

การลดจุดบกพร่องแบบโปรแกรมในงานอัดรีดขึ้นรูปทองเหลืองหน้าตัดหกเหลี่ยม

นายฉัตรแก้ว สุริยะภา วศ.บ. (วิศวกรรมอุตสาหการ)

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมระบบการผลิต
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
พ.ศ. 2549

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการวิทยานิพนธ์
(ดร.พงษ์ศักดิ์ ถึงสุข)

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

..... กรรมการ
(ดร.ไพฑูรย์ ช่างทอง)

..... กรรมการ
(ดร.จุลเทพ ขจรไชยกูล)

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

สำนักหอสมุด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การลดจุดบกพร่องแบบโพรงในงานอัดรีดขึ้นรูป ทองเหลืองหน้าตัดหกเหลี่ยม
หน่วยกิต	12
ผู้เขียน	นายฉัตรแก้ว สุริยะภา
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.พงษ์ศักดิ์ ถึงสุข
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมระบบการผลิต
ภาควิชา	วิศวกรรมอุตสาหกรรม
คณะ	วิศวกรรมศาสตร์
พ.ศ.	2549

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาอิทธิพลของความเร็วการขึ้นรูป และขนาดมุมของแม่พิมพ์ ในระดับความเลียดทานต่าง ๆ ที่มีผลกระทบต่อการเกิดจุดบกพร่อง แบบโพรงในงานอัดรีดขึ้นรูป ทองเหลืองหน้าตัดหกเหลี่ยม ด้วยการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ จากนั้นจึงสร้างเส้น แสดงขอบเขตความสามารถในการอัดรีดขึ้นรูป วัสดุที่ใช้เป็นทองเหลือง Brass 60/40 มีขนาดเส้น ผ่านศูนย์กลาง 150 มม. ความยาว 460 มม. และอัตราการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 97.70 เปอร์เซ็นต์ ภายได้ความเร็วการขึ้นรูป 4 ระดับคือ 500 , 1,000 , 1,500 และ 2,000 มม./วินาที ขนาดมุมของ แม่พิมพ์มี 3 ขนาด คือ 30 องศา , 60 องศา และ 90 องศา ความเลียดทานในกระบวนการ 6 ระดับ คือ 0.05 , 0.1 , 0.2 , 0.3 , 0.5 และ 1.0 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองพบว่า มีการเกิดจุดบกพร่อง แบบโพรงในงานอัดรีดขึ้นรูป เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของ 3 ตัวแปร คือ ความเร็วการขึ้นรูป ขนาดมุม ของแม่พิมพ์ และระดับความเลียดทานในกระบวนการที่มีค่าสูง โดยจะส่งผลให้วัสดุไหลตัวผ่าน ปากแม่พิมพ์ได้ยาก และเกิดความเค้นสูงในเนื้อวัสดุ จึงเป็นเหตุให้เกิดจุดบกพร่องขึ้น แต่เมื่อลด ระดับความเร็วการขึ้นรูป ขนาดมุมของแม่พิมพ์และระดับความเลียดทานให้มีค่าต่ำลง จะมีผลให้ เนื้อวัสดุไหลตัวผ่านปากแม่พิมพ์ได้สะดวกขึ้น และความเค้นในเนื้อวัสดุลดลง เมื่อพิจารณา ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วการขึ้นรูป และขนาดมุมของแม่พิมพ์ที่มีความเลียดทานของ กระบวนการในระดับต่าง ๆ สามารถนำมาใช้สร้างเส้นแสดงขอบเขตความสามารถในการอัดรีด ขึ้นรูป เพื่อหลีกเลี่ยงการผลิตชิ้นงานที่มีจุดบกพร่องแบบโพรงได้ ด้วยการเลือกใช้ค่าความเร็ว การขึ้นรูปและขนาดมุมของแม่พิมพ์ที่มีความเลียดทานของกระบวนการระดับต่าง ๆ ให้อยู่ในบริเวณ พื้นที่ใต้เส้นแสดงขอบเขตดังกล่าว

คำสำคัญ : การวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ / งานอัดรีดขึ้นรูป / ทองเหลือง Brass60/40
ความเร็วการขึ้นรูป / ขนาดมุมของแม่พิมพ์ / ความเสียดทาน

Thesis Title	Decrease of Hollow Defect in Hexagon Profile Brass Extrusion
Thesis Credits	12
Candidate	Mr. Chatkaew Suriyapha
Thesis Advisor	Dr. Pongsak Tuengsook
Program	Master of Engineering
Field of Study	Manufacturing System Engineering
Department	Production Engineering
Faculty	Engineering
B.E.	2549

Abstract

The objective of this thesis is to study the effect of forming velocity and die angle in various friction levels on hollow defect arising during the forming of hexagon-profile brass extrusion. The analysis is done by using finite element method, and in the process, the extrusion limit diagram is generated. The material in this study is 60/40 brass with initial diameter of 150 mm, length of 460 mm and area reduction ratio 97.70%. It is subject to 4 levels of forming velocity at 500, 1000, 1500 and 2000 mm/s with die angle of 30° , 60° and 90° in 6 friction levels of 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.5 and 1.0 respectively. According to the finite element analysis, hollow defect is found in forming due to an increase of 3 factors; i.e., forming velocity, die angle and friction, to the extent that inhibits the free flow of material into the die orifice, causing high stress in the material content and, ultimately, the undesirable hollow defect. When the three factors are reduced, however, the material then flows through die orifice more easily, and the stress in the material content is reduced. Based on the relationship of forming velocity, die angle, and level of friction, related extrusion limit diagram can be generated to help avoid the condition of hollow defect in the work piece by choosing proper forming velocity, die angle and levels of friction within its configuration.

Keywords : Finite Element Method / Extrusion Process / Brass 60/40 / Forming Velocity /
Die Angle / Friction

กิตติกรรมประกาศ

ในการทำงานวิจัยครั้งนี้จะสำเร็จด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ดร.พงษ์ศักดิ์ ถึงสุข ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาและควบคุมดูแลวิทยานิพนธ์ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำ หลักการ และกระบวนการทางความคิดในการดำเนินการวิจัย การเขียนวิทยานิพนธ์ ตลอดจนการแก้ไขปัญหาดังต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้ และขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ให้ความรู้ และบุคคลที่สำคัญที่สุด ผู้คอยสนับสนุน ให้กำลังใจ ให้ความรัก และให้การอุปการะข้าพเจ้าเสมอมา คือ คุณพ่อและคุณแม่ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอย่างยิ่งสำหรับกรรมการ คือ รศ.ดร.เชาวลิต ลิ้มมณีวิจิตร ดร.ไพบุลย์ ช่างทอง และ ดร.จุลเทพ ขจรไชยกุล ที่ให้ความกรุณาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์และรวมถึง บริษัท อาซาฮี ไทยอัลลอยด์ จำกัด ที่ได้เอื้ออำนวยการสถานที่ เครื่องจักร ตลอดจนวัสดุอุปกรณ์ทั้งหมดที่ใช้ในการเก็บข้อมูลจากกลุ่มตัวอย่าง สำหรับการทํางานวิจัยในครั้งนี้ ขอขอบพระคุณอาจารย์สุเทพ เขี่ยมชัยภูมิ ที่ได้มีส่วนช่วยเหลือในการค้นคว้าและหาข้อมูลด้านต่าง ๆ สำหรับงานอดิเรกขึ้นรูปวัสดุ ขอขอบคุณเพื่อนร่วมงานทุกท่านที่สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น ที่ได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ ตลอดจนอีกหลายท่านที่ไม่ได้กล่าวนามมา ณ ที่นี้

ประโยชน์อันใดที่เกิดจากการทำงานวิจัยนี้ ย่อมเป็นผลมาจากความกรุณาของทุกท่านดังกล่าวข้างต้น ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่ง จึงใคร่ขอขอบพระคุณอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	๗
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	๘
กิตติกรรมประกาศ	๑๑
สารบัญ	๑๓
รายการตาราง	๑๖
รายการรูปประกอบ	๑๗
รายการสัญลักษณ์	๑๘
ประมวลศัพท์และคำย่อ	๑๙

บทที่

1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ในการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย	2
1.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 กระบวนการอัดรีดขึ้นรูปทองเหลือง	4
2.2 การเกิดจุดบกพร่องแบบโพรงในกระบวนการอัดรีดขึ้นรูป	12
2.3 การวิเคราะห์การอัดรีดขึ้นรูปด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์	20
2.4 การวิเคราะห์พฤติกรรมเชิงกลของโลหะ	37
2.5 ทฤษฎีวิเคราะห์การแตกหักของโลหะ	48
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	58

3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	62
3.1 การศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	62
3.2 การศึกษาสมบัติทองเหลืองและกระบวนการอัดรีดขึ้นรูปทองเหลือง	64
3.3 การวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กระบวนการอัดรีดขึ้นรูปทองเหลืองตามตัวแปรกำหนด	66
3.4 การสร้างเส้นแนวโน้มแสดงขอบเขตความสามารถในการอัดรีดขึ้นรูป	72
3.5 การสรุปผลการวิจัยและเสนอแนะ	72
4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล	73
4.1 การวิเคราะห์แบบจำลองเปรียบเทียบกับการผลิต	73
4.2 การวิเคราะห์แบบจำลองตามตัวแปรที่กำหนด	79
4.3 การสร้างเส้นแนวโน้มแสดงขอบเขตความสามารถในการอัดรีดขึ้นรูป	94
5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	102
5.1 สรุปผล	102
5.2 ข้อเสนอแนะ	105
เอกสารอ้างอิง	107
ภาคผนวก	111
ก ข้อมูลจุดบกพร่องแบบโพรงในการผลิตทองเหลืองเส้น	111
ข สมบัติของทองเหลือง Brass 60/40	114
ประวัติผู้วิจัย	134

รายการตาราง

ตาราง	หน้า
4.1 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองสำหรับเปรียบเทียบกับการผลิต	74
4.2 ระยะเวลาวิเคราะห์ Increment Steps ที่เริ่มเกิดจุดบกพร่องสำหรับแม่พิมพ์ขนาดมุม 90°	81
4.3 ระยะเวลาเคลื่อนที่ของแกนอัดที่เริ่มเกิดจุดบกพร่องสำหรับแม่พิมพ์ที่มีขนาดมุม 90°	81
4.4 ค่าความเค้นหลักสูงสุดของโหนดที่วิเคราะห์สำหรับแม่พิมพ์ที่มีขนาดมุม 90°	82
4.5 ระยะเวลาวิเคราะห์ Increment Steps ที่เริ่มเกิดจุดบกพร่องสำหรับแม่พิมพ์ขนาดมุม 60°	85
4.6 ระยะเวลาเคลื่อนที่ของแกนอัดที่เริ่มเกิดจุดบกพร่องสำหรับแม่พิมพ์ที่มีขนาดมุม 60°	85
4.7 ค่าความเค้นหลักสูงสุดของโหนดที่วิเคราะห์สำหรับแม่พิมพ์ที่มีขนาดมุม 60°	86
4.8 ระยะเวลาวิเคราะห์ Increment Steps ที่เริ่มเกิดจุดบกพร่องสำหรับแม่พิมพ์ขนาดมุม 30°	89
4.9 ระยะเวลาเคลื่อนที่ของแกนอัดที่เริ่มเกิดจุดบกพร่องสำหรับแม่พิมพ์ที่มีขนาดมุม 30°	89
4.10 ค่าความเค้นหลักสูงสุดของโหนดที่วิเคราะห์สำหรับแม่พิมพ์ที่มีขนาดมุม 90°	90
4.11 เปอร์เซ็นต์ของจุดบกพร่องในชิ้นงานสำหรับแม่พิมพ์มุม 90°	97
4.12 ปริมาณเปอร์เซ็นต์ของจุดบกพร่องในชิ้นงานสำหรับแม่พิมพ์มุม 60°	98
4.13 ปริมาณเปอร์เซ็นต์ของจุดบกพร่องในชิ้นงานสำหรับแม่พิมพ์มุม 30°	98
ก. 1 ข้อมูลจุดบกพร่องแบบโพรงในการผลิตทองเหลืองเส้นของกลุ่มตัวอย่าง	112
ก. 2 ข้อมูลจุดบกพร่องแบบโพรงในกลุ่มตัวอย่างทองเหลืองเส้นความยาว 16 เมตร/เส้น	113
ข. 1 แสดงขนาดของชิ้นทดสอบหน้าตัดกลม	122
ข. 2 แสดงผลการทดสอบความเสียดทาน	132
ข. 3 แสดงสมบัติของวัสดุทองเหลือง Brass60/40 ที่กำหนดในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์	133

รายการรูปประกอบ

รูป	หน้า
2.1 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการอัดรีดขึ้นรูปมีรูปร่างต่างๆ และมีรูปทรงหลากหลาย ซึ่งยากแก่การผลิตโดยกรรมวิธีอื่นๆ	5
2.2 ขั้นตอนการอัดรีดขึ้นรูป	7
2.3 แรงที่เกิดขึ้นจากขบวนการอัดขึ้นรูปโลหะ	10
2.4 เส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงขึ้นรูปและระยะทางในการอัดรีดขึ้นรูป	11
2.5 จุดบกพร่องแบบโพรงกรวย	12
2.6 จุดบกพร่องแบบโพรงท่อ	13
2.7 จุดบกพร่องที่ผิวชิ้นงาน	14
2.8 รูปแบบการไหลตัวของเนื้อวัสดุในกระบวนการอัดรีด	15
2.9 พฤติกรรมการเกิดจุดบกพร่องแบบโพรงสำหรับกระบวนการอัดรีดขึ้นรูปโลหะ	16
2.10 แสดงการอัดรีดขึ้นรูปแบบบล็อกเปลือก	18
2.11 เอลิเมนต์มิติเดียว	22
2.12 เอลิเมนต์สองมิติ	22
2.13 เอลิเมนต์สามมิติ	23
2.14 เอลิเมนต์สี่เหลี่ยมชนิดบางแบบไอโซพารามетริกซ์	25
2.15 การวิเคราะห์ชิ้นงานที่มีลักษณะสมมาตร	37
2.16 พฤติกรรมการเปลี่ยนรูปของวัสดุ	38
2.17 กราฟแสดงการหาสมการเส้นตรงเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ในสมการยกกำลัง	41
2.18 แสดงสภาวะของความเค้น 3 มิติ	42
2.19 เอลิเมนต์ที่ถูกกระทำใน 3 ทิศทางที่ตั้งฉากกัน	43
2.20 แบบจำลองพฤติกรรมระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุ	45
2.21 เปรียบเทียบแบบจำลองความเสียหายคูลอมป์กับความเสียหายที่เกิดขึ้นจริง	46
2.22 วัตถุรับภาระในแนวแกนเดียว	49
2.23 การรับความเค้นสองแนวแกน	50
2.24 การรับความเค้นตั้งฉากในกรณีพิเศษ	50
2.25 วัสดุภายใต้แรงบิดอย่างเดียวน	51
2.26 กราฟแสดงขอบเขตการอัดรีดขึ้นรูปโลหะที่ปลอดภัย โดยไม่ทำให้เกิดจุดบกพร่องตามแนวแกน โดยการผันแปรค่าอัตราส่วนลดลงของพื้นที่หน้าตัดและมุมของแม่พิมพ์	60

3.1	ขั้นตอนหลักของกระบวนการอัดรีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ทองเหลืองเส้น	65
3.2	แบบจำลองแม่พิมพ์และแท่งขึ้นงานบิลเลทสำหรับงานอัดรีดขึ้นรูปแบบแกนสมมาตร	68
3.3	แสดงผลการประมวลแบบจำลองกระบวนการอัดรีดขึ้นรูปแบบแถบสี่	70
3.4	ลักษณะของแม่พิมพ์ในงานอัดรีดขึ้นรูปทองเหลืองหน้าตัดหกเหลี่ยมขนาดมุม 90 องศา	71
3.5	ลักษณะของแม่พิมพ์ในงานอัดรีดขึ้นรูปทองเหลืองหน้าตัดหกเหลี่ยมขนาดมุม 60 องศา	71
3.6	ลักษณะของแม่พิมพ์ในงานอัดรีดขึ้นรูปทองเหลืองหน้าตัดหกเหลี่ยมขนาดมุม 30 องศา	71
4.1	บริเวณไหนที่มีแนวโน้มจะเกิดจุดบกพร่องตามแนวแกนการอัดขึ้นรูป	73
4.2	เปรียบเทียบความเค้นหลักสูงสุดของโหนดแรกที่มีแนวโน้มจะเกิดจุดบกพร่องตามแนวแกนที่ความเร็วขึ้นรูป 728 ม.ม./วินาที และมีความเสียหายระดับต่าง ๆ สำหรับแม่พิมพ์ขนาดมุม 90 องศา	75
4.3	เปอร์เซ็นต์และความยาวจุดบกพร่องในแท่งบิลเลทที่มีความเร็วขึ้นรูป 728 ม.ม./วินาที มุมแม่พิมพ์ 90 องศา และมีความเสียหายระดับต่าง ๆ	75
4.4	ความเร็วการไหลตัวของเนื้อวัสดุที่มีความแตกต่างกันและเกิดจุดบกพร่องแบบโพรงขึ้น	76
4.5	ความเร็วการไหลตัวของเนื้อวัสดุลดลงเมื่อก่อนเนื้อตายแยกตัวกัน	77
4.6	ความเร็วการไหลตัวของโหนดที่เริ่มเกิดจุดบกพร่องและ โหนดบริเวณใกล้เคียงที่ระดับความเสียหาย 0.2 และมีขนาดมุมแม่พิมพ์ 90 องศา	78
4.7	เปรียบเทียบความเค้นหลักสูงสุดของโหนดแรกที่มีแนวโน้ม จะเกิดจุดบกพร่องตามแนวแกนที่ความเร็วขึ้นรูป 2,000 ม.ม./วินาที และมีความเสียหายระดับต่าง ๆ สำหรับแม่พิมพ์ขนาดมุม 90°	79
4.8	เปรียบเทียบความเค้นหลักสูงสุดของโหนดแรกที่มีแนวโน้มจะเกิดจุดบกพร่องตามแนวแกนที่ความเร็วขึ้นรูป 1,500 ม.ม./วินาที และมีความเสียหายระดับต่าง ๆ สำหรับแม่พิมพ์ขนาดมุม 90°	80
4.9	เปรียบเทียบความเค้นหลักสูงสุดของโหนดแรกที่มีแนวโน้มจะเกิดจุดบกพร่องตามแนวแกนที่ความเร็วขึ้นรูป 1,000 ม.ม./วินาที และมีความเสียหายระดับต่าง ๆ สำหรับแม่พิมพ์ขนาดมุม 90°	80
4.10	ระยะการเคลื่อนที่ของแกนอัดที่เริ่มเกิดจุดบกพร่องในขึ้นงานสำหรับแม่พิมพ์มุม 90°	83
4.11	เปรียบเทียบความเค้นหลักสูงสุดของโหนดแรกที่มีแนวโน้มจะเกิดจุดบกพร่องตามแนวแกนที่ความเร็วขึ้นรูป 2,000 ม.ม./วินาที และมีความเสียหายระดับต่าง ๆ สำหรับแม่พิมพ์ขนาดมุม 60°	84
4.12	เปรียบเทียบความเค้นหลักสูงสุดของโหนดแรกที่มีแนวโน้มจะเกิดจุดบกพร่องตามแนวแกนที่ความเร็วขึ้นรูป 1,500 ม.ม./วินาที และมีความเสียหายระดับต่าง ๆ สำหรับแม่พิมพ์ขนาดมุม 60°	84

4.29	เส้นแนวโน้มแสดงขอบเขตความสามารถในการอัดรีดขึ้นรูปทองเหลืองที่ระดับความเสียดทาน 0.2	99
4.30	เส้นแนวโน้มแสดงขอบเขตความสามารถในการอัดรีดขึ้นรูปทองเหลืองที่ระดับความเสียดทานต่าง ๆ	100
ข. 1	กราฟความสัมพันธ์ความเค้นที่เกิดขึ้นตามปกติกับความเครียดที่เกิดขึ้นในเชิงเส้นตรง	116
ข. 2	กราฟความสัมพันธ์ความเค้นจริงกับความเครียดจริง	116
ข. 3	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของวัสดุเปราะ	118
ข. 4	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของวัสดุเหนียว	118
ข. 5	กราฟเปรียบเทียบความเค้นกับความเครียดปกติกับความเค้นกับความเครียดจริง	120
ข. 6	แสดงภาพลักษณะขึ้นทดสอบภาคตัดวงกลม	122
ข. 7	เส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของทองเหลือง Brass60/40	125
ข. 8	เส้นโค้งการไหลของทองเหลือง Brass60/40	125
ข. 9	ขนาดของขึ้นทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน	127
ข. 10	วงแหวนก่อนการทดสอบ	127
ข. 11	การเปลี่ยนรูปเนื่องจากความเสียดทานต่ำ	128
ข. 12	การเปลี่ยนรูปเนื่องจากความเสียดทานสูง	128
ข. 13	Friction Hill ที่เกิดขึ้นบนแผ่นจานกลม	129
ข. 14	กราฟเปรียบเทียบความเสียดทาน μ ตามทฤษฎีของเมลล์และค็อกคร็อป	130
ข. 15	กราฟเปรียบเทียบความเสียดทาน m ตามทฤษฎีของเมลล์และค็อกคร็อป	131
ข.16	แม่พิมพ์แผ่นเรียบ	131
ข.17	ชุดรองแม่พิมพ์	132

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
$[K]$	=	สทิตีเฟนสมเมทริกซ์รวมของระบบ
L_1, L_2, L_3	=	ความยาวเดิม
$\Delta L_1, \Delta L_2, \Delta L_3$	=	ความยาวใดๆที่เพิ่มขึ้น
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	=	งานเนื่องจากโหลดกระจาย 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
$\partial\Pi / \partial\{d\}$	=	การดิฟเฟอเรนเชียลของการกระจัด
2α	=	มุมลาดเอียงของดาวย

ประมวลศัพท์และคำย่อ

Anisotropy	=	คุณสมบัติไม่เท่ากันทุกทิศทาง
Boundary Condition	=	เงื่อนไขขอบ
Center Burst, Chevron	=	การเกิดรอยแตกที่แกนกลางของชิ้นงาน
Cold Forward Bar Extrusion	=	ขบวนการอัดขึ้นรูปท่อนโลหะที่อุณหภูมิห้อง
Compression Test	=	การทดสอบโดยการกด
Constitutive Relation	=	ความสัมพันธ์ ระหว่างความเค้นกับความเครียด ของวัสดุภายใต้แรงกระทำ
Constrain	=	เงื่อนไขบังคับ
Contour Label	=	แสดงแถบสีลาเบล
Convergence	=	การบรรจบกันที่จุดหนึ่งหรือเส้นหนึ่ง
Damage	=	ความเสียหาย
Defects Formation	=	การเกิดความเสียหายหรือรอยแตก
Die Angle	=	มุมเอียงของแม่พิมพ์
Dislocation	=	การเรียงตัวของผลึกที่ไม่สม่ำเสมอ
Direct Stiffness Method	=	วิธี stiffness โดยตรง
Displacement or Stiffness Method	=	วิธี stiffness
Dynamic	=	เกี่ยวกับการเคลื่อนที่
Elastic Region	=	บริเวณช่วงการยืดหยุ่น
Electro-Magnetic	=	แม่เหล็กไฟฟ้า
Engineering Stress-Strain Curve	=	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น และความเครียดเชิงวิศวกรรม
Extrusion	=	ขบวนการอัดขึ้นรูป
Finite Element Analysis (FEA)	=	การวิเคราะห์โดยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์
Finite Element Method (FEM)	=	
Fix	=	ขอบเขตแบบฟิกซ์ คัดแน่น
Flow Curve	=	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ความเค้นจริง
Force or Flexibility Method	=	วิธีแรงหรือวิธียืดหยุ่น
Force Travel Diagram	=	ไดอแกรมแสดงแรงกับระยะกดของพั่นซ์
Forming Limit Diagram (FLD)	=	ไดอแกรมแสดงขอบเขตจำกัดในการแปรรูป
Forming Velocity	=	ความเร็วของการขึ้นรูป

Fracture Criteria	=	เงื่อนไขการตัดสินใจในการเกิดความเสียหาย
Free	=	ขอบเขตแบบอิสระ
Friction Coefficient	=	สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ผิวคายกับชิ้นงาน
Galerkin's Method	=	วิธีของกาเลอร์คิน
Gauss's Elimination Method	=	วิธีการกำจัดของเกาส์
Graph	=	แสดงแบบกราฟ
Graphic	=	แสดงแบบรูปภาพ
Heat Transfer	=	การถ่ายเทความร้อน
Hydrostatic Compression	=	สภาวะความเค้นกดสูง
Hydrostatic Stress	=	ความเค้นกด
Hydrostatic Stress Criterion	=	ทฤษฎีสภาวะของความเค้นกด
Inclusions	=	สิ่งปลอมปน
Isotropy	=	คุณสมบัติของวัสดุเท่ากันทุกทิศทาง
Iteration Method	=	วิธีการประมวลผลแบบซ้ำๆ
Kilo-Newton (KN)	=	กิโลนิวตัน
Large Deformation	=	การทำให้เปลี่ยนรูปมาก
Linearity	=	เป็นเส้นตรง
Maximum Principle Stress Criterion	=	ทฤษฎีความเค้นหลักสูงสุด
Microvoid	=	อนุภาควอยด์
Mega-Pascal (MPa)	=	หน่วยวัดแรงกดอัด นิวตันต่อตารางเมตร
Non-Linearity	=	ไม่เป็นเชิงเส้นตรง
Newton per Millimeter Square (N/mm ²)	=	นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร
Optimal Die-Angle	=	ค่ามุมคายที่เหมาะสม
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	=	ความเค้นหลัก

Process Parameters	=	ตัวแปรต่าง ๆ ในขบวนการ
Punch	=	พื้้น
Quadratic	=	สาขาพีชคณิตที่เกี่ยวกับ Quadratic Equation
Recrystallization	=	การจัดเรียงตัวของผลึกใหม่
Rigid	=	คุณสมบัติแข็ง
Safe Zone	=	บริเวณขอบเขตที่ปลอดภัยในการขึ้นรูป
Second Phase Particles	=	อนุภาคของวัสดุปลอมปน
Simulation	=	การทำแบบจำลอง
Slide	=	ขอบเขตแบบสไลด์
Static	=	ไม่มีการเคลื่อนที่
Steady State	=	สภาวะเงื่อนไขคงที่
Strain Hardening	=	ความเครียดแข็งตกค้าง
Structural Mechanics	=	ปัญหาโครงสร้างเชิงกล
Superposition Method	=	วิธีซ้อนทับ
Support	=	จุดรองรับ
Symmetry	=	ขอบเขตแบบสมมาตร
Triangular	=	เอลิเมนต์แบบสามเหลี่ยม
True Stress-True Strain Curve	=	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจริง
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

จุดบกพร่องแบบโพรงเป็นปัญหาอย่างยิ่ง ในงานตรวจสอบเพื่อควบคุมคุณภาพผลิตภัณฑ์โลหะ ที่ได้จากกระบวนการอัดรีดขึ้นรูป เนื่องจากไม่สามารถตรวจสอบ หรือพบเห็นได้จากผิวของชิ้นงาน ซึ่งทองเหลืองเป็นโลหะชนิดหนึ่ง ที่มีโอกาสเกิดจุดบกพร่องดังกล่าวได้ง่าย จัดอยู่ในกลุ่มโลหะที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน หากควบคุมกระบวนการอัดรีดขึ้นรูปดังกล่าวไม่เหมาะสม การตรวจสอบสามารถทำได้หลายวิธีการ โดยใช้เครื่องมือทางการทดสอบวัสดุ ทั้งการทดสอบแบบทำลาย และการทดสอบแบบไม่ทำลาย ซึ่งมีราคาค่อนข้างสูงและไม่สามารถพยากรณ์ หรือบอกสาเหตุการเกิดจุดบกพร่องดังกล่าวได้ การวิเคราะห์ที่อาศัยหลักพื้นฐานทางด้านคณิตศาสตร์ จึงเป็นเครื่องมือที่เข้ามามีบทบาท และเป็นประโยชน์อย่างมากในการออกแบบทางวิศวกรรม [2]

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เป็นวิธีการหนึ่งที่ถูกนิยมนำมาใช้เพื่อช่วยในงานวิศวกรรม เนื่องจากสามารถช่วยให้การวิเคราะห์ตัวแปรที่มีผลต่อกระบวนการผลิตได้อย่างมีประสิทธิภาพ จะช่วยให้วิศวกรสามารถควบคุมกระบวนการผลิตให้มีความถูกต้องมากขึ้น ส่งผลให้สามารถผลิตสินค้าที่มีคุณภาพดี และสม่ำเสมอมากขึ้น แนวคิดนี้สามารถนำไปใช้ได้ทั้งการออกแบบกระบวนการผลิตใหม่ หรือนำไปใช้วิเคราะห์กระบวนการผลิตเดิม เพื่อหาสาเหตุที่ก่อให้เกิดข้อบกพร่องหรือจุดเสียบนชิ้นงาน ที่ผลิตขึ้นในกระบวนการผลิตและนำข้อมูลดังกล่าว ไปใช้ในการแก้ไขกระบวนการผลิต เพื่อกำจัดข้อบกพร่องที่เกิดขึ้น ดังนั้นการนำระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาจำลองปรากฏการณ์ต่าง ๆ ทำให้เห็นถึงปัญหาต่าง ๆ ที่จะเกิดขึ้นในการผลิตและสามารถทำการแก้ไขปัญหาดังกล่าว เหล่านี้ก่อน ที่จะทำการผลิตขึ้นจริง จึงสามารถช่วยให้ลดเวลา ค่าใช้จ่าย และโอกาสที่จะเกิดข้อบกพร่องของผลิตภัณฑ์ลดลงได้อย่างมากระหว่างทำการทดลองและผลิตจริง

ดังนั้น เพื่อช่วยลดความเสี่ยงเปลี่ยนแปลงทรัพยากร ลดเวลา ลดค่าใช้จ่ายในช่วงทดสอบก่อนการผลิตจริงของอุตสาหกรรมการผลิต เพิ่มประสิทธิภาพในการออกแบบแม่พิมพ์ และการวางแผนกระบวนการผลิต โดยอาศัยการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ จึงจัดดำเนินงานวิจัยการลดจุดบกพร่องแบบโพรงในงานอัดรีดขึ้นรูปทองเหลืองหน้าตัดหกเหลี่ยมขึ้นในครั้งนี้

1.2 วัตถุประสงค์ในการวิจัย

1. ศึกษาค่าความเร็วขึ้นรูปที่มีผลต่อการเกิดจุดบกพร่องแบบโพรงในงานอัดรีดขึ้นรูปทองเหลือง
2. ศึกษาขนาดมุมของแม่พิมพ์ที่มีผลต่อการเกิดจุดบกพร่องแบบโพรงในงานอัดรีดขึ้นรูปทองเหลือง
3. สร้างเส้นแสดงขอบเขตความสามารถในการอัดรีดขึ้นรูปทองเหลืองหน้าตัดหกเหลี่ยม โดยไม่เกิดจุดบกพร่องแบบโพรงที่ระดับความเร็วขึ้นรูป และขนาดมุมของแม่พิมพ์ตามกำหนด

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1. ศึกษาการเกิดจุดบกพร่องแบบโพรงในแนวแกนของงานอัดรีดขึ้นรูปทองเหลืองหน้าตัดหกเหลี่ยม ด้วยการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์
2. ใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ MSC.Marc ในการสร้างแบบจำลองวิเคราะห์การเกิดจุดบกพร่องแบบโพรงในงานอัดรีดขึ้นรูปทองเหลือง ที่มีการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 97.70 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิขึ้นรูปขึ้นงาน 750 องศาเซลเซียส ที่ระดับความเร็วขึ้นรูป 4 ระดับ คือ 500 , 1,000 1,500 และ 2,000 ม.ม./วินาที และขนาดมุมของแม่พิมพ์ 3 ขนาด คือ 30 องศา 60 องศา และ 90 องศา
3. สร้างเส้นแนวโน้มแสดงขอบเขตความสามารถในการอัดรีดขึ้นรูปทองเหลือง จากความสัมพันธ์ของความเร็วขึ้นรูป และขนาดมุมของแม่พิมพ์ที่กำหนด

1.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. ศึกษาคุณสมบัติทองเหลืองและกระบวนการอัดรีดขึ้นรูปทองเหลือง
3. ประมวลผลการอัดรีดขึ้นรูปทองเหลืองด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ตามตัวแปรที่กำหนด
4. วิเคราะห์การประมวลผลแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อสร้างเส้นแนวโน้มแสดงขอบเขตความสามารถในการอัดรีดขึ้นรูปทองเหลือง

5. สรุปผลและเสนอแนะ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ผลที่ได้จากการวิจัย สามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลประกอบเป็นแนวทางในการลดจุดบกพร่องแบบโพรงในกระบวนการอัดรีดขึ้นรูปทองเหลืองหน้าตัดหกเหลี่ยม ด้วยการปรับเปลี่ยนค่าตัวแปรความเร็วการขึ้นรูป และหรือขนาดมุมของแม่พิมพ์ให้เหมาะสม หลักการและแนวความคิดจากการวิจัยสามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลประกอบแนวทางในการลดความสูญเสียทรัพยากร ค่าใช้จ่ายในการหาจุดบกพร่องในชิ้นงานได้ต่อไป

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการวิจัยเรื่องการลดจุดบกพร่องแบบโพรงในงานอัดรีดทองเหลืองเส้นหน้าตัดหกเหลี่ยม ได้ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องดังนี้

1. กระบวนการอัดรีดขึ้นรูปทองเหลือง
2. การเกิดจุดบกพร่องแบบโพรงในกระบวนการอัดรีดขึ้นรูป
3. การวิเคราะห์การอัดรีดขึ้นรูปด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์
4. การวิเคราะห์พฤติกรรมเชิงกลของโลหะ
5. ทฤษฎีวิเคราะห์การแตกหักของโลหะ
6. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

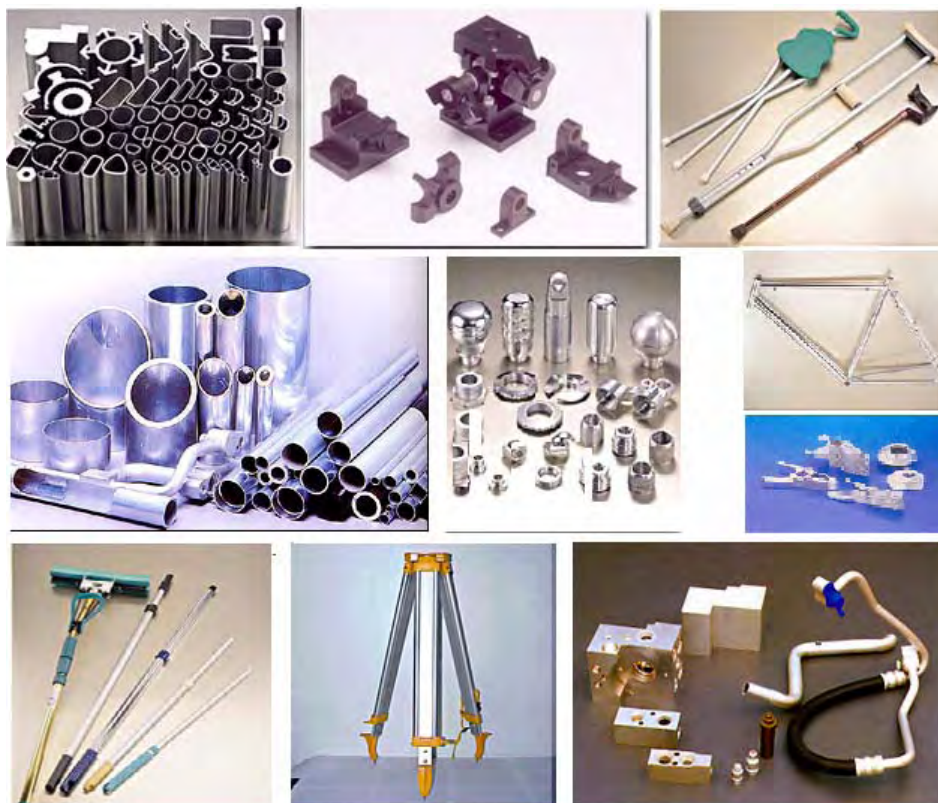
2.1 กระบวนการอัดรีดขึ้นรูปทองเหลือง

กระบวนการอัดรีดขึ้นรูปโลหะมีความสำคัญมาก ในขบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ประเภทแท่งตัน ท่อผนังหนา หรือชิ้นงานผนังบางรูปทรงหน้าตัดต่าง ๆ ที่มีลักษณะเป็นท่อนยาว ซึ่งยากแก่การผลิตในขบวนการผลิตประเภทอื่น วัสดุที่นิยมใช้มีโลหะ พลาสติก ไม้ และวัสดุเชิงประกอบ ชิ้นงานที่ผ่านขบวนการอัดรีดขึ้นรูป จะมีคุณสมบัติทางกลสูงกว่าวัสดุเริ่มต้น โดยเนื้อวัสดุจะมีความเครียดแข็งตกค้าง ซึ่งเป็นการเพิ่มคุณสมบัติทางกลที่ดี และเป็นประโยชน์ในเชิงพาณิชย์ โดยสามารถนำวัสดุที่มีราคาต้นทุนต่ำ มาผ่านขบวนการอัดรีดขึ้นรูปให้มีคุณสมบัติทางกลสูงขึ้นและราคาเพิ่มขึ้น ซึ่งวัสดุบางประเภทไม่สามารถเพิ่มคุณสมบัติทางกล โดยวิธีอื่นได้ยกเว้นการทำให้เกิดความเค้นตกค้างในเนื้อวัสดุ อย่างเช่นอลูมิเนียมและทองแดง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากขบวนการอัดรีดขึ้นรูปจะมีผิวสวยและมีความเที่ยงตรงสูง

2.1.1 การจำแนกประเภทของการอัดรีดขึ้นรูป

กระบวนการอัดรีดขึ้นรูป จำแนกออกตามลักษณะการไหลตัวของวัสดุกับทิศทางการเคลื่อนที่ของแกนอัดแรมหรือพั่นซ์ สามารถแยกได้เป็นสามประเภท คือ การอัดแบบไหลตาม การอัดแบบไหลทวน และการอัดแบบไหลผสม การอัดแบบไหลตามมีการเคลื่อนตัวของพั่นซ์ และการไหลตัวของเนื้อวัสดุในทิศทางเดียวกัน ซึ่งวัสดุจะถูกกดด้วยแรงดันสูงให้ไหลตัวไปในทางเดียวกับการเคลื่อนที่ของพั่นซ์ รูปร่างภายนอกของชิ้นงานจะเป็นไปตามรูปร่างภายในของแม่พิมพ์บริเวณทางออก ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีลักษณะเป็นท่อนตัน กลวง หรือมีหน้าตัดรูปทรงต่าง ๆ เช่น ท่อโลหะ แท่งโลหะ หรืองานเส้นอลูมิเนียมรูปทรงต่าง ๆ การอัดแบบไหลทวน มีการไหลตัวของวัสดุในทิศทางสวนกับการเคลื่อนที่ของพั่นซ์ โดยวัสดุจะถูกแรงกดของพั่นซ์ให้ไหลตัวในช่องว่างวงแหวนระหว่างพั่นซ์กับแม่พิมพ์สวน

ทิศทางการเคลื่อนที่ของพื้นผิว ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีลักษณะเป็นท่อนกลวงผนังบาง เช่น หลอดยาสีฟัน หรือกระป๋องน้ำอัดลม การอัดแบบไหลผสมมีการเคลื่อนตัวของเนื้อวัสดุส่วนหนึ่งในทิศทางเดียวกับการเคลื่อนตัวของพื้นผิว และเนื้อวัสดุอีกส่วนหนึ่ง จะไหลตัวสวนทางกับการเคลื่อนตัวของพื้นผิว ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีลักษณะตันผสมกลวงเช่นอุปกรณ์กลไกหรือข้อต่อเพลลา [3]



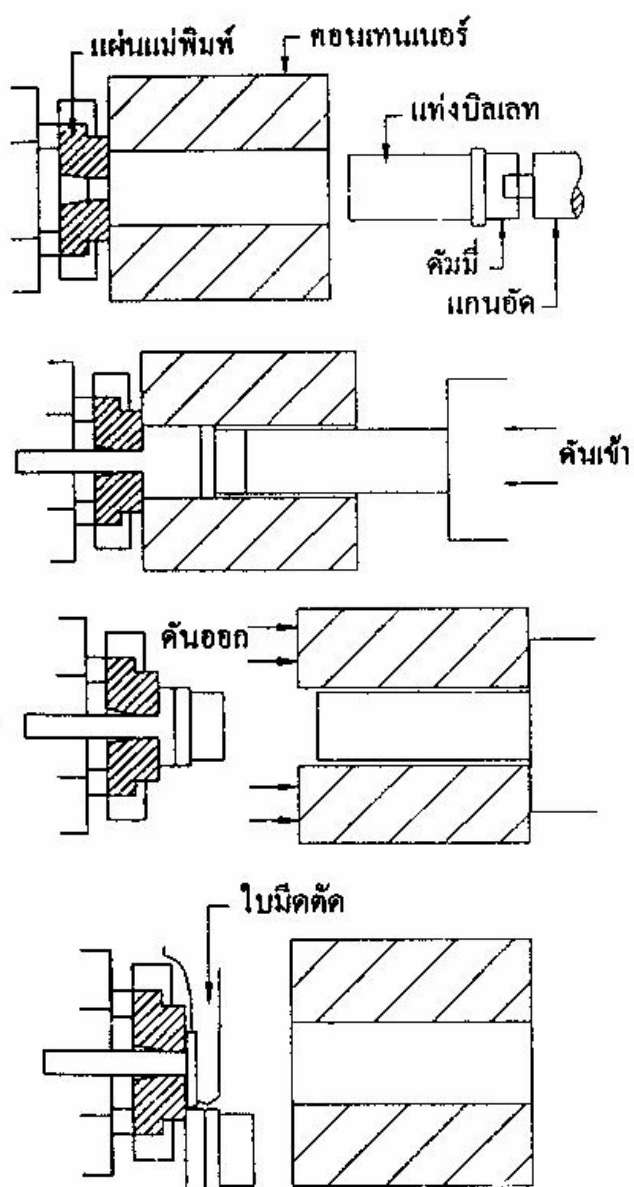
รูปที่ 2.1 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการอัดรีดขึ้นรูปมีรูปร่างต่าง ๆ และมีรูปทรงหลากหลาย ซึ่งยากแก่การผลิตโดยกรรมวิธีอื่น ๆ [3]

กระบวนการอัดรีดขึ้นรูปโลหะ มีแบบขึ้นรูปเย็นและแบบขึ้นรูปร้อน ในกรณีของการขึ้นรูปเย็นที่ต้องใช้แรงในการขึ้นรูปสูง และจำเป็นต้องใช้เครื่องจักรขนาดใหญ่ เช่น ชิ้นงานที่มีขนาดการเปลี่ยนรูปมากและมีขนาดโต การอัดขึ้นรูปเย็นจะเปลี่ยนเป็นการอัดขึ้นรูปร้อน เพื่อเป็นการลดแรง โดยวัสดุดิบจะถูกให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงเกินจุดการเรียงตัวของผลึกในโลหะก่อนนำมาขึ้นรูป ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีขนาดความเที่ยงตรงลดลง และชิ้นงานมีผิวหยาบเนื่องจากอุณหภูมิสูงทำให้เกิดสะเก็ด ในบางกรณีจำเป็นต้องทำการตกแต่งผิวผลิตภัณฑ์ก่อนนำไปใช้ อุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการอัดขึ้นรูปโลหะต้องรับแรงดันสูง ดังนั้นวัสดุที่ใช้ทำแม่พิมพ์จะต้องมีความแข็งแรงสูงและทนต่อการสึกหลอ โดยแม่พิมพ์จะมีความเรียบผิวที่ดีและผ่านกระบวนการชุบแข็ง ดังนั้นกระบวนการอัดขึ้นรูปโลหะ จึงมีต้นทุนสูง ซึ่งในอดีตใช้การลองผิดลองถูก ประสบการณ์และความชำนาญเฉพาะทาง ในการออกแบบทำ

ให้การผลิตมีต้นทุนสูง ปัจจุบันได้มีการนำการจำลองการอัดขึ้นรูปโลหะ โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ มาใช้เพื่อศึกษาและทำนายผลการเปลี่ยนรูปของโลหะที่ใกล้เคียงความเป็นจริง แล้วแสดงผลเป็น ตัวเลขหรือรูปภาพ ซึ่งเป็นการประหยัดและลดค่าใช้จ่ายได้มาก ซึ่งเหมาะสมและเป็นประโยชน์ ในการช่วยออกแบบผลิตภัณฑ์ และพัฒนากระบวนการผลิตอย่างมีประสิทธิภาพ ในปัจจุบันมีการ แข่งขันกันสูง

การอัดรีดทองเหลืองเป็นกระบวนการที่ใช้อุณหภูมิสูง โดยนำแท่งบิลเลท ทองเหลือง มาอบให้ร้อน จนถึงอุณหภูมิที่เหมาะสมกับการเปลี่ยนรูปถาวร ที่อุณหภูมิประมาณ 700-750 องศาเซลเซียส ต่อมาจึง นำบิลเลทบรรจุลงในคอนเทนเนอร์ จากนั้นให้แรงอัดดันให้เนื้อทองเหลือง ไหลผ่านบริเวณปาก แม่พิมพ์ อุณหภูมิของแผ่นแม่พิมพ์และคอนเทนเนอร์ ขณะทำการอัดรีดขึ้นรูปทองเหลืองจะใกล้เคียง กับรูปทรงของชิ้นงาน ที่ได้จะเป็นไปตามรูปร่างของปากแม่พิมพ์นั้น ๆ

Altan, Oh และ Gegel [4] ได้แบ่งขั้นตอนในการอัดรีดขึ้นรูป ซึ่งจะประกอบด้วย 4 ขั้นตอนหลักที่ใช้ กันโดยทั่วไป ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ขั้นตอนการอัดรีดขึ้นรูป



ขั้นตอนที่ 1 นำแท่งบิลเลตที่อบแล้วใส่ในคอนเทนเนอร์ ที่มีอุณหภูมิใกล้เคียงกัน โดยมีคีมอยู่ระหว่างแกนอัดกับแท่งบิลเลต

ขั้นตอนที่ 2 ใช้แกนอัด คั่นคีม จากนั้นเพิ่มแรงดันจนเนื้อวัสดุไหลตัวผ่านปากแม่พิมพ์ จนสุดความยาวแท่งบิลเลต

ขั้นตอนที่ 3 เคลื่อนคอนเทนเนอร์ และแกนอัดออก โดยคีมจะติดกับแท่งบิลเลต

ขั้นตอนที่ 4 ตัดเศษบริเวณหน้าแผ่นแม่พิมพ์ด้วยใบมีดตัด จากนั้นเคลื่อนคอนเทนเนอร์ ใบมีดตัดและแกนอัดกลับสู่ขั้นตอนที่ 1

รูปที่ 2.2 ขั้นตอนการอัดรีดขึ้นรูป [4]

ประเสริฐ ก้วยสมบูรณ์ [5] อธิบายการขึ้นรูปโลหะร้อนต้องให้อุณหภูมิเหนือช่วงการรีคริสตัลไลเซชัน โลหะจะเปลี่ยนรูปในช่วงของพลาสติก แต่การยึดตัวของเกรนไม่แน่นอน เนื่องจากโลหะจะถูกผ่าน การรีคริสตัลไลเซชันในทันที แต่เราสามารถแปรรูปขึ้นงานได้ตามความต้องการได้มากมาย เช่น การรีดขึ้นรูป ตีขึ้นรูป อัดขึ้นรูป รีดเป็นเส้นยาว เป็นแผ่นหรือเป็นท่อ สำหรับการขึ้นรูปร้อนเกรน จะเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิ และการหล่อก่อนนำมารีด โลหะอาจเกิดรูพรุน ซึ่งเกิดจากการกวนของน้ำ โลหะคล้ายฟองอากาศ และโพรงเล็ก ๆ ซึ่งเกิดจากความดันสูง โพรงที่เกิดจะมีผิวเรียบและมัน ไม่เกิดออกไซด์หรืออุณหภูมิที่ทำให้หลอมติดกันในขณะรีด Lange[1] แนะนำให้อัดรีดขึ้นรูปด้วยความเร็ว

ขึ้นรูป 0.5 ถึง 2 ม./วินาที โดย จงกล รัตสุข [6] กล่าวว่า การเดิมตะกั่วลงไปประมาณร้อยละ 2-3.5 จะกระจาย โดยไม่ละลายเข้าไปในเนื้อทองเหลือง สามารถตกแต่งด้วยคมตัดของเครื่องมือตัดได้ง่าย

2.1.2 การคำนวณหาค่าแรง พลังงาน และประสิทธิภาพในกระบวนการอัดขึ้นรูป

Lange [1] กล่าวถึง อุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการอัดขึ้นรูปโลหะประกอบด้วยพื้นที่ แม่พิมพ์หรือเรียกว่า คาย และช่องใส่วัสดุหรือเรียกว่าคอนเทนเนอร์ โดยพื้นที่จะทำหน้าที่กดชิ้นงาน เริ่มต้นให้ไหลผ่าน คายซึ่งมีรูปร่างตามแบบที่ต้องการ ชิ้นงานจะถูกดันให้ไหลออกมาทางปากคาย จนเป็นชิ้นงานสำเร็จ ซึ่งมีลักษณะเป็นเส้นยาวต่อเนื่องกัน พลังงานรวมที่ใช้ในกระบวนการอัดขึ้นรูปประกอบด้วย

$$W_{tot} = W_{id} + W_{FRW} + W_{FRS} + W_{Sh} \quad (2.1)$$

ซึ่ง W_{tot} คือ พลังงานรวมทั้งระบบ W_{id} คือ พลังงานในอุดมคติ W_{FRW} คือ พลังงานจากการเสียดทานที่ผนังของคอนเทนเนอร์ W_{FRS} คือ พลังงานจากการเสียดทานที่ผนังของคาย และ W_{Sh} คือ พลังงานจากความเค้นเฉือนในเนื้อวัสดุ ดังนั้นแรงโดยรวมที่ใช้ในกระบวนการอัดขึ้นรูปประกอบด้วย

$$F_{tot} = F_{id} + F_{FRW} + F_{FRS} + F_{Sh} \quad (2.2)$$

ซึ่ง F_{tot} คือ แรงโดยรวมทั้งระบบ F_{id} คือ แรงในอุดมคติ F_{FRW} คือ แรงจากการเสียดทานที่ผนังของคอนเทนเนอร์ F_{FRS} คือ แรงจากการเสียดทานที่ผนังของคาย และ F_{Sh} คือ แรงจากความเค้นเฉือน ในเนื้อวัสดุ การเปลี่ยนรูปของชิ้นงานในทิศทางที่แรงกระทำ คือ ขนาดของความเครียดจริงเรียกอีกชื่อว่าเกรดในการอัดขึ้นรูป คือ

$$\phi_{max} = \ln \frac{A_0}{A_1} \quad (2.3)$$

ซึ่ง A_0 คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานเริ่มต้น A_1 คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานหลังจากทำการขึ้นรูป พลังงานในอุดมคติที่ใช้ในการอัดขึ้นรูป

$$W_{id} = V \times \sigma_{fm} \times \phi_{max} \quad (2.4)$$

ซึ่ง V คือ ปริมาตรทั้งหมดของชิ้นงาน σ_{fm} คือ ความเค้นเฉลี่ย และ ϕ_{max} คือ เกรดในการอัดขึ้นรูป แรงในอุดมคติที่ใช้ในการอัดขึ้นรูป

$$F_{id} = A_0 \times \sigma_{fm} \times \varphi_{max} \quad (2.5)$$

ความเค้นเฉลี่ย σ_{fm} หาได้จากความเค้นระหว่างความเค้นจุดเริ่มต้นครากถึงความเค้น ณ จุดความเครียดจริงของชิ้นงาน

$$\sigma_{fm} = \frac{\sigma_0 + \sigma_{max}}{2} \quad (2.6)$$

พลังงานในการอัดขึ้นรูปจริง

$$W_{tot} = \frac{W_{id}}{\eta} = \frac{V \sigma_{fm} \varphi_{max}}{\eta} \quad (2.7)$$

แรงในการอัดขึ้นรูปจริง

$$F_{tot} = \frac{F_{id}}{\eta} = \frac{A_0 \sigma_{fm} \varphi_{max}}{\eta} \quad (2.8)$$

ซึ่ง η คือ ประสิทธิภาพในขบวนการอัดขึ้นรูป ค่าความแตกต่างของประสิทธิภาพ เกิดจากระบบการหล่อลื่นและคุณภาพของผิวชิ้นงานเริ่มต้นรวมทั้งระยะความสูงที่เปลี่ยนรูปก็มีผลต่อประสิทธิภาพในการเปลี่ยนรูปเช่นกัน โดยที่มุมของแม่พิมพ์ในช่วง 80 องศา และ 120 องศา ไม่มีผล ส่วนมากระยะพื้นที่ในช่วง $1 \leq h_0/d_0 \leq 1.5$ จะมีค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูประหว่าง $0.7 \leq \eta \leq 0.8$ เช่น วัสดุเหล็ก Ck15 ซึ่งมีความเครียดจริง $\varphi_{max} \approx 1.3$ พลังงานจากการเสียดทานที่ผนังคอนเทนเนอร์

$$W_{FRW} = \frac{1}{2} \pi d_0 \mu \sigma_{f0} (l_0^2 - l^2) \quad (2.9)$$

ซึ่ง d_0 คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในคอนเทนเนอร์ μ คือค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน σ_{f0} คือความเค้นตั้งฉากกับผนังคอนเทนเนอร์ ซึ่งยากแก่การหาค่า จึงนิยมสมมุติให้เท่ากับความดันภายในชิ้นงาน $p = \sigma_{f0}$ และ l คือ ความยาวของคอนเทนเนอร์ ดังนั้นแรงจากการเสียดทานที่ผนังของคอนเทนเนอร์ คือ

$$F_{FRW} = \pi d_0 \mu \sigma_{f0} l \quad (2.10)$$

พลังงานจากการเสียดทานที่ผนังของคาย

$$W_{\text{FRS}} = V \sigma_{fm} \varphi_{\max} \frac{2\mu}{\sin 2\alpha} \quad (2.11)$$

ซึ่ง 2α คือ มุมรวมของรัศมีของคาย ส่วนแรงจากการเสียดทานที่ผนังของคาย คือ

$$F_{\text{FRS}} = A_0 \sigma_{fm} \varphi_{\max} \frac{2\mu}{\sin 2\alpha} \quad (2.12)$$

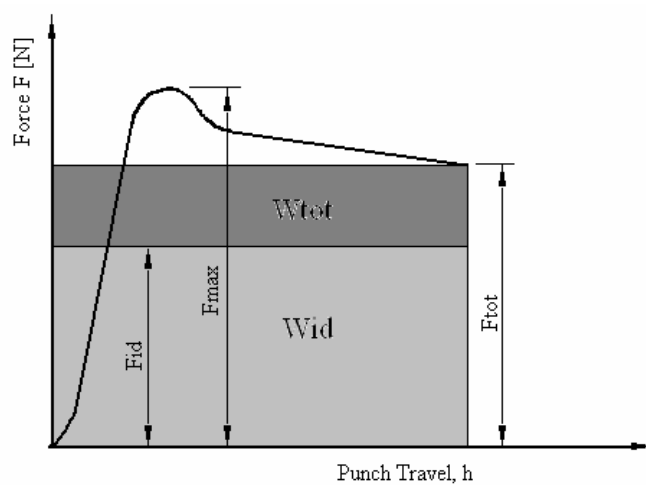
พลังงานจากความเค้นเฉือนในเนื้อวัสดุ

$$W_{\text{Sh}} = \frac{2}{3} V \alpha \sigma_{fm} \quad (2.13)$$

แรงจากความเค้นเฉือนในเนื้อวัสดุ

$$F_{\text{Sh}} = \frac{2}{3} A_0 \alpha \sigma_{fm} \quad (2.14)$$

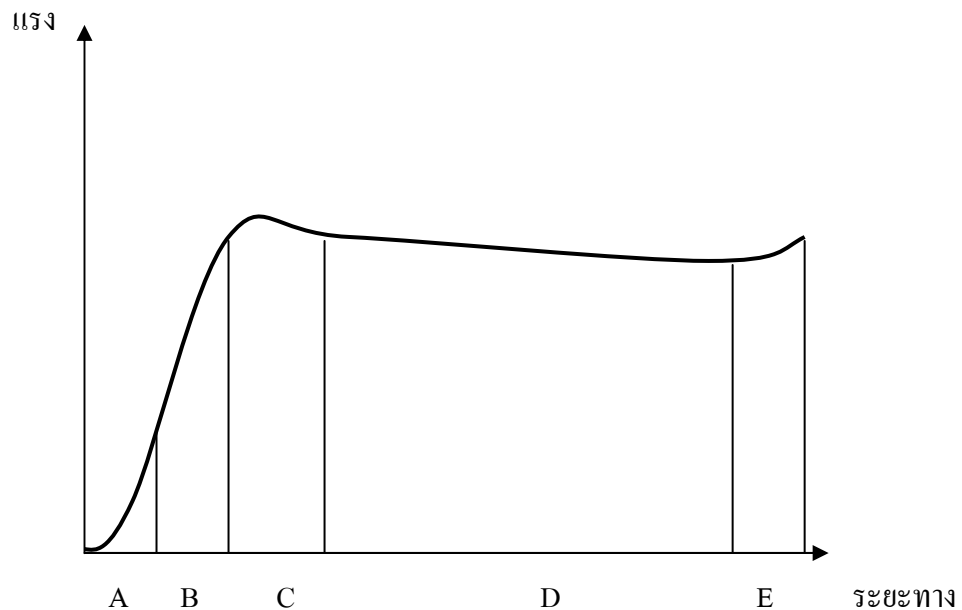
ในการคำนวณหาแรงสูงสุด ในขบวนการอัดขึ้นรูปค่าคงที่ m จะมีค่าลดลงเมื่อความเครียดในชิ้นงานเพิ่มขึ้น ผลคูณระหว่าง η ค่าประสิทธิภาพและค่าคงที่ m แสดงถึงความต่างระหว่างขบวนการอัดขึ้นรูปจริงและในอุดมคติ



รูปที่ 2.3 แรงที่เกิดขึ้นจากขบวนการอัดขึ้นรูปโลหะ [1]

2.1.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงขึ้นรูปและระยะในการอัดรีดขึ้นรูป

การวิเคราะห์การอัดรีดขึ้นรูป ส่วนมากใช้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดรีดต่ออัตราส่วนการอัดรีด เพื่อประมาณการไหลตัวของเนื้อโลหะที่บริเวณการเปลี่ยนรูป โดยแสดงในรูปแบบของเส้นความสัมพันธ์ระหว่างแรงขึ้นรูปและระยะทางในการอัดรีดขึ้นรูป ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 5 ส่วน ดังนี้



รูปที่ 2.4 เส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงขึ้นรูปและระยะทางในการอัดรีดขึ้นรูป [1]

ส่วน A การเริ่มต้นของการอัดรีดขึ้นรูป แท่งบิลเลทมีการขยายตัวเต็มกระบอกอัดคอนเทนเนอร์ และผิวหน้าแม่พิมพ์ ส่วน B แท่งขึ้นงานบิลเลทเกิดแรงต้านภายใน เมื่อถูกอัดด้วยการเปลี่ยนรูปของแท่งบิลเลท ต้องใช้แรงอัดมากขึ้นและสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว จนเกิดการไหลตัวของชิ้นงานผ่านปากแม่พิมพ์ เมื่อแรงขึ้นรูปมากกว่าความเค้นไหลของแท่งบิลเลท ส่วน C การเปลี่ยนรูปในขั้นแรกจะยังไม่แสดงชัดเจน กระทั่งแรงที่ใช้ขึ้นรูปถึงตำแหน่งสูงสุดของเส้นกราฟ ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของการเกิดบริเวณเปลี่ยนรูปและเกิดก้อนเนื้อตายชัดเจนยิ่งขึ้น ส่วน D การเปลี่ยนรูปอย่างสม่ำเสมอภายในแท่งบิลเลท หรือเรียกว่า ช่วงสถานะอยู่ตัว แรงอัดรีดขึ้นรูปจะลดลงเนื่องจากความยาวของแท่งบิลเลทที่ลดลง เป็นเหตุให้ความเสียดทานระหว่างแท่งบิลเลทและกระบอกอัดคอนเทนเนอร์ลดลงอย่างต่อเนื่องตลอดช่วงระยะของการขึ้นรูป ส่วน E การไหลตัวของเนื้อชิ้นงานช่วงสุดท้ายของกระบวนการอัดรีดขึ้นรูป เป็นไปอย่างยาก เนื่องจากความยาวของแท่งบิลเลทที่สั้นลงมากและการไหลตัวของก้อนเนื้อตายเริ่มผ่านเข้าปากแม่พิมพ์ จึงเป็นเหตุให้ต้องใช้แรงขึ้นรูปสูงขึ้น

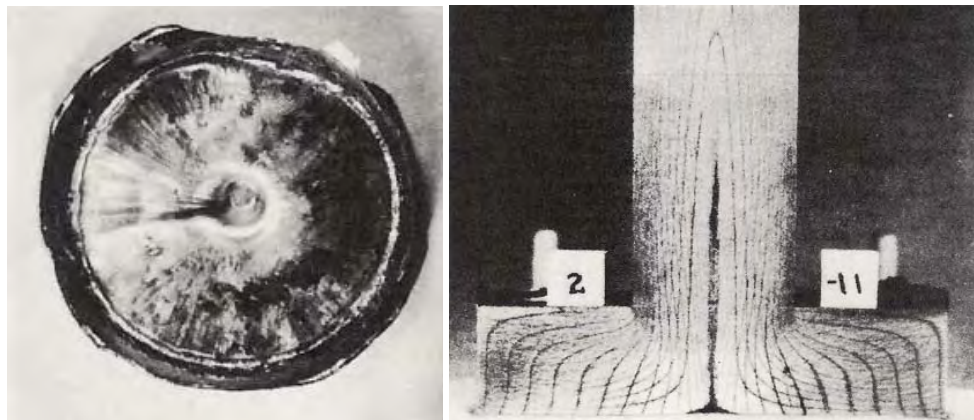
2.2 การเกิดจุดบกพร่องแบบโพรงในกระบวนการอัดรีดขึ้นรูป

การเกิดจุดบกพร่องของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการอัดรีดขึ้นรูป มีทั้งที่ปรากฏให้เห็นได้ชัดเจนที่ผิวภายนอก และที่เกิดขึ้นภายในเนื้อของชิ้นงาน โดยมีผลกระทบมาจากหลายสาเหตุปัจจัย ทั้งที่เกิดจากการออกแบบ กระบวนการผลิต และวัสดุที่ใช้ขึ้นรูป สามารถลดหรือแก้ไขการเกิดจุดบกพร่องดังกล่าวได้โดยแก้ไขเพียงหนึ่งตัวแปรหรือหลายตัวแปรร่วมกัน

2.2.1 ลักษณะจุดบกพร่องในงานอัดรีดขึ้นรูป

Pearson และ Parkins [7] กล่าวถึงจุดบกพร่องของชิ้นงานในกระบวนการอัดรีดนี้ เป็นผลลัพธ์ที่เกิดจากรูปแบบการไหลตัวของเนื้อวัสดุที่ไม่ดี โดยการไหลตัวแบบ S ที่เป็นระเบียบมากที่สุด มักไม่เกิดจุดบกพร่องให้เห็น ส่วนการไหลตัวแบบ A และ B สามารถสร้างจุดบกพร่องที่บริเวณผิวของชิ้นงาน ส่วนการไหลตัวแบบ C มักจะเป็นโพรงหรือรูรูปท่อ และถ้ามีการหล่อลื่นอาจเกิดจุดบกพร่องที่ผิวใน ลักษณะเป็นเม็ดพุพองเกิดขึ้นกับการไหลตัวทั้งสามแบบก็เป็นได้ ซึ่ง Laue และ Stenger [8] ได้กล่าวถึงลักษณะของจุดบกพร่องที่เกิดขึ้นในงานอัดรีดขึ้นรูปได้ดังนี้

จุดบกพร่องแบบโพรงกรวย



รูปที่ 2.5 จุดบกพร่องแบบโพรงกรวย [8]

การเคลื่อนไหวยของพื้นที่รอบนอกของบิลเลทที่กระทำกับแม่พิมพ์ มีการไหลตัวที่เป็นอิสระอยู่ภายในคอนเทนเนอร์ วัสดุในแกนไหลจะเกิดขึ้นมากบริเวณปากแม่พิมพ์อย่างรวดเร็วกว่าที่บริเวณผิว เพราะฉะนั้น ส่วนท้ายของบิลเลท เมื่อเข้าไปใกล้แม่พิมพ์ การเกิดโพรงแบบกรวยสามารถขยายเข้าไปในงานข้างหลังของงาน ดังนั้นการอัดส่ง ควรจะไม่ถูกดันออกมาจนหมด ในระยะความยาวที่ดีที่สุดของงาน

จุดบกพร่องแบบโพรงท่อ

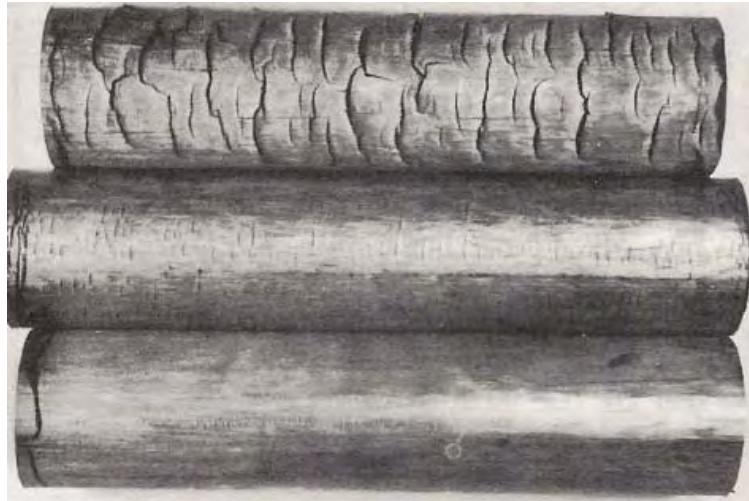


รูปที่ 2.6 จุดบกพร่องแบบโพรงท่อ [8]

โพรงแบบท่อ คือ การแยกตัวออกภายในของวัตถุเพียงบางส่วนหรือทั้งหมด ตามหน้าตัดขวางของงานอัดรีดขึ้นรูป ความบกพร่องนี้มักจะพบบริเวณหนึ่งในสามด้านท้ายของของงานอัดรีดขึ้นรูป ความบกพร่องเกิดขึ้นที่ส่วนปลายของแม่พิมพ์ เมื่อออกไซด์ปกคลุมที่พื้นผิวของแท่งขึ้นงานบิลเลทส่งเข้าไปในวัตถุอย่างรวดเร็ว ซึ่งไหลมากกว่าบริเวณศูนย์กลาง โลหะจะแบ่งตัวออกเป็นชั้น ซึ่งไหลอย่างไม่เป็นระเบียบด้วยกันไม่สามารถเชื่อมกัน เนื่องจากชั้นออกไซด์ ความแตกต่างในความเร็วระหว่างศูนย์กลาง แท่งขึ้นงานบิลเลทและชั้นด้านหน้าสุดสำหรับการไหลแบบ C ผลตามมาก็ คือ ความบกพร่องของงานอัดรีดขึ้นรูป มักพบในโลหะผสมเท่านั้นกับการไหลแบบนี้ เช่น ทองเหลืองและโลหะผสมอลูมิเนียม จุดบกพร่องในกระบวนการอัดรีดที่เป็นรูปท่อ เป็นสาเหตุจากการไหลตัวแบบ C โดยมีการแยกออกเป็นรูปวงแหวนตามภาคตัดขวางส่วนท้ายของชิ้นงานอัดรีด

จุดบกพร่องที่ผิวชิ้นงาน

ความบกพร่องที่ส่งผลให้ผิวของชิ้นงานอัดรีดขึ้นรูป เกิดสะเก็ดหรือเม็ดพุพอง สามารถเกิดขึ้นระหว่างการขึ้นรูป ถ้ามีความไม่บริสุทธิ์การเกิดออกไซด์ของสารหล่อลื่นบนพื้นผิว อนุภาคเล็กสามารถตกค้างใต้ผิวของงานอัดรีด



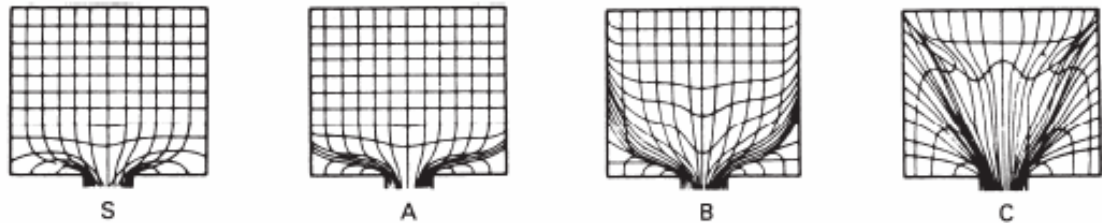
รูปที่ 2.7 จุดบกพร่องที่ผิวชิ้นงาน [8]

ปรากฏการณ์นี้ทำให้สเกลหรือรอยพับ จะปรากฏรอยฉีกเปิดหรือมีลักษณะแผ่นบาง ๆ บนพื้นผิวงาน โดยเส้นหรือเม็ดพุพองจะเกิดขึ้นถ้าเกิดความสกปรกที่ผิว สารหล่อลื่นจะเกิดเป็นก๊าซ ขณะทำการอัดรีดขึ้นรูปทองแดง โลหะผสมธาตุโครเมียม จึงมักแก้ปัญหาที่การรักษาอุณหภูมิที่ 950 ถึง 1,000 องศาเซลเซียส โดยปกติสเกลมักปรากฏในงานอัดรีดโลหะที่มีการไหลตัวแบบ B และการอัดรีดแบบอ้อม วิธีที่ป้องกันการเกิดสเกล ได้แก่ การอัดรีด โดยปราศจากสารหล่อลื่นและด้วยแม่พิมพ์หน้าเรียบ การอัดรีดแบบปอกเปลือก และการอัดรีดที่มีการหล่อลื่นด้วยแม่พิมพ์ลาดเอียง

2.2.2 การไหลตัวของเนื้อโลหะในกระบวนการอัดรีด

Pearson และ Parkins [7] กล่าวถึงการอัดรีดขึ้นรูป ซึ่งโดยปกติเป็นกระบวนการผลิตที่ไม่ต่อเนื่อง เนื่องจากบิลเลทแท่งที่สอง ไม่สามารถนำเข้ามาอัดรีดต่อได้จนกว่าแท่งแรกจะอัดรีดจนเสร็จ ดังนั้น จึงเป็นเหตุให้อุณหภูมิแปรปรวนในแท่งบิลเลท รวมทั้งการเสียคานระหว่างคอนเทนเนอร์ ปลอกนำ และแท่งบิลเลท นำพาสู่การไหลตัวที่มีรูปแบบไม่สม่ำเสมอได้ ซึ่ง Altan และ Gegel [4] ได้วิเคราะห์รูปแบบการไหลตัวของเนื้อโลหะในกระบวนการอัดรีดขึ้นรูป มีปัจจัยส่งผลจากหลายประการ เช่น รูปแบบของการอัดรีดขึ้นรูป ลักษณะของแม่พิมพ์ ขนาดของแท่งบิลเลท และความเสียคานเป็นต้น ซึ่งการศึกษารูปแบบการไหลตัว จะพิจารณาจากความเสียคานที่เกิดขึ้นเป็นสำคัญ โดยเฉพาะความเสียคานที่เกิดขึ้นระหว่างผิวของแท่งบิลเลทและกระบอกคอนเทนเนอร์ มีผลทำให้เนื้อโลหะบริเวณผิวแท่งบิลเลทเคลื่อนตัวได้ช้ากว่าแกนกลางของแท่งบิลเลทขณะอัดรีดขึ้นรูป เนื้อโลหะบริเวณส่วนหน้าของแม่พิมพ์จะเกิดการเปลี่ยนรูป และมีการหยุดอยู่กับที่บริเวณจุดอับบริเวณหน้าแม่พิมพ์ เรียกว่าก้อนเนื้อตาย และเนื้อโลหะจะไหลตัวไปตามบริเวณขอบของก้อนเนื้อตาย จึงเกิดการเลื่อน

ภายใน เป็นผลดีต่อชิ้นงาน คือ ผิวชิ้นงานสำเร็จจะมันวาว โดยมีรูปแบบการไหลในกระบวนการอัดรีดดังนี้



รูปที่ 2.8 รูปแบบการไหลตัวของเนื้อวัสดุในกระบวนการอัดรีด [9]

Lange [1] กล่าวว่าความเสียดทานบริเวณผิวของแท่งบิลเลท ที่กระทำต่อกระบอกลอดคอนเทนเนอร์ และแม่พิมพ์ เป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดการไหลตัวในรูปแบบต่าง ๆ ที่เป็นผลให้เกิดจุดดีและเกิดจุดบกพร่องแบบต่าง ๆ ในชิ้นงาน โดยมีรายละเอียดรูปแบบการไหลตัวของวัสดุชิ้นงานอัดรีดขึ้นรูปดังต่อไปนี้

รูปแบบการไหลตัวแบบ S

การไหลเป็นระเบียบในคอนเทนเนอร์ เมื่อวัสดุเป็นเนื้อเดียวกันหรือแบบเอกพันธ์มีสมบัติการเปลี่ยนรูปเหมือนกันทั้งตามยาวและตามขวางของชิ้นงาน โดยการไหลแบบถาวรเกิดขึ้นมากในบริเวณ การเปลี่ยนรูปที่อยู่ปากแม่พิมพ์โดยตรง การไหลอย่างเป็นระเบียบจะเกิดขึ้นที่ผนังตัวกันเลื่อน หรือที่ผิวหน้าของปากแม่พิมพ์ และเบ้ารองรับที่ไม่มีการเสียดทาน เนื่องจากใช้สารหล่อลื่นที่ผิวสัมผัสระหว่างแท่งบิลเลทกับกระบอกลอดคอนเทนเนอร์ แต่ในทางปฏิบัติแล้วกรรมวิธีการอัดรีด โดยไม่มีการเสียดทานนั้นเป็นไปได้น้อย

รูปแบบการไหลตัวแบบ A

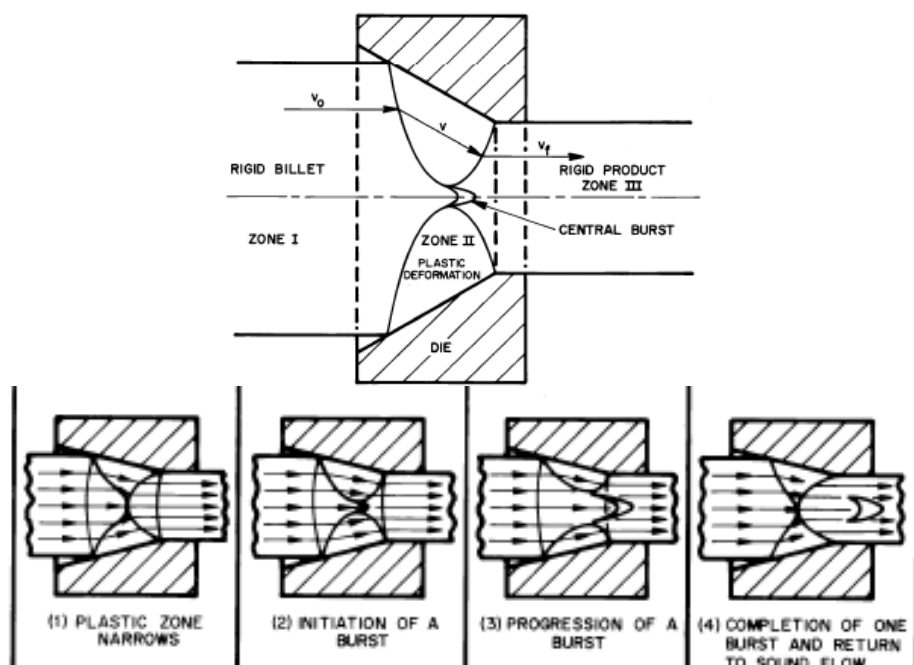
การไหลตัวลักษณะนี้ จะเกิดกับการอัดรีดที่ไม่มีการเสียดทานระหว่างแท่งบิลเลทและคอนเทนเนอร์ แต่มีการเสียดทานที่ปากแม่พิมพ์ ทำให้การไหลตัวบริเวณแกนกลางแท่งบิลเลทไหลตัวได้เร็วกว่าบริเวณขอบของแท่งบิลเลท และมักเกิดกับกระบวนการอัดรีดขึ้นรูปแบบอัดทวน มักเกิดกับการอัดรีดที่มีสารหล่อลื่นของโลหะอ่อน เช่น ตะกั่ว ดีบุก ทองเหลือง และทองแดง

รูปแบบการไหลตัวแบบ B

การไหลตัวลักษณะนี้ มักเกิดกับกระบวนการอัดรีดร้อน วัสดุเป็นแบบเอกพันธ์มีความเสียดทาน ทั้งที่ผนังคอนเทนเนอร์และผิวของแม่พิมพ์ มักเกิดขึ้นในกระบวนการอัดรีดขึ้นรูปแบบอัดตาม จะพบในทองแดงผสมที่ไม่เคลือบผิวออกไซด์ และอลูมิเนียมผสมเกือบทุกชนิด

รูปแบบการไหลตัวแบบ C

การไหลตัวลักษณะนี้ มักเกิดกับกรรมวิธีการอัดรีดร้อน วัสดุไม่เป็นเนื้อเดียวกันหรือไม่เป็นเอกพันธ์ มีความแข็งแรง อุณหภูมิของบิลเลตมีความแตกต่างกันทำให้ความเค้นไหลของแต่ละบริเวณไม่เท่ากันด้วย และมีความเสียดทานที่คอนเทนเนอร์สูงกว่าชนิด B การไหลตัวชนิดนี้มักจะพบในทองเหลือง



รูปที่ 2.9 พฤติกรรมการเกิดจุดบกพร่องแบบโพรงสำหรับกระบวนการอัดรีดขึ้นรูปโลหะ [9]

ซึ่ง Avitzur [9] อธิบายถึงพฤติกรรมการเกิดจุดบกพร่องแบบโพรงจากความสัมพันธ์ของความเร็วการไหลตัวของเนื้อโลหะว่า ความเร็วของการขึ้นรูปยังมีผลต่อความเค้นที่เกิดขึ้น และขนาดของก้อนเนื้อตาย โดยเนื้อโลหะจะมีความเค้นที่สูงขึ้น และยึดเกาะกันอย่างแข็งแรงที่บริเวณของก้อนเนื้อตาย เมื่อก้อนเนื้อตายมีขนาดโตขึ้นถึงระดับหนึ่ง จะทำให้เนื้อโลหะที่ไหลผ่านออกจากแม่พิมพ์มีความเร็วที่สูงขึ้น และมีความแตกต่างกันมากกับเนื้อโลหะบริเวณทางด้านเข้าปากแม่พิมพ์ จึงทำให้เนื้อวัสดุไหลตัวไม่ต่อเนื่อง เกิดการฉีกขาดหรือเป็นจุดบกพร่องแบบโพรงขึ้นในที่สุด ซึ่งจุดบกพร่องแบบโพรงนี้สามารถเกิดขึ้นได้ง่ายสำหรับการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ที่มีขนาดมุมใหญ่

2.2.3 ตัวแปรที่มีผลกระทบต่อรูปแบบการไหลตัวของเนื้อโลหะในกระบวนการอัดรีด

ซึ่งจากการศึกษาตัวแปรที่มีผลกระทบต่อรูปแบบการไหลตัวของเนื้อโลหะ ในกระบวนการอัดรีดของ Lange [1] และ Saba [10] สามารถสรุปตัวแปรที่มีสำคัญต่อกระบวนการได้ดังนี้

ชนิดของการอัดรีดขึ้นรูป

เมื่อพิจารณารูปแบบการไหลจาก รูปที่ 2.8 รูปแบบการไหลตัวของเนื้อวัสดุในกระบวนการอัดรีด พบว่าการอัดรีดขึ้นรูปโลหะแบบไหลตาม จะเกิดความเสียหายในกระบวนการมากกว่าการอัดรีดขึ้นรูปแบบไหลทวน เกิดจากการเสียหายของผิวแท่งบิลเลทกับกระบอกอัดคอนเทนเนอร์และผิวหน้าของแม่พิมพ์ ซึ่งการอัดรีดขึ้นรูปแบบไหลย้อน เกิดความเสียหายจากการเคลื่อนที่ของผิวแท่งบิลเลทกับผิวหน้าของแม่พิมพ์เท่านั้น

อุณหภูมิของแท่งบิลเลท

เมื่อวัสดุไม่เป็นเนื้อเดียวกัน มีผลให้อุณหภูมิความร้อนในแต่ละจุดของแท่งบิลเลทไม่เท่ากัน และเป็นผลให้ความเค้นไหลของแต่ละบริเวณไม่เท่ากันด้วย

อัตราส่วนการอัดรีดขึ้นรูป

เนื่องจากความเครียด เป็นตัวประกอบฟังก์ชันของอัตราส่วนการอัดรีดขึ้นรูป และความดันอัดรีดขึ้นรูปเป็นตัวประกอบฟังก์ชันของความเครียด ดังนั้นอัตราส่วนการอัดรีดต่ำ เป็นผลให้ความเครียดพลาสติกต่ำด้วย กล่าวคือ อัตราส่วนการอัดรีดต่ำจะมีเกรนหยาบ หรือลักษณะโครงสร้างคล้ายกับงานหล่อและสมบัติทางกลอ่อนแอ ในกรณีที่อัตราส่วนการอัดรีดสูงจะให้ผลตรงข้ามกัน คือ ต้องใช้ความดันสูงขึ้นในการดันอัดขึ้นงานให้ขึ้นรูปผ่านปากแม่พิมพ์ ซึ่งสมชาย ตันขวิรุพห์ และคณะ [11] ได้ทดลองการอัดรีดขึ้นรูป พบว่า อัตราการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดที่มากขึ้นทำให้ค่าความเค้น ในการอัดขึ้นรูปมีค่ามากขึ้นตาม การบีบเรียงตัวของโครงสร้างละเอียดและมีความแข็งแรงมากขึ้น

การออกแบบแม่พิมพ์

การออกแบบขนาดมุมของแม่พิมพ์ มีผลกระทบต่อรูปแบบการไหลตัว เมื่อมุมของแม่พิมพ์มีขนาดใหญ่ ทำให้การต้านทานการไหลมีมาก การเกิดของก้อนเนื้อตายมีมาก เป็นผลให้ความเร็วของการไหลตัวบริเวณผิวกับแกนกลางของแท่งบิลเลทแตกต่างกันมาก แต่เมื่อขนาดมุมของแม่พิมพ์เล็กลง เนื้อวัสดุมีการไหลตัวได้สะดวก และความเร็วของการไหลบริเวณผิวกับแกนกลางของแท่งบิลเลทใกล้เคียงกันมากขึ้น สอดคล้องกับผลการทดลองของ Barker และคณะ [12] ที่ได้วิเคราะห์ความเร็ว

การไหลตัวของวัสดุบริเวณผิวและแกนกลางของบิลเลท มีความแตกต่างกันมากที่ขนาดมุมของแม่พิมพ์ 35 องศา เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีอัดรีดขึ้นรูปด้วยขนาดมุมของแม่พิมพ์ 20 องศา

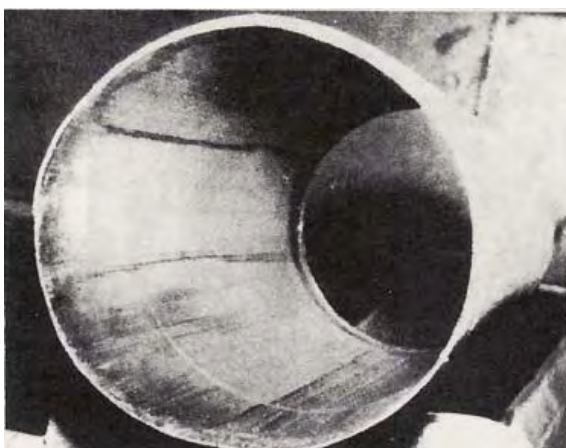
ความเร็วของการขึ้นรูป

โดยปกติกระบวนการอัดรีดขึ้นรูปทองเหลือง เป็นกระบวนการขึ้นรูปร้อน การเพิ่มความเร็วขึ้นรูปมีผลทำให้ความดันในการอัดขึ้นรูปสูงขึ้นตาม และความเครียดที่เกิดขึ้นจะมีผลโดยตรงกับการเพิ่มความเร็วขึ้นรูปนี้

ดังนั้นจะสังเกตเห็นได้ว่า ตัวแปรที่ได้กล่าวในข้างต้นมีผลกระทบต่อรูปแบบการไหลตัวของวัสดุในกระบวนการอัดรีดขึ้นรูปทั้งสิ้น แต่การปรับเปลี่ยนหรือเปลี่ยนแปลงตัวแปรต่าง ๆ เพื่อลดการเกิดจุดบกพร่องที่เกิดจากรูปแบบการไหล โดยให้มีผลกระทบน้อยต่อรูปแบบกระบวนการผลิต ทั้งขนาดชิ้นงานสำเร็จและอัตราการผลิต คือ การปรับเปลี่ยนตัวแปรของการออกแบบแม่พิมพ์และความเร็วของการขึ้นรูป

2.2.4 การแก้ปัญหาการเกิดจุดบกพร่องของงานอัดรีดขึ้นรูป

Laue และ Stenger [8] ได้เสนอแนะแนวทางการแก้ปัญหา การเกิดจุดบกพร่องของงานอัดรีดขึ้นรูป สามารถทำได้หลายวิธีการ เช่นการอัดรีดขึ้นรูป แบบปลอกเปลือก การปาดผิวแท่งบิลเลทออก ตัดส่วนท้ายให้ยาวขึ้น การรักษาอุณหภูมิบิลเลทและคอนเทนเนอร์ให้ใกล้เคียงกัน การอัดแบบทางอ้อม และการลดความเสียดทานบริเวณผิวหน้าของแม่พิมพ์ด้วยการลดขนาดมุมเอียง เป็นต้น



ก. สมบูรณ์



ข. บกพร่อง

รูปที่ 2.10 แสดงการอัดรีดขึ้นรูปแบบปลอกเปลือก [8]

การอัดรีดขึ้นรูปแบบบล็อกเปลือก

การอัดรีดขึ้นรูปแบบบล็อกเปลือก มักใช้ในการอัดรีดทองเหลือง โดยการออกแบบเส้นผ่าศูนย์กลางของดัมมี่ ให้มีขนาดเล็กกว่ากระบอกอัดคอนเทนเนอร์ 3-5 มม. เพื่อป้องกันส่วนผิวของบิลเลท ที่ไม่สะอาดจะผ่านเข้าส่วนการขึ้นรูปเป็นชิ้นงาน จะดันเฉพาะส่วนกลางของเนื้อวัสดุให้ขึ้นรูปออกไปเป็นชิ้นงานสำเร็จ

การปาดผิวแท่งบิลเลทออกจากเครื่องจักร

การปาดผิวแท่งบิลเลทออกจากเครื่องจักร เพื่อกำจัดส่วนที่สกปรก ขรุขระ หรือผิวออกไซด์ออกทิ้ง เพื่อป้องกันการทำปฏิกิริยาหรือเกิดสนิมของผิวระหว่างการอัดรีดขึ้นรูปร้อน

การตัดส่วนท้ายของการอัดรีดให้ยาวขึ้น

การตัดส่วนท้ายของการอัดรีดให้ยาวขึ้นนี้ จะหยุดทำการขึ้นรูปก่อนที่จะจับบัพพร่องจะปรากฏขึ้น ซึ่งวิธีนี้ อาจจะต้องทิ้งส่วนที่ยังไม่ขึ้นรูปสูงถึง 30 เปอร์เซ็นต์ของความยาวการอัดรีด อีกทั้งยังสิ้นเปลืองและเป็นเหตุให้ต้นทุนในการผลิตสูงด้วย

การรักษาอุณหภูมิบิลเลทและคอนเทนเนอร์ให้ใกล้เคียงกัน

การรักษาอุณหภูมิของแท่งบิลเลทและคอนเทนเนอร์ให้มีระดับใกล้เคียงกัน ซึ่งอุณหภูมิในการขึ้นรูปเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้มีการไหลตัวแบบ C ได้ เช่น การลดหรือป้องกันการเกิดโพรงแบบท่อ ในโลหะผสมอลูมิเนียมและโลหะผสมทองแดงจะรักษาระดับอุณหภูมิอยู่ที่ 450 องศาเซลเซียส

การลดความเสียหายบริเวณผิวหน้าแม่พิมพ์

การลดความเสียหายบริเวณผิวหน้าแม่พิมพ์ เพื่อหลีกเลี่ยงการไหลตัวแบบ C โดยเพิ่มการหล่อลื่นและเพิ่มการลาดเอียงที่แม่พิมพ์สำหรับ วิธีนี้สามารถใช้เพื่อป้องกันการเกิดโพรงแบบท่อที่ปลายของงานอัดรีดขึ้นรูป และหล่อลื่นในงานอัดรีดขึ้นรูปร้อน อย่างไรก็ตามการหล่อลื่นทำได้ไม่เสมอไป เพราะว่าการหล่อลื่นที่ตกค้างบนผิวของผลิตภัณฑ์ จะทำให้เกิดความบกพร่องแบบสเกลหรือการเกิดเม็ดพุพองขึ้นแทน การเพิ่มมุมลาดเอียงที่แม่พิมพ์จะเป็นวิธีที่จะลดความเสียหายและการเกิดโพรงแบบท่อได้ กระบวนการแก้ปัญหาเหล่านี้ เหมาะสำหรับการกระบวนการผลิต สำหรับโลหะผสมเช่นเดียวกับทองเหลือง

ซึ่ง Lange [1] ยังให้เหตุผลอีกว่า จุดบดร่องแบบโพรงที่พบในการอัดรีดขึ้นรูปโลหะ มักเกิดจากการเปลี่ยนแปลงขนาด ในกระบวนการสามารถแก้ปัญหาในเบื้องต้นและป้องกันได้ โดยปรับอัตราการลดขนาดให้น้อยลง ลดมุมลาดเอียงของแม่พิมพ์ ลดความเสียดทาน ควบคุมการอบให้ความร้อนที่สม่ำเสมอทั่วทั้งแท่งบิลเลท ก่อนทำการอัดรีดขึ้นรูป และใช้ความเร็วของการขึ้นรูปที่เหมาะสม

2.3 การวิเคราะห์การอัดรีดขึ้นรูปด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

การวิเคราะห์กระบวนการขึ้นรูปโลหะ 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) เนื่องจากได้มีการพัฒนานำคอมพิวเตอร์มาช่วยในการประมวลผลทางคณิตศาสตร์ จึงทำให้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นที่นิยมใช้กันมาก และสะดวกในการวิเคราะห์ปัญหาทางวิศวกรรมศาสตร์ อย่างกว้างขวาง ซึ่งวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้มีการเริ่มต้น โดยในปี ค.ศ.1940 ได้มีการเริ่มนำแนวคิดทางไฟไนต์เอลิเมนต์มาใช้วิเคราะห์ปัญหาความเค้นในมิติเดียว เช่น ความเค้นในท่อนโลหะและคาน แต่ในช่วงนั้นยังไม่เป็นที่นิยมแพร่หลาย ต่อมาในปี ค.ศ.1954 เครื่องคอมพิวเตอร์ได้รับการพัฒนาให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น การวิเคราะห์โครงสร้างโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จึงได้รับความนิยมมากขึ้น

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้รับความสนใจมากขึ้นและได้พัฒนาใช้หลักการต่าง ๆ ซึ่งสามารถวิเคราะห์ปัญหาที่มีการเปลี่ยนรูปของวัสดุอยู่ในช่วงไม่ยืดหยุ่นเชิงเส้นได้ โดยมีความเครียดและการกระจัดมาก ปัจจุบันวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้รับความนิยมอย่างกว้างขวาง ซึ่งมีการนำวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จัดพิมพ์เป็นหนังสือมากมาย และมีการสอนในหลักสูตรการเรียนในมหาวิทยาลัยต่าง ๆ วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้รับการพัฒนาและประยุกต์ในการวิเคราะห์ปัญหาทางโครงสร้าง ถึงความดัน การไหลตัวของลม หรือของเหลว การนำความร้อน การเปลี่ยนรูปของโลหะก้อนหรือโลหะแผ่น การสั่นสะเทือนพลังสนามแม่เหล็ก ปฏิกิริยาของอนุภาคทางชีวและเคมี ซึ่งมีประโยชน์มากทางด้านการศึกษา

Reddy และคณะ [13] กล่าวถึงสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์กระบวนการอัดขึ้นรูปโลหะ สามารถหาได้จากวิธีพื้นฐาน 2 วิธี คือ วิธีแรงหรือวิธียืดหยุ่น และวิธีการกระจัดหรือวิธีสปีฟเนส วิธีแรกสามารถจะหาแรงภายในและแรงปฏิกิริยาได้ โดยอาศัยสมการสมดุลของแรงตามเงื่อนไขการกระจัด ส่วนวิธีที่สอง สามารถจะหาการกระจัดที่สมมุติขึ้น โดยมีเงื่อนไขของความต่อเนื่องของเอลิเมนต์ที่แต่ละจุดต่อหรือที่บริเวณขอบสัมผัสกันก่อนและหลังโหลดกระทำ ซึ่งมีความต่อเนื่องกัน ดังนั้นสมการสมดุลจะเขียนอยู่ในเทอมของการกระจัดของแต่ละจุดต่อ และค่าของการกระจัดสามารถหาได้โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการกระจัด การวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะนิยมใช้วิธีที่สองมากกว่า ทั้งนี้เพราะสามารถจะหาสมการสมดุลและผลเฉลยได้สะดวกกว่า รวมทั้ง

โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูปทางการค้าที่ใช้ในการวิเคราะห์นิยมใช้วิธีการกระจัด หลักการทั่วไปของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ คือ การแบ่งโครงสร้างออกเป็นส่วนย่อย ๆ เรียกว่า ไฟไนต์เอลิเมนต์ ฟังก์ชันการกระจัด ซึ่งนำมาแทนเอลิเมนต์และเป็นฟังก์ชันต่อเนื่อง ในแต่ละเอลิเมนต์จะเชื่อมโยงกันด้วยจุดต่อ และเส้นขอบหรือผิวรอบเอลิเมนต์ที่สัมผัสกัน โดยอาศัยการกำหนดคุณสมบัติทางกลที่ถูกต้องให้กับวัสดุ ที่ใช้ทำโครงสร้างหรือชิ้นงาน เราสามารถหาการกระจัด ความเค้น และความเครียดที่เกิดขึ้นที่จุดต่อต่าง ๆ ของเอลิเมนต์ที่ประกอบกันเป็นโครงสร้างหรือชิ้นงาน

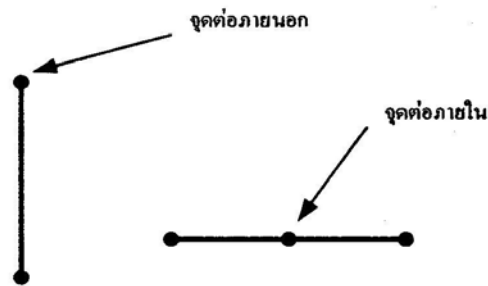
การวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ เป็นหลักวิธีเชิงตัวเลขวิธีหนึ่ง ที่ใช้สำหรับแก้สมการเชิงอนุพันธ์ สามารถประยุกต์ใช้ได้กับปัญหาทางด้านกลศาสตร์ของแข็ง ไม่ว่าวัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์จะอยู่ในสภาพยืดหยุ่นหรือสภาพพลาสติก การวิเคราะห์โครงสร้างจำลองของปัญหา จะประกอบจากชิ้นส่วนเล็ก ๆ ตามรูปทรงชิ้นงานเรียกว่า เอลิเมนต์ รูปร่างของเอลิเมนต์ถูกกำหนดด้วยจุดต่อตั้งแต่ 2 จุดขึ้นไป โดยทั่วไปการวิเคราะห์ปัญหาด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้น ปัญหาจะถูกแบ่งออกเป็นส่วนย่อย ๆ อย่างต่อเนื่อง ตามรูปร่างลักษณะแท้จริงของชิ้นงาน การวิเคราะห์จะนำค่าของแต่ละเอลิเมนต์มารวมกันเป็นผลเฉลยของทั้งระบบ ผลเฉลยที่ได้รับจะเป็นผลเฉลยที่จุดต่อ ของแต่ละเอลิเมนต์ จากนั้นจึงหาการกระจัดและความเค้นของแต่ละจุดต่อของเอลิเมนต์ ที่เป็นโครงสร้างของระบบได้ การแบ่งโครงสร้างออกเป็นส่วนย่อย ๆ จากนั้นนำฟังก์ชันการกระจัด มาแทนลักษณะรูปร่างของเอลิเมนต์ ซึ่งต้องเป็นฟังก์ชันต่อเนื่อง โดยแต่ละเอลิเมนต์โยงกันด้วยจุดต่อ และอาศัยความสัมพันธ์ความเค้น ความเครียด และการกระจัด ในการหาผลเฉลยของปัญหา ณ จุดต่อต่าง ๆ ของเอลิเมนต์

2.3.1 การแบ่งโครงสร้างและการแบ่งส่วนเอลิเมนต์

การวิเคราะห์กระบวนการขึ้นรูปโลหะด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ต้องแบ่งชิ้นงานออกเป็นส่วนเล็ก ๆ และการเลือกใช้ชนิดของเอลิเมนต์ ต้องเหมาะสมกับรูปร่างลักษณะของงาน โดยเอลิเมนต์แบ่งเป็น 3 ชนิด ตามมิติ คือ เอลิเมนต์สำหรับปัญหามิติเดียว สองมิติ และสามมิติ การเลือกใช้ชนิดของเอลิเมนต์จะต้องคำนึงถึงรูปร่างลักษณะของชิ้นงาน โดยการแบ่งชิ้นงานออกเป็นส่วนเล็ก ๆ จะต้องเหมาะสมกับบริเวณที่เป็นส่วนเว้า ส่วนโค้ง หรือมีรู ซึ่งสามารถแบ่งชนิดของ เอลิเมนต์ ได้สามประเภทตามมิติคือ

เอลิเมนต์มิติเดียว

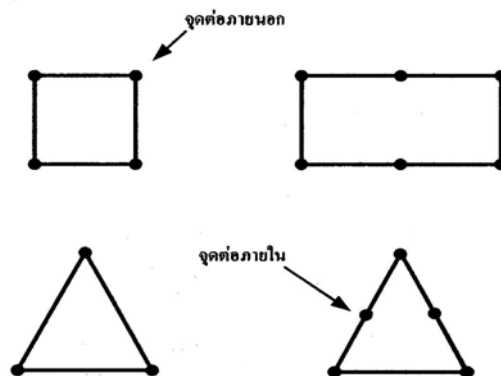
เอลิเมนต์ชนิดนี้จะใช้ปัญหามิติเดียว เช่น ชิ้นส่วนที่มีแรงกระทำในแนวแกน ชิ้นส่วนที่รับแรงบิดหรือการโก่งของคานเป็นต้น ในแต่ละเอลิเมนต์จะประกอบด้วยจุดต่อภายนอกหรืออาจมีจุดต่อภายในรวมก็ได้ เพื่อให้การวิเคราะห์ผลเฉลยมีความแม่นยำมากขึ้น



รูปที่ 2.11 เอลิเมนต์มิติเดียว [14]

เอลิเมนต์สองมิติ

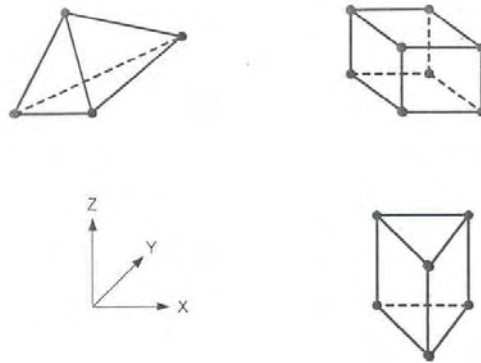
เอลิเมนต์ชนิดนี้ เหมาะสำหรับวิเคราะห์ปัญหาในระบบสองมิติ และนิยมใช้สำหรับวิเคราะห์ปัญหาความเค้นระนาบหรือความเครียดระนาบ ซึ่งเอลิเมนต์จะเป็นรูปสามเหลี่ยม หรือสี่เหลี่ยมที่ประกอบด้วยด้านที่เป็นเส้นตรงและประกอบด้วยจุดต่อภายในหรือจุดต่อภายนอกไปด้วย



รูปที่ 2.12 เอลิเมนต์สองมิติ [14]

เอลิเมนต์สามมิติ

เอลิเมนต์สามมิติ จะใช้วิเคราะห์ปัญหาสามมิติทั่วไป ที่มีทิศทางการเคลื่อนที่ทั้งสามแนวแกน รูปทรงของเอลิเมนต์จะมีลักษณะเป็นสามเหลี่ยมปริซึม รูปกรวยสามเหลี่ยม หรือปริซึม เป็นต้น



รูปที่ 2.13 เอลิเมนต์สามมิติ [14]

การแบ่งโครงสร้างออกเป็นเอลิเมนต์ย่อย ต้องคำนึงถึงจำนวนเอลิเมนต์และจำนวนจุดต่อที่ใช้ การแบ่งเอลิเมนต์สำหรับแทนรูปร่างชิ้นงานเดิมนั้น รูปร่างที่ได้ต้องใกล้เคียงกับของจริงมากที่สุด เช่น บริเวณที่มีส่วนโค้ง ส่วนเว้า เป็นต้น ส่วนบริเวณที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างมากนัก อาจแทนส่วนนั้นด้วยเอลิเมนต์ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น แต่ถ้าแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ประกอบด้วยเอลิเมนต์จำนวนมากเกินความจำเป็น จะทำให้เสียทั้งเวลาและค่าใช้จ่ายในการคำนวณ ส่วนการเลือกชนิดของเอลิเมนต์ ต้องคำนึงถึงรูปร่างของการเปลี่ยนรูป และความเหมาะสมกับปัญหาที่ทำการวิเคราะห์ แบ่งชิ้นส่วนออกเป็นเอลิเมนต์ที่เชื่อมโยงกัน ด้วยจุดต่อซึ่งการแบ่งเอลิเมนต์สองมิติ หรือ สามมิติ สามารถแบ่งเป็นรูปสามเหลี่ยม หรือสี่เหลี่ยมก็ได้ มีหลักในการปฏิบัติทั่วไป คือ

ควรหลีกเลี่ยงการใช้เอลิเมนต์ที่มีรูปร่างผิดปกติไม่สมมาตร เช่น เอลิเมนต์ที่มีรูปเป็นสามเหลี่ยมมุมป้านมาก หรือรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีด้านยาวมากเกินไป โดยใช้รูปร่างของเอลิเมนต์ที่เป็นสามเหลี่ยม หรือสี่เหลี่ยมด้านเท่า หรือมีอัตราส่วนความกว้างต่อความยาว เข้าใกล้จำนวนเต็ม 1 มากที่สุด และควรใช้เอลิเมนต์ขนาดเล็กเป็นจำนวนมากในบริเวณที่เป็นจุดวิกฤต หรือมีการเปลี่ยนรูปมากที่คาดว่ามีความเค้นหนาแน่น และใช้เอลิเมนต์ขนาดใหญ่ ในบริเวณที่ไม่ใช่จุดวิกฤต

2.3.2 ฟังก์ชันการกระจัด

การทำนายการเปลี่ยนแปลงหรือการประมาณของแต่ละจุดต่อแต่ละเอลิเมนต์ ที่จะประกอบเข้าด้วยกันเป็นระบบรวม จะใช้ฟังก์ชันการกระจัด ซึ่งเป็นฟังก์ชันที่สมมุติขึ้นมาแทนการกระจัดเหล่านั้น การกำหนดฟังก์ชันการกระจัดที่เหมาะสม จะทำให้ผลลัพธ์มีความแม่นยำตรง โดยทั่วไปฟังก์ชันการกระจัดที่นิยมใช้ คือ ฟังก์ชันโพลิโนเมียล ความแตกต่างกันในทอมสัมประสิทธิ์ของโพลิโนเมียล ของฟังก์ชันขึ้นอยู่กับรูปร่างและปัญหา สำหรับปัญหามิติเดียวฟังก์ชัน โพลิโนเมียล คือ

$$u(x) = a_1 + a_2x + a_3x^2 + \dots + a_{n+1}x^n \quad (2.15)$$

เมื่อ $a_1 - a_{n+1}$ คือ สัมประสิทธิ์โพลิโนเมียล
 u คือ การกระทำในทิศทาง x

สำหรับปัญหาสองมิติ ฟังก์ชันโพลิโนเมียล คือ

$$u(x, y) = a_1 + a_2x + a_3y + a_4x^2 + a_4xy + a_6y^2 + \dots + a_ny^n \quad (2.16)$$

$$v(x, y) = a_{m+1} + a_{m+2}x + a_{m+3}y + a_{m+4}x^2 + a_{m+5}xy + a_{m+6}y^2 + \dots + a_{2m}y^n$$

เมื่อ u และ v คือการกระทำในทิศทาง x และ y

$$m = \sum_{i=1}^{n+1} i \quad (2.17)$$

สำหรับปัญหาสามมิติ ฟังก์ชันโพลิโนเมียล คือ

$$u(x, y, z) = a_1 + a_2x + a_3y + a_4z + a_5xz + \dots + a_mz^n$$

$$v(x, y, z) = a_{m+1} + a_{m+2}x + a_{m+3}y + a_{m+4}z + a_{m+5}zx + \dots + a_{2m}z^n \quad (2.18)$$

$$w(x, y, z) = a_{2m+1} + a_{2m+2}x + a_{2m+3}y + a_{2m+4}z + a_{2m+5}zx + \dots + a_{3m}z^n$$

เมื่อ u, v และ w คือการกระทำในทิศทาง x, y และ z

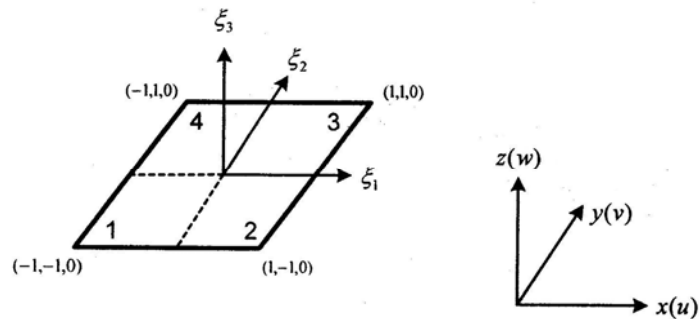
$$m = \sum_{i=1}^{n+1} i(n+2-i) \quad (2.19)$$

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 ซึ่งสามารถแสดงในรูปแบบการกระทำ คือ

$$\{d_n\} = \{\bar{u}_n, \bar{v}_n, \bar{w}_n\} \quad (2.20)$$

2.3.3 ฟังก์ชันรูปร่าง

เมื่อพิจารณาจุดต่อที่ 1, 2, 3 และ 4 โดยนับทวนเข็มนาฬิกา จุดต่อหรือโหนดต่าง ๆ จะเคลื่อนที่ตามแนวแกนทั้งสามแกน คือ x, y และ z



รูปที่ 2.14 เอลิเมนต์สี่เหลี่ยมชนิดบางแบบไอโซพาราเมตริกซ์ [14]

ถ้ากำหนดให้ เมทริกซ์ $\{\phi\}$ เป็นเมทริกซ์การกระจัดที่ จุดต่อในทอมพิกัดรวม $\{\phi\} = \{u, v, w\}$ สามารถเขียนอยู่ในรูปของเมทริกซ์ได้ คือ

$$\{\phi\} = \begin{Bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ w_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ u_4 \\ v_4 \\ w_4 \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

ฟังก์ชันการกระจัดสำหรับเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมแผ่นบาง แบบไอโซพาราเมตริกซ์ สามารถเลือกแบบการกระจัดเชิงเส้นที่มี 12 ระดับความเสรีในระนาบ u, v และ w ได้ดังนี้

$$u(x, y, z) = a_1 + a_2x + a_3y + a_4z$$

$$v(x, y, z) = a_5 + a_6x + a_7y + a_8z \quad (2.22)$$

$$w(x, y, z) = a_9 + a_{10}x + a_{11}y + a_{12}z$$

เมื่อ u, v และ w คือ การกระจัดในทิศทาง x, y และ z
 $a_1 - a_2$ คือ สัมประสิทธิ์ของโพลิโนเมียล

เมื่อเอลิเมนต์ได้รับแรงกระทำ จนเกิดการกระจัดขึ้นภายในเอลิเมนต์ ซึ่งสามารถอธิบายได้ในเทอมของฟังก์ชันรูปร่าง โดยฟังก์ชันรูปร่างจะเป็นตัวกำหนดลักษณะรูปร่างของเอลิเมนต์ เพื่อที่จะหาฟังก์ชันรูปร่าง จะใช้ระบบพิกัดธรรมชาติเป็นตัวกำหนดพิกัดหรือจุดต่อ ดังนั้น พิกัดจุดต่อที่ 1, 2, 3 และ 4 จะมีการกระจัดในแนวแกน x, y และ z ซึ่งสามารถแปลงสู่พิกัดธรรมชาติ ξ_1, ξ_2 และ ξ_3 ซึ่งสามารถเขียนในรูปสมการดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} u &= \frac{1}{4}[(1-\xi_1)(1-\xi_2)(\xi_3)x_1 + (1-\xi_1)(1-\xi_2)(\xi_3)x_2 + (1-\xi_1)(1-\xi_2)(\xi_3)x_3 + (1-\xi_1)(1-\xi_2)(\xi_3)x_4] \\ v &= \frac{1}{4}[(1-\xi_1)(1-\xi_2)(\xi_3)y_1 + (1-\xi_1)(1-\xi_2)(\xi_3)y_2 + (1-\xi_1)(1-\xi_2)(\xi_3)y_3 + (1-\xi_1)(1-\xi_2)(\xi_3)y_4] \\ w &= \frac{1}{4}[(1-\xi_1)(1-\xi_2)(\xi_3)z_1 + (1-\xi_1)(1-\xi_2)(\xi_3)z_2 + (1-\xi_1)(1-\xi_2)(\xi_3)z_3 + (1-\xi_1)(1-\xi_2)(\xi_3)z_4] \end{aligned} \quad (2.23)$$

เพื่อความสะดวกกำหนดให้ ξ_3 มีค่าเท่ากับ 1 และกำหนดให้

$$\begin{aligned} N_1 &= \frac{1}{4}(1-\xi_1)(1-\xi_2)(\xi_3) \\ N_2 &= \frac{1}{4}(1-\xi_1)(1-\xi_2)(\xi_3) \\ N_3 &= \frac{1}{4}(1-\xi_1)(1-\xi_2)(\xi_3) \\ N_4 &= \frac{1}{4}(1-\xi_1)(1-\xi_2)(\xi_3) \end{aligned} \quad (2.24)$$

สมการที่ N_1, N_2, N_3 และ N_4 คือ ฟังก์ชันรูปร่างของเอลิเมนต์ และสามารถแทนสมการเพื่อจัดรูปสมการได้ดังนี้

$$\begin{aligned} u(x, y, z) &= N_1x_1 + N_2x_2 + N_3x_3 + N_4x_4 \\ v(x, y, z) &= N_1y_1 + N_2y_2 + N_3y_3 + N_4y_4 \\ w(x, y, z) &= N_1z_1 + N_2z_2 + N_3z_3 + N_4z_4 \end{aligned} \quad (2.25)$$

ซึ่งสามารถนำมาเขียนในรูปเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 & 0 & N_3 & 0 & 0 & N_4 & 0 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 & 0 & N_3 & 0 & 0 & N_4 & 0 \\ 0 & 0 & N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 & 0 & N_3 & 0 & 0 & N_4 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \\ . \\ . \\ . \\ x_4 \\ y_4 \\ z_4 \end{Bmatrix} \quad (2.26)$$

จากสมการที่ (2.10) สามารถเขียนการกระจัดรวมในรูปเมทริกซ์อย่างย่อได้ดังนี้

$$\{\phi\} = [N]\{d\} \quad (2.27)$$

เมื่อ $\{\phi\}$ คือ ฟังก์ชันการกระจัดในเทอมพิกัดรวม

$[N]$ คือ เมทริกซ์ฟังก์ชันรูปร่าง

$\{d\}$ คือ เมทริกซ์การกระจัดของจุดต่อในเทอมพิกัดรวม

2.3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับการกระจัด

การวิเคราะห์ปัญหาที่อยู่ภายใต้สภาวะแรงกระทำใน 3 มิตินั้น จากการกระทำดังกล่าว ทำให้มีความเครียดเกิดขึ้น ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับการกระจัดสามารถจัดให้อยู่ในรูปอย่างย่อได้ดังนี้

$$\{\epsilon\} = [B]\{d\} \quad (2.28)$$

เมื่อ $\{\epsilon\}$ คือ เมทริกซ์แสดงความเครียดที่เกิดขึ้น

$[B]$ คือ เมทริกซ์ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและการกระจัดที่จุดต่อ

กำหนดให้ u, v และ w เป็นการกระจัดในทิศทาง x, y และ z ตามลำดับ ดังนั้นสมการ 2.13 สามารถจัดรูปได้ใหม่ดังนี้

$$\{\varepsilon\} = \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & & & & & \\ & \frac{\partial}{\partial y} & & & & \\ & & \frac{\partial}{\partial z} & & & \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} & & & & \\ & & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial y} & & \\ \frac{\partial}{\partial z} & & \frac{\partial}{\partial x} & & & \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} \quad (2.29)$$

จากสมการ 2.29 จำเป็นต้องหาเมทริกซ์ $[B]$ ซึ่งเป็นเมทริกซ์ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับการกระจัดที่จุดต่อ ในการหาเมทริกซ์ $[B]$ ในทอมพิกัดไอโซพารามเมตริกซ์ของพิกัดธรรมชาติ (ξ_1, ξ_2, ξ_3) แต่ความเครียด $\{\varepsilon\}$ หาได้จากอนุพันธ์ของการกระจัดเทียบกับพิกัด (x, y, z) ดังนั้นจะต้องเปลี่ยนสมการความเครียด ให้อยู่ในทอมของค่าพิกัดธรรมชาติ ด้วยการใช้กฎลูกโซ่ในการหาอนุพันธ์ดังนี้

$$f = f[x(\xi_1, \xi_2, \xi_3), y(\xi_1, \xi_2, \xi_3), z(\xi_1, \xi_2, \xi_3)]$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial \xi_1} \\ \frac{\partial f}{\partial \xi_2} \\ \frac{\partial f}{\partial \xi_3} \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} \\ \frac{\partial f}{\partial y} \\ \frac{\partial f}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

เมื่อ J คือจาโคเบียนเมทริกซ์

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi_1} & \frac{\partial y}{\partial \xi_1} & \frac{\partial z}{\partial \xi_1} \\ \frac{\partial x}{\partial \xi_2} & \frac{\partial y}{\partial \xi_2} & \frac{\partial z}{\partial \xi_2} \\ \frac{\partial x}{\partial \xi_3} & \frac{\partial y}{\partial \xi_3} & \frac{\partial z}{\partial \xi_3} \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

$$\equiv \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} & J_{13} \\ J_{21} & J_{22} & J_{23} \\ J_{31} & J_{32} & J_{33} \end{bmatrix}$$

กำหนดให้

$$J^{-1} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} & J_{13} \\ J_{21} & J_{22} & J_{23} \\ J_{31} & J_{32} & J_{33} \end{bmatrix}^{-1} \quad (2.32)$$

เพื่อลดรูปสมการด้วยเมทริกซ์ผกผันของ J ดังนั้น

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} \\ \frac{\partial f}{\partial y} \\ \frac{\partial f}{\partial z} \end{bmatrix} = J^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial \xi_1} \\ \frac{\partial u}{\partial \xi_2} \\ \frac{\partial u}{\partial \xi_3} \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

สามารถเขียนเมทริกซ์ที่แสดงความสัมพันธ์ในรูปอนุพันธ์การกระจัด ในเทอมพิกัดรวมเทียบกับพิกัดธรรมชาติต่อความเครียดได้ดังนี้

$$[A] = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} & J_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & J_{21} & J_{22} & J_{23} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & J_{31} & J_{32} & J_{33} \\ J_{21} & J_{22} & J_{23} & J_{11} & J_{12} & J_{13} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & J_{31} & J_{32} & J_{33} & J_{21} & J_{22} & J_{23} \\ J_{31} & J_{32} & J_{33} & 0 & 0 & 0 & J_{11} & J_{12} & J_{13} \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

สามารถหาอนุพันธ์ของ u, v, w เทียบกับ ξ_1, ξ_2, ξ_3 คือ

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial \xi_1} \\ \frac{\partial u}{\partial \xi_2} \\ \frac{\partial u}{\partial \xi_3} \\ \frac{\partial v}{\partial \xi_1} \\ \frac{\partial v}{\partial \xi_2} \\ \frac{\partial v}{\partial \xi_3} \\ \frac{\partial w}{\partial \xi_1} \\ \frac{\partial w}{\partial \xi_2} \\ \frac{\partial w}{\partial \xi_3} \end{bmatrix} = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 & 0 & N_3 & 0 & 0 & N_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 & 0 & N_3 & 0 & 0 & N_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 & 0 & N_3 & 0 & 0 & N_4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \{d\}$$

$$= [G]\{d\} \quad (2.35)$$

สมการความเครียดในทอมพิกัดธรรมชาติ ξ_1, ξ_2, ξ_3 และการกระจัดที่จุดต่อ คือ

$$\{\varepsilon\} = [A][G]\{d\} \quad (2.36)$$

กำหนดให้

$$[B] = [A][G] \quad (2.37)$$

เนื่องจาก $[A]$ เป็นเมทริกซ์ขนาด 6×9 $[G]$ เป็นเมทริกซ์ขนาด 9×12 และถูกคูณด้วย $\{d\}$ ซึ่งเป็นเมทริกซ์ขนาด 12×1 แล้ว ดังนั้นเมทริกซ์ของความเครียดจะมีขนาดเท่ากับ 6×1 นั่นคือ $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}$ และ γ_{xz}

2.3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด

เมื่อเนื้อวัสดุได้รับแรงภายนอกมา กระทำเป็นผลทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปภายในเนื้อวัสดุ ซึ่งจะเกิดความเค้นและความเค้นเฉือนขึ้น $(\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx})$ ความเครียดและความเครียดเฉือนเกิดขึ้น $(\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx})$ เมื่อนำมาเขียนสมการ สามารถเขียนให้อยู่ในรูปเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\} \quad (2.38)$$

หรือ

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix} = [D] \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} \quad (2.39)$$

เมื่อ $[D]$ คือ เมทริกซ์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด

เมทริกซ์ที่แสดงความสัมพันธ์ ระหว่างความเค้นและความเครียด ในช่วงยืดหยุ่น ดังนี้

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \end{Bmatrix} = 2G \begin{bmatrix} \frac{1-\nu}{1-2\nu} & \frac{\nu}{1-2\nu} & \frac{\nu}{1-2\nu} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu}{1-2\nu} & \frac{1-\nu}{1-2\nu} & \frac{\nu}{1-2\nu} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu}{1-2\nu} & \frac{\nu}{1-2\nu} & \frac{1-\nu}{1-2\nu} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \varepsilon_{12} \\ \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{13} \end{Bmatrix} \quad (2.40)$$

การวิเคราะห์การเปลี่ยนรูปในช่วงพลาสติก ความเค้นและความเครียดจึงอยู่ในรูปของความเค้นและความเค้นเฉือน สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$d\varepsilon'_{ij} = d\varepsilon'^e_{ij} + d\varepsilon'^e_{ij} \quad (2.41)$$

เมื่อแทนค่า $d\varepsilon'_{ij}{}^e$ และ $d\varepsilon'_{ij}{}^p$ จะได้

$$d\varepsilon'_{ij} = \frac{1}{2G} d\sigma'_{ij} d\lambda \quad (2.42)$$

$$[D] = [[D^e] - [D^p]] \quad (2.43)$$

เป็นเมทริกซ์ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด

2.3.6 สมการไฟไนต์เอลิเมนต์

สมการไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถหาได้หลายวิธีดังที่ได้กล่าวมาแล้ว เช่น วิธีแปรผัน วิธีโดยตรงและวิธีอื่น ๆ เป็นต้น ในปัญหาความเค้นระนาบของโลหะแผ่นบาง จะใช้หลักของงานสมมุติสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งจะต้องสร้างฟังก์ชันขึ้น แล้วทำการหาค่าต่ำสุดของฟังก์ชันและสทิฟเนสเมทริกซ์ของเอลิเมนต์ สมการที่แทนแบบจำลองของวัสดุแบบแข็งเกร็ง – พลาสติก อธิบายว่า เมื่อวัสดุได้รับแรงกระทำที่พื้นผิว (S) และกำหนดให้แรงกระทำที่พื้นผิววัสดุเป็น (F_i) ดังนั้นแรงที่กระทำภายนอกบนพื้นผิววัสดุสามารถเขียนได้ดังนี้

$$F_i = \sigma_{ij} n_j \quad (2.44)$$

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

งานที่เกิดขึ้นจากแรงภายนอก จะเริ่มเมื่อมีแรงมากระทำที่พื้นผิวของวัสดุ เกิดการเปลี่ยนรูปเกิดขึ้น หรือมีการกระจัดเกิดขึ้น ถ้าวัสดุอยู่ในสภาวะสมดุล แรงภายนอกจะต้องเท่ากับแรงภายใน ซึ่งแรงต่อหน่วยเวลาที่กระทำบนพื้นผิว คือ

$$\int_s F_i w_j dS \quad (2.45)$$

เมื่อ w_i คือ ความเร็วที่กระทำบนพื้นผิววัสดุ เมื่อแทนลงในสมการที่จะได้

$$\int_s \sigma_{ij} n_j w_j dS \quad (2.46)$$

และเมื่อแปลงสมการเชิงพื้นผิว (dS) ให้เป็นสมการเชิงปริมาตร (dV) ทำให้สมการ มีค่าเท่ากับ

$$\int_v \sigma_{ij} \frac{\partial w_j}{\partial x_j} dV \quad (2.47)$$

เนื่องจากแรงที่กระทำภายนอกย่อมเท่ากับพลังงานความเครียดที่เกิดจากการเปลี่ยนรูปภายในเนื้อวัสดุ

$$U = W \quad (2.48)$$

เมื่อ U คือพลังงานความเครียดภายใน
 W คือพลังงานศักย์ที่เกิดขึ้นจากแรงภายนอก

เมื่อรวมพลังงานความเครียดภายในและพลังงานศักย์จากภายนอกจากสมการ ดังนั้นพลังงานศักย์รวมคือ

$$\pi = U + W \quad (2.49)$$

และเมื่อไปแทนสมการจะได้พลังงานศักย์รวมคือ

$$\int_v \sigma_{ij} \frac{\partial w_j}{\partial x_j} dV = \int_s F_i w_j dS \quad (2.50)$$

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

$$\int_v \sigma_{ij} \dot{\epsilon}_{ij} dV = \int_s F_i w_j dS \quad (2.51)$$

เมื่อแยกเทอมของความเค้นออก เป็นความเค้นเฉลี่ย หรือความเค้นไฮโดรสแตติก และความเครียด เบี่ยงเบนคังสมการ

$$\sigma_{ij} = \sigma'_{ij} + \delta_{ij}\sigma_m \quad (2.52)$$

ซึ่งสามารถเขียนขึ้นใหม่ได้ดังนี้

$$\int_V (\sigma'_{ij} + \delta_{ij}\sigma_m) \delta \dot{\epsilon}_{ij} dV - \int_S F_i \delta w_j dS = 0 \quad (2.53)$$

เมื่อจัดรูปสมการเพื่อพิจารณาความเค้นเฉลี่ยและความเค้นเบี่ยงเบนจะได้

$$\int_V \sigma'_{ij} \delta \dot{\epsilon}_{ij} dV + \int_V \sigma_m \delta \dot{\epsilon}_v dV - \int_S F_i \delta w_j dS = 0 \quad (2.54)$$

เมื่อกำหนดให้ความเค้นเบี่ยงเบน มีค่าเท่ากับค่าความเค้นประสิทธิผล ซึ่งเป็นพฤติกรรมในช่วงพลาสติก $\sigma'_{ij} \delta \dot{\epsilon}_{ij} = \bar{\sigma} \delta \dot{\epsilon}$ ดังนั้น จึงสามารถเขียนได้ใหม่เป็น

$$\int_V \bar{\sigma} \delta \dot{\epsilon} dV + \int_V \sigma_m \delta \dot{\epsilon}_v dV - \int_S F_i \delta w_j dS = 0 \quad (2.55)$$

เมื่อนำส่วนของการยืดหยุ่นออกจากสมการ โดยกำหนดให้อัตราความเครียดเชิงปริมาตร เท่ากับศูนย์ ($\dot{\epsilon}_v = 0$) ดังนั้น

$$\int_V \bar{\sigma} \delta \dot{\epsilon} dV + \int_V \sigma_m \delta \dot{\epsilon}_v dV + \int_V \delta \sigma_m \dot{\epsilon}_v dV - \int_S F_i \delta w_j dS = 0 \quad (2.56)$$

จากสมการ $Y' = \frac{dy}{d\epsilon^p}$ ซึ่งเป็นสมการพื้นฐานไฟไนต์เอลิเมนต์ และกำหนดให้ความเค้นเฉลี่ย มีค่าเท่ากับตัวคูณลาگرانเจียน λ ทำให้สามารถจัดรูปใหม่ได้ คือ

$$\delta \pi = \int_V \bar{\sigma} \delta \dot{\epsilon} dV + \int_V \lambda \dot{\epsilon}_v dV - \int_S F_i \delta w_j dS = 0 \quad (2.57)$$

ซึ่งเป็นสมการพื้นฐานของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์อีกวิธีหนึ่ง

2.3.7 สทิตินสมเมทริกซ์

ในระบบโครงสร้างทั้งหมดของชิ้นงาน ซึ่งประกอบด้วยหลาย ๆ จุด ต่อที่มีการเปลี่ยนแปลงหรือมีการกระตุ้นเกิดขึ้นเมื่อได้รับแรงกระทำ ในการวิเคราะห์โครงสร้างทั้งระบบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จำเป็นต้องหาสทิตินสมเมทริกซ์ของทั้งระบบทั้งหมดก่อน ซึ่งจะเริ่มจากสมการของระบบอยู่ในรูป

$$\{f\} = [k]\{d\} \quad (2.58)$$

เมื่อ $\{f\}$ คือ เมทริกซ์แรงกระทำที่จุดต่อ
 $[k]$ คือ สทิตินสมเมทริกซ์
 $\{d\}$ คือ เมทริกซ์ของการกระตุ้นที่จุดต่อ

ในการหาสทิตินสมเมทริกซ์ของแบบจำลองวัสดุแข็งเกร็ง-พลาสติก เพื่อหาสทิตินสมเมทริกซ์ จึงกำหนดให้เทอมแรกของสมการค่าเท่ากับ

$$\int_v \bar{\sigma} \delta \dot{\epsilon} dV = \int_v \left(\frac{\bar{\sigma}_o}{\dot{\epsilon}_o} \right) \dot{\epsilon} \delta \dot{\epsilon} dV \quad (2.59)$$

กำหนดให้อัตราความเครียดเชิงปริมาตร $\dot{\epsilon}_v$ มีค่าเท่ากับ

$$\dot{\epsilon}_v = \dot{\epsilon}_x + \dot{\epsilon}_y + \dot{\epsilon}_z \quad (2.60)$$

หรือ

$$\dot{\epsilon}_v = C^T W \quad (2.61)$$

เมื่อ $C^T = \{1, 1, 1, 0\} \bar{B}$

W คือ เมทริกซ์ฟังก์ชันการกระตุ้นต่อหน่วยเวลา

$\bar{B}$ คือ เมทริกซ์อัตราความเครียด

จากสมการความเครียดประสิทธิผล $\dot{\epsilon}$ สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของอัตราความเครียดได้ดังนี้

$$\dot{\epsilon} = \sqrt{\frac{2}{3} \{ \dot{\epsilon}_{ij} \dot{\epsilon}_{ij} \}} \quad (2.62)$$

หรือสามารถเขียนให้อยู่ในเทอมของเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$(\dot{\varepsilon})^2 = \dot{\varepsilon}^T D \dot{\varepsilon} \quad (2.63)$$

และเมื่อนำสมการอัตราความเครียด $(\dot{\varepsilon}) = \bar{B}W$ แทนลงในสมการจะได้

$$(\dot{\varepsilon})^2 = W^T B^T D B W = W^T k W \quad (2.64)$$

เมื่อ $k = B^T D B$

และเมื่อแทนค่าสมการจะได้

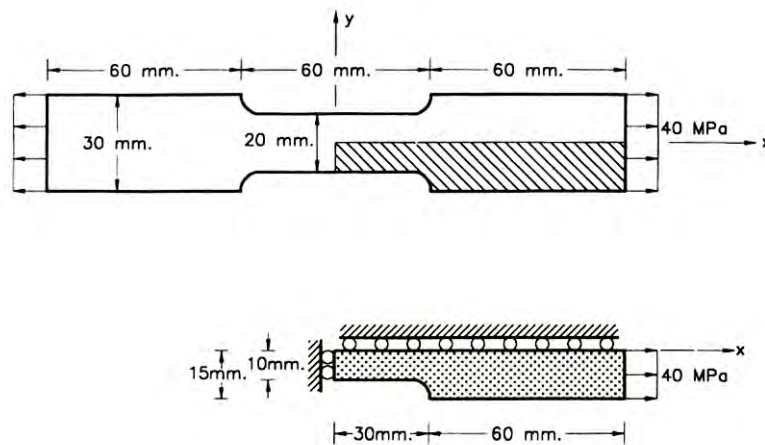
$$\frac{\partial \pi}{\partial W} = \int_V \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \varepsilon} k W dV + \int_V \lambda C^T dV - \int_S N F dS = 0 \quad (2.65)$$

2.3.8 การกำหนดเงื่อนไขขอบ

ในการวิเคราะห์แก้สมการรวมของระบบโครงสร้าง สามารถรวมสมการของแต่ละเอลิเมนต์ เข้าด้วยกันด้วยวิธีซ้อนทับ หรือเรียกว่าวิธีสปีฟเนสโดยตรง โดยอาศัยหลักการสมดุลของแรงที่จุดต่อของเอลิเมนต์ที่ต่อเนื่องของโครงสร้าง เขียนให้อยู่ในรูปของเมทริกซ์ได้ คือ

$$\{F\} = [K]\{\bar{d}\} \quad (2.66)$$

ซึ่ง $\{F\}$ คือ เมทริกซ์รวมของแรงที่จุดต่อ $[K]$ คือ สปีฟเนสเมทริกซ์รวมของระบบและ $\{\bar{d}\}$ คือ เมทริกซ์รวมของการกระจัด ซึ่งอาจจะทราบค่าเพียงบางค่า จึงจำเป็นต้องอาศัยเงื่อนไขขอบ หรือเงื่อนไขบังคับ หรือจุดรองรับ เพื่อช่วยทำให้เมทริกซ์สามารถหาค่าการกระจัดในจุดต่อที่ต้องการได้ ตัวอย่างชนิดเงื่อนไขขอบต่าง ๆ คือแบบ ฟิกซ์ (Fix) แบบสไลด์ (Slide) แบบพิน (Pin) แบบอิสระ (Free) และแบบสมมาตร (Symmetry) แสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.15 การวิเคราะห์ชิ้นงานที่มีลักษณะสมมาตร [15]

2.3.9 การวิเคราะห์ผลลัพธ์

การวิเคราะห์ผลลัพธ์ที่คำนวณได้ ทำให้สามารถทราบได้ว่าจุดต่อใด ๆ เป็นบริเวณที่ต้องสนใจเป็นพิเศษ เช่น บริเวณที่มีการเปลี่ยนรูปมากหรือมีความเค้นสูง โดยสามารถเปรียบเทียบได้ว่าผลการทำนายที่ได้มีความแม่นยำ หรือใกล้เคียงกับการทดลองหรือไม่อย่างไร ซึ่งจะช่วยให้ทราบถึงความเหมาะสมของโครงสร้างหรือชิ้นส่วนนั้นและใช้ในการปรับปรุงการออกแบบให้เหมาะสมกับลักษณะงานที่ทำการวิเคราะห์หรือการเลือกใช้วัสดุอื่นที่เหมาะสมกว่า เราสามารถใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์ปัญหาต่าง ๆ ทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ได้อย่างกว้างขวาง ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบกว่าวิธีทั่วไป เช่น สามารถสร้างแบบจำลองของโครงสร้าง หรือชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ดี และสะดวกกว่าสามารถจำลองการกระทำของแรง และเปลี่ยนแปลงค่าของแรงในสถานะต่าง ๆ ได้ใกล้เคียงกับสภาพจริง สามารถใช้วิเคราะห์โครงสร้าง หรือชิ้นงานหลายชิ้นที่ประกอบด้วยวัสดุต่างชนิดกันได้โดยง่าย สามารถวิเคราะห์ปัญหาที่มีเงื่อนไขและขอบเขตที่ซับซ้อนได้ สามารถเลือกขนาดของเอลิเมนต์ ในบริเวณที่สนใจให้มีขนาดที่เหมาะสมได้โดยง่าย และสามารถเปลี่ยนค่าตัวแปรต่าง ๆ ได้สะดวกและเป็นการประหยัดค่าใช้จ่าย [14]

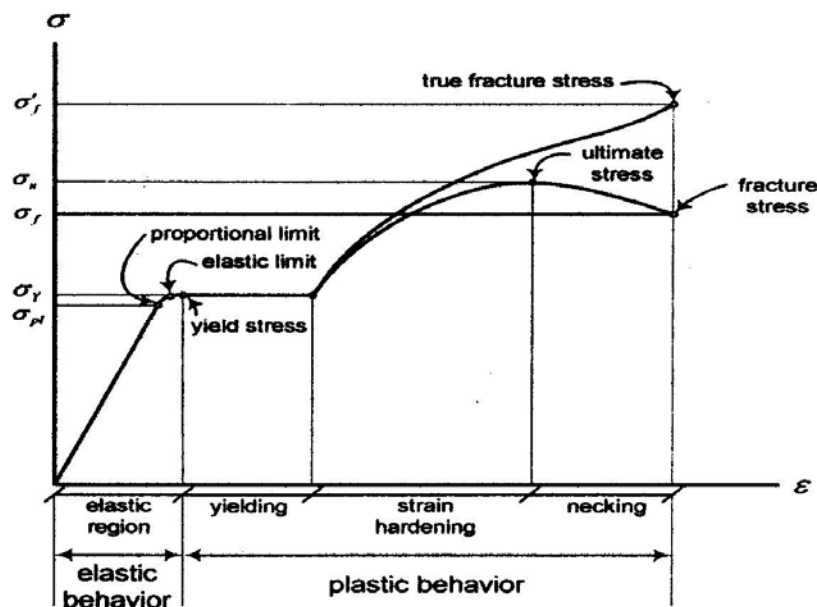
2.4 การวิเคราะห์พฤติกรรมเชิงกลของโลหะ

การวิเคราะห์พฤติกรรมเชิงกลของโลหะของ Kobayashi และคณะ [16] ได้กล่าวถึงความเครียดแข็ง (Strain Hardening) ว่ามีผลกระทบต่อการขึ้นรูปเย็น (Cold Forming) เนื่องจากมีอุณหภูมิทำงานต่ำกว่า อุณหภูมิเปลี่ยนโครงสร้างผลึก (Recrystallization) ความเครียดแข็งดังกล่าวจะเป็นประโยชน์ด้านความแข็งแรงสำหรับลักษณะชิ้นงานที่ไม่ต้องทำการ (Heat Treatment) ภายหลังการขึ้นรูป แต่ความเครียดแข็งจะมีผลกระทบเล็กน้อยสำหรับกระบวนการขึ้นรูปร้อน (Hot Forming) ของโลหะที่มีอุณหภูมิสูง

กว่าอุณหภูมิเปลี่ยนโครงสร้างผลึก ซึ่งอุณหภูมิทำงานจะมีความสำคัญและผลกระทบต่อแรงที่ใช้ขึ้นรูปและการไหลของวัสดุมากกว่า สิ่งสำคัญสำหรับการวิเคราะห์งานขึ้นรูปโลหะ คือ ความเค้นไหลที่ได้จากการทดสอบการดึง การอัด หรือการทดสอบการบิด ตามเงื่อนไขอุณหภูมิในกระบวนการขึ้นรูปโลหะนั้น ๆ ซึ่งการทดสอบด้วยการอัดเป็นวิธีที่ง่าย และได้รับความนิยมโดยทั่วไป (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ข)

2.4.1 ทฤษฎีในการเปลี่ยนรูปช่วงยืดหยุ่น

เมื่อวัสดุได้รับแรงดึง จะทำให้วัสดุเกิดการยืดตัว ซึ่งสามารถแบ่งพฤติกรรมการยืดตัวออกเป็น 2 ส่วนหลัก ๆ คือ การเปลี่ยนรูปในช่วงยืดหยุ่นหรือช่วงอีลาสติก และการเปลี่ยนรูปถาวรหรือช่วงพลาสติก ดังแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.16 พฤติกรรมการเปลี่ยนรูปของวัสดุ [15]

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจริง หรือเรียกอีกชื่อว่า Flow Curve ซึ่งมีลักษณะเป็นเชิงเส้น หรือไม่เป็นเชิงเส้น โดยมีความสำคัญในการนำมาใช้ ในการคำนวณเพื่อช่วยให้ทำนายผลได้ถูกต้องแม่นยำ ในการวิเคราะห์ห้วงวิไฟในดเอนเมนต์จะกำหนดให้วัสดุของแบบจำลองมีคุณสมบัติเท่ากันทุกทิศทาง ซึ่งจะแตกต่างจากพฤติกรรมของวัสดุจริง เนื่องจากวัสดุจริงมีการเรียงตัวของผลึกไม่เท่ากันทุกทิศทางทำให้วัสดุมีคุณสมบัติแบบ Anisotropy โดยที่กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจริงของวัสดุสามารถหาได้จากการทดสอบดึง หรือการทดสอบกด ในการทดสอบแรงดึงขึ้นทดสอบชนิดหน้าตัดกลมหรือชนิดหน้าตัดสี่เหลี่ยม จะถูก

แรงกระทำโดยการดึงหรือกดเพิ่มแรง (F) อย่างช้า ๆ และควบคุมความเร็วให้ขึ้นทดสอบเปลี่ยนรูปอย่างสม่ำเสมอตามแนวแกน แล้ววัดค่าแรงและระยะการเปลี่ยนรูปของชิ้นทดสอบ จนกระทั่งชิ้นทดสอบเกิดความเสียหายหรือขาดออกจากกัน ผลการทดสอบที่ได้จะนำไปหาคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุชิ้นทดสอบ ซึ่งความเค้นที่เกิดภายในวัสดุสามารถหาได้ โดยนำแรงภายนอก F_i ในแต่ละช่วงของการทดสอบหารด้วยพื้นที่หน้าตัดเริ่มต้นของชิ้นงาน [15]

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (2.67)$$

โดย F_i คือ แรงดึงหรือโหด A_0 คือ พื้นที่หน้าตัดเดิมของชิ้นทดสอบ และ σ คือ ความเค้นเฉลี่ยหรือความเค้นเชิงวิศวกรรม (Engineering Stress) ซึ่งมีทิศทางตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัด A_0 สำหรับความเครียดเชิงวิศวกรรม (Engineering Strain) สามารถคำนวณได้จากความยาวที่เปลี่ยนไปหารด้วยความยาวเดิมของชิ้นทดสอบ [15]

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L_i - L_0}{L_0} \quad (2.68)$$

โดย ΔL คือ ความยาวที่เปลี่ยนไป L_0 คือ ความยาวเดิมของชิ้นทดสอบ L_i คือ ความยาวขณะใดขณะหนึ่งและ ε คือ ความเครียดเฉลี่ย เป็นความเครียดเชิงวิศวกรรม ซึ่งมีทิศทางเดียวกับทิศทางของแรง F ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้พื้นที่หน้าตัดและความยาวเดิมของชิ้นทดสอบเรียกว่า กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเชิงวิศวกรรม ซึ่งในการทดสอบจริง ในขณะที่ระดับความเค้นในชิ้นงานทดสอบเพิ่มเลยความเค้นคราก σ_0 พื้นที่หน้าตัดและความยาวของชิ้นงานทดสอบ จะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง จนเกิดคอคอนและขาดออกจากกันในที่สุด ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด สามารถหาได้โดยใช้พื้นที่หน้าตัดและความยาวที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละขณะ ซึ่งเรียกว่า กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นจริงและความเครียดจริง (True Stress True Strain Curve) หรือเรียกอีกชื่อว่า Flow Curve ซึ่งแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมของวัสดุในช่วงการเปลี่ยนรูปถาวร ถ้าให้ $\bar{\sigma}$ เป็นความเค้นจริงและ $\bar{\varepsilon}$ เป็นความเครียดจริง ดังนั้น [15]

$$\bar{\sigma} = \frac{F_i}{A_i} = \sigma \left(\frac{A_0}{A_i} \right) \quad (2.69)$$

โดย A_i คือ พื้นที่หน้าตัดใด ๆ A_o คือ พื้นที่หน้าตัดเริ่มต้น σ คือ ความเค้นเฉลี่ย F_i คือ แรงดึงที่กระทำบนชิ้นทดสอบ สำหรับความเครียดจริง $\bar{\varepsilon}$ สามารถหาได้โดยพิจารณาที่ความยาวใด ๆ ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งหาได้จากการอินทิเกรตความยาว dL_i ใด ๆ [15]

$$\bar{\varepsilon} = \int_{L_o}^{L_i} \frac{dL_i}{L_i} = \ln \frac{L_i}{L_o} \quad (2.70)$$

ในกรณีการขึ้นรูปโลหะมีปริมาตรก่อนและหลังการขึ้นรูป จะเกิดการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ดังนั้น จะสมมติให้ปริมาตรไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งก่อนและหลังการขึ้นรูป ทำให้มีปริมาตรเท่าเดิม [15]

$$A_o L_o = A_i L_i \quad (2.71)$$

$$\frac{A_o}{A_i} = \frac{L_i}{L_o} = \frac{L_o + \Delta L}{L_o} = 1 + \varepsilon \quad (2.72)$$

ดังนั้น ความเค้นจริงและความเครียดจริง โดยสมมติฐานให้ปริมาตรก่อนและหลังการขึ้นรูปคงที่ [15]

$$\bar{\sigma} = \sigma(1 + \varepsilon) \quad (2.73)$$

$$\bar{\varepsilon} = \ln \frac{A_o}{A_i} = 2 \ln \frac{d_o}{d_i} \quad (2.74)$$

โดย d_i คือ เส้นผ่านศูนย์กลางใด ๆ d_o คือ เส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้นของชิ้นงานทดสอบ ในรูปที่ 2.13 แสดงการเปรียบเทียบระหว่าง True Stress True Strain Curve และ Engineering Stress-Strain Curve ซึ่งคุณสมบัติของวัสดุในรูปแบบกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ความเค้นจริงและความเครียดจริง สามารถเขียนในรูปของสมการยกกำลัง เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณและวิเคราะห์ การเปลี่ยนรูปของโครงสร้างอื่น ๆ สำหรับค่ายังมอดูลัส E สามารถหาได้จากช่วงการยืดหยุ่น เริ่มต้นของชิ้นงาน โดยการหาความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด คือ [15]

$$E = \frac{\sigma_b - \sigma_a}{\varepsilon_b - \varepsilon_a} \quad (2.75)$$

สำหรับค่าตัวเลขกำลังหรือความเครียดแข็ง n และค่าสัมประสิทธิ์ความแข็งแรงของวัสดุ K สามารถหาได้โดยทำการใส่ค่า $\log$ เข้าไปในสมการยกกำลัง ซึ่งทำให้สามารถได้สมการใหม่ คือ [15]

$$\sigma = H \varepsilon_p^n \quad (2.76)$$

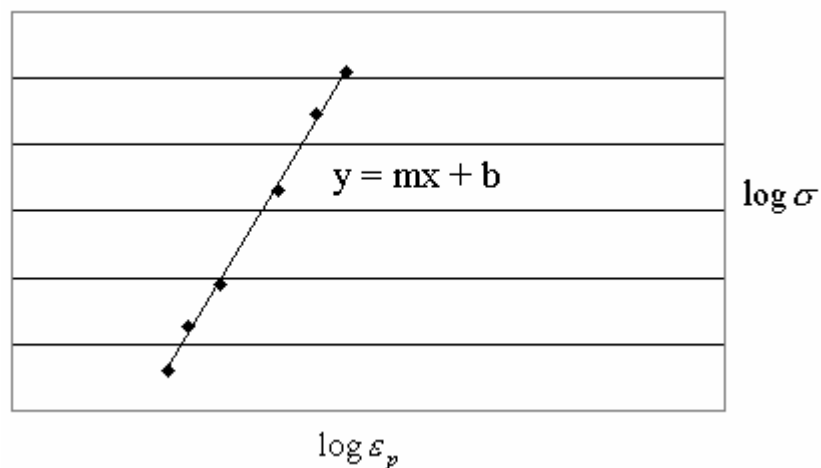
$$\log \sigma = n \log \varepsilon_p + \log H \quad (2.77)$$

โดยที่ค่าความเครียดพลาสติก ε_p สามารถหาได้ คือ [15]

$$\varepsilon_p = \varepsilon - \frac{\sigma}{E} \quad (2.78)$$

จากสมการ $\log$ ที่ได้สามารถเขียนในรูปสมการเส้นตรงในแกน X และ Y ได้เช่น $y = mx + b$

โดย $y = \log \sigma$, $x = \log \varepsilon_p$, $m = n$ และ $b = \log H$ สำหรับ H สามารถหาได้โดย $H = 10^b$ ดังนั้น ถ้าวาดจุดระหว่าง $\log \sigma$ และ $\log \varepsilon_p$ ลงบนแกน X – Y จะได้กราฟเส้นตรง แสดงในรูปที่ 2.15 ดังนั้นการหากราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดมีความจำเป็น เพื่อการคำนวณหาสมการคอนสทิทิวทิฟ และมีความสำคัญในการกำหนดคุณสมบัติของวัสดุ ในแบบจำลองวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ต่อไป



รูปที่ 2.17 กราฟแสดงการหาสมการเส้นตรงเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ในสมการยกกำลัง [15]

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในช่วงการเปลี่ยนรูปยืดหยุ่น จะเป็นในลักษณะเชิงเส้น การเพิ่มขึ้นของแรงกระทำจะทำให้เกิดความเครียดเป็นสัดส่วน ซึ่งหลักการนี้จะเป็นไปตามกฎของฮุก (Hook's Law) ดังสมการ [15]

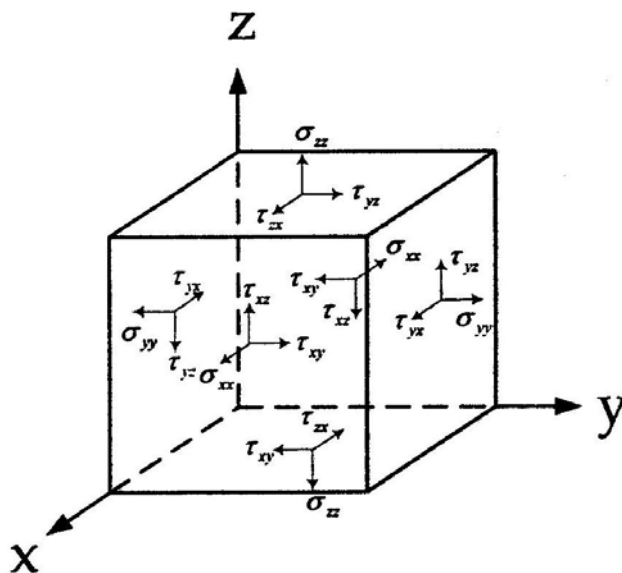
$$\sigma = E\varepsilon \quad (2.79)$$

เมื่อ σ คือ ค่าความเค้น

E คือ ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นหรือโมดูลัสของยัง

ε คือ ค่าความเครียด

เมื่อพิจารณาวัสดุลูกบาศก์ (Cubic) ที่มีขนาด dx, dy และ dz ดังรูป [15]



รูปที่ 2.18 แสดงสถานะของความเค้น 3 มิติ [15]

จะเห็นว่าส่วนประกอบของเวกเตอร์ความเค้นในทิศทาง x, y และ z หรือ $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ ถ้ากำหนดให้พื้นที่แต่ละด้านมีขนาดเล็กมาก ดังนั้นแต่ละด้านจึงมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก เมื่อวัสดุอยู่ภายใต้สถานะสมดุลรอบแกน z ดังนั้น

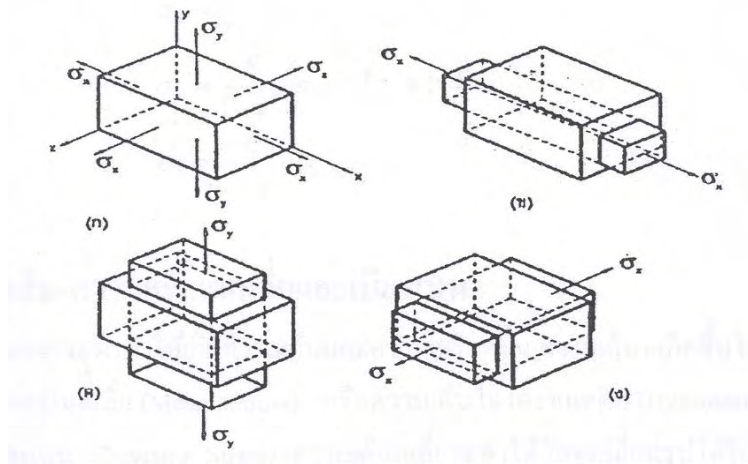
$\tau_{xy} = \tau_{yx}$ และในทำนองเดียวกัน $\tau_{yz} = \tau_{zy}$ และ $\tau_{xz} = \tau_{zx}$ จากรูปที่ 2.16 เมื่อนำความเค้นที่เกิดขึ้นทั้งหมด 9 ค่า มาเขียนเป็นสมการให้อยู่ในรูปของเทนเซอร์ความเค้น (Stress Tensor) ได้ดังนี้ [15]

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} \quad (2.80)$$

เมื่อวัสดุมีการเปลี่ยนรูปร่าง เนื่องจากถูกแรงดึงกระทำตามแนวแกน ไม่เพียงแต่เกิดการยืดตัวตามแนวแกนด้านยาวเท่านั้น ยังเกิดการหดตัวทางด้านข้าง ด้วยอัตราส่วนความเครียดตามแนวแกนและด้านข้าง จะมีอัตราส่วนคงที่ เรียกอัตราส่วนนี้ว่า อัตราส่วนของปัวซอง (Poisson's Ratio) [15]

$$\nu = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} = -\frac{\varepsilon_z}{\varepsilon_x} \quad (2.81)$$

เมื่อรวมความเครียดในแต่ละทิศทางเข้าด้วยกัน จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ในปัญหา 3 มิติดังรูปที่ 2.17 คือ [15]



รูปที่ 2.19 เอลิเมนต์ที่ถูกกระทำใน 3 ทิศทางที่ตั้งฉากกัน [15]

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= \frac{1}{E} [\sigma_1 - \nu(\sigma_2 + \sigma_3)] \\ \varepsilon_2 &= \frac{1}{E} [\sigma_2 - \nu(\sigma_1 + \sigma_3)] \\ \varepsilon_3 &= \frac{1}{E} [\sigma_3 - \nu(\sigma_1 + \sigma_2)] \end{aligned} \quad (2.82)$$

เมื่อพิจารณาความเค้นเฉือน

$$\begin{aligned}\gamma_{xy} &= \frac{\tau_{xy}}{G} \\ \gamma_{yz} &= \frac{\tau_{yz}}{G} \\ \gamma_{zx} &= \frac{\tau_{zx}}{G}\end{aligned}\tag{2.83}$$

เมื่อ γ คือ ความเครียดเฉือน

τ คือ ความเค้นเฉือน

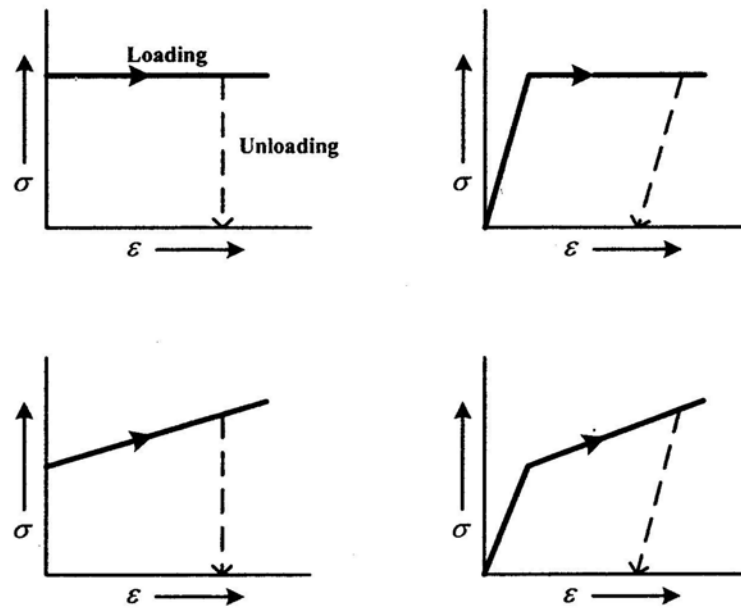
G คือ โมดูลัสเฉือนของวัสดุ (Modulus of Rigidity) ซึ่ง $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$

อย่างไรก็ตาม สามารถหาความเค้นจากของปัญหาสามมิติได้จากสมการความเครียดจากดังนี้ [15]

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \frac{E}{1-\nu^2} [\epsilon_x + \nu(\epsilon_y + \epsilon_z)] \\ \sigma_y &= \frac{E}{1-\nu^2} [\epsilon_y + \nu(\epsilon_z + \epsilon_x)] \\ \sigma_z &= \frac{E}{1-\nu^2} [\epsilon_z + \nu(\epsilon_x + \epsilon_y)]\end{aligned}\tag{2.84}$$

2.4.2 ทฤษฎีในการเปลี่ยนรูปถาวรหรือในช่วงพลาสติก

ในการขึ้นรูปวัสดุโลหะแผ่นให้มีรูปทรงตามที่ต้องการ จะต้องให้แรงกระทำกับวัสดุ เพื่อให้วัสดุเปลี่ยนรูปอย่างถาวร ผลจากการทดสอบการดึงวัสดุพบว่า พฤติกรรมของวัสดุแบ่งได้เป็นสองช่วง คือ ช่วงยืดหยุ่นและช่วงเปลี่ยนรูปอย่างถาวรหรือช่วงพลาสติกพฤติกรรมเหล่านี้มีอยู่ด้วยกันหลายลักษณะ ซึ่งสามารถแสดงด้วยแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดแสดงในรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.20 แบบจำลองพฤติกรรมระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุ [15]

ในการพิจารณาการเปลี่ยนรูปจะใช้เกณฑ์การคราก (Yield Criterion) เป็นเกณฑ์ที่จะกำหนดการเปลี่ยนรูปจากอิลาสติกไปเป็นพลาสติก และทฤษฎีพื้นฐานที่นิยมใช้ในการทำนาย การแตกหักของ โลหะ คือ ทฤษฎีความเค้นหลักสูงสุด (Maximum Principal Stress) ทฤษฎีฟอนมิสเซส (Von Misses Theory) และทฤษฎีของฮิล (Hill Theory) [15]

2.4.3 ความเสียดทาน

Avitzur [17] กล่าวถึงการต้านทานการเคลื่อนที่ของผิวสัมผัสที่เรียกว่า ความเสียดทาน (Friction) กลไกของความเสียดทานเป็นเรื่องที่ซับซ้อน และเป็นส่วนน้อยมากที่จะทราบถึงรูปแบบสมการของความสัมพันธ์ที่ถูกต้องของความเสียดทานและตัวแปรกระบวนการอื่น ๆ โดยทั่วไปแล้วจะพิจารณาจากความเค้นของความเสียดทาน (Friction Stress) ระหว่างชิ้นงานกับแม่พิมพ์ ซึ่งความเสียดทานเป็นปรากฏการณ์ของความซับซ้อนทางกายภาพที่เกิดจากผิวสัมผัส และมีผลกระทบต่อความเรียบผิว อุณหภูมิ ความเค้น และความเร็วการเคลื่อนที่เป็นต้น ความเสียดทานของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ MSC.Marc [18] ที่ใช้สำหรับวิเคราะห์ 2 แบบ คือ ความเสียดทานคูลอมป์ (Coulomb Friction) ที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์แบบจำลองต่าง ๆ ทั่วไป ยกเว้นการวิเคราะห์แบบจำลองของการขึ้นรูปโลหะแบบก้อน ซึ่งควรจะใช้ความเสียดทานเฉือน โดยมีรายละเอียดดังนี้

ความเสียดทานคูลอมป์ (Coulomb Friction)

สมมติให้ความเค้นเฉือน (Shear Stress) มีความผันแปรกับความดันระหว่างชิ้นงานและแม่พิมพ์ โดยกำหนดให้เป็นค่าคงที่สำหรับแม่พิมพ์ชิ้นงาน และการหล่อขึ้น ดังสมการ 2.76

$$\tau = \mu p \quad (2.76)$$

เมื่อ τ คือ ความเค้นเฉือน
 P คือ แรงดันในแนวสัมผัส
 μ คือ สัมประสิทธิ์ความเสียดทานคูลอมป์

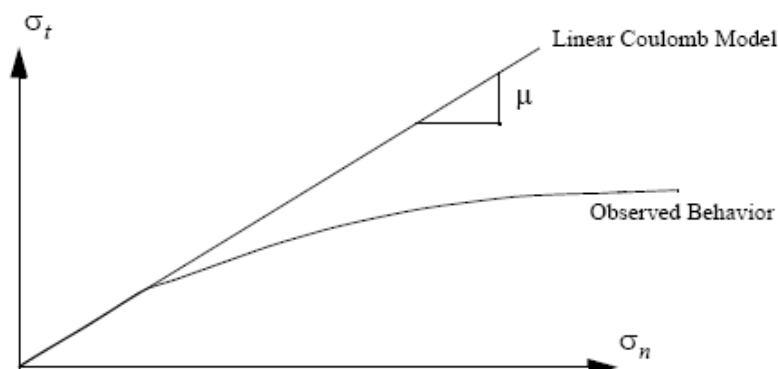
สำหรับความเสียดทานแบบติดสติด (Stick) จะได้ดังสมการ

$$\|\sigma_t\| < \mu \sigma_n \quad (2.77)$$

สำหรับความเสียดทานแบบลื่นไถล (Slip) จะได้ดังสมการ

$$\sigma_t = -\mu \sigma_n \bullet t \quad (2.78)$$

เมื่อ σ_t คือ ความเค้นสัมผัส หรือความเสียดทาน
 σ_n คือ ความเค้นปกติ
 μ คือ สัมประสิทธิ์ความเสียดทานคูลอมป์
 t คือ เวกเตอร์การสัมผัสในทิศทางที่สัมพันธ์กับการเคลื่อนที่ หรือ $t = \frac{V_r}{\|V_r\|}$ และ V_r เป็นความสัมพันธ์ของความเร็ว



รูปที่ 2.21 เปรียบเทียบแบบจำลองความเสียดทานคูลอมป์กับความเสียดทานที่เกิดขึ้นจริง [18]

ข้อจำกัดของความเสียดทานคลอมบี้ สำหรับแบบจำลองกรณีที่แรงหรือความเค้นมีค่าสูงขึ้น ความเสียดทานคลอมบี้ จะให้ผลที่ไม่ถูกต้องตามความเป็นจริง ในกรณีความเสียดทานคลอมบี้ทำนายความเค้นเฉือนเสียดทานที่เพิ่มขึ้นเกินความเค้นไหลของวัสดุไม่เป็นเส้นตรง ซึ่งรูปแบบของความเสียดทานที่นิยมใช้ทั่วไป เป็นความเสียดทานคลอมบี้ ที่มีความผันแปรกับความดันระหว่างผิวสัมผัส ซึ่งจะแปรเปลี่ยนตามสภาวะอุณหภูมิ และเป็นการยากสำหรับการวิเคราะห์หาค่า และนำมาใช้งาน สำหรับงานขึ้นรูปแบบก่อน จะใช้ความเสียดทานแบบเฉือน หรือความเสียดทานคงที่ แทนความเสียดทานคลอมบี้

ความเสียดทานเฉือน (Shear Friction)

ความเสียดทานสำหรับการวิเคราะห์งานขึ้นรูปโลหะแบบก่อน ตามทฤษฎีและคู่มือสำหรับผู้ใช้งาน โปรแกรม MSC.Marc [18] กำหนดให้ความเค้นเฉือน เป็นสัดส่วนกับความแข็งแรงของวัสดุ ดังแสดงตามสมการ

$$\tau = \frac{m\sigma_0}{\sqrt{3}} \quad (2.79)$$

สำหรับความเสียดทานแบบเกาะติด (Stick) คือ

$$|\sigma_t| < m \frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{3}} \quad (2.80)$$

และความเสียดทานแบบไหลลื่น (Slip) คือ

$$|\sigma_t| = -m \frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{3}} \cdot t \quad (2.81)$$

เมื่อ m คือ ความเสียดทานหรือตัวประกอบการเฉือน มีลักษณะคล้ายคลึงกับความเสียดทานคลอมบี้ ซึ่งมีค่าคงที่ระหว่างชิ้นงาน แม่พิมพ์ และการหล่อขึ้นรูป โปรแกรมมีการคำนวณของสองส่วน คือ ส่วนแรกเป็นฟังก์ชันของการสัมผัสราบเรียบ ใช้ในส่วนของการกระจายของภาระ

$$\sigma_t = -m \frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{3}} \frac{2}{\pi} \arctan\left(\frac{V_r}{RVCNST}\right) \cdot t \quad (2.82)$$

ส่วนที่สองเป็นแบบเชิงเส้น (Bilinear Model) สำหรับการคำนวณตามสมมติฐานความเค้นเฉือน ใน โหนดเป็นสัดส่วนกับแรงเฉือน กล่าวคือ ความเค้นเฉือนเป็นตัวแปรกำหนดความเสียหายดั่งนั้น

$$\sigma_t = \min \left(m\sigma_n, m \frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{3}} \right) \quad (2.83)$$

ซึ่งความเสียหายแบบเฉือนหรือแบบคงที่ นิยมใช้สำหรับการวิเคราะห์งานขึ้นรูปโลหะมากกว่าความเสียหายคลอมป์ ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง $0 \leq m \leq 1$ ค่าตัวแปรความเสียหายคงที่ สำหรับการขึ้นรูป โลหะจะเป็นสัดส่วนกับค่าความเค้นไหลของวัสดุชิ้นงาน ค่าคงที่ของการสัมผัสและอุณหภูมิ ซึ่ง Avitzur และคณะ [17] ได้ใช้ความเสียหายแบบเฉือนหรือแบบคงที่นี้ สำหรับวิเคราะห์การไหลของ วัสดุในแม่พิมพ์ เช่น งานดึงขึ้นรูป และงานอัดรีดขึ้นรูป การหาค่าความเสียหายในกระบวนการ ขึ้นรูปโลหะนั้น Male และ Cockcroft [19] กล่าวว่า สามารถทดสอบหาค่าความเสียหายได้จากการ ทดสอบการอัดวงแหวนของวัสดุชิ้นงาน ด้วยแผ่นกดที่เป็นวัสดุชนิดเดียวกันกับแม่พิมพ์ (แสดง รายละเอียดดัง ภาคผนวก ค.)

2.5 ทฤษฎีวิเคราะห์การแตกหักของโลหะ

Young และ Budynas [20] กล่าวถึง การเสียหายของโลหะภายใต้ความเค้นที่กระทำในหลายแนวแกน จะพิจารณาจุดเริ่มต้นที่เกิดการเสียหายขึ้น และเริ่มทำให้ชิ้นส่วนมีพฤติกรรมไม่เชิงเส้น จนกระทั่ง ครากหรือแตกหัก เรียกว่า เกณฑ์การคราก ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นที่วัสดุจะหมดสภาพยืดหยุ่น การคราก สำหรับระบบความเค้นในหลายแกน มาจากนิยามที่ว่า ค่าความเค้นลัพธ์ซึ่งเป็นความเค้นที่อยู่ใน แนวแกนเดียวที่ได้มาจากการรวมของความเค้นในแนวแกนต่าง ๆ เข้าไว้ด้วยกัน และวางสมมติฐานไว้ ว่าการครากจากความเค้นในหลาย ๆ แกนนี้ ทำให้เกิดความเค้นลัพธ์มีค่าสูงถึงค่าจำกัดค่าหนึ่ง ถ้าหาก ว่าความเค้นลัพธ์มีค่าสูงกว่าค่าจำกัดนี้ วัสดุก็จะเกิดการครากหรือเสียหายขึ้น เกณฑ์การครากจะ กำหนดเป็นฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ โดยหากวัสดุตกอยู่ภายใต้เทนเซอร์ความเค้น $T = \sigma_{ij}$ และวัสดุ นั้นมีค่าความเค้นคราก ที่ได้จากการทดสอบโดยการดึงในแนวแกนเดียวเท่ากับ Y เรานิยมเขียนเป็น ฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ สำหรับการครากของวัสดุนั้นเป็นฟังก์ชันการคราก $f(\sigma_{ij}, Y)$ โดยวัสดุจะ ครากเมื่อ

$$f(\sigma_{ij}, Y) = 0 \quad (2.82)$$

$$\text{เมื่อ } f(\sigma_{ij}, Y) < 0$$

$$f(\sigma_{ij}, Y) > 0$$

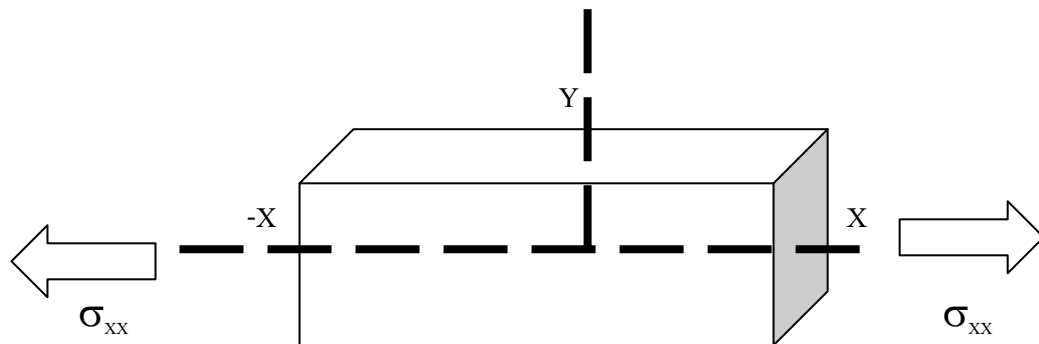
แสดงว่าวัสดุนั้นยังไม่เกิดการครากขึ้น

จะไม่มีกฏนิยามค่าของฟังก์ชันในช่วงนี้

เนื่องจากระบบความเค้น σ_{ij} เป็นความเค้นในหลายแนวแกน แต่การพิจารณาความเค้นที่จะทำให้เกิดการครากจะต้องเปลี่ยนความเค้นนั้น ให้เป็นความเค้นในแนวแกนเดียวเสียก่อน ความเค้นที่เปลี่ยนจากหลายแกนมาอยู่ในแนวแกนเดียวนั้น เรียกว่า ความเค้นหลัก หรือ ความเค้นที่เป็นผล จากนั้นจึงนำความเค้นหลักที่ได้มาเปรียบเทียบกับความเค้นครากตามที่กำหนดขึ้น เพื่อพิจารณาว่าเกิดการครากขึ้นหรือไม่ นอกเหนือจากค่าฟังก์ชันการครากแล้ว เพื่อให้การแสดงลักษณะของฟังก์ชันนั้นได้เหมาะสมยิ่งขึ้นจะกล่าวถึงผิวการคราก โดยทั่วไปจะเขียนในระบบแกนของความเค้นหลัก ทฤษฎีความเสียหายของวัสดุมีหลายทฤษฎี ซึ่งประกอบด้วยความเค้นหลักสูงสุด (Maximum Principal Stress) ความเครียดหลักสูงสุด (Maximum Principal Strain) ความหนาแน่นพลังงานความเครียด (Strain Energy Density) ความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear - Stress) และความหนาแน่นของพลังงานบิดรูป (Distortion Energy Density)

2.5.1 ทฤษฎีความเค้นหลักสูงสุด (Maximum Principal Stress Theory)

ทฤษฎีความเค้นหลักสูงสุดหรือเรียกว่าทฤษฎีของ Rankine เป็นทฤษฎีที่เหมาะสมสำหรับใช้ทำนายการแตกหักของโลหะ โดยทฤษฎีกล่าวว่าการครากหรือการแตกหักของวัสดุ จะเริ่มเกิดขึ้นถ้าค่าของความเค้นหลักสูงสุด ที่เกิดขึ้นที่จุดใดในวัสดุมีค่าเท่ากับค่าความเค้นครากของวัสดุเดียวกัน

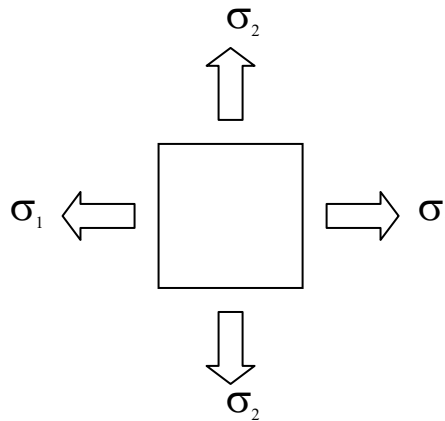


รูปที่ 2.22 วัสดุรับภาระในแนวแกนเดียว [20]

การครากจะเกิดขึ้นเมื่อความเค้นที่เกิดขึ้น σ มีค่าเท่ากับค่าความเค้นคราก Y ที่ได้จากการทดสอบ

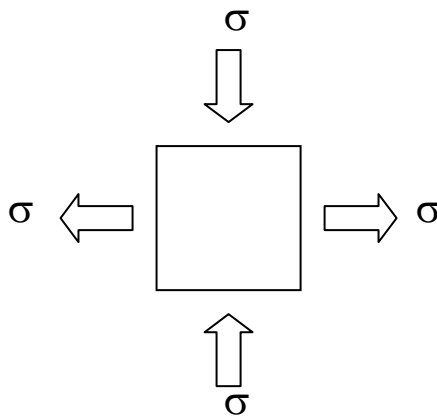
$$\sigma_Y = Y \quad (2.83)$$

เมื่อพิจารณาความเหมาะสมกับการรับภาระในหลาย ๆ แนวแกน พิจารณาจากส่วนที่ตกอยู่ภายใต้ความเค้นหลัก 2 แกน โดยกำหนดให้ $|\sigma_1| > |\sigma_2|$



รูปที่ 2.23 การรับความเค้นสองแนวแกน [20]

ชิ้นงานจะเกิดการครากเมื่อ σ_1 มีค่าเท่ากับ Y โดยไม่พิจารณาว่ามีค่า σ_2 กระทำอยู่ที่จุดนั้นเช่นกัน กล่าวคือ ค่าความเค้นหลักสูงสุด ไม่พิจารณาผลกระทบจากความเค้นหลักในแนวอื่น ๆ หากเราต้องการพิจารณาความถูกต้องของบรรทัดฐานนี้ให้พิจารณากรณีพิเศษที่ $\sigma_1 = -\sigma_2 = \sigma$

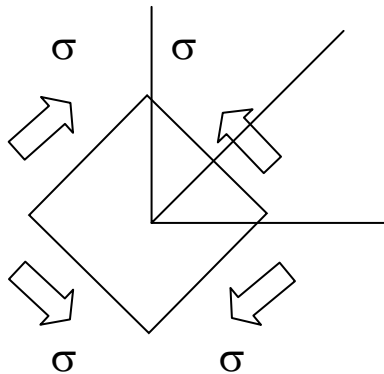


รูปที่ 2.24 การรับความเค้นตั้งฉากในกรณีพิเศษ [20]

ระบบความเค้นที่แสดงในรูปที่ 2.24 เป็นความเค้นบนระนาบ และเป็นความเค้นหลัก ดังนั้นค่าความเค้นเฉือนสูงสุดจะเกิดขึ้นบนระนาบ ที่ทำมุมกับแกนหลัก 45 องศา และความเค้นเฉือนสูงสุดมีค่าเท่ากับ

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma - (-\sigma)}{2} = \sigma \quad (2.84)$$

ซึ่งเป็นไปตามรูปที่ 2.25 วัสดุภายใต้แรงบิดอย่างเดียว



รูปที่ 2.25 วัสดุภายใต้แรงบิดอย่างเดียว [20]

ดังนั้นระบบความเค้นลักษณะนี้ จะเกิดกับชิ้นงานที่ตกอยู่ภายใต้ความเค้นเฉือนเพียงอย่างเดียว และวัสดุชนิดหนึ่งภายใต้ลักษณะการะดังกล่าว ค่าความเค้นครากเฉือน (shear yield stress, τ_y) ของวัสดุชนิดนั้นต้องเท่ากับค่าความเค้นครากถึง Y หรือ

$$\tau_y = Y \quad (2.85)$$

พบว่าสมการนี้ ไม่เป็นจริงสำหรับวัสดุเหนียว เพราะ τ_y จะมีค่าต่ำกว่า Y มาก ซึ่งเป็นเหตุให้เกณฑ์ของความเค้นหลักสูงสุดนี้ ไม่เหมาะสมที่จะใช้กับวัสดุประเภทโลหะเหนียว ซึ่งวัสดุประเภทนี้จะเกิดการเสียหายด้วยการแตกหักไม่ใช่การคราก ดังนั้นเกณฑ์ความเค้นหลักสูงสุดนี้ อาจเพียงพอที่จะคาดเดาการแตกหักหรือการเสียหาย สามารถเขียนเป็นฟังก์ชันการครากได้เป็น

$$F = \sigma_{\max} - Y \quad (2.86)$$

เมื่อ $\sigma_{\max}$ คือ ค่าความเค้นหลักที่สูงที่สุด ซึ่งความเค้นหลักจะเป็น

$$\sigma_e = \max(|\sigma_1|, |\sigma_2|, |\sigma_3|) \quad (2.87)$$

2.5.2 ทฤษฎีความเครียดหลักสูงสุด (Maximum Principal Strain Theory)

ความเครียดหลักสูงสุด หรือรู้จักกันในอีกชื่อหนึ่งว่า Venant's Criterion กำหนดไว้ว่า การครากของวัสดุจะเกิดขึ้นเมื่อ ความเครียดหลักสูงสุดที่จุดใดในวัสดุมีค่าเท่ากับค่าความเครียดคราก

$$\varepsilon_Y = \frac{Y}{E} \quad (2.88)$$

การครากจะเริ่มเมื่อ $\varepsilon_1 = \varepsilon_Y$ ซึ่งจะได้ว่า $\sigma_1 = Y$ ตามที่ควรจะเป็น สำหรับความเค้นใน 2 แนวแกนจะได้ว่าความเครียดหลัก สำหรับวัสดุไอโซโทรปิก เท่ากับ

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E} - \frac{\nu\sigma_2}{E} \quad (2.89)$$

สำหรับกรณีที่ σ_2 มีค่าเป็นบวกหรือยึดตัว เราจะได้ว่า $\sigma_1 > Y$ นั่น คือ การครากจะเกิดขึ้นเมื่อความเค้นหลักสูงสุดมีค่ามากกว่าความเค้นคราก สำหรับกรณีที่ σ_2 มีค่าเป็นลบหรืออัดตัว เราจะได้ว่า $\sigma_1 < Y$ นั่น คือ การครากจะเกิดขึ้นเมื่อความเค้นหลักสูงสุดมีค่าน้อยกว่าความเค้นคราก ซึ่งจะเห็นว่าผลกระทบของความเค้นหลักในแนวอื่นจะมีผลต่อความครากด้วย แม้ว่าจะไม่ได้ให้ผลที่ถูกต้องทั้งหมด โดยเฉพาะในกรณีการคาดการณ์การครากของโลหะเหนียว แต่ปรับปรุงความสามารถในการคาดการณ์เพิ่มขึ้นจากความเครียดสูงสุด โดยเฉพาะในกรณีของการคาดการณ์การแตกหักของโลหะเปราะ ความเครียดสูงสุดจะกำหนดการครากเป็นค่าของความเครียด แต่ในการเขียนฟังก์ชันการครากก็ยังเขียนในรูปของความเค้น ดังนั้นบนระบบแกนหลักความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียด ของวัสดุไอโซโทรปิกจะเป็น

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{E}(\sigma_1 - \nu\sigma_2 - \nu\sigma_3) \quad (2.90)$$

ถ้า ε_1 มีค่าสูงสุดในความเครียดหลักทั้งหมด ดังนั้นการครากจะเกิดขึ้นเมื่อ $|\varepsilon_1| = \varepsilon_Y$ ซึ่งสามารถเขียนฟังก์ชันการครากได้เป็น

$$f = |\sigma_1 - \nu\sigma_2 - \nu\sigma_3| - Y = 0 \quad (2.91)$$

หรือหากจะเขียนในรูปความเค้นหลัก σ_e จะได้

$$\sigma_e = \max |\sigma_i - \nu\sigma_j - \nu\sigma_k| \cdot i \neq j \neq k \quad (2.92)$$

และฟังก์ชันการครากจะเป็น

$$f = \sigma_e - Y \quad (2.93)$$

2.5.3 ทฤษฎีความหนาแน่นพลังงานความเครียด (Strain Energy Density Theory)

ความหนาแน่นพลังงานความเครียดได้รับการเสนอโดย Beltrami ซึ่งได้กำหนดเกณฑ์ไว้ว่า การครากจะเกิดขึ้นเมื่อความหนาแน่นของพลังงานความเครียดที่จุดใดในวัสดุ มีค่าเท่ากับความหนาแน่นของพลังงานความเครียดที่ทำให้เกิดการครากของวัสดุ หากเขียนในรูปของความเค้นหลักจะได้ ความหนาแน่นของพลังงานความเครียดเป็น

$$U_0 = \frac{1}{2E} [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1)] \quad (2.94)$$

ความเค้นของระบบคือ

$$\sigma_1 = Y, \sigma_2 = \sigma_3 = 0 \quad (2.95)$$

ดังนั้นในขณะที่เกิดการครากความหนาแน่นของพลังงานความเครียดจะเท่ากับ

$$U_{0Y} = \frac{Y^2}{2E} \quad (2.96)$$

เนื่องจากเกณฑ์ความหนาแน่นพลังงานความเครียดกำหนดให้การครากเกิดขึ้น เมื่อพลังงานความเครียดเท่ากับพลังงานความเครียด ขณะที่ครากจากการทดสอบแรงดึง ดังนั้น

$$U_0 = U_{0Y} \quad (2.97)$$

เมื่อพิจารณาความถูกต้องของเกณฑ์นี้ ที่การครากแบบทั่ว ๆ ไป พบว่าจะเกิดการครากเมื่อ $\sigma_1 = Y$ ซึ่งเป็นไปตามที่ได้คาดหวังไว้ สำหรับสภาวะความเค้นสองแนวแกน เช่น $\sigma_2 = \sigma_3 = \sigma$ การครากจะเกิดขึ้นเมื่อ

$$2\sigma^2(1-\nu) = Y^2 \quad (2.98)$$

และถ้าหากสภาวะความเค้นสองแนวแกนที่ $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma$ การครากจะเกิดขึ้นเมื่อ

$$2\sigma^2(1+\nu) = Y^2 \quad (2.99)$$

ซึ่งสภาวะนี้เป็นสภาวะของความเค้นเท่ากันนั้น หากเราสมมุติให้ค่าอัตราส่วนปัวร์ซอง $\nu = 0$ จะได้

$$\sigma = \frac{Y}{2} \quad (2.100)$$

สำหรับค่าฟังก์ชันการคราก จะเป็น

$$f = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\nu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1) - Y^2 = 0 \quad (2.101)$$

โดย ค่าความเค้นลัทธิจะมีค่าเป็น

$$\sigma_e = \left[\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\nu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.102)$$

2.5.4 ทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress Theory)

เกณฑ์ความเค้นเฉือนสูงสุดหรือ Tresca Criterion กำหนดการครากไว้ว่า การครากจะเกิดขึ้น เมื่อความเค้นเฉือนสูงสุดที่จุดใดในวัสดุ มีค่าเท่ากับความเค้นเฉือนสูงสุดที่เกิดขึ้นในวัสดุ สำหรับความเค้นในหลายแกน ความเค้นเฉือนสูงสุดจะเป็น

$$\tau_{\max} = \frac{1}{2}(\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) \quad (2.103)$$

โดย $\sigma_{\max}$ และ $\sigma_{\min}$ คือ ความเค้นหลักที่มีค่าสูงสุดและต่ำสุดตามลำดับ หากพิจารณาในกรณีความเค้นในแกนเดียว $\sigma_1 = \sigma_2, \sigma_2 = \sigma_3 = 0$ จะได้ว่า

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma}{2} \quad (2.104)$$

แต่เนื่องจากการทดสอบแรงดึงในแนวเดียว วัสดุจะครากเมื่อ $\sigma = Y$ ดังนั้น เกณฑ์นี้จะคาดการณ์ว่าการครากจะเกิดเมื่อ

$$\tau_{\max} = \frac{Y}{2} \quad (2.105)$$

ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ของความเค้นครากดึง และความเค้นครากเฉือนเป็น

$$\tau_Y = \frac{Y}{2} \quad (2.106)$$

เกณฑ์ความเค้นเฉือนสูงสุด คาดการณ์ว่าการครากภายใต้ความเค้นเฉือนเพียงอย่างเดียว จะเกิดขึ้นเมื่อความเค้นเฉือนมีค่าครึ่งหนึ่งของความเค้นครากที่ได้จากการทดสอบการดึง สำหรับฟังก์ชันการครากจะเป็น

$$f = \sigma_e - \frac{Y}{2} \quad \text{เมื่อ } \sigma_e = \tau_{\max} \quad (2.107)$$

เกณฑ์ความเค้นเฉือนสูงสุดนี้ จะให้ผลสอดคล้องอย่างมากกับโลหะเหนียวบางประเภท เพราะโลหะเกิดการเปลี่ยนรูปอย่างถาวรนั้น จะเกิดขึ้นบนระนาบหนึ่ง ซึ่งเรียกว่าระนาบเลื่อน ซึ่งการเกิดระนาบนี้จะเป็นปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับแรงเฉือนในส่วนหนึ่ง การครากด้วยความเค้นเฉือนจะมีค่าความเค้นเฉือนคราก τ_Y สูงกว่าค่าที่ได้จากการคาดการณ์ด้วยเกณฑ์ความเค้นเฉือนสูงสุด อยู่ประมาณร้อยละ 15 สำหรับโลหะบางชนิด ดังนั้นการคาดการณ์ด้วยเกณฑ์ความเค้นเฉือนสูงสุดนี้ จึงนิยมใช้ในการคาดการณ์การเกิดการครากของวัสดุประเภทโลหะเหนียวส่วนใหญ่

2.5.5 ทฤษฎีความหนาแน่นของพลังงานผิดรูป (Distorsion Energy Density Theory)

เกณฑ์ความหนาแน่นของพลังงานผิดรูป หรือเกณฑ์ของมิส ซึ่งกำหนดการครากไว้ว่า การครากจะเกิดขึ้นเมื่อความหนาแน่นของพลังงานผิดรูปที่จุดใดเท่ากับความหนาแน่นของพลังงานผิดรูปของวัสดุ การพิจารณาความหนาแน่นของพลังงานความเครียด

$$U_0 = \frac{1}{2E} \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\nu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1) \quad (2.108)$$

หรือ

$$U_0 = \frac{(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)^2}{18K} + \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{12G} \quad (2.109)$$

เมื่อ K คือโมดูลัสการขยายตัว $K = \frac{E}{3(1-2\nu)}$ และ G คือ โมดูลัสการเฉือน $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$ ในส่วนแรกของสมการนี้ จะเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของวัตถุ ส่วนเทอมหลังของสมการ จะเกี่ยวข้องกับผิดรูปของวัตถุ ดังนั้นกำหนดให้ความหนาแน่นของพลังงานผิดรูปเป็น

$$U_D = \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{12G} \quad (2.120)$$

ดังนั้นจากเกณฑ์ความหนาแน่นของพลังงานผิดรูป วัตถุจะครากเมื่อ

$$U_D = U_{DY} \quad (2.121)$$

เมื่อ U_{DY} คือ พลังงานการเปลี่ยนรูป เมื่อวัตถุเกิดการคราก พิจารณาภาวะภายใต้ความเค้นแกนเดียวนั้น คือ $\sigma_1 = \sigma_2, \sigma_2 = \sigma_3 = 0$ จะได้ว่า

$$U_D = \frac{\sigma^2}{6G} \quad (2.122)$$

และเนื่องจากความเค้น ที่ทำให้เกิดการครากในความเค้นแกนตัวจะเป็น $\sigma = Y$ ดังนั้น

$$U_{DY} = \frac{Y^2}{6G} \quad (2.123)$$

ดังนั้นในระบบความเค้นหลายแกน การครากจะเกิดเมื่อ $U_{DY} = \frac{Y^2}{6G}$ นั่นเอง สำหรับระบบความเค้นเฉือนเพียงอย่างเดียว $\sigma_1 = -\sigma_2 = \sigma, \sigma_3 = 0$ จะได้ว่า

$$U_D = \frac{\sigma^2}{2G} \quad (2.124)$$

ดังนั้นการเกิดการครากจะเท่ากับ

$$\sigma^2 = \frac{1}{3}Y^2 \quad (2.125)$$

ซึ่งสำหรับความเค้นในลักษณะนี้จะได้ความเค้นเฉือนสูงสุด $\tau_{\max} = \frac{|\sigma_1 - \sigma_2|}{2} = \sigma$ ซึ่งการครากจะเกิดขึ้นเมื่อ $\sigma = \tau_{\max} = \tau_Y$ ดังนั้นจะได้ว่า

$$\tau_Y^2 = \frac{1}{3}Y^2 \quad (2.126)$$

หรือ

$$\tau_Y = \frac{1}{\sqrt{3}}Y = 0.577Y \quad (2.127)$$

หากเราเปรียบเทียบกับเกณฑ์ความเค้นเฉือนสูงสุดที่ความเค้นเท่ากัน พบว่าเกณฑ์ความเค้นเฉือนสูงสุด จะประมาณการครากด้วยความเค้นเฉือนอย่างเดียวที่ $\tau_Y = 0.5Y$ ซึ่งทำให้เกณฑ์ความหนาแน่นของพลังงานผิดรูป มีค่าสูงกว่าของเกณฑ์ความเค้นเฉือนสูงสุดอยู่ประมาณร้อยละ 15 ฟังก์ชันการครากของเกณฑ์ความหนาแน่นของพลังงานผิดรูปจะเป็น

$$f = \sigma_e^2 - Y^2 \quad (2.128)$$

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (2.129)$$

สำหรับโลหะประเภทเหล็กเหนียว ทองแดง หรืออลูมิเนียม ซึ่งเกณฑ์ความหนาแน่นของพลังงานผิดรูป จะให้ค่าที่เหมาะสมใกล้เคียงกับความเป็นจริง สำหรับเหล็กหล่อ ซึ่งเป็นโลหะเปราะพบว่าความเค้นหลักสูงสุด จะให้ค่าที่เหมาะสมที่สุดในการประมาณการคราก แต่สำหรับวัสดุอื่น ๆ นั้นการครากอาจจะแตกต่างออกไป อย่างไรก็ตามการศึกษาถึงหลักเกณฑ์การวิเคราะห์การคราก หรือการเสียหายที่กล่าวมาแล้ว ยังมีหลักเกณฑ์การวิเคราะห์ความครากที่ไม่ได้กล่าวถึงในที่นี้อีก เช่น Marh-Coulomb Yield Criterion ซึ่งนิยมใช้กับวัสดุจำพวกหิน คอนกรีต หรือดิน เป็นต้น

ดังนั้นการวิเคราะห์การครากหรือการเสียหายของการขึ้นรูปโลหะ จะเริ่มเกิดขึ้นเมื่อใดจะต้องมีค่าสำหรับการอ้างอิง ซึ่งจะเห็นได้ว่าความเค้นหลักสูงสุด เป็นทฤษฎีการแตกหักที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์งานขึ้นรูปโลหะมากที่สุด เนื่องจากสามารถนำค่าความเค้นหลักสูงสุด ที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ไปเปรียบเทียบกับค่าความเค้นครากของวัสดุ ที่ได้มีการทดสอบการดึงหรืออัดของวัสดุนั้น

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กระบวนการอัดรีดขึ้นรูปโลหะได้มีการศึกษากันอย่างกว้างขวางทั้งในงานวิจัย และการทดลองเพื่อนำไปใช้ในกระบวนการผลิตจริง หรือเพื่อการปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ซึ่งปัจจุบันการวิเคราะห์ผลโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นที่นิยมกันมากทั้งในทางอุตสาหกรรมและการศึกษา เพราะมีข้อได้เปรียบในด้านการพัฒนาและการแข่งขันทางด้านการลดต้นทุน ลดค่าใช้จ่าย และลดเวลาในการสร้างต้นแบบหรือการทดลอง ซึ่งผลจากการทำนายที่ได้ให้ค่าใกล้เคียง ความเป็นจริงหรืออยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ เช่นเดียวกับตัวอย่างผลงานวิจัยของนักวิจัยท่านอื่น ๆ

Avitzur [21] ศึกษาอิทธิพลขนาดมุมของแม่พิมพ์ที่มีผลกระทบต่อแรงขึ้นรูป เมื่อขนาดมุมของแม่พิมพ์เพิ่มขึ้น ทำให้แรงในการเปลี่ยนรูปโลหะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และระยะที่วัสดุถูกอัดให้ผ่านคายสั้นลง และเมื่อขนาดของมุมคายลดลง ทำให้แรงที่ใช้เปลี่ยนรูปโลหะลดลง แรงที่ใช้เปลี่ยนรูปโลหะและความเครียดประสิทธิผลในแกนกลางชิ้นงาน มีค่าแตกต่างกับความเครียดประสิทธิผล ที่ผิวชิ้นงานมาก ซึ่งขนาดมุมของแม่พิมพ์มีผลกระทบต่อการดำเนินการไหลตัวของวัสดุ

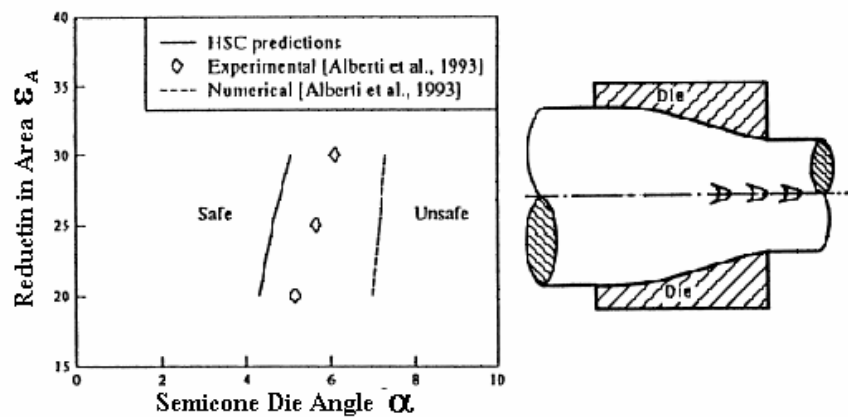
Dae-Cheol Ko และ Byung-Min Kim [22] ได้ศึกษาถึงการพยากรณ์การเกิดจุดบกพร่องแบบโพรงในงานอัดรีดขึ้นรูปและงานดึงลวดอลูมิเนียม โดยวิเคราะห์ความเป็นไปได้ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์พิจารณาเงื่อนไขที่อัตราการลดขนาดหน้าตัด และขนาดมุมของแม่พิมพ์ จากนั้นจึงทำการทดลองนำผลมาเปรียบเทียบ และสร้างแผนภาพแสดงความสัมพันธ์ที่เหมาะสมระหว่างอัตราการลดขนาดหน้าตัดและขนาดมุมครึ่งของแม่พิมพ์ พบว่าบริเวณใต้เส้นกราฟที่เสนอแนะจะเกิดจุดบกพร่อง ส่วนบริเวณ

ที่อยู่เหนือเส้นกราฟเสนอแนะจะไม่เกิดจุดบกพร่อง สรุปได้ว่าการลดอัตราการผลิตหน้าตัดและการลดมุมครึ่งของแม่พิมพ์ สามารถลดการเกิดจุดบกพร่องลักษณะโพรงแบบ central burst ได้

Hung-Kuk Oh และ Byung-Woo Ryu [23] กล่าวถึงการเกิดจุดบกพร่องแบบโพรง ว่าประการสำคัญจะอยู่ที่รูปร่างของการไหลและลักษณะเฉพาะของวัสดุ จึงประยุกต์หลักการของ Upper bound อธิบายถึงการแก้ปัญหาทั้งส่วนที่เกี่ยวกับความเร็วและความเค้นในงานอัดรีดขึ้นรูป โดยมีอัตราการลดขนาดหน้าตัด มุมของแม่พิมพ์ และสมบัติความเครียดแข็งของวัสดุ เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการและความเสียหายที่มีอิทธิพลต่อการไหล

Gouveia และคณะ [24] ทำการทดสอบความแม่นยำของทฤษฎีความเสียหาย ของนักวิจัยท่านอื่น ๆ ในการทำนายผลการเกิดความเสียหายในขบวนการขึ้นรูปต่าง ๆ เช่นในขบวนการตัด และในขบวนการอัดขึ้นรูป ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าแต่ละทฤษฎีความเสียหาย มีความเหมาะสมและความแม่นยำในการทำนายผลความเสียหายเฉพาะบางขบวนการขึ้นรูป ซึ่งจะไม่สามารถใช้ทฤษฎีใดทฤษฎีหนึ่งทำนายผลความเสียหายทุกขบวนการขึ้นรูปได้

Reddy และคณะ [25] ได้ทำการวิเคราะห์การเกิดความเสียหาย ในงานอัดขึ้นรูปโลหะ โดยการเปลี่ยนตัวแปร คือ ขนาดของพื้นที่หน้าตัดและขนาดมุมลาดเอียงของดาบ เมื่อพิจารณาสภาวะของความเค้นไฮโดรสแตติก ทำให้สามารถทำนายผลการเกิดรอยแตกในแนวแกนและขอบเขตในการอัดขึ้นรูปโลหะที่ปลอดภัยกว่าการทดสอบ ซึ่งผลแสดงให้เห็นว่าเมื่อค่าความเค้นไฮโดรสแตติก ในบริเวณแกนที่มีการเปลี่ยนรูปมีค่าเป็นศูนย์ และมีค่าความเค้นกดไฮโดรสแตติกในบริเวณอื่น ๆ มีผลทำให้เกิดการแตกในแนวแกน เมื่อนำค่าความเค้นกดไฮโดรสแตติกไปคำนวณหาค่าความเสียหาย ผลที่ได้แสดงในรูปของค่าความเสียหายซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อขนาดอัตราส่วนลดลงของพื้นที่หน้าตัดมีค่าเพิ่มขึ้น และมุมลาดเอียงของดาบมีค่าเพิ่มขึ้น แสดงในรูปที่ 2.26 ได้สรุปกราฟ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงขอบเขตความปลอดภัย ในขบวนการอัดขึ้นรูปโลหะที่ทำนายโดยทฤษฎีความเค้นดึง ซึ่งให้ผลใกล้เคียงและมีแนวโน้มเดียวกันเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลอง



รูปที่ 2.26 กราฟแสดงขอบเขตการอัดรีดขึ้นรูปโลหะที่ปลอดภัย โดยไม่ทำให้เกิดจุดบกพร่องตามแนวแกน โดยการผันแปรค่าอัตราส่วนลดลงของพื้นที่หน้าตัดและมุมของแม่พิมพ์ [25]

Wagener และ Wolf [26] ได้ทำการจำลองการอัดรีดขึ้นรูปโลหะ โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อศึกษา ขบวนการอัดขึ้นรูปโลหะ โดยการเปลี่ยนตัวแปรต่าง ๆ เช่น วัสดุชนิดต่าง ๆ อัตราส่วนลดลงของพื้นที่หน้าตัด มุมลาดเอียงของคาย และสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ผิวคายกับชิ้นงาน ซึ่งผลที่ได้เมื่อทำการอัดขึ้นรูปโลหะ คือ แรงที่ใช้ในการขึ้นรูปเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในระยะกชช่วงแรก เมื่อวัสดุเปลี่ยนรูปจนเต็มคาย แรงที่เพิ่มถึงจุดสูงสุดจะค่อย ๆ ลดลง เนื่องจากการลดลงของระยะผิวสัมผัสระหว่างคายกับเนื้อของชิ้นงาน อิทธิพลของขนาดส่วนลดลงของพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงาน ทำให้ความแตกต่างแรงเพิ่มขึ้น เมื่อลดลงของพื้นที่หน้าตัดชิ้นงานเล็กลง ในการปฏิบัติจริงจะเห็นการเกิดรอยแตกที่แกนกลางของชิ้นงาน เมื่อการเปลี่ยนแปลงขนาดของพื้นที่หน้าตัดชิ้นงานที่ลดลง

พิพัฒน์ เลิศโกวิทย์ [27] ศึกษาถึงการปรับปรุงคุณภาพการอัดรีดขึ้นรูปทองเหลืองเส้น เพื่อใช้ในการผลิตอุปกรณ์ประปาและมาตรวัดน้ำประปา ตามข้อกำหนดของการประปานครหลวงและมาตรฐาน ISO 4064 Class B มีส่วนผสมของสังกะสีร้อยละ 36-39 อยู่ในช่วง $\alpha+\beta$ ขนาดความยาวชิ้นงานสำเร็จ 16 เมตร ด้วยการเพิ่มความเครียดแข็งของแท่งบิลเลท ด้วยการอบที่อุณหภูมิต่ำลงจากเดิมที่ 700-750 องศาเซลเซียส เป็น 600-650 องศาเซลเซียส ด้วยความเร็วขึ้นรูปเฉลี่ย 0.677 เมตร/วินาที จากชิ้นงานตัวอย่างจำนวนทั้งหมด 280 ชิ้น พบว่าเกิดโพรงจำนวน 100 ชิ้น และสามารถลดความยาวของโพรงได้เฉลี่ยเดิมจาก 76.50 ซม. ลงเหลือ 41.86 ซม.

จินดา เปี่ยมราศี [28] ศึกษาความเค้นบริเวณปากแม่พิมพ์อัดรีดอะลูมิเนียม โดยเปรียบเทียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ การทดลอง และทฤษฎีสถิต สำหรับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ไม่คิดความร้อนที่เกิดจากความ

เสียตาทนระหว่างแท่งบิลเลทกับคอนเทนเนอร์ พบว่าเมื่อเริ่มต้นวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แรงดันอัดรีดจะมีค่าสูงกว่าทฤษฎีสแลบ จากนั้นแนวโน้มของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จะเข้าไปใกล้ค่าแรงดันจากวิธีสแลบ แต่เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลอง พบว่าแรงดันอัดรีดของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สูงกว่าการทดสอบการอัดรีดในช่วงเริ่มต้นและผลต่ำกว่าเมื่อสิ้นสุดการอัด ดังนั้นวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถใช้ในการประมาณแรงดัน และความเค้นในภาวะเริ่มต้นการอัดรีดได้ ส่วนการวิเคราะห์การเปรียบเทียบผลทั้งระบบไม่สามารถกระทำได้ ต้องทำการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขในการทำงานให้รวมผลของความร้อนในกระบวนการผลิตก่อน

กิตติศักดิ์ เผือกสะอาด [29] ศึกษาการออกแบบแม่พิมพ์เพื่อลดปัญหาการค้ำขึ้นรูปชิ้นงานโลหะแผ่นโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ มีการเปรียบเทียบผลการทดลอง ระหว่างวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับการทดลอง โดยกำหนดเงื่อนไขในการวิเคราะห์ให้สอดคล้องกับการทดลองค้ำขึ้นรูปจริง จากการวิจัยดังกล่าวชี้ให้เห็นว่า สามารถประยุกต์ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ นำมาทำนายการเปลี่ยนรูปของโลหะแผ่นได้เป็นอย่างดี ซึ่งเป็นวิธีที่ประหยัดเวลาออกแบบแม่พิมพ์ และเป็นประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมการขึ้นรูปโลหะแผ่น แล้วยังสามารถช่วยวิเคราะห์ความเครียดและความเค้นที่ยังคงเหลืออยู่ได้อีกด้วย

บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

การลดจุดบกพร่องแบบโพรงในงานอัดรีดขึ้นรูปทองเหลือง โดยอาศัยหลักการวิเคราะห์แบบจำลอง ไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อหาผลกระทบจากอิทธิพลของความเร็วขึ้นรูปและมุมแม่พิมพ์ขนาดต่าง ๆ ในแบบจำลอง ซึ่งนำไปสู่การทำนายการเกิดจุดบกพร่องในแนวแกนของวัสดุ แล้วนำผลการวิเคราะห์ไปสร้างเส้นแนวโน้มแสดงขอบเขตความสามารถในการอัดรีดขึ้นรูป สำหรับทองเหลืองหน้าตัดหกเหลี่ยม ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาผลิตภัณฑ์ การออกแบบแม่พิมพ์ การควบคุมกระบวนการผลิต และลดความสิ้นเปลืองในการทดลองผลิต โดยการวิจัยเพื่อลดการเกิดจุดบกพร่องในงานอัดรีดทองเหลืองมีขั้นตอนการทำงานดังนี้

1. การศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. การศึกษาสมบัติของทองเหลืองและกระบวนการอัดรีดขึ้นรูปทองเหลือง
3. การวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กระบวนการอัดรีดขึ้นรูปทองเหลืองตามตัวแปรกำหนด
4. การสร้างเส้นแนวโน้มแสดงขอบเขตความสามารถในการอัดรีดขึ้นรูป
5. การสรุปผลการวิจัยและเสนอแนะ

3.1 การศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การวิจัยดำเนินไปตามหลักการและแนวทางที่ถูกต้อง จำเป็นต้องศึกษาค้นคว้าทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อเป็นแนวทางและจุดอ้างอิงของการวิจัยสำหรับลดจุดบกพร่องแบบโพรงในกระบวนการอัดรีดขึ้นรูปทองเหลือง โดยทำการค้นคว้าจากแหล่งข้อมูลต่าง ๆ เช่น หนังสือตำรา เอกสารวิชาการ และสารสนเทศที่เกี่ยวข้องต่าง ๆ สามารถสรุปได้ดังนี้

3.1.1 การศึกษาทฤษฎีกระบวนการอัดรีดขึ้นรูปโลหะ

เพื่อให้ทราบถึงหลักการและลักษณะของการอัดรีดขึ้นรูปแบบต่าง ๆ ตัวแปรที่สำคัญของกระบวนการลักษณะจุดบกพร่อง ที่มักเกิดในกระบวนการและการแก้ไขจุดบกพร่องที่เกิดขึ้น ในกระบวนการอัดรีดขึ้นรูปโลหะ จากการศึกษาทฤษฎีกระบวนการอัดรีดขึ้นรูปโลหะ ทำให้ทราบว่ากระบวนการอัดรีดขึ้นรูปทองเหลืองแบบไหลตาม มีสาเหตุปัจจัยหลักของการเกิดจุดบกพร่อง มาจากรูปแบบการไหลที่ไม่เหมาะสม ซึ่ง Avitzur [17] ได้กล่าวสรุปถึงตัวแปรที่สำคัญสำหรับกระบวนการอัดรีดขึ้นรูปไว้ดังนี้

1. การลดขนาดมีผลกระทบต่อค่าความเค้นในการอัดขึ้นรูป การเรียงตัวของโครงสร้างและความแข็งแรงของชิ้นงานสำเร็จ
2. ขนาดมุมของแม่พิมพ์มีผลกระทบต่อรูปแบบการไหลตัว การเกิดของก้อนเนื้อตาย ความแตกต่างของความเร็วของการไหลตัวบริเวณผิวกับแกนกลางของแท่งบิลเลท
3. ความเสียดทานระหว่างแม่พิมพ์และชิ้นงาน

ความเร็วการขึ้นรูปมีผลต่อความดันอัดขึ้นรูป และความเครียดที่เกิดขึ้นในเนื้อวัสดุ และเป็นเหตุให้การไหลตัวเนื้อโลหะบริเวณขึ้นรูปเปลี่ยนแปลง เมื่อความเร็วขึ้นรูปเปลี่ยนไป ซึ่งตัวแปรหลักของกระบวนการทั้ง 3 ได้แก่ การลดขนาด ขนาดมุมของแม่พิมพ์ และความเสียดทาน จะมีผลกระทบต่อการวางแผนกระบวนการทั้งสิ้น เช่น ความรุนแรงของความเสียดทาน สามารถแก้ไขโดยควบคุมจากตัวเลือกของการหล่อขึ้นรูป วัสดุแม่พิมพ์ ผิวสำเร็จของแม่พิมพ์ ความเร็วของการขึ้นรูป เป็นต้น การศึกษาตัวแปรที่มีผลกระทบต่อรูปแบบการไหลตัวของเนื้อโลหะกระบวนการอัดรีดของ Lange [1] และ Saha [10] ที่กล่าวถึงตัวแปรที่มีผลกระทบต่อรูปแบบการไหลตัวของเนื้อโลหะ ในกระบวนการอัดรีดขึ้นรูป จึงพิจารณาศึกษาและทดลองการปรับเปลี่ยนตัวแปรของกระบวนการ เพื่อลดการเกิดจุดบกพร่องแบบโพรงในกระบวนการอัดรีดขึ้นรูปทองเหลือง ด้วยการวิเคราะห์พฤติกรรมเชิงกลของวัสดุจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ คือ ความเร็วการขึ้นรูปและขนาดมุมของแม่พิมพ์ และพยากรณ์การเสียหายของวัสดุในกระบวนการด้วยทฤษฎีความเค้นหลักสูงสุด ดังรายละเอียดที่กล่าวในบทที่ผ่านมาแล้วนั้น สามารถวิเคราะห์การเสียหายได้จากการอ้างอิง ความเค้นหลักสูงสุดกับค่าความเค้นครากของวัสดุที่ได้จากการทดสอบการดึงหรืออัด

3.1.2 งานวิจัยเกี่ยวกับการเกิดจุดบกพร่องในชิ้นงานอัดรีดขึ้นรูปโลหะ

ศึกษาถึงแนวทางการแก้ปัญหาการเกิดจุดบกพร่อง การประยุกต์ใช้ทฤษฎีหรือแนวคิดในการแก้ปัญหาการเกิดจุดบกพร่องด้วยการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ด้านผลกระทบและการแก้ปัญหาการเกิดจุดบกพร่องแบบโพรง พบว่ามีการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องเป็นจำนวนมาก กล่าวโดยสรุปได้ว่าการเกิดจุดบกพร่องแบบโพรงมีปัจจัยสำคัญที่กระทบ คือ ลักษณะการอัดรีดขึ้นรูป อุณหภูมิของแท่งบิลเลท อัตราส่วนการขึ้นรูป ลักษณะของแม่พิมพ์ และความเร็วของการขึ้นรูป สังเกตเห็นได้ว่าตัวแปรที่ได้กล่าวในข้างต้น มีผลกระทบต่อรูปแบบการไหลตัวของวัสดุในการอัดรีดขึ้นรูปทั้งสิ้น แต่การปรับเปลี่ยนหรือเปลี่ยนแปลงตัวแปรด้านการออกแบบขนาดมุมของแม่พิมพ์ และความเร็วของการขึ้นรูป เพื่อลดการเกิดจุดบกพร่องที่เกิดจากรูปแบบการไหล มีผลกระทบน้อยต่อรูปแบบกระบวนการผลิตทั้งในด้านขนาดของชิ้นงานและปริมาณผลิต ซึ่ง Lange [1] ให้เหตุผลเกี่ยวกับจุดบกพร่องแบบโพรงที่พบในการอัดรีดขึ้นรูปโลหะ สามารถแก้ปัญหาและป้องกันได้โดยปรับลดขนาดมุมลาดเอียงของแม่พิมพ์ เพื่อลดความเสียดทาน และใช้ความเร็วของการขึ้นรูปที่เหมาะสม

ดังนั้นการพยากรณ์การเกิดจุดบกพร่องแบบโพรงในงานอัดรีดขึ้นรูปทองเหลือง สามารถวิเคราะห์ได้จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ที่มีการกำหนดสมบัติเฉพาะของวัสดุ ขนาดมุมของแม่พิมพ์ และความเร็วขึ้นรูป ที่มีผลกระทบต่อรูปแบบการไหลของวัสดุ โดยใช้น้ำค่าความเค้นหลักสูงสุดที่ได้จากแบบจำลองไปเปรียบเทียบกับค่าความเค้นครากของวัสดุ ที่ได้จากการทดสอบการดึงหรืออัด เพื่อเป็นการอ้างอิงการเสียหายที่เกิดขึ้นของวัสดุตามทฤษฎีการแตกหักของวัสดุ

3.2 การศึกษาสมบัติทองเหลืองและกระบวนการอัดรีดขึ้นรูปทองเหลือง

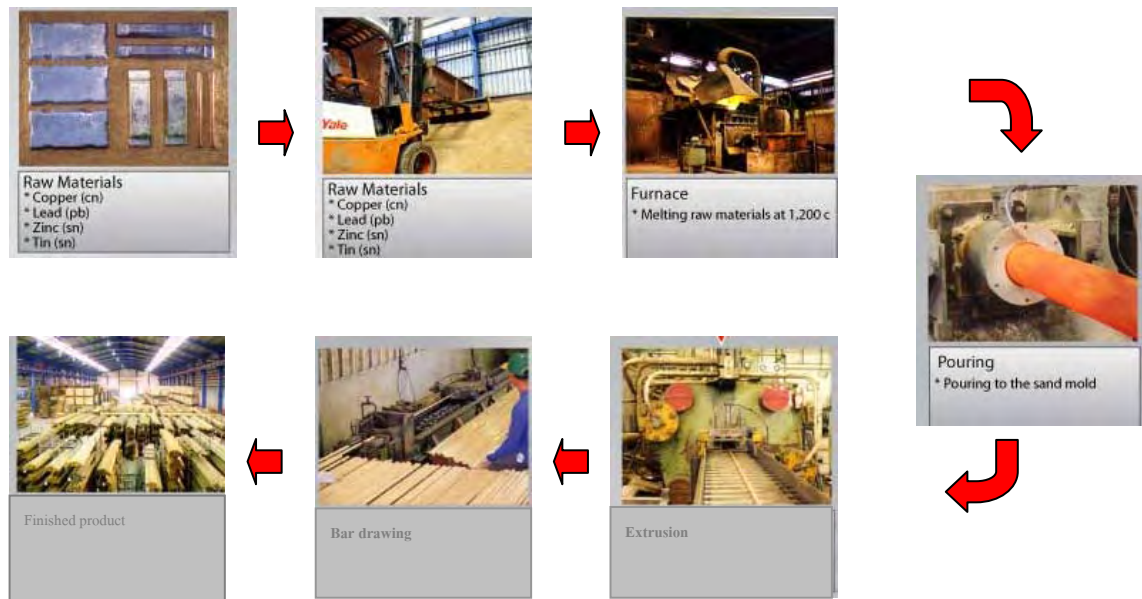
เพื่อให้การกำหนดเงื่อนไข สำหรับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์มีความถูกต้องตามกระบวนการอัดรีดขึ้นรูปวัสดุทองเหลือง จึงต้องศึกษาสมบัติทองเหลืองและกระบวนการอัดรีดขึ้นรูปทองเหลือง แบบไหลตาม เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมเชิงกลที่เกิดขึ้น ในกระบวนการอัดรีดขึ้นรูปด้วยการวิเคราะห์จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ จึงแบ่งขั้นตอนการดำเนินการออกเป็น 2 ส่วน คือ การศึกษาสมบัติของวัสดุขึ้นงานทองเหลือง และการศึกษากระบวนการอัดรีดขึ้นรูปทองเหลือง ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.2.1 การศึกษาสมบัติของวัสดุขึ้นงานทองเหลือง

ในการวิเคราะห์การเกิดจุดบกพร่องในชิ้นงานจากพฤติกรรมทางกล ต้องทราบสมบัติเชิงกลที่สำคัญของวัสดุทองเหลืองภายในกระบวนการ คือ ค่าความเค้นไหลของวัสดุและค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหาย สมบัติทางความร้อนของวัสดุทองเหลืองที่สำคัญ ได้แก่ สมบัติการนำความร้อน ความร้อนจำเพาะ และการขยายตัวของทองเหลือง ซึ่งได้จากการทดสอบและการศึกษาค้นคว้า หาค่าสมบัติทางความร้อนของทองเหลือง (แสดงรายละเอียดดัง ภาคผนวก ข)

3.2.2 การศึกษากระบวนการอัดรีดขึ้นรูปทองเหลือง

ชิ้นงานอัดรีดขึ้นรูปทองเหลือง เป็นผลิตภัณฑ์ที่นำไปใช้อย่างกว้างสำหรับงานอุตสาหกรรมการผลิตผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ และมีความเสี่ยงต่อผู้บริโภค ถ้ามีการควบคุมกระบวนการออกแบบและการผลิตที่ไม่เหมาะสม เมื่อดำเนินงานศึกษาข้อมูลการผลิตจากกระบวนการดังกล่าว ทำให้ทราบว่าในบางสถานะการผลิตมีตัวแปรบางส่วนที่เป็นปัจจัยสนับสนุนการเกิดจุดบกพร่องในชิ้นงาน และเนื่องจากเป็นข้อมูลด้านอุตสาหกรรมการผลิตที่มีการแข่งขัน จึงสามารถนำเสนอได้ในบางรายการของขั้นตอนผลิต ดังนี้



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนหลักของกระบวนการอัดรีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ทองเหลืองเส้น [30]

การเตรียมวัสดุส่วนผสมในการผลิตทองเหลือง

ทองเหลืองเป็นโลหะผสมระหว่างทองแดงกับสังกะสี โดยสังกะสีมีผลทำให้ความแข็ง ความแข็งแรง ความเหนียว และสมบัติการทนทานต่อการกัดกร่อน ซึ่งทองเหลือง Brass 60/40 มีส่วนผสมของสังกะสี ตะกั่ว ดีบุก และสังกะสีประมาณร้อยละ 40

การหล่อแท่งชิ้นงานบิลเลททองเหลือง

เพื่อให้ได้ชิ้นงานสำเร็จมีอัตราการลดขนาดตามกำหนดที่ต้องการ จึงต้องจัดเตรียมแท่งบิลเลท เป็นวัสดุชิ้นงานเริ่มต้นในกระบวนการอัดรีดขึ้นรูป ให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 มม. ด้วยการหล่อแบบต่อเนื่อง ที่อุณหภูมิหลอมประมาณ 1,200 องศาเซลเซียส

การตัดแท่งชิ้นงานบิลเลททองเหลือง

เพื่อให้ได้ชิ้นงานสำเร็จมีขนาดความยาวตามกำหนดที่ต้องการ จึงต้องจัดเตรียมแท่งบิลเลท เป็นวัสดุชิ้นงานเริ่มต้นในกระบวนการอัดรีดขึ้นรูป เมื่อหล่อเย็นชิ้นงานที่หล่อให้อุณหภูมิลดลงหรือเย็นตัวลงแล้วจะทำการตัดเป็นแท่งมีขนาดความยาวแท่งละ 460 มม.

การอบให้ความร้อนแก่แท่งชิ้นงานบิลเลท

ทองเหลืองที่จะทำการอัดรีดขึ้นรูปให้ร้อนจนถึงอุณหภูมิที่เหมาะสมกับการเปลี่ยนรูปถาวร ที่อุณหภูมิประมาณ 750 องศาเซลเซียส เพื่อให้วัสดุสามารถขึ้นรูปได้ง่าย

การอัดรีดขึ้นรูปแท่งชิ้นงานบิลเลททองเหลือง

การขึ้นรูปแท่งบิลเลทที่อบให้ความร้อนแล้วด้วยแกนอัดแรมดันอัดแท่งบิลเลท ให้ไหลผ่านปากแม่พิมพ์หน้าตัดหกเหลี่ยม ให้เป็นผลิตภัณฑ์ทองเหลืองเส้นที่มีรูปร่างหน้าตัดหกเหลี่ยม ด้วยความเร็วขึ้นรูปเฉลี่ย 728 มม./วินาที สำหรับเปอร์เซ็นต์การลดขนาดพื้นที่หน้าตัดสำหรับการวิจัยนี้คือ 97.7 % เนื่องมาจากในการศึกษาผลการผลิตและเก็บข้อมูลของสถานประกอบการที่เข้าทำการศึกษา พบว่าเป็นขนาดชิ้นงานที่มีการผลิตเป็นปริมาณมาก

การตกแต่งผิวสำเร็จด้วยกรรมวิธีดึงขึ้นรูป

เพื่อเป็นการตกแต่งรอยแตกที่ผิวสำเร็จของชิ้นงานอัดขึ้นรูปให้สวยงาม และขึ้นรูปชิ้นงานให้ได้ขนาดตามกำหนดที่ต้องการ จึงนำชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการอัดรีดขึ้นรูปแล้วผ่านเข้ากระบวนการดึงขึ้นรูป ก่อนนำผลิตภัณฑ์ทองเหลืองเส้นไปใช้งานสำหรับกระบวนการถัดไปหรือจำหน่ายต่อไป

3.3 การวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กระบวนการอัดรีดขึ้นรูป

ทองเหลืองตามตัวแปรกำหนด

การวิเคราะห์กระบวนการอัดรีดขึ้นรูปทองเหลือง สำหรับการวิจัยนี้ใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์สำเร็จรูป MSC.Marc ซึ่งภายในโปรแกรมประกอบไปด้วย โปรแกรมย่อยที่ทำงานร่วมกันหลาย ๆ โปรแกรม ซึ่งมีประสิทธิภาพในการวิเคราะห์ปัญหาทางด้านวิศวกรรม เช่น การวิเคราะห์ทางด้านโครงสร้างเชิงกล (Structural Mechanics) การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer) และปัญหาสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Electro-Magnetic) โดยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ถูกออกแบบให้สามารถใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาแบบเชิงเส้น (Linear) หรือแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Non-Linear) รวมทั้งปัญหาแบบไม่มีการเคลื่อนที่ (Static) และแบบเคลื่อนที่ (Dynamic) ได้เป็นอย่างดี ในงานวิจัยนี้ได้แบ่งการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ 2 ขั้นตอน โดยขั้นตอนแรกจะทำการวิเคราะห์แบบจำลองเปรียบเทียบกับการผลิต เพื่อทวนสอบความถูกต้องของค่าตัวแปรที่กำหนดในแบบจำลอง ขั้นตอนถัดไปจึงทำการวิเคราะห์แบบจำลองตามตัวแปร ที่ความเร็วขึ้นรูปและขนาดมุมของแม่พิมพ์ที่กำหนด ซึ่งการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ เป็นการคำนวณเชิงตัวเลขที่มีขีดจำกัดของการวิเคราะห์บางประการ คือ ความจำเป็นที่จะต้องกำหนดเงื่อนไขกระบวนการ และหลักเกณฑ์การวิเคราะห์ให้สอดคล้องกับการกระบวนการ โดยมีขั้นตอนของการดำเนินการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ดังต่อไปนี้

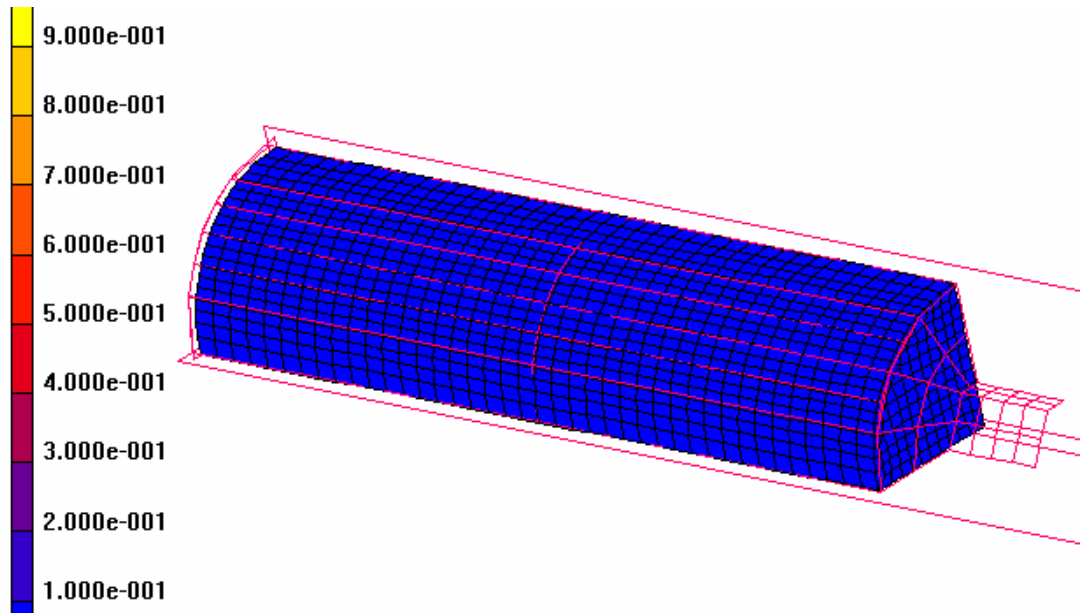
3.3.1 การวิเคราะห์แบบจำลองเปรียบเทียบกับการผลิต

การวิเคราะห์แบบจำลองเปรียบเทียบกับการผลิต เป็นการทวนสอบความถูกต้องของค่าตัวแปร ที่กำหนดในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยวิเคราะห์ตำแหน่งของการเริ่มเกิดจุดบกพร่องด้วยการเปรียบเทียบค่าความเค้นหลักสูงสุด ที่ได้จากการประมวลผลของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กับความเค้นครากของวัสดุ ที่ได้จากการทดสอบการอัดวัสดุ ตามทฤษฎีการแตกหักของวัสดุ ดังแสดงรายละเอียดบทที่ผ่านมา ซึ่งกรณีที่ค่าความเค้นหลักสูงสุดจากแบบจำลองมากกว่าความเค้นครากของวัสดุ แสดงว่าวัสดุมีแนวโน้มที่จะเกิดความเสียหายที่บริเวณโหนดนั้น ๆ ด้วยการเลือกเฉพาะโหนดในแนวแกนกลางของการอัดมาวิเคราะห์ และเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการผลิตจริง พิจารณาโหนดแรกที่มีค่าความเค้นหลักสูงสุดมากกว่า ค่าความเค้นครากของวัสดุจากโหนดตามแนวแกนที่เลือก ผลการเปรียบเทียบการแตกหักของวัสดุกับข้อมูลจุดบกพร่องแบบโพรง ในการผลิตทองเหลืองเส้น ให้ผลใกล้เคียงหรือเหมาะสมหรือไม่ หากมีผลแตกต่างกันมากหรือยอมรับค่าตัวแปรไม่ได้ ให้ทำการปรับค่าตัวแปรที่มีกระทบให้เหมาะสมมากขึ้น เช่น ขนาดของรัศมีในส่วนต่าง ๆ ของแม่พิมพ์ เพราะแม่พิมพ์ในกระบวนการผลิตมีการสึกหรอที่ระดับไม่เท่ากัน แต่หากมีผลการเกิดจุดบกพร่องใกล้เคียงกันหรือมีผลอยู่ในระดับเดียวกัน จึงทำการทดลองที่ตัวแปรความเร็วขึ้นรูปและขนาดมุมของแม่พิมพ์ที่กำหนดในการวิจัยต่อไป โดยการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์มีขั้นตอนดำเนินงานดังนี้

การสร้างแบบจำลองการอัดรีดขึ้นรูป

การสร้างแบบจำลองการอัดรีดขึ้นรูป จากโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ MSC.Marc ทั้งส่วนของแม่พิมพ์และชิ้นงาน จากเครื่องมือการสร้างรูปแบบ Mesh Generation ดังนี้

1. แบบจำลองแม่พิมพ์และกระบอกอัดคอนเทนเนอร์ การสร้างแบบจำลองในส่วน of แม่พิมพ์และกระบอกอัดคอนเทนเนอร์ ให้มีขนาดตามกำหนดที่ได้ศึกษากระบวนการแล้ว (ตามขั้นตอน 3.2.2 การศึกษากระบวนการอัดรีดขึ้นรูปทองเหลือง) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกระบอกอัดคอนเทนเนอร์ 153 มม. ความยาวกระบอกอัดคอนเทนเนอร์ 465 มม. ช่องปากแม่พิมพ์รูปทรงแท่งเหลี่ยมด้านเท่ามีเปอร์เซ็นต์การลดขนาดร้อยละ 97.70 ดังรูปที่ 3.4 แสดงลักษณะของแม่พิมพ์ในงานอัดรีดขึ้นรูปทองเหลืองหน้าตัดหกเหลี่ยมขนาดมุม 90 องศา
2. แบบจำลองแท่งชิ้นงานบิลเลท แท่งชิ้นงานบิลเลทมีขนาดผ่านศูนย์กลาง 150 มม. ยาว 460 มม. โครงตาข่ายเอลิเมนต์ของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ซึ่งขนาดและจำนวนของเอลิเมนต์ที่ใช้แสดงจะต้องมีการหาความเหมาะสม โดยทดลองที่จำนวนเอลิเมนต์ขนาดต่าง ๆ แล้วจึงเปรียบเทียบความแตกต่างของแรงขึ้นรูป ความคลาดเคลื่อนและระยะเวลาในการประมวลผล การกำหนดสมบัติของวัสดุและสภาพเงื่อนไขขอบเขตต้องให้มีความสอดคล้องกัน เพื่อช่วยให้สามารถทำนายผลได้ใกล้เคียงกับการทดลองจริงมากที่สุด (แสดงรายละเอียดดัง ภาคผนวก ค)



รูปที่ 3.2 แบบจำลองแม่พิมพ์และแท่งขึ้นงานบิลเลทสำหรับงานอัดรีดขึ้นรูปแบบแกนสมมาตร

กำหนดเงื่อนไขขอบและกำหนดการสัมผัส

การกำหนดเงื่อนไขขอบของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยกำหนดให้โหนดของชิ้นงานไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านแกนสมมาตรได้ แต่สามารถไหลตัวไปตามทิศทางการเคลื่อนที่ของแกนอัด และเคลื่อนที่ภายในกระบอกอัดคอนเทนเนอร์และแกนสมมาตรที่สร้างขึ้น ซึ่งแบบจำลองดังกล่าวจะมีลักษณะสมมาตรตามหน้าตัด จึงสามารถสร้างเพียงหนึ่งส่วนของหน้าตัดได้ จึงเป็นการช่วยลดเวลาในการประมวลผลของคอมพิวเตอร์ลงได้

1. กำหนดเงื่อนไขขอบ โดยกำหนดเงื่อนไขขอบของแบบจำลอง ในส่วนของเครื่องมือมีสมบัติแข็งเกร็ง ซึ่งจะไม่มีการเปลี่ยนขนาดหรือรูปร่างขณะทำการวิเคราะห์ จะประกอบไปด้วยส่วนต่าง ๆ ได้แก่ แม่พิมพ์ กระบอกอัดคอนเทนเนอร์ และแกนอัด และพื้นผิวที่เป็นแนวแกนสมมาตรของแบบจำลองจะกำหนดให้ไม่มีผลทางความร้อนและความเสียดทาน การเคลื่อนที่ของส่วนต่าง ๆ จะกำหนดให้ให้มีการเคลื่อนที่ของแกนอัดได้เฉพาะในแนวทิศทางการขึ้นรูปเท่านั้น เพื่อเป็นการศึกษาผลกระทบด้านความเร็วขึ้นรูปที่มีต่อการเกิดจุดบกพร่อง จึงทำการศึกษาความเร็วขึ้นรูปในช่วงที่ Lange [1] กำหนด คือ 500-2,000 ม.ม./วินาที โดยแบ่งออกเป็นช่วงระดับเพื่อศึกษา 4 ระดับ ได้แก่ 500 1,000 1,500 และ 2,000 ม.ม./วินาที ส่วนกระบอกอัดคอนเทนเนอร์และพื้นผิวของแกนสมมาตรกำหนดให้ไม่มีเคลื่อนที่

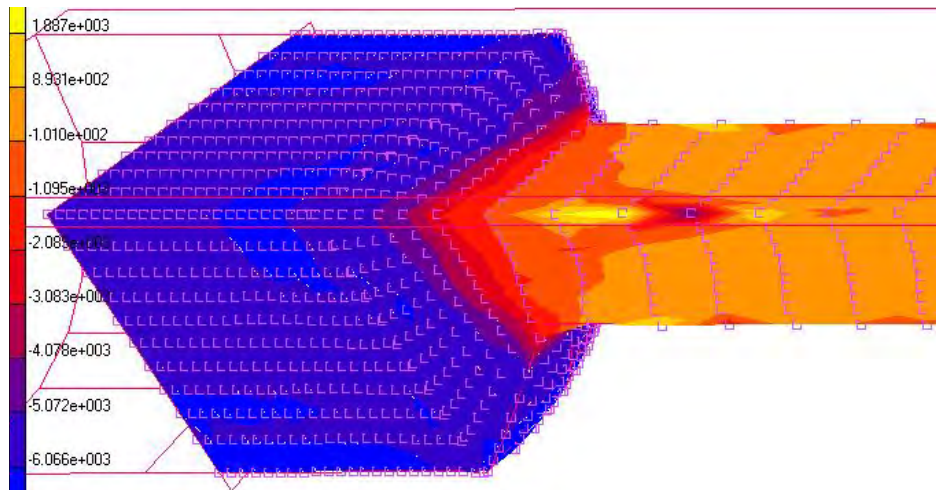
2. กำหนดสมบัติและการเปลี่ยนรูป กำหนดให้แท่งชิ้นงานบิลเลทที่สร้างขึ้น มีการเปลี่ยนรูปร่างตามกระบวนการขึ้นรูป โดยมีพฤติกรรมของการเปลี่ยนรูปของวัสดุชิ้นงานทองเหลืองตามสมบัติทางกลและทางความร้อน ตามที่ได้ทำการทดสอบและศึกษามาแล้ว (แสดงรายละเอียดตาม ภาคผนวก ข)
3. กำหนดการสัมผัสของแบบจำลอง กำหนดสภาวะการสัมผัสระหว่างชิ้นส่วนต่าง ๆ ของแบบจำลอง ให้มีการสัมผัสแบบแตะกันระหว่างแท่งชิ้นงานบิลเลทกับแกนอัดและพื้นผิวของแกนสมมาตร ส่วนการสัมผัสระหว่างบิลเลทกับกระบอกอัดคอนเทนเนอร์และแม่พิมพ์ จะกำหนดให้มีความเสียดทาน 5 ระดับ คือ 0.05 , 0.1 , 0.2 , 0.3 , 0.5 และ 1.0 เพื่อศึกษาพฤติกรรมทางกลที่จะก่อให้เกิดจุดบกพร่องขึ้นที่ความเสียดทานระดับต่าง ๆ

การประมวลผล

ประมวลผลโดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ MSC.Marc โดยกำหนดช่วงระยะการวิเคราะห์ Increment step ของการเคลื่อนที่แกนอัด และเพื่อให้ระยะการอัดของแบบจำลอง ใกล้เคียงกับกระบวนการอัดรีดขึ้นรูปจริง จึงกำหนดให้มีระยะป้องกันการกระแทก ของเครื่องมือ 5 มม. จากความยาวของแท่งบิลเลท 460 มม. ดังนั้นระยะการเคลื่อนที่ของแกนอัดจึงมีความยาว 455 มม. จากการแบ่งเป็นช่วงระยะของการวิเคราะห์ Increment Step สำหรับแบบจำลองเป็น 100 ช่วงการวิเคราะห์ ดังนั้นความยาวของแต่ละช่วงการวิเคราะห์มีค่าเท่ากับ 4.55 มม.

แสดงและวิเคราะห์การประมวลผล

โปรแกรมจะทำการคำนวณสมการเชิงตัวเลขในรูปของเมทริกซ์ และแสดงผลที่ได้เป็นภาพกราฟฟิก แถบสี ตัวเลข และกราฟ ของแรง ความเค้นและความเครียดต่าง ๆ เช่น กราฟความสัมพันธ์ของแรงต่อเวลา หรือแรงต่อระยะการเคลื่อนที่ ภาพกราฟฟิกของความเค้นและความเครียด ขนาดเอลิเมนต์ของบิลเลท มีการเปลี่ยนแปลงตามลักษณะของการเปลี่ยนรูป และจุดวิกฤตที่เกิดขึ้นในชิ้นงานดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แสดงผลการประมวลแบบจำลองกระบวนการอัดขึ้นรูปแบบแถบสี่

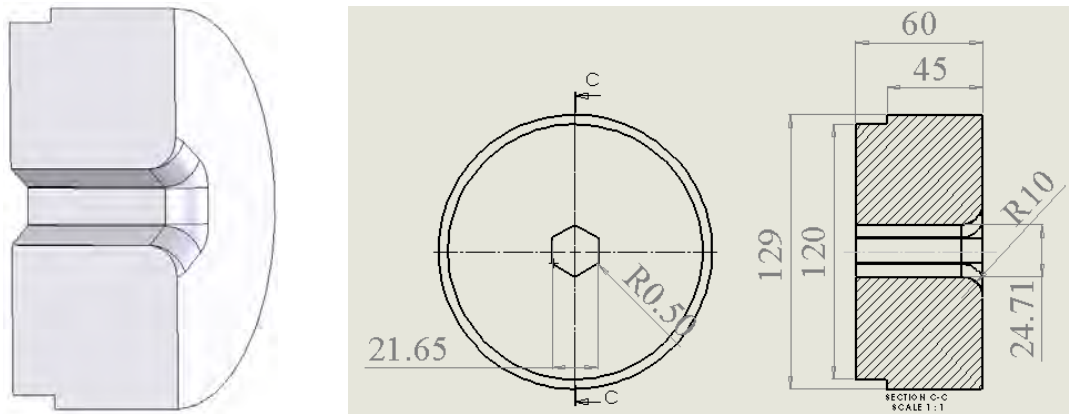
การวิเคราะห์ตำแหน่งของการเริ่มเกิดจุดบกพร่อง ด้วยการใช้อยู่ปฏิบัติการแตกหักของวัสดุ โดยเลือกเฉพาะโหนดในแนวแกนกลางของการอัดมาวิเคราะห์ หากพบว่าโหนดที่ค่าความเค้นหลักสูงสุดมากกว่าค่าความเค้นครากของวัสดุเป็นโหนดแรกในระยการขึ้นรูป Increment ใด ๆ แสดงว่าวัสดุมีความเสียหายเกิดขึ้นที่บริเวณโหนดนั้น

3.3.2 การวิเคราะห์แบบจำลองตามตัวแปรที่กำหนด

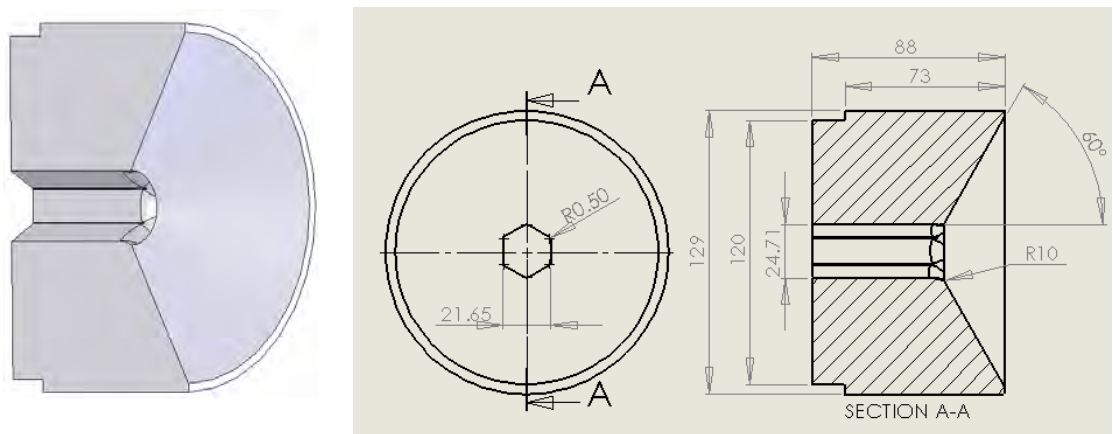
เมื่อทำการทวนสอบความถูกต้องของค่าตัวแปร ที่กำหนดในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ กระทั่งให้ผลที่ใกล้เคียงกับการผลิต จึงทำการวิเคราะห์แบบจำลองตามตัวแปรความเร็วขึ้นรูปและขนาดมุมของแม่พิมพ์ตามที่กำหนดในการวิจัย ดังนี้

ขนาดมุมของแม่พิมพ์

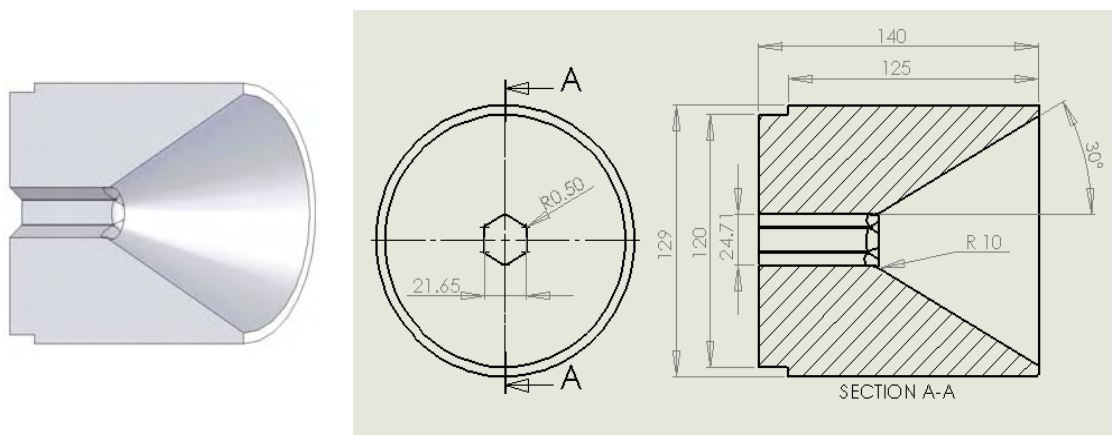
เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบผลกระทบต่อการเกิดจุดบกพร่อง เมื่อขนาดมุมของแม่พิมพ์เปลี่ยนไปในระดับมากขึ้น จึงกำหนดขนาดมุมของแม่พิมพ์ไว้ 3 ขนาดคือ 30 องศา 60 องศา และ 90 องศา



รูปที่ 3.4 ลักษณะของแม่พิมพ์ในงานอัดรีดขึ้นรูปทองเหลืองหน้าตัดหกเหลี่ยมขนาดมุม 90 องศา



รูปที่ 3.5 ลักษณะของแม่พิมพ์ในงานอัดรีดขึ้นรูปทองเหลืองหน้าตัดหกเหลี่ยมขนาดมุม 60 องศา



รูปที่ 3.6 ลักษณะของแม่พิมพ์ในงานอัดรีดขึ้นรูปทองเหลืองหน้าตัดหกเหลี่ยมขนาดมุม 30 องศา

ความเร็วของการขึ้นรูป

เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบผลกระทบต่อการเกิดจุดบกพร่อง เมื่อความเร็วการขึ้นรูปเปลี่ยนแปลงไปในระดับต่าง ๆ ตามช่วงความเร็วขึ้นรูปที่ Lange [1] กำหนดไว้สำหรับกระบวนการอัดรีดขึ้นรูปทองเหลืองคือ ระหว่าง 500-2,000 ม.ม./วินาที ดังนั้นจึงแบ่งระดับความเร็วขึ้นรูปสำหรับการวิจัยเป็น 4 ระดับ คือ 500 , 1,000 , 1,500 และ 2,000 ม.ม./ต่อวินาที

3.4 การสร้างเส้นแนวโน้มแสดงขอบเขตความสามารถในการอัดรีดขึ้นรูป

เมื่อได้ผลการวิเคราะห์แบบจำลองจากทุกเงื่อนไขตัวแปรตามที่กำหนดแล้ว จึงวิเคราะห์ผลเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วการขึ้นรูป ขนาดมุมของแม่พิมพ์ และการเกิดจุดบกพร่องแบบโพรง จากตัวแปรดังกล่าว สำหรับสร้างเส้นแนวโน้มแสดงขอบเขตความสามารถ ในการอัดรีดขึ้นรูป (Extrusion Forming Limit Diagram) ในรูปแบบของเส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของความเร็วการขึ้นรูปและขนาดมุมของแม่พิมพ์ในระดับต่าง ๆ ที่เกิดจุดบกพร่อง และสามารถหลีกเลี่ยงการเกิดจุดบกพร่อง โดยใช้ความเร็วการขึ้นรูปและขนาดมุมของแม่พิมพ์ในระดับใดได้บ้างต่อไป

3.5 การสรุปผลการวิจัยและเสนอแนะ

การจัดสรุปผลการดำเนินงานวิจัย จากผลการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ กระบวนการอัดรีดขึ้นรูปทองเหลืองว่าให้ผลการวิจัยอย่างไร ตัวแปรกระบวนการด้านความเร็วขึ้นรูปและขนาดมุมของแม่พิมพ์ที่สถานะความเค้นต่างกันระดับต่าง ๆ มีผลกระทบอย่างไรต่อการเกิดจุดบกพร่อง แบบโพรงในงานอัดรีดขึ้นรูปทองเหลือง เมื่อเปรียบเทียบกับหลักการและทฤษฎีของนักวิจัยท่านต่าง ๆ พร้อมทั้งให้ข้อเสนอแนะต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อผู้ที่ต้องการศึกษาการลดจุดบกพร่องแบบโพรงในงานอัดรีดขึ้นรูปทองเหลืองหน้าตัดหกเหลี่ยมในลำดับต่อไป

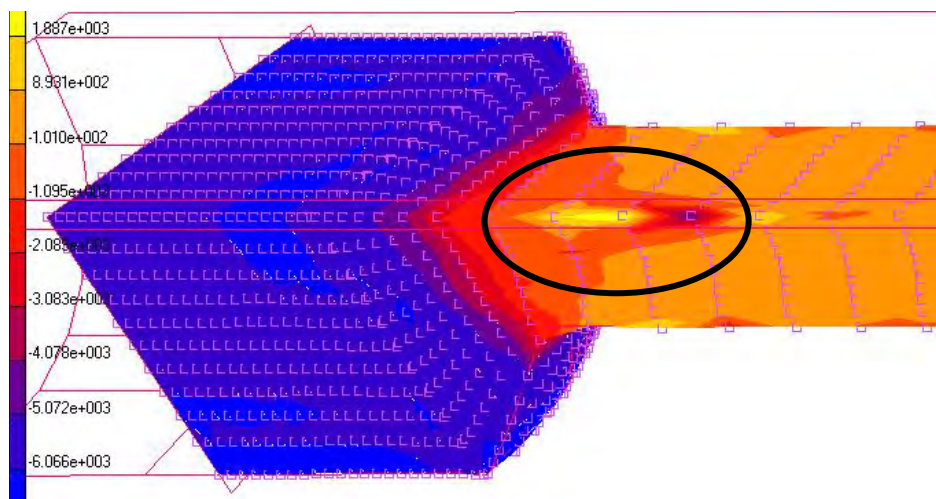
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

การลดจุดบกพร่องแบบโพรงในงานอัดรีดทองเหลือง โดยวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์จากอิทธิพลของความเร็วขึ้นรูปและมุมของแม่พิมพ์ขนาดต่าง ๆ เพื่อนำผลการวิเคราะห์ไปสร้างเส้นแนวโน้มแสดงขอบเขตความสามารถ ในการอัดรีดขึ้นรูปโดยไม่เกิดความเสียหายในแนวแกน ได้ผลการวิเคราะห์ด้านต่าง ๆ ดังนี้

1. การวิเคราะห์แบบจำลองเปรียบเทียบกับการผลิต
2. การวิเคราะห์แบบจำลองตามตัวแปรที่กำหนด
3. การสร้างเส้นแนวโน้มแสดงขอบเขตความสามารถในการอัดรีดขึ้นรูป

4.1 การวิเคราะห์แบบจำลองเปรียบเทียบกับการผลิต

เพื่อวิเคราะห์ค่าตัวแปรที่ใช้กำหนดในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ว่า ให้ผลของการประมวลผลที่มีความแม่นยำหรือใกล้เคียงความเป็นจริงเพียงใด โดยทำการวิเคราะห์จากระยะตำแหน่งของการเริ่มเกิดจุดบกพร่องแบบโพรงในชิ้นงานอัดรีดขึ้นรูปทองเหลือง ด้วยการนำค่าความเค้นหลักสูงสุด ที่ได้จากการประมวลผลของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เปรียบเทียบกับค่าความเค้นครากของวัสดุ ตามทฤษฎีการแตกหักของโลหะที่ได้จากการทดสอบ (แสดงรายละเอียดสมบัติของวัสดุในภาคผนวก ข) จากนั้นจึงหาระยะการเริ่มเกิดจุดบกพร่องจากตำแหน่งของโหนด ที่มีค่าความเค้นหลักสูงสุดมากกว่าค่าความเค้นครากของวัสดุ และทำการเปรียบเทียบระยะตำแหน่งของการเกิดจุดบกพร่องในแนวแกