลาการประมวลผลและผลที่ได้พร้อมกัน

3.3.3 เปรียบเทียบระยะเวลาการประมวลผลที่เหมาะสม

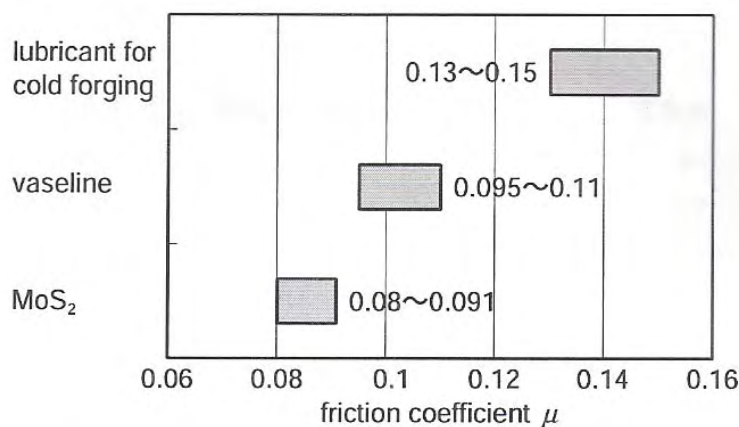
ในการวิเคราะห์วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ชนิดของเอลิเมนต์และจำนวนเอลิเมนต์มีผลกระทบต่อระยะเวลาในการประมวลผลโดยโปรแกรม ดังนั้นจึงจำเป็นต้องตรวจสอบ โดยเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลการทดลองของนักวิจัยท่านอื่น ๆ ว่า มีความสมเหตุสมผลเข้ากันได้ด้วยดีหรือไม่ และมีค่าความผิดพลาดอยู่ในช่วง ที่ยอมรับได้หรือไม่ แล้วเปรียบเทียบระยะเวลาในการประมวลผล เพื่อหาแบบจำลองที่เหมาะสม โดยสามารถใช้เวลาที่สั้นในการประมวลผล และสามารถได้ผลการวิเคราะห์ที่มีค่าความผิดพลาดน้อย เมื่อได้แบบจำลองขบวนการอัดขึ้นรูปโลหะที่เหมาะสมและยอมรับได้ ผู้วิจัยจะทำการสร้างแบบจำลอง และเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่มีผลกระทบในขบวนการอัดขึ้นรูปโลหะขึ้นมาทดสอบ ณ สถานะที่แตกต่างกันในลำดับต่อไป

3.4 การใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์และแสดงผล

การใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์สำเร็จรูป MSC.Marc 2003 ทำการสร้างแบบจำลองและกำหนดสมมติฐานและหลักเกณฑ์การวิเคราะห์เรียบร้อยแล้ว จึงทำการประมวลผลโดยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งโปรแกรมจะทำการคำนวณสมการต่าง ๆ เชิงตัวเลขในรูปของเมทริกซ์และแสดงผลที่ได้ในแบบรูปภาพ แถบสี ตัวเลข และกราฟ ของแรงหรือความเค้นและความเครียดต่าง ๆ ซึ่งสะดวกและง่ายในการทำความเข้าใจและการศึกษา เพื่อใช้เป็นประโยชน์ในการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลการทดลองของนักวิจัยท่านอื่น ๆ ต่อไป

3.4.1 กำหนดชนิดและค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานในการจำลองเหตุการณ์

สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเป็นตัวแปรหนึ่ง ซึ่งมีความสำคัญมากต่อกระบวนการขึ้นรูปโลหะ เพราะมีผลกระทบโดยตรงกับการเกิดความเค้นเฉือน (Shear Stress) ตรงบริเวณผิวสัมผัสระหว่างชิ้นงานและแม่พิมพ์ ซึ่งเราจะทำการหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจากการทดลองของ Takasu , Kasai และ Nakasaki ซึ่งได้ทำการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของสารหล่อลื่นอันได้แก่ MoS₂ , Vaseline และ Lubricant for Cold Forging ดังแสดงในรูปที่ 3.5 โดยเราจะเปรียบเทียบผลกระทบจากการจำลองเหตุการณ์ในโปรแกรม MSC.Marc2003 เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ที่เหมาะสมกับการขึ้นรูปในเหล็กคาร์บอนต่ำ AISI 12L14

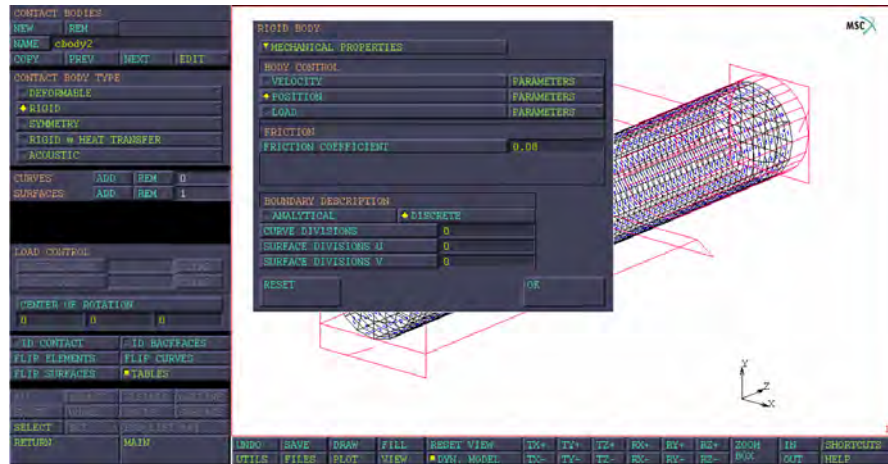


รูปที่ 3.4 แสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของสารหล่อลื่น 3 ชนิด

3.4.2 การหาสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานจริง

การหาสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน ที่เกิดขึ้นระหว่างผิวชิ้นงานกับพื้นและคายนั้น สามารถหาได้หลายวิธี ตัวอย่างเช่น วิธีการกดวงแหวน (Ring Compression Testing) ของ Avitzur , Van Tyne และ Umana ซึ่งเป็นหลักการที่ใช้ในการศึกษาพฤติกรรมของความเสียดทาน ภายใต้ช่วงการเปลี่ยนแปลงอย่างถาวรของชิ้นงาน เป็นต้น ส่วนในงานวิจัยนี้ได้นำโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์เข้ามาช่วยในการหาสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างการขึ้นรูปของชิ้นงาน ด้วยวิธีการตีขึ้นรูปของชิ้นงานจำลอง ซึ่งสามารถลดเวลาและค่าใช้จ่ายในการทดลองได้ และความเที่ยงตรงอยู่ในระดับยอมรับได้ โดยขั้นตอนการใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของรัศมีที่เปลี่ยนไปของชิ้นงาน (R) กับค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่างๆ ดังนี้

1. สร้างชิ้นงานจำลองในโปรแกรม MSC.Marc2003 ตามรูปที่ 3.3
2. นำค่าคุณสมบัติทางกลของวัสดุทดลองป้อนใน โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ MSC.Marc2003
3. ป้อนค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน ในแต่ละสภาวะหรือวิธี Interpolation ตั้งแต่ 0 ถึง 1 โดยเพิ่มขึ้นทีละ 0.05 ในแต่ละสภาวะของแบบจำลองดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.5 แสดงการป้อนค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานในชิ้นงานจำลอง

4. Run โปรแกรมเพื่อให้ได้ชิ้นงานที่เกิดการขึ้นรูป
5. วัดขนาดของชิ้นงานจำลอง ณ ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่าง ๆ
6. เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างรัศมีของชิ้นงานกับสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน
7. นำขนาดของรัศมีชิ้นงานจริงที่ได้จากการวัดจริงมาเปรียบเทียบกับกราฟเพื่อหาสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน

3.5 การสรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

หลังจากการทำทดลองตีขึ้นรูปด้วยโปรแกรม MSC.Marc2003 แล้ว ผู้วิจัยได้เลือกค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่เหมาะสม เพื่อนำไปทดลองการขึ้นรูปจริง เพื่อลดปัญหาการแตกร้าวที่เกิดขึ้น ตลอดจนแนวทางการแก้ไขและข้อเสนอแนะต่าง ๆ เพื่ออันเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจต่อไป

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 ผลการตรวจสอบประวัติการขึ้นรูปของวัสดุ AISI 12L14

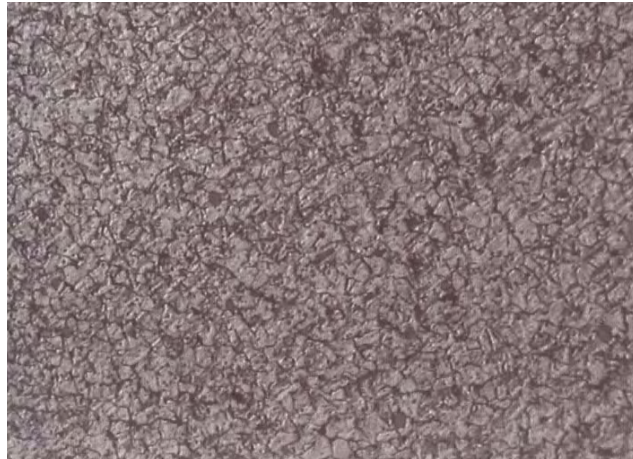
การตรวจสอบประวัติการขึ้นรูปของวัสดุ AISI 12L14 ที่นำมาทดลองนั้น เพื่อทำนายสาเหตุและโอกาสที่มีอิทธิพลต่อการขึ้นรูป โดยการนำชิ้นงานมาตรวจโครงสร้างจุลภาค ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ซึ่งบ่งบอกได้ว่า ชิ้นงานนี้ได้ผ่านกรรมวิธีการรีดเย็น โดยเปรียบเทียบจากรูปร่างของเกรนที่มีลักษณะเป็นแนวยาว ในทิศทางตามยาวของชิ้นงาน เมื่อเปรียบเทียบกับเกรนในแนวภาคตัดชิ้นงาน ที่เกรนมีรูปร่างเป็นทรงกลม ซึ่งจากกรรมวิธีการผลิตวัสดุด้วยวิธีการรีดเย็น ทำให้มีความเค้นตกค้างในเนื้อวัสดุ เมื่อนำวัสดุที่ผ่านกรรมวิธีดังกล่าว อาจเป็นผลให้เกิดการแตกร้าวหลังจากผ่านกรรมวิธีขึ้นรูปด้วยการตีขึ้นรูปได้



ก) เกรนแนวภาคตัดชิ้นงาน กำลังขยาย 500 เท่า



ข) เกรนตามยาวชิ้นงาน กำลังขยาย 500 เท่า



ค) เกรนแนวภาคตัดชิ้นงาน กำลังขยาย 200 เท่า



ง) เกรนตามยาวชิ้นงาน กำลังขยาย 200 เท่า

รูปที่ 4.1 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทดสอบ AISI 12L14

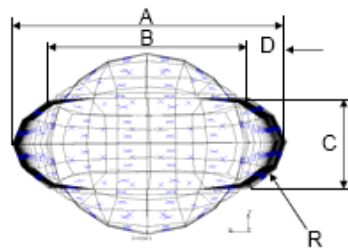
4.2 ผลการหาขนาดของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยโปรแกรมจำลองเหตุการณ์ ณ

สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่าง ๆ

จากการทดลองหาขนาดของชิ้นงานในโปรแกรม Marc.2003 ของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่าง ๆ สามารถหาความสัมพันธ์ของพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.1 ซึ่งพบว่า มิติขนาด A สามารถเคลื่อนที่ออกในทิศทางแนวนอนได้มากขึ้น เมื่อค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมากขึ้น เนื่องด้วยบริเวณผิวด้านข้างของชิ้นงานทดสอบไม่ได้สัมผัสกับผิวตาย จึงไม่มีสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน ณ บริเวณดังกล่าว ในขณะที่เดียวมิติขนาด B มีขนาดที่ลดลง เนื่องจากผิวของชิ้นงานทดสอบ

สัมผัสกับผิวคาย ที่มีสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานอยู่ เป็นผลให้ที่สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมากขึ้น โอกาสการเคลื่อนที่ของเนื้อชิ้นงานทดสอบยากขึ้นตามไปด้วย จึงเป็นผลให้มิติขนาด B ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่เพิ่มขึ้น ส่วนมิติขนาด R จะแปรผกผันกับสัดส่วนของส่วนต่างระหว่างมิติขนาด A และ B

ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบขนาดรูปร่างของชิ้นงานทดลองที่สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่างๆ

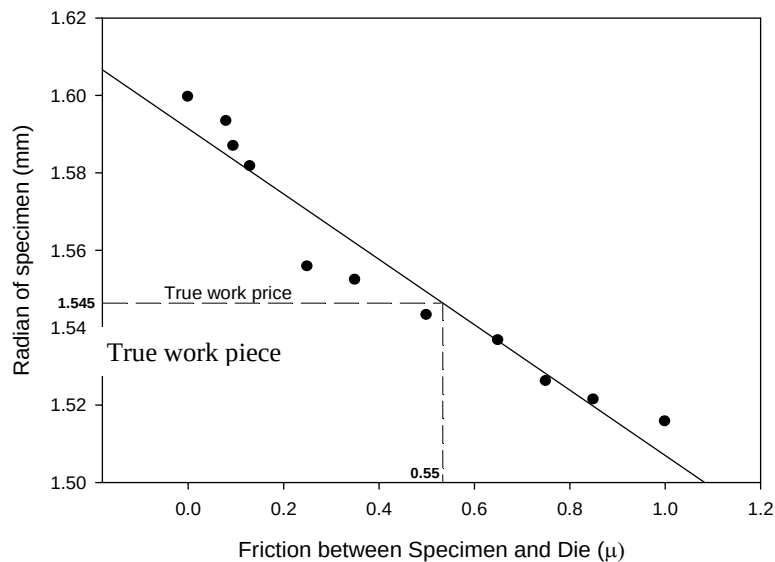


C คือ ช่องว่างระหว่างพื้นกับคาย
มีขนาดเท่ากับ 3 มิลลิเมตร

ลำดับที่	สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน	มิติขนาด (มม.)				
		A	B	C	D	R
1	0.00	7.983	5.895	3.000	1.044	1.600
2	0.05	8.233	6.125	3.000	1.054	1.594
3	0.10	8.376	6.229	3.000	1.0735	1.585
4	0.20	8.421	6.191	3.000	1.115	1.566
5	0.30	8.455	6.186	3.000	1.1345	1.559
6	0.40	8.486	6.153	3.000	1.1665	1.548
7	0.50	8.504	6.143	3.000	1.1805	1.543
8	0.60	8.547	6.108	3.000	1.2195	1.532
9	0.70	8.560	6.076	3.000	1.242	1.527
10	0.80	8.572	6.058	3.000	1.257	1.523
11	0.90	8.599	6.034	3.000	1.2825	1.518
12	1.00	8.618	6.022	3.000	1.298	1.516

4.3 ผลการหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของชิ้นงานผลิตจริง

จากการทดลองเพื่อหาสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน ที่เกิดขึ้นในกระบวนการขึ้นรูปด้วยการตีขึ้นรูป โดยเปรียบเทียบขนาดรัศมีของชิ้นงาน ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการขึ้นรูปด้วยการตีขึ้นรูปจริงกับการจำลองเหตุการณ์ด้วยโปรแกรม MSC.Marc2003 ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานนั้น แปรผันกับรัศมีของชิ้นงานที่ถูกตีขึ้นรูป ซึ่งผลการจำลองเหตุการณ์การขึ้นรูปจากโปรแกรม MSC.Marc2003 ดังแสดงในรูปที่ 4.3 โดยการหากราฟจากการกระจายของข้อมูล เพื่อให้ได้กราฟเส้นตรงของข้อมูล และง่ายต่อการใช้งานต่อไป เมื่อทำการเปรียบเทียบรัศมีของชิ้นงานจริงที่รัศมีเท่ากับ 1.545 มม. จะมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเท่ากับ 0.55 และนำค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน 0.55 ทำการจำลองเหตุการณ์ด้วยโปรแกรม Marc2003 เพื่อทำการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของขนาดระหว่างกราฟที่ได้ ซึ่งเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 1.29% ดังแสดงในตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกับรัศมีของชิ้นงาน

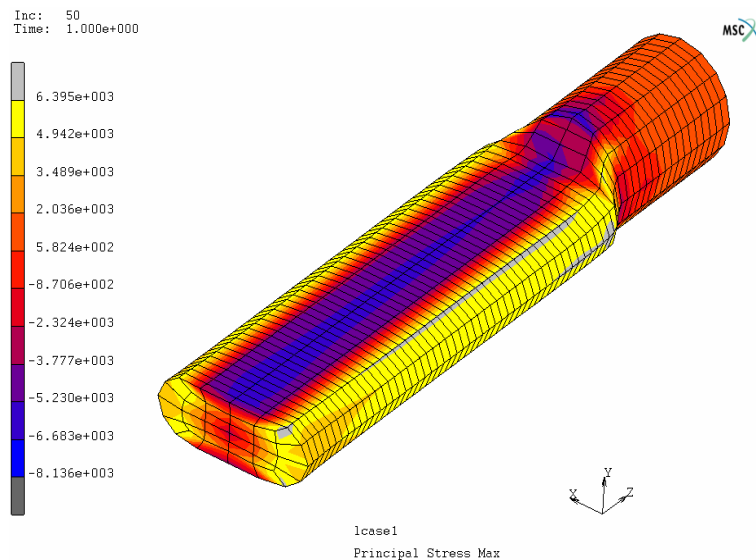
ตารางที่ 4.2 ตารางเปรียบเทียบการจำลองเหตุการณ์ขึ้นรูปกับค่าที่ได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเสียดทานกับขนาดของชิ้นงานจริง

	A (mm)	B (mm)	C (mm)	D (mm)	R (mm)	% error
True work piece	8.50	6.15	3.000	1.175	1.545	1.29%
Simulation by Marc	8.510	6.147	3.000	1.1815	1.525	

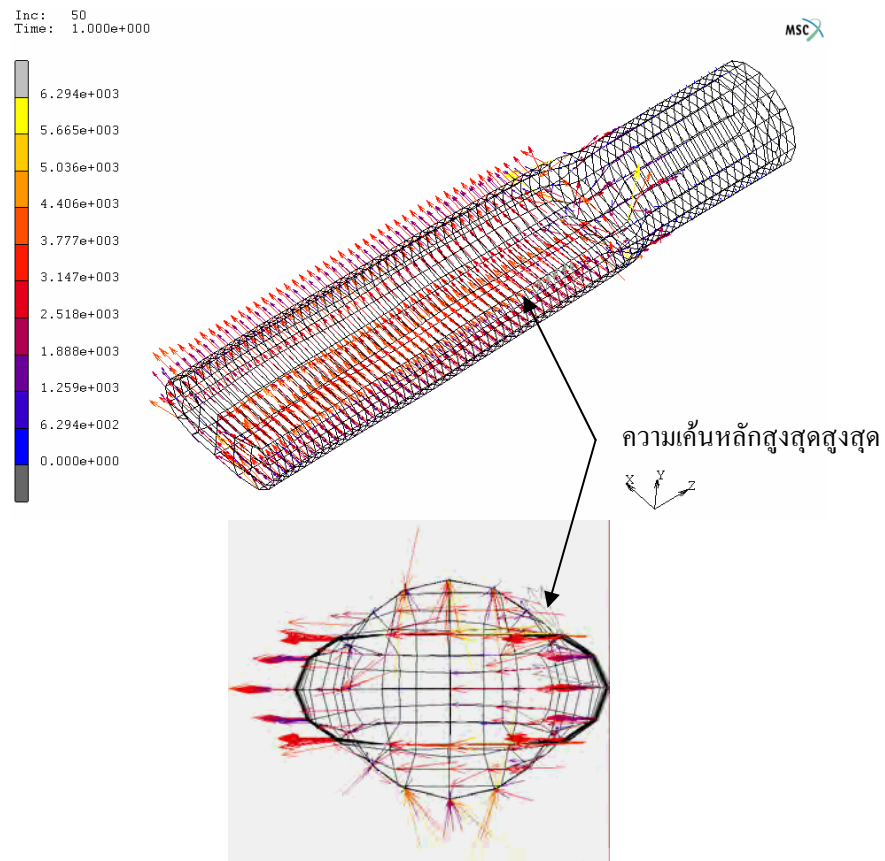
4.4 ผลการจำลองเหตุการณ์กระบวนการขึ้นรูปการตีขึ้นรูปด้วยโปรแกรม

Marc2003

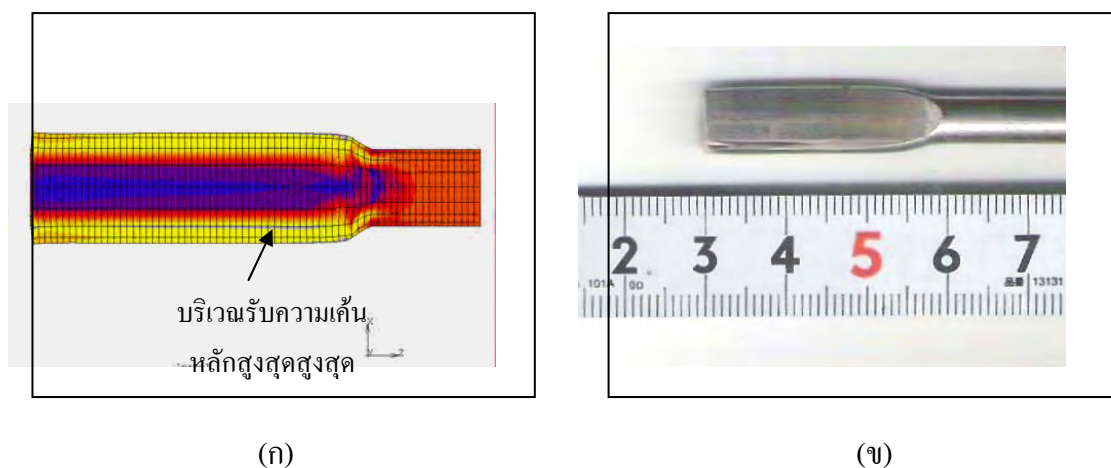
จากการจำลองเหตุการณ์ของชิ้นงานตัวอย่าง 3 มิติในโปรแกรม MSC.Marc2003 ซึ่งทำการจำลองโอกาสการเกิดการแตกร้าวในชิ้นงาน เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานจริง จากการทดลองเราพบว่า ชิ้นงานที่ถูกขึ้นรูปจากการตีขึ้นรูป ด้วยโปรแกรมจำลองเหตุการณ์ หรือ MSC.Marc2003 มีรูปร่างใกล้เคียงกับชิ้นงานจริง ซึ่งมีค่าเคลื่อนที่อยู่ที่ร้อยละ 1.29 จากผลการทดลองที่ 4.3 และเมื่อทำการเปรียบเทียบค่า Principal Stress Max จากผลการทดลองกับค่าความเครียดของวัสดุเหล็กคาร์บอนแท่งกลม 12L14 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 540 เมกะปาสกาล ซึ่งรูปที่ 4.3 แสดงความเค้นหลักสูงสุดในพื้นที่ต่าง ๆ บนชิ้นงานทดลอง และสามารถที่จะอธิบายถึงแนวโน้มหรือโอกาสที่จะเกิดการเสียหายได้ต่อไป



รูปที่ 4.3 แสดงชิ้นงานจำลองด้วยโปรแกรม MSC.Marc 2003 ที่สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเท่ากับ 0.55



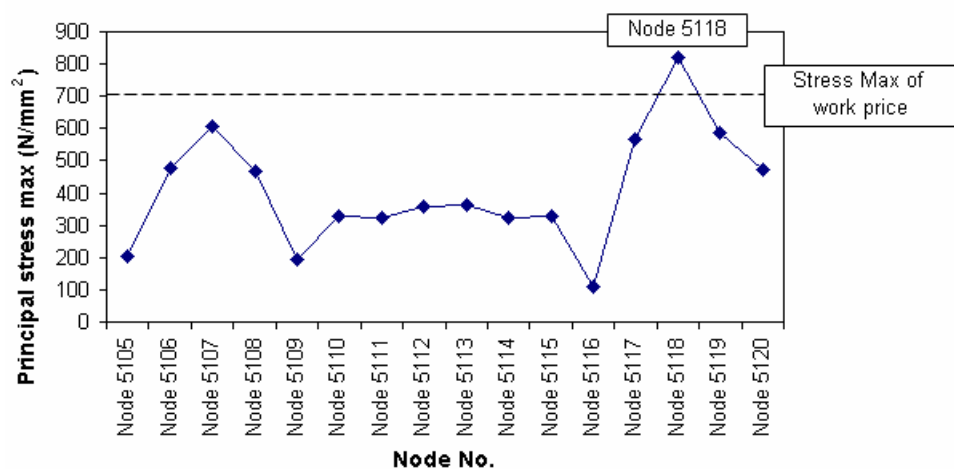
รูปที่ 4.4 แสดงทิศทางของความเค้นหลักสูงสุดที่กระทำต่อจุดต่อ



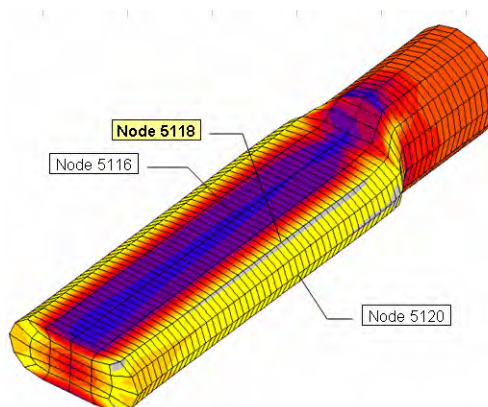
รูปที่ 4.5 แสดงเปรียบเทียบชิ้นงานจริงกับชิ้นงานจำลองด้วยโปรแกรม MSC.Marc2003

4.5 หาจุดต่อที่รับภาระความเค้นหลักสูงสุด

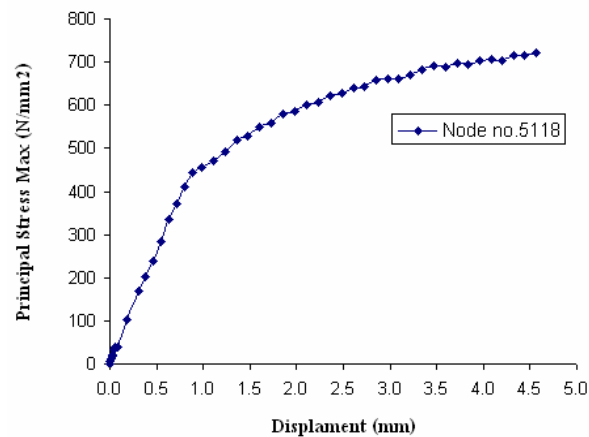
จากการจำลองเหตุการณ์ด้วยโปรแกรม MSC.Marc2003 เราสามารถระบุตำแหน่งและจุดต่อที่ถูกกระทำด้วยภาวะความเค้นหลักสูงสุดสูงสุดได้ ซึ่งเราสามารถนำมาทำนายโอกาสการเกิดการเสียหายได้ จากการทดลองเราได้ทำการวัดค่าความเค้นหลักสูงสุด ของกลุ่มจุดต่อที่มีความเค้นหลักสูงสุดสูงสุด โดยใช้กลุ่มแถบสีที่แสดงในรูปที่ 4.4 และผลที่ได้ดังแสดงในรูปที่ 4.6 ที่แสดงถึงค่าความเค้นหลักสูงสุดในแต่ละจุดต่อ เพื่อให้ได้จุดต่อที่รับภาระความเค้นหลักสูงสุด นำมาทำนายโอกาสการแตกร้าวที่จะเกิดขึ้นต่อไป



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความเค้นหลักสูงสุด (Principal Stress Max) ของแต่ละจุดต่อตรงบริเวณ ผิวด้านนอกแนวตัดส่วนกลางชิ้นงาน



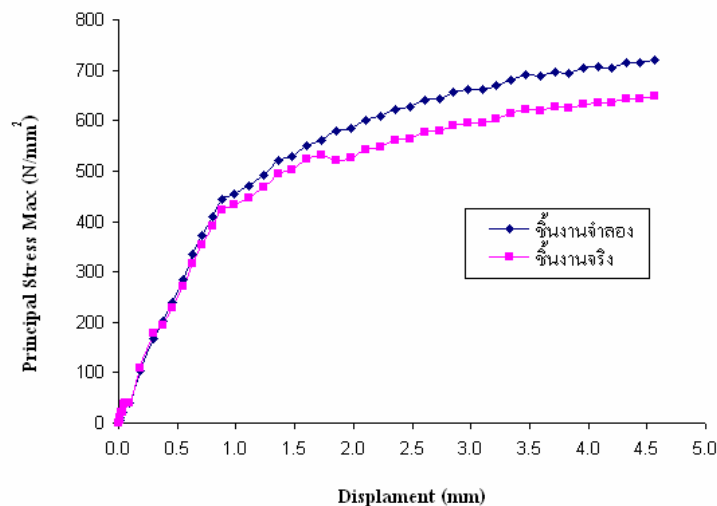
รูปที่ 4.7 แสดงตำแหน่งของจุดต่อ 5116 , 5118 และ 5120 ในชิ้นงานจำลอง



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความเค้นหลักสูงสุด (Principal Stress Max) ของจุดต่อ 5118 ที่สัมผัสกับแรงเสียดทานเท่ากับ 0.55

4.6 เปรียบเทียบความเค้นหลักสูงสุดของชิ้นงานจำลองกับชิ้นงานจริง

จากการทดลอง เพื่อหาค่าความเค้นของชิ้นงานทดสอบ โดยการทดลองด้วยวิธีการดึงด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง เราจะได้ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นดังรูปที่ ก.1 และทำการเปรียบเทียบผลการจำลองชิ้นงานจำลองกับผลการทดสอบแรงดึง ดังแสดงในรูปที่ 4.9 ซึ่งจากกราฟแสดงให้เห็นว่าค่าความเค้นที่เกิดขึ้นในชิ้นงานจำลอง มีภาวะการรับความเค้นมากกว่าชิ้นงานจริง

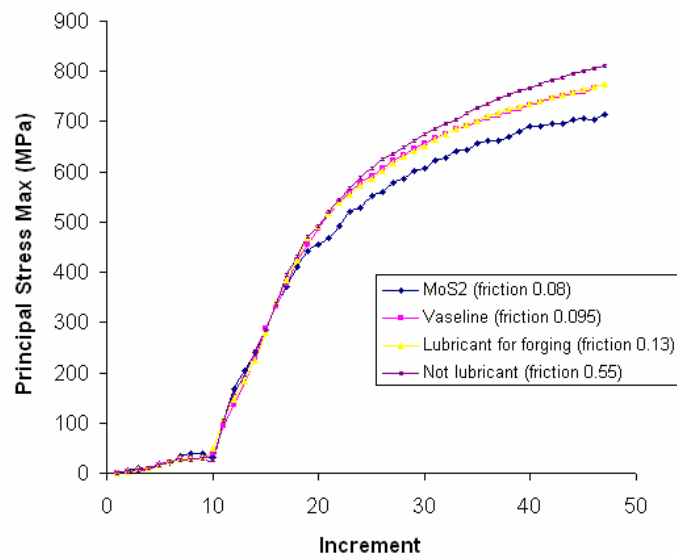


รูปที่ 4.9 กราฟเปรียบเทียบความเค้นระหว่างชิ้นงานจำลองที่สัมผัสกับแรงเสียดทานเท่ากับ 0.55 กับชิ้นงานจริง

4.7 ผลการเปรียบเทียบความเค้นหลักสูงสุดในขอบเขตเงื่อนไขสัมประสิทธิ์

แรงเสียดทานต่างกัน

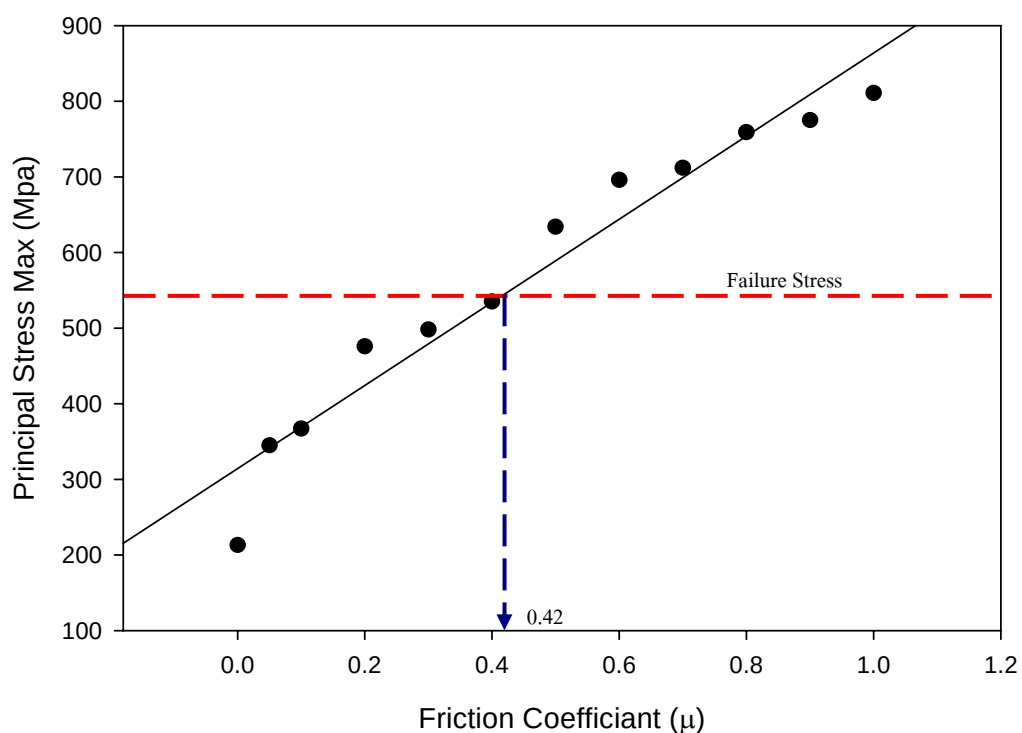
จากการทดลองเพื่อเปรียบเทียบความเค้นหลักสูงสุด ที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานจำลอง ณ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเท่ากับ 0.08 , 0.095 , 0.13 และ 0.55 ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเท่ากับ 0.08 ถึง 0.13 ได้จากการทดลองของ Takasu ,Kasai และ Nakasaki ได้หาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจากสารหล่อลื่น คือ MoS_2 , Vaseline และสารหล่อลื่นสำหรับการตีขึ้นรูปเย็น ตามลำดับ โดยจากการทดลองเราจะเห็นว่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน มีผลกระทบต่อค่าความเค้นสูงสุดดัง ดังแสดงในรูปที่ 4.9 ซึ่งสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน 0.08 จะมีผลให้ค่าความเค้นหลักสูงสุดน้อยที่สุด ส่วนสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน 0.55 จะมีค่าความเค้นหลักสูงสุดมีค่ามากที่สุด ซึ่งเราสามารถบอกได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานน้อยลง จะมีผลทำให้โอกาสการเสียหายจากการขึ้นรูปน้อยลงตามไปด้วย โดยเปรียบเทียบจากค่าวิกฤตการแตกร้าว



รูปที่ 4.10 กราฟเปรียบเทียบความเค้นหลักสูงสุดที่สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่าง ๆ

4.8 ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกับความเค้นหลักสูงสุด

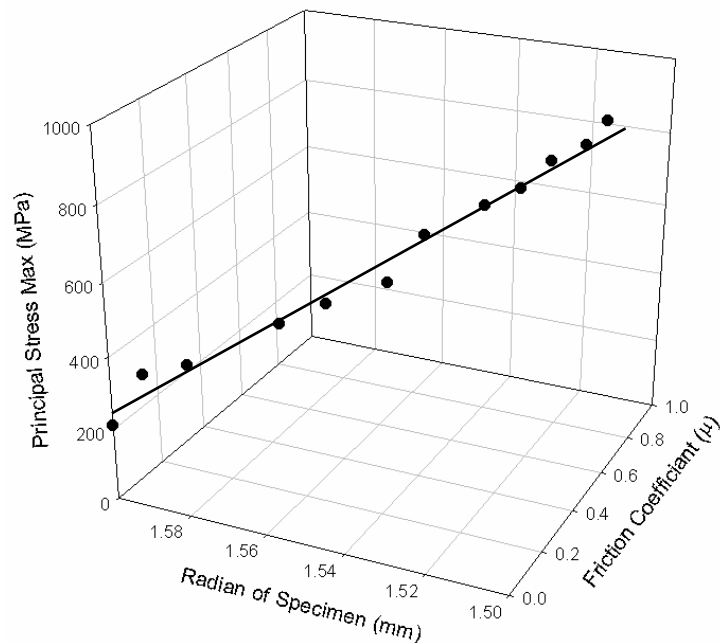
จากผลการจำลองเหตุการณ์ของโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์นั้น สามารถบอกถึงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสูงสุด ที่มีผลกระทบต่อโอกาสการเกิดความเสียหายของวัสดุ AISI 12L14 ที่ความเค้นหลักสูงสุด 540 เมกกะปาสกาล ซึ่งเป็นจุดที่เกิดโอกาสความเสียหายต่อวัสดุ หรือ Failure Stress โดยผลจากการทดลองสามารถหาความสัมพันธ์ในรูปแบบกราฟดังแสดงในรูปที่ 4.11 สามารถบอกได้ว่าค่าของสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสูงสุดของวัสดุ AISI 12L14 จากการขึ้นรูปด้วยการตีขึ้นรูป มีค่าเท่ากับ 0.42 ที่ค่าความเค้นหลักสูงสุดเท่ากับ 540 เมกกะปาสกาล จากผลการจำลองเหตุการณ์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ข้างต้น สามารถที่จะกำหนดขอบเขตสูงสุด ในการควบคุมตัวแปรที่ทำให้เกิดโอกาสเสียหายกับวัสดุได้ ซึ่งจากกราฟสามารถบอกได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานไม่ควรเกิน 0.42



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกับความเค้นหลักสูงสุด

4.9 สรุปผลการหาความสัมพันธ์ระหว่างรูปร่างของชิ้นงาน ความเค้นหลักสูงสุด และสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน

ผลการจำลองเหตุการณ์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ เราสามารถสรุปถึงความสัมพันธ์ระหว่างรูปร่างของชิ้นงาน ความเค้นหลักสูงสุดและสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน ที่เกิดขึ้นจากการขึ้นรูปด้วยการตีขึ้นรูปของวัสดุ AISI 12L14 ซึ่งสามารถสรุปได้ดังแสดงรูปที่ 4.12 จากกราฟพบว่า ความเค้นหลักสูงสุดจะเพิ่มขึ้นเมื่อสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมากขึ้น และขนาดของรัศมีชิ้นงานหลังจากขึ้นรูป จะลดลงจากการจำลองเหตุการณ์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์นั้น สามารถวิเคราะห์โอกาสการเกิดความเสียหายของวัสดุ AISI 12L14 จากการขึ้นรูปด้วยการตีขึ้นรูปได้ ด้วยขอบเขตเงื่อนไขต่าง ๆ ที่มีอิทธิพลต่อโอกาสเกิดความเสียหายได้ อันได้แก่ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน ขนาดรูปร่างของชิ้นงาน หลังจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ซึ่งบ่งบอกถึงพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง และความเค้นหลักสูงสุดที่เกิดขึ้นระหว่างการขึ้นรูป



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน รัศมีของชิ้นงานขึ้นรูป และความเค้นหลักสูงสุด

จากการศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการตีขึ้นรูป ที่ผิวสัมผัสระหว่างผิวของพื้นและคายกับชิ้นงาน พบว่า จะมีสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเกิดขึ้นและมีอิทธิพลต่อรูปร่างของชิ้นงานและโอกาสเสียหายได้ เมื่อเปรียบเทียบชิ้นงานจริงที่เกิดความเสียหายจากการขึ้นรูปจริง ดังนั้นจากผลการทดลอง เราสามารถที่จะลดโอกาสเกิดความเสียหายได้ โดยการลดสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานบริเวณผิวสัมผัสระหว่างผิวดายและชิ้นงานไม่เกิน 0.42 และขนาดรัศมีของชิ้นงานไม่น้อยกว่า 1.547 มิลลิเมตร ซึ่งจากผลการทดลองที่ 4.7 ได้นำเอาสารหล่อลื่นที่มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเท่ากับ 0.08 , 0.095 และ 0.13 ผลปรากฏว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานทั้งหมด เมื่อทำการจำลองเหตุการณ์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์แล้ว พบว่าค่าความเค้นหลักสูงสุดไม่เกิน 540 เมกะปาสกาล และไม่มีผลต่อโอกาสเกิดความเสียหาย

บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

1. โปรแกรมจำลองเหตุการณ์การขึ้นรูปด้วยการตีขึ้นรูปของเหล็ก AISI 12L14 หรือเหล็ก Lead Free Cutting นั้น สามารถบอกถึงค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างการขึ้นรูปได้ จากการเปรียบเทียบรูปร่างระหว่างชิ้นงานจริงกับชิ้นงานจำลอง ซึ่งสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเท่ากับ 0.55 และมีค่าคาบเคลื่อนอยู่ที่ร้อยละ 1.29
2. จากผลการจำลองเหตุการณ์โดยโปรแกรม MSC.Marc2003 นั้น แสดงให้เห็นถึงรูปร่างชิ้นงานที่มีความคล้ายคลึงกับชิ้นงานจริง และที่ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเท่ากับ 0.55 ยังสามารถทำนายตำแหน่งของรอยแตกร้าวได้ใกล้เคียงกับชิ้นงานจริงดังแสดงในรูปที่ 4.5
3. จากการศึกษาเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่เกิดขึ้น ระหว่างผิวชิ้นงานกับแม่พิมพ์ โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเท่ากับ 0.08 , 0.095 และ 0.13 ผลจากการทดลองพบว่าค่าความเค้นหลักสูงสุดที่กระทำกับชิ้นงานจะลดลงตามค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.10 ซึ่งหมายความว่า โอกาสเกิดความเสียหายจากการขึ้นรูปด้วยขบวนการตีขึ้นรูปดังกล่าว ลดลงตามไปด้วย
4. ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่น้อยที่สุดคือ 0.08 สามารถลดความเค้นที่เกิดในชิ้นงานได้มากที่สุด และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเท่ากับ 0.13 สามารถลดความเค้นที่เกิดในชิ้นงานได้น้อยที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 4.10 โดยจากผลการทดลองดังกล่าว สามารถบอกถึงพฤติกรรมและรูปร่างที่เกิดขึ้นจากการขึ้นรูปได้ ดังแสดงในภาคผนวก ค ดังนั้นเราสามารถนำผลการทดลอง โดยนำสารหล่อลื่นที่มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานใกล้เคียงกับการทดลองไปใช้ในการขึ้นรูปจริงได้ เพื่อเปรียบเทียบผลการทดลองและลดปัญหาการแตกร้าวของวัสดุได้
5. จากความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน ขนาดรัศมีของชิ้นงานและความเค้นหลักสูงสุด พบว่า ความเค้นหลักสูงสุดแปรผันตรงกับสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน แต่จะแปรผกผันกับขนาดรัศมีของชิ้นงาน ซึ่งสามารถระบุขอบเขตค่าของตัวแปรที่เหมาะสม เพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายระหว่างการขึ้นรูป คือ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานไม่เกิน 0.42 และขนาดรัศมีของชิ้นงานไม่น้อยกว่า 1.547 มิลลิเมตร

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม MSC.Marc2003 ได้นำตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการแตกร้าวในชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการตีขึ้นรูป เพื่อเป็นแนวทางในการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้น จากการขึ้นรูปจริง โดยจากการศึกษาได้นำค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานค่าต่าง ๆ เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างรูปร่างชิ้นงานและความเค้นหลักสูงสุด จากผลการศึกษาเราสามารถนำสารหล่อลื่นที่มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานใกล้เคียงจากการจำลองเหตุการณ์และนำไปใช้ในกระบวนการขึ้นรูปด้วยวิธีการตีขึ้นรูป เพื่อลดปัญหาการแตกร้าวที่อาจเกิดขึ้นได้ระหว่างการขึ้นรูปด้วยการตีขึ้นรูป แต่จากการจำลองลำดับขั้นตอนการเปลี่ยนแปลงของรูปร่างของชิ้นงาน พบว่า มีความคาบเคลื่อนของรูปร่างถึงร้อยละ 1.29 ซึ่งอาจมีสาเหตุจากขอบเขตเงื่อนไขในสภาวะการขึ้นรูปจริง จะมีมากกว่าโปรแกรมจำลองเหตุการณ์ ดังนั้นถ้าเราสามารถที่จะกำหนดเงื่อนไข ในการจำลองเหตุการณ์ด้วยโปรแกรมได้ใกล้เคียงกับสภาวะการขึ้นรูปจริงมากเท่าไรก็อาจที่จะสามารถได้ค่าที่มีความเที่ยงตรงตามไปด้วย

เอกสารอ้างอิง

1. George E.Dieter , 1988, “Mechanical Metallurgy”, **McGraw-Hill Book Company (UK)**, New York , pp. 550-554.
2. Norman E.Dowling, 1993, “Mechanical Behavior of Materials”, **Englewood Cliffs**, New Jersey, pp. 102-108.
3. Bridgman, P.W., 1925 , “Studies in Large Plastic Flow and Fracture”, **McGraw-Hill Book Company (UK)**, New York, pp. 127-128.
4. Coffin, L.F. and Rogers, H.C., 1971, “The influence of was subsequently covered”, **Mechanical Science**, American, pp. 141-155.
5. ภูวเสถียร คำดังหาญ, 2005, “การสร้างแบบจำลองไฟในตัวอย่างและการศึกษาโดยอาศัยการทดลองของกระบวนการตีขึ้นรูปร้อนแม่พิมพ์ปิด”, วิทยานิพนธ์ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 4.
6. Takasu , Kasai and Nakasaki, 2000, “Practical use Numerical Analysis and Physical Simulation to Cold Die Forging Process”, **Sanyo Technical**, Japan, Vol. 7, pp. 2-5.
7. Wagener, H.W. and Wolf, J., 1996, “Cold Extrusion of Titanium Alloys and Titanium MMCs”, **Symposium on Advances in the Science and Technology of Titanium Alloy Processing**, TMS, Anaheim Germany, Vol. 1, pp. 5, [1996, February 4-8].
8. Lange, K., 1991, **Handbook of Metal Forming**, McGraw-Hill, New York, pp. 13.1-15.93.
9. ดำรง ไชยธีรานุวัตรศิริ, 2521, การขึ้นรูปโลหะ, บริษัท ซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัด, กรุงเทพฯ, หน้า 33-57.
10. Kobayashi, S., Oh, S.I. and Altan, T., 1989, “Metal Forming and the Finite Element Method”, **Oxford University Press**, England, pp. 1-10.

11. เดช พุทธเจริญทอง, 2541, การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์, ศูนย์สื่อเสริมกรุงเทพ, หน้า 1-231.
12. Dowling, N.E., 1999, **Mechanical Behavior of Materials**, 2nd ed., Prentice Hall, New Jersey, pp. 127-156.
13. Aravas, N., 1986, “The Analysis of Void Growth That Leads to Central Bursts During Extrusion”, **Journal of Mechanics Physics and Solids**, Vol. 34, pp. 55-79.
14. Babout, L., Maire, E., Buffiere, J.Y. and Fougères, R., 2001, “Characterization by X-Ray Computed Tomography of Decohesion, Porosity Growth and Coalescence in Model Metal Matrix Composites”, **Acta Mater**, pp. 2055-2063.
15. Gouveia, B.P.P.A., Rodrigues, J.M.C. and Martins, P.A.F., 2001, “Ductile Fracture in Metalworking Experimental and Theoretical Research”, **Journal of Materials Processing Technology**, pp. 52-63.
16. Reddy, N.V., Dixit, P.M. and Lal, G.K., 1996, “Ductile Fracture Criteria and Its Prediction in Axisymmetric Drawing”, **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, pp. 95-111.
17. Komori, K., 2003, “Effect of Ductile Fracture Criteria on Chevron Crack Formation and Evolution in Drawing”, **International Journal of Mechanical Sciences**, pp. 141-160.
18. MSC.Marc, 2003, **User's Guide**, MSC. Software Corporation, USA, Vol. E, pp. 1-156.

ภาคผนวก ก
การขึ้นรูปชิ้นงาน

ก. 1 เงื่อนไขและสาเหตุของปัญหาที่เกิดขึ้นจากขบวนการผลิต

1. วัสดุได้ถูกกำหนดให้โดยผู้ออกแบบ คือ AISI 12L14 (ตามข้อกำหนด RoHS (Restriction of the Certain Hazardous Substances))
2. เปอร์เซ็นต์งานที่เสียหายอยู่ที่ร้อยละ 53.08 จากจำนวน 5000 ชิ้น ซึ่งทุก ๆ ชิ้นใช้เงื่อนไขขอบเขตเดียวกัน คือ เครื่อง Pressing เดียวกัน และผลิตแบบต่อเนื่องด้วยผู้ปฏิบัติงานคนเดียว
3. รูปร่างของ Die ที่ขึ้นรูป ซึ่งเป็น Die ชนิดเปิด โดยใช้ขนาดเครื่อง Pressing ขนาด 80 ตัน
4. ไม่มีการหล่อลื่นระหว่างชิ้นงานกับ Die ซึ่งอาจเป็นอิทธิพลทำให้เป็นสาเหตุจากการแตกร้าวได้



รูปที่ ก.1 เครื่อง Pressing ขนาด 80 ตัน



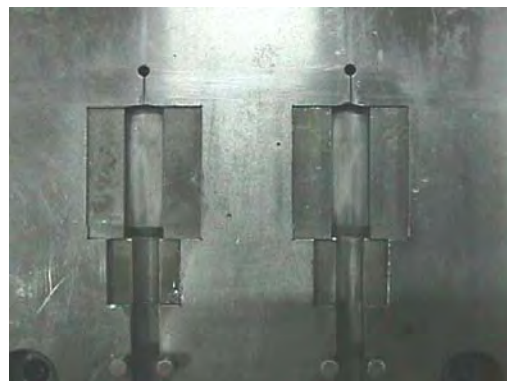
รูปที่ ก.2 Punch-Die ของชิ้นงานทดลอง



ก. แสดง Die



ข. แสดงรูปร่างของ Punch

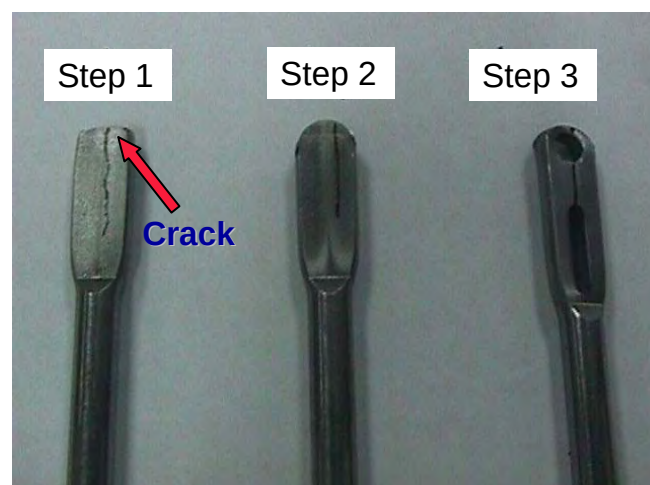


ค. แสดงรูปร่างของ Die

รูปที่ ก.3 Punch และ Die ของชิ้นงานทดลองในขั้นตอนการขึ้นรูปที่ 1

ก. 2 ขั้นตอนการขึ้นรูปชิ้นงาน

1. นำชิ้นงานเพลากลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 มม. จำนวน 2 ชิ้น วางในตำแหน่งของ Die และทำการตีชิ้นงานให้แบน และวัดขนาดตามมาตรฐานที่กำหนด
2. นำชิ้นงานในขั้นตอนที่ 1 มาวางในตำแหน่งของ Die ในชุด Punch-Die ชุดที่ 2 จำนวน 1 ชิ้น เพื่อทำการลบมุมให้มีขนาดรูปร่างตามที่กำหนดไว้
3. นำชิ้นงานในขั้นตอนที่ 2 มาทำการเปลี่ยนตำแหน่งของชิ้นงาน วางในตำแหน่งถัดไป เพื่อทำการเจาะรูทั้ง 2 ตำแหน่ง ดังที่ได้กำหนดไว้ในแบบ จากนั้นทำการตรวจรูปร่างชิ้นงานด้วยสายตา และทำการวัดขนาดในขั้นตอนสุดท้ายว่าตรงตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ในแบบ



รูปที่ ก.4 แสดงชิ้นงานในขั้นตอนการผลิตต่าง ๆ

ภาคผนวก ข
สมบัติทางกลของวัสดุ

ข.1 วัสดุการทดลองและสมบัติทางกลของวัสดุ

วัสดุการทดลอง คือ เหล็กคาร์บอนต่ำ AISI 12L14 หรือ Lead Free Cutting Steel

ตารางที่ ข.1 แสดงค่าทางเคมีของวัสดุ AISI 12L14

Standard	Specifications	C	Si	Mn	S	P	Ni	Cr	Mo	Pb
AISI	12L14	0.15	0.10	0.85	0.26	0.04	-	-	-	-

Density : 8.03 kg./m³

Young's modulus : 210 GPa.

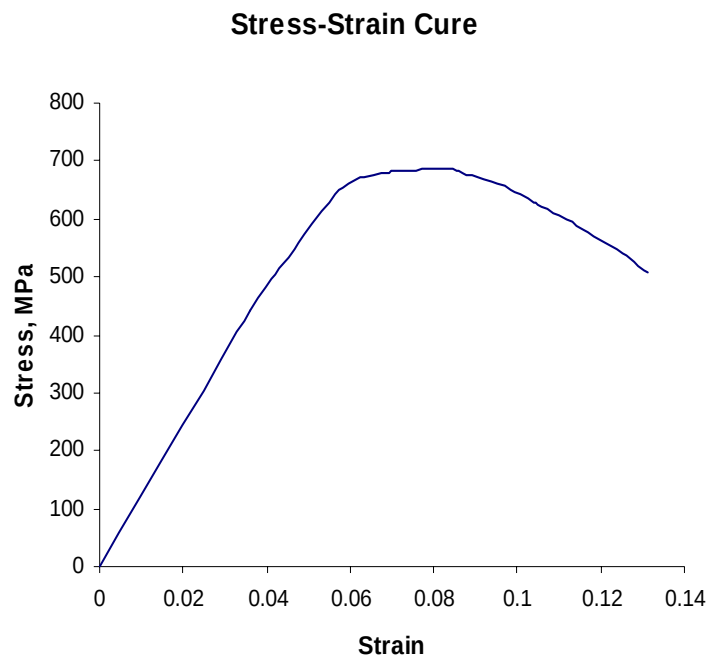
Poisson's ratio : 0.3

ข.2 การทดสอบแรงดึงของวัสดุ AISI 12L14

การทดสอบแรงดึง เพื่อหาค่าความเค้นและความเครียดของชิ้นงานทดลอง และนำไปใช้ในโปรแกรม MSC.Marc2003 เพื่อทำการจำลองเหตุการณ์และทำนายการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของชิ้นงานทดลอง ดังแสดงในรูปที่ ข.2 และ ข.3



รูปที่ ข.1 แสดงชิ้นงานทดสอบแรงดึง



รูปที่ ข.2 แสดงกราฟค่าความเค้นและความเครียดของวัสดุ AISI 12L14

ข.3 ความเค้นจริงและความเครียดจริง

จากการทดสอบด้วยวิธีทดสอบแรงดึง จะได้ค่าความเค้นวิศวกรรมและความเครียดวิศวกรรม ซึ่งยังไม่สามารถนำมาใช้ในโปรแกรมจำลองหรือ MSC.Marc2003 ได้ จึงจะต้องทำการเปลี่ยนแปลงค่าความเค้นวิศวกรรมและความเครียดวิศวกรรม ให้เป็นความเค้นจริงและความเครียดจริง โดยการคำนวณจากสูตรดังนี้

ความเค้น ณ ตำแหน่งใด ๆ คือ

(ข.1)

$$\sigma_f = \frac{P_f}{A_f}$$

$$\sigma_T = \frac{P}{A_i}; A_i = \frac{A_o L_o}{L_i}$$

$$\sigma_T = \frac{P L_i}{A_o L_o};$$

$$\sigma = \frac{P}{A_o};$$

$$L_i = L_o + \Delta L;$$

$$\frac{L_i}{L_o} = \frac{L_o + \Delta L}{L_o} = (1 + \varepsilon)$$

ดังนั้นความเค้นจริง คือ

$$\sigma_T = \sigma (1 + \varepsilon) \quad (ข.2)$$

ความเครียด ณ ตำแหน่งใด ๆ คือ

$$\varepsilon_f = \ln \left(\frac{A_o}{A_f} \right) \quad (ข.3)$$

$$d\varepsilon_T = \frac{dL_i}{L_i}$$

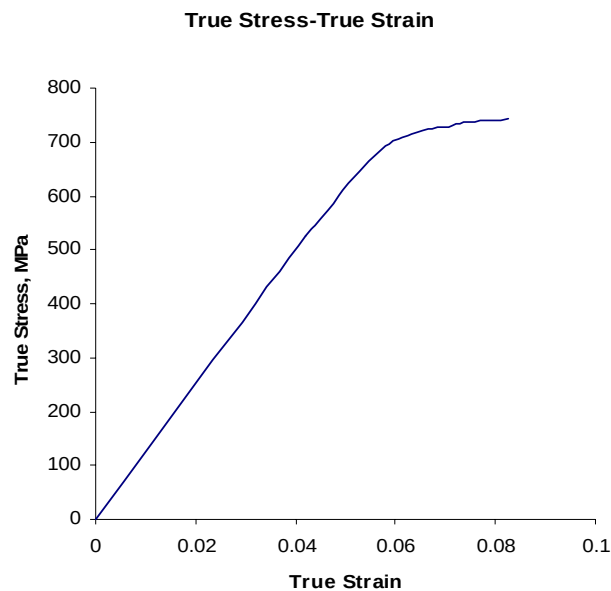
$$\varepsilon_T = \ln \left(\frac{L_i}{L_o} \right)$$

$$L_i = L_o + \Delta L;$$

ดังนั้นความเครียดจริง คือ

$$\varepsilon_T = \ln(1 + \varepsilon) \quad (ข.4)$$

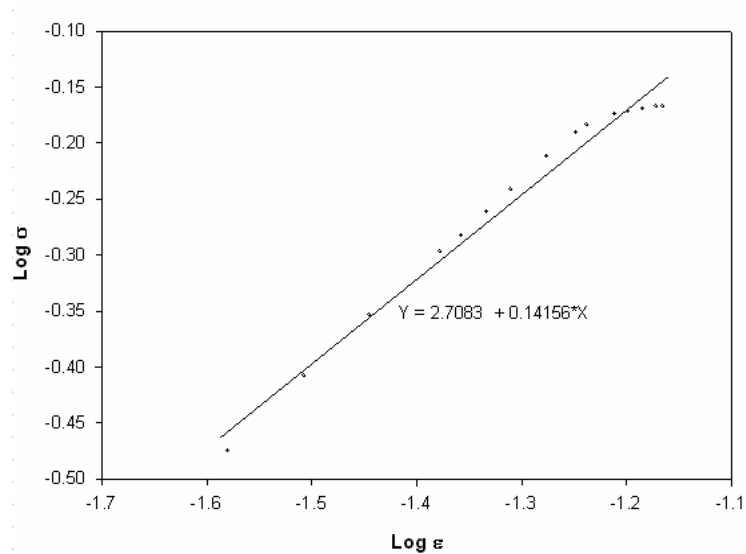
จากนั้นทำการคำนวณ เพื่อหากราฟของความเค้นจริงและความเครียดจริง ดังแสดงในกราฟที่ ข.4 เพื่อนำไปหาค่า K และ n ในสมการของ Power law ไปใช้ในโปรแกรม MSC.Marc2003 ต่อไป



รูปที่ ข.3 กราฟแสดงความเค้นจริงและความเครียดจริง

ข.4 การหาค่า K และ n จากสมการ Power Law

จากสมการ Power Law คือ $\sigma = K\epsilon^n$ เพื่อทำการหาค่า K และ n นำไปใช้ในโปรแกรม MSC.Marc 2003 โดยการหาค่าได้จากสมการ $\text{Log}\sigma = \text{Log}K + n\text{Log}\epsilon$ จะได้กราฟดังรูปที่ ข.5 และหาค่า K และ n ต่อไป



รูปที่ ข.4 กราฟแสดงค่า Log σ และค่า Log ε

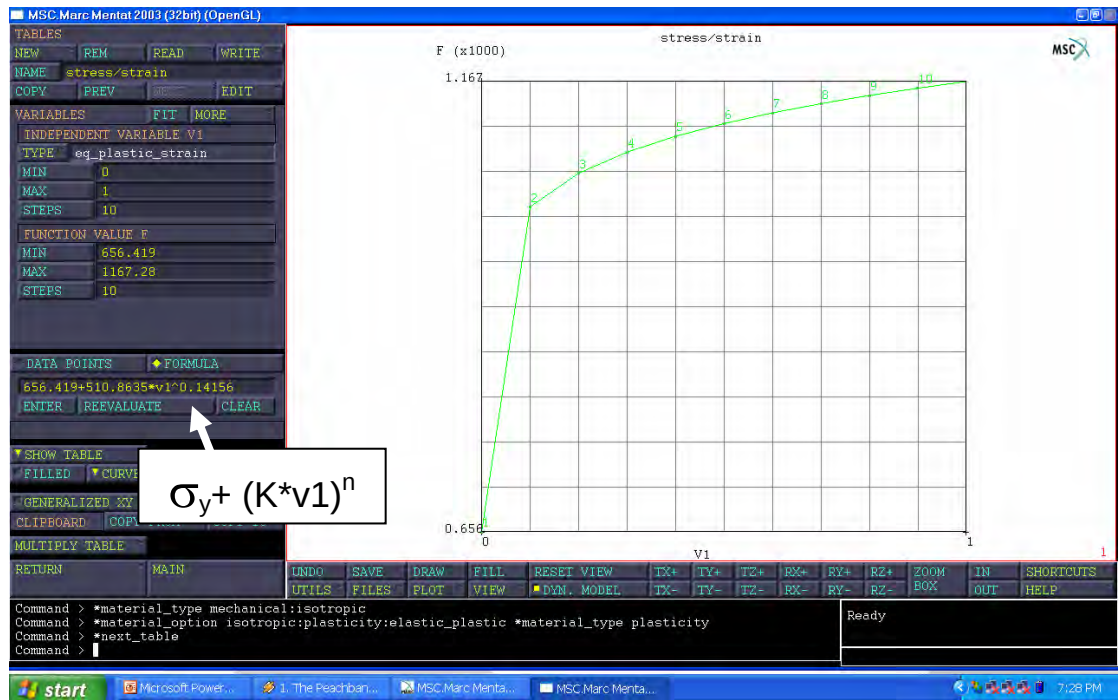
จากกราฟจะได้สมการ คือ $Y = 2.7083 + 0.14156X$ (ข.5)

เมื่อ $\text{Log } K = 2.7083$

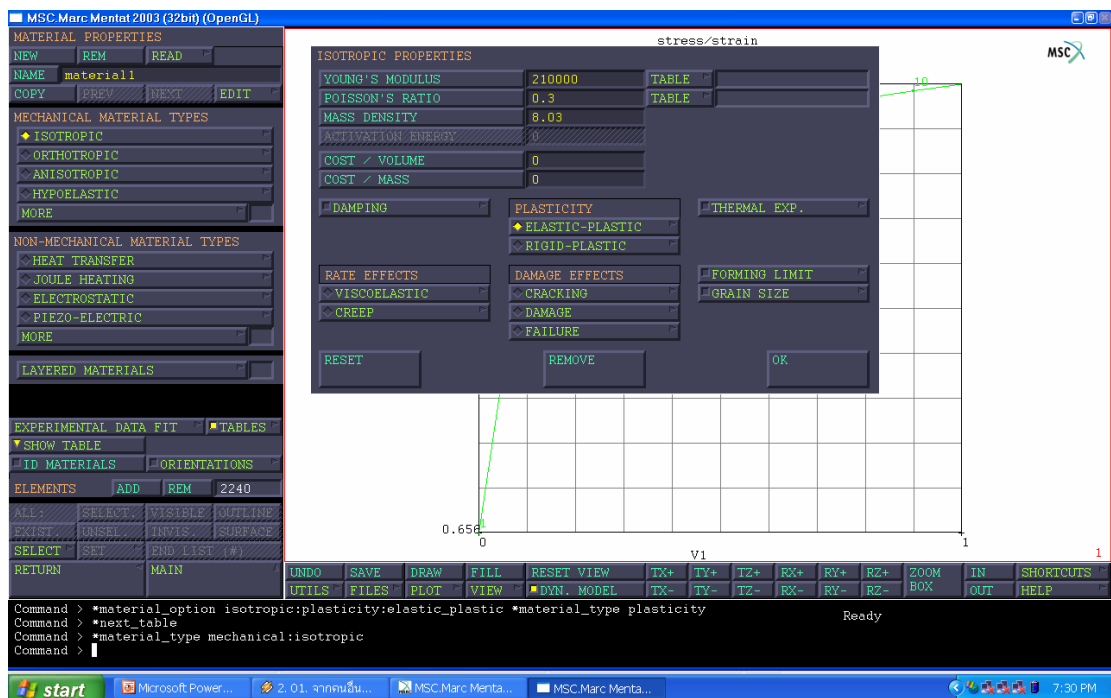
ดังนั้น $K = 10^{2.7083} = 510.8635$

และ $n = 0.14156$

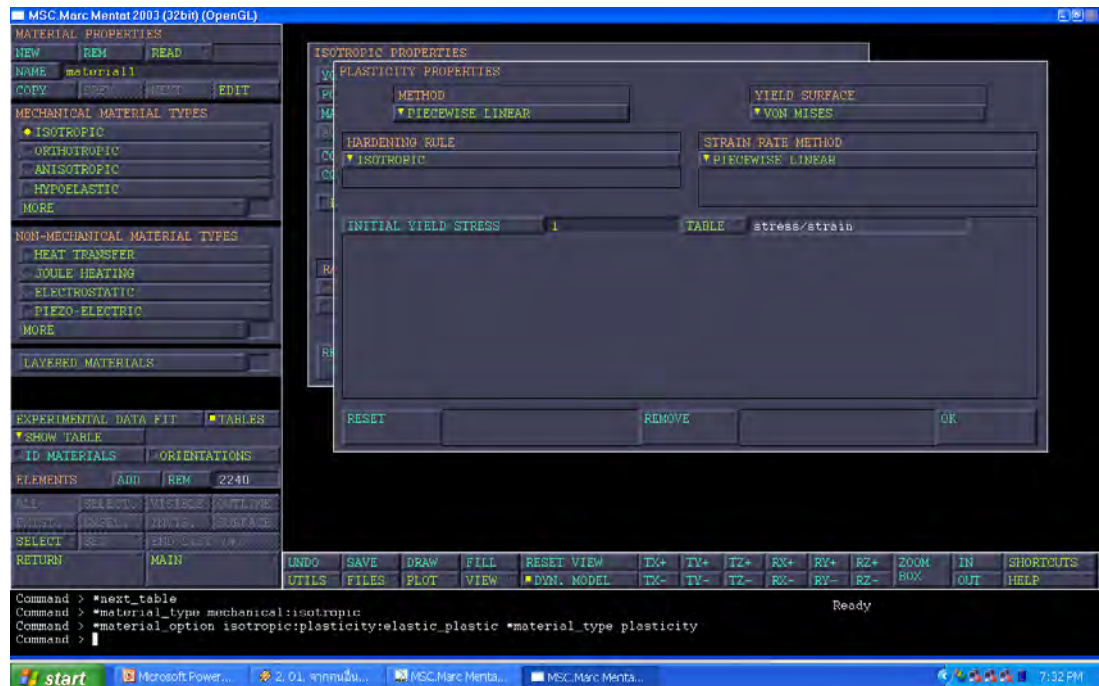
ภาคผนวก ค
การป้อนค่าวัสดุ



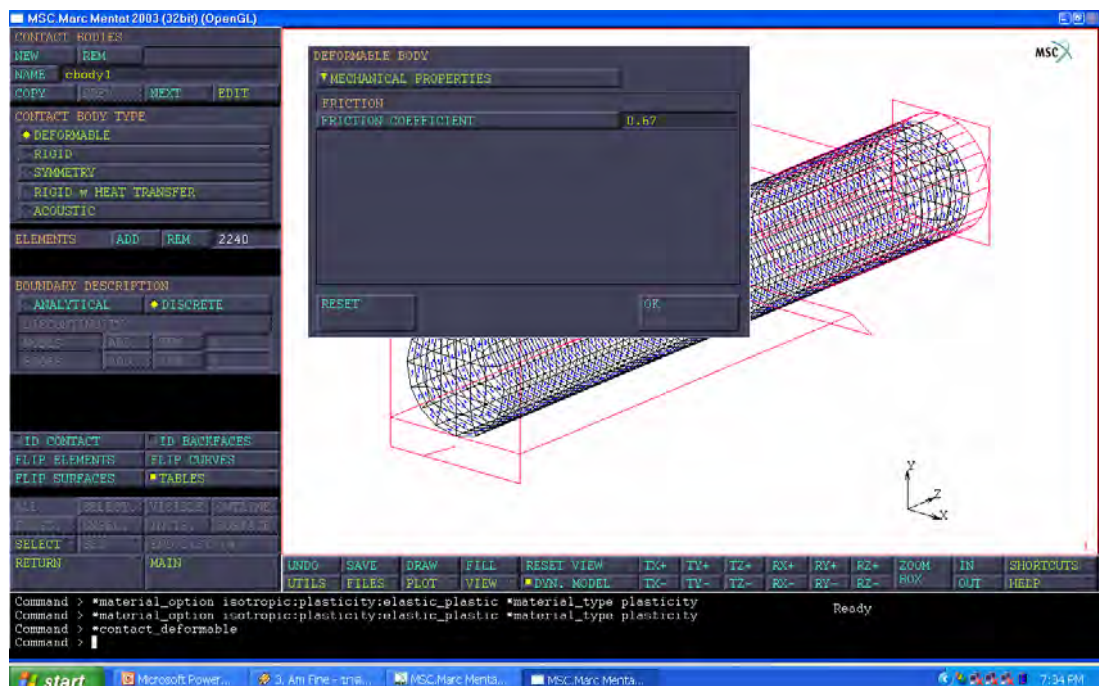
รูปที่ ค.1 แสดงการป้อนค่า K และ n ในโปรแกรม MSC.Marc2003



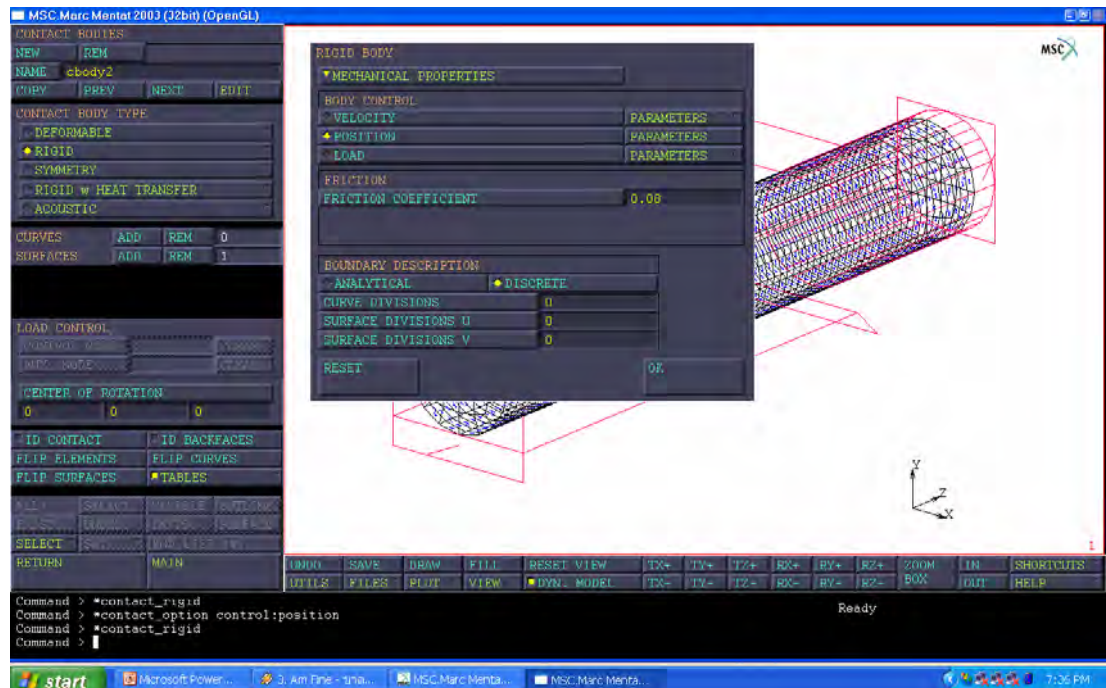
รูปที่ ค.2 แสดงการป้อนค่าสมบัติทางกลของวัสดุในโปรแกรม MSC.Marc2003



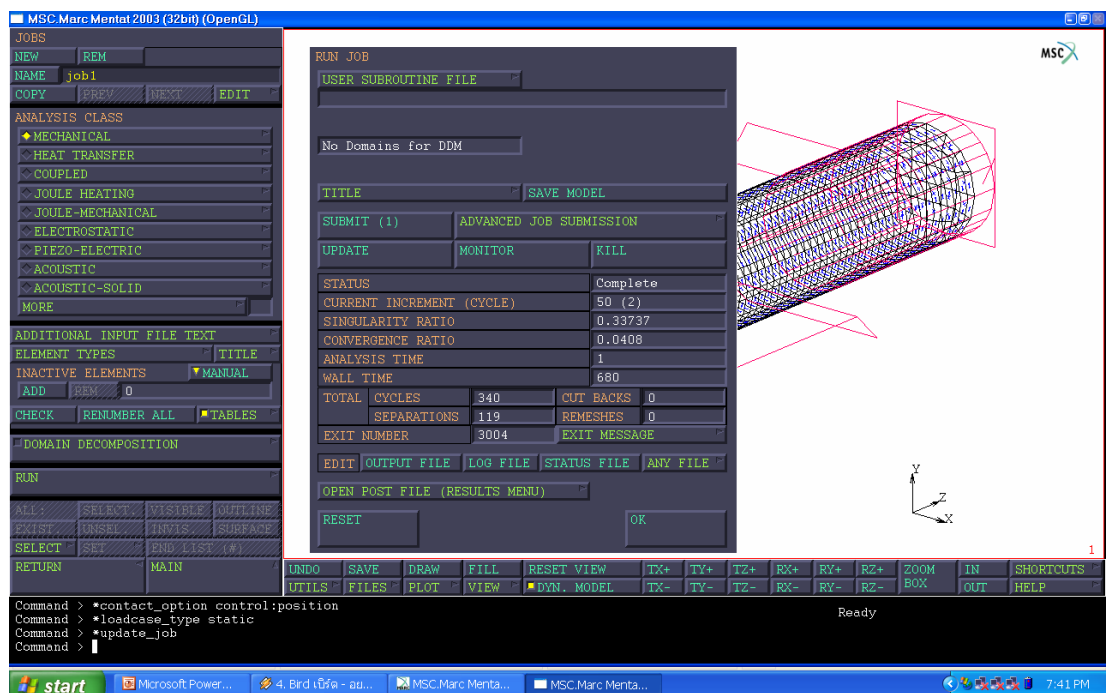
รูปที่ ค.3 แสดงการป้อนกราฟความเค้นและความเครียดของวัสดุในโปรแกรม MSC.Marc2003



รูปที่ ค.4 แสดงการป้อนค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของวัสดุในโปรแกรม MSC.Marc2003

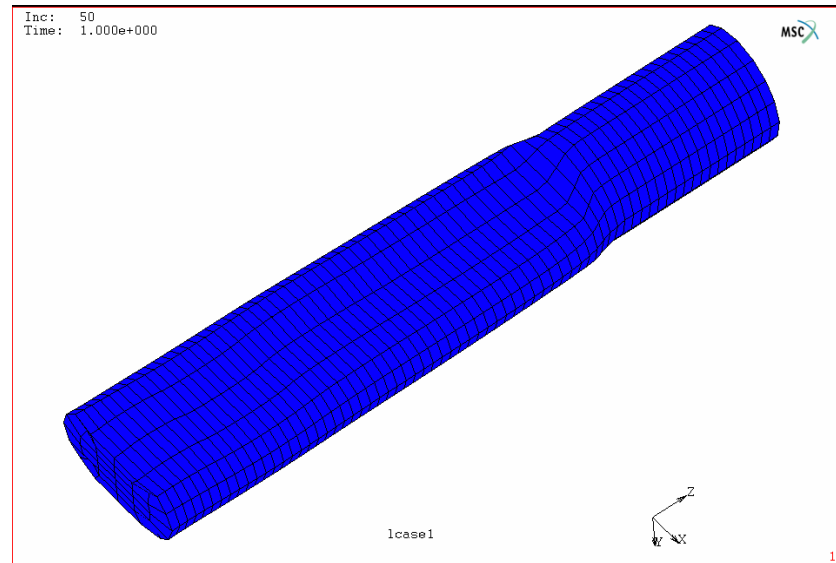


รูปที่ ก.5 แสดงการป้อนค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่าง Die กับชิ้นงานทดลอง

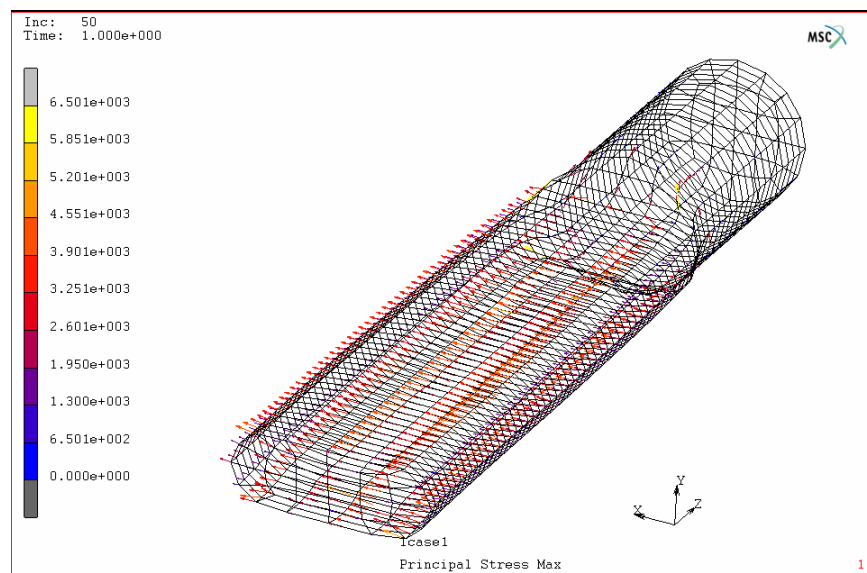
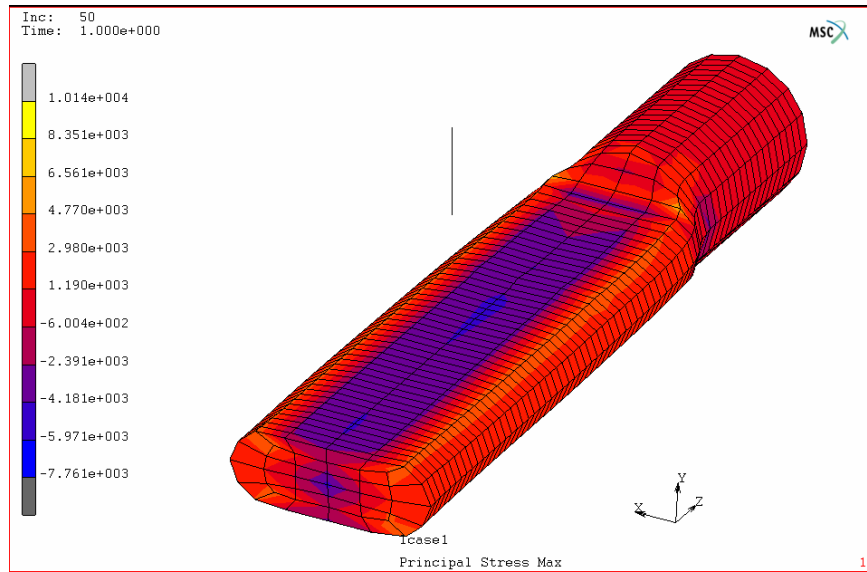


รูปที่ ก.6 แสดงการคำนวณของโปรแกรม MSC.Marc2003

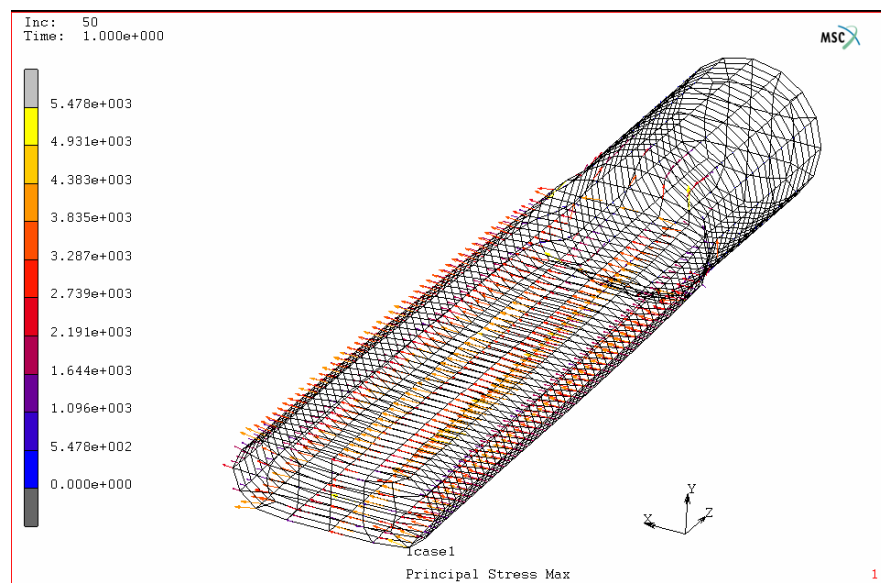
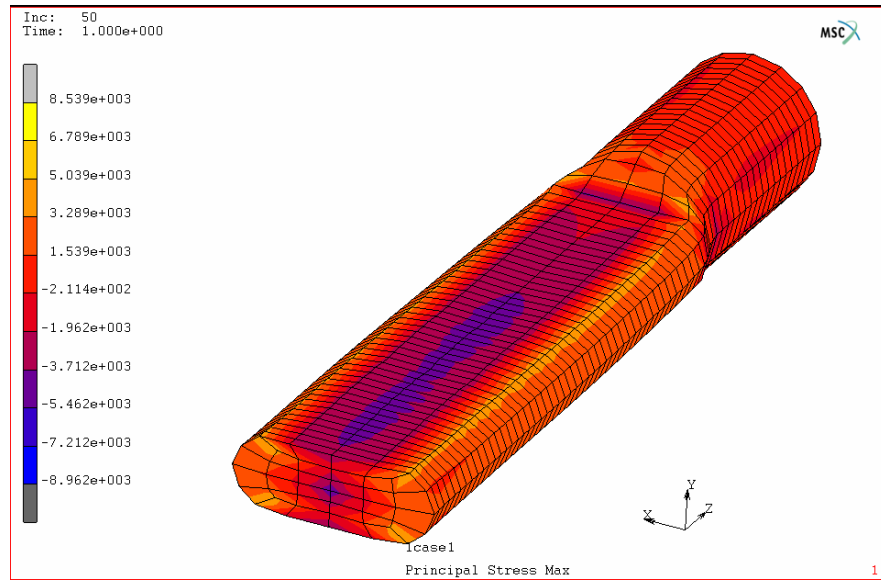
ภาคผนวก ง
ประมวลผลการทดลอง



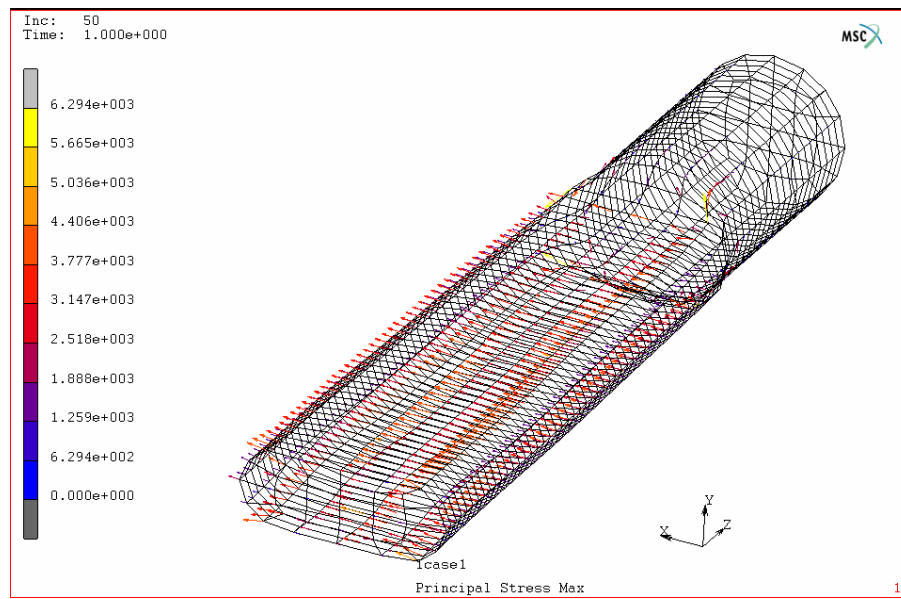
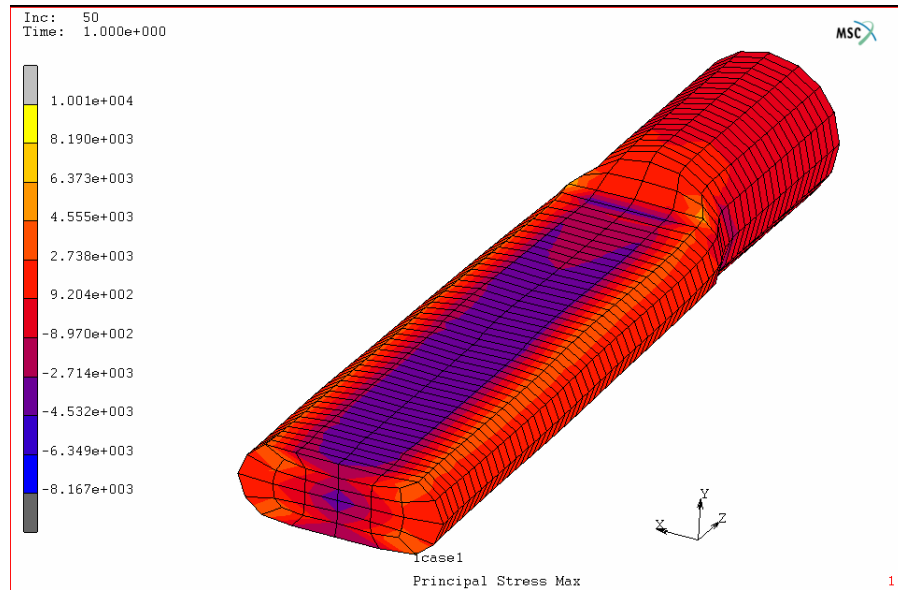
รูปที่ ง.1 เปรียบเทียบชิ้นงานจริงกับชิ้นงานจากการจำลองเหตุการณ์ด้วยโปรแกรม MSC.Marc2003 ที่สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน 0.55



รูปที่ ง.2 แสดงความเค้นหลักสูงสุดที่สัมพันธ์ประสิทธิผลแรงเสียดทาน 0.13



รูปที่ ง.3 แสดงความเค้นหลักสูงสุดที่สัมพันธ์กับประสิทธิผลแรงเสียดทาน 0.095



รูปที่ ๔.๔ แสดงความเค้นหลักสูงสุดที่สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน 0.08

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	นายชาญณรงค์ ชาแท่น
วัน-เดือน-ปีเกิด	9 กันยายน 2522
ประวัติการศึกษา	
ระดับอาชีวศึกษา	ประกาศนียบัตรวิชาชีพ สาขาวิชาช่างเขียนแบบเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีราชมงคลวิทยาเขตขอนแก่น พ.ศ.2541
ระดับปริญญาตรี	ครุศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ พ.ศ.2545
ระดับปริญญาโท	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี พ.ศ.2549
ประวัติการทำงาน	วิศวกร บริษัท มัตสึชิตะ อิเล็กทรอนิกส์ (อยุธยา) จำกัด พ.ศ.2547 - 2549 ผู้ช่วยผู้จัดการโรงงาน บริษัท ดีไอเอส ฮอฟแมน(ประเทศไทย) จำกัด พ.ศ.2549-ปัจจุบัน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ข้อตกลงว่าด้วยการโอนลิขสิทธิ์ในโครงการวิจัยอุตสาหกรรม

วันที่...22...เดือน.....พฤษภาคม.....พ.ศ.....2550.....

ข้าพเจ้า (นาย/นาง/นางสาว)...นายชาญณรงค์...ชาแท่น.....รหัสประจำตัว.....45411918.....
เป็นนักศึกษาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ระดับปริญญา ☒ โท ☐ เอก
หลักสูตร.....วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต.....สาขาวิชา.....วิศวกรรมโลหการ.....
คณะ.....วิศวกรรมศาสตร์.....อยู่บ้านเลขที่.....138..... หมู่ที่.....11.....ซอย.....ฉัตรทอง.....
ถนน...กลางเมือง.....ตำบล/แขวงเมืองเก่า.....อำเภอ.....เมือง.....จังหวัด.....ขอนแก่น.....
รหัสไปรษณีย์...40000.....ขอโอนลิขสิทธิ์ในโครงการวิจัยอุตสาหกรรมให้ไว้กับมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
โดยมี.....รศ.ดร.เอก ไชยสวัสดิ์.....ตำแหน่ง.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์...เป็นผู้รับโอนลิขสิทธิ์และมี
ข้อตกลงดังนี้

1. ข้าพเจ้าได้จัดทำโครงการวิจัยอุตสาหกรรมเรื่อง.....การลดปัญหาแตกร้าวในเหล็กคาร์บอนแท่งกลม 12L14 จาก
การขึ้นรูปด้วยวิธีขึ้นรูป.... ซึ่งอยู่ในความควบคุมของ.....ดร.พงษ์ศักดิ์...ถึงสุข..... ตามมาตรา 14 แห่ง พ.ร.บ.
ลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2537 และถือว่าเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
2. ข้าพเจ้าตกลงโอนลิขสิทธิ์จากผลงานทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากการสร้างสรรค์ของข้าพเจ้าในโครงการวิจัย
อุตสาหกรรมให้กับมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ตลอดอายุแห่งการคุ้มครองลิขสิทธิ์ตามมาตรา 23 แห่ง
พระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2537 ตั้งแต่วันที่ได้รับอนุมัติโครงร่างโครงการวิจัยอุตสาหกรรมจากมหาวิทยาลัย
3. ในกรณีที่ข้าพเจ้าประสงค์จะนำโครงการวิจัยอุตสาหกรรมไปใช้ในการเผยแพร่ในสื่อใด ๆ ก็ตาม ข้าพเจ้าจะต้อง
ระบุว่าเป็นโครงการวิจัยอุตสาหกรรมเป็นผลงานของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีทุก ๆ ครั้งที่มีการเผยแพร่
4. ในกรณีที่ข้าพเจ้าประสงค์จะนำโครงการวิจัยอุตสาหกรรมไปเผยแพร่หรืออนุญาตให้ผู้อื่นทำซ้ำหรือดัดแปลง
หรือ เผยแพร่ต่อสาธารณชนหรือกระทำการอื่นใด ตามมาตรา 27, มาตรา 28 และมาตรา 29 และมาตรา 30 แห่ง
พระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2537 โดยมีค่าตอบแทนในเชิงธุรกิจ ข้าพเจ้าจะกระทำได้เมื่อได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์
อักษรจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ลงชื่อ.....ผู้โอนลิขสิทธิ์
(นายชาญณรงค์ ชาแท่น)

ลงชื่อ.....ผู้รับโอนลิขสิทธิ์
(รศ.ดร.เอก ไชยสวัสดิ์)

ลงชื่อ.....พยาน
(ดร.พงษ์ศักดิ์ ถึงสุข)

ลงชื่อ.....พยาน
(รศ.ดร.ชาวลิต ลิ้มมณีวิจิตร)

25 ก.ค. 2550

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ข้อตกลงว่าด้วยการโอนลิขสิทธิ์ในโครงการวิจัยอุตสาหกรรม

วันที่...11...เดือน.....กรกฎาคม.....พ.ศ.....2550.....

ข้าพเจ้า (นาย/นาง/นางสาว).....นายชาญณรงค์.....ชาแท่น.....รหัสประจำตัว.....45411918.....

เป็นนักศึกษาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ระดับปริญญา ☒ โท ☐ เอก

หลักสูตร.....วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต.....สาขาวิชา.....วิศวกรรมโลหการ.....

คณะ.....วิศวกรรมศาสตร์.....อยู่บ้านเลขที่.....138..... หมู่ที่.....11.....ซอย.....ฉัตรทอง.....

ถนน.....กลางเมือง.....ตำบล/แขวง.....เมืองเก่า.....อำเภอ.....เมือง.....จังหวัด.....ขอนแก่น.....

รหัสไปรษณีย์...40000.....ขอโอนลิขสิทธิ์ในโครงการวิจัยอุตสาหกรรมให้กับมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

โดยมี.....รศ.ดร.เอก ไชยสวัสดิ์.....ตำแหน่ง.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์.....เป็นผู้รับโอนลิขสิทธิ์และมี

ข้อตกลงดังนี้

1. ข้าพเจ้าได้จัดทำโครงการวิจัยอุตสาหกรรมเรื่อง.....การลดปัญหาแตกร้าวในเหล็กคาร์บอนแท่งกลม 12L14 จาก
การขึ้นรูปด้วยวิธีตีขึ้นรูป.... ซึ่งอยู่ในความควบคุมของ.....ดร.พงษ์ศักดิ์.....ถึงสุข..... ตามมาตรา 14 แห่ง พ.ร.บ.
ลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2537 และถือว่าเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

2. ข้าพเจ้าตกลงโอนลิขสิทธิ์จากผลงานทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากการสร้างสรรค์ของข้าพเจ้าในโครงการวิจัย
อุตสาหกรรมให้กับมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ตลอดจนอายุแห่งการคุ้มครองลิขสิทธิ์ตามมาตรา 23 แห่ง
พระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2537 ตั้งแต่วันที่ได้รับอนุมัติโครงร่างโครงการวิจัยอุตสาหกรรมจากมหาวิทยาลัย

3. ในกรณีที่ข้าพเจ้าประสงค์จะนำโครงการวิจัยอุตสาหกรรมไปใช้ในการเผยแพร่ในสื่อใด ๆ ก็ตาม ข้าพเจ้าจะต้อง
ระบุว่าเป็นโครงการวิจัยอุตสาหกรรมเป็นผลงานของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีทุก ๆ ครั้งที่มีการเผยแพร่

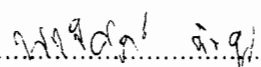
4. ในกรณีที่ข้าพเจ้าประสงค์จะนำโครงการวิจัยอุตสาหกรรมไปเผยแพร่หรืออนุญาตให้ผู้อื่นทำซ้ำหรือดัดแปลง
หรือ เผยแพร่ต่อสาธารณชนหรือกระทำการอื่นใด ตามมาตรา 27, มาตรา 28 และมาตรา 29 และมาตรา 30 แห่ง
พระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2537 โดยมีค่าตอบแทนในเชิงธุรกิจ ข้าพเจ้าจะกระทำได้เมื่อได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์
อักษรจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ลงชื่อ..........ผู้โอนลิขสิทธิ์

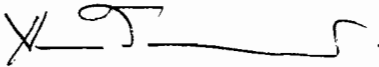
(นายชาญณรงค์ ชาแท่น)

ลงชื่อ..........ผู้รับโอนลิขสิทธิ์

(รศ.ดร.เอก ไชยสวัสดิ์)

ลงชื่อ..........พยาน

(ดร.พงษ์ศักดิ์ ถึงสุข)

ลงชื่อ..........พยาน

(รศ.ดร.เชาวลิต ลิ้มมณีวิจิตร)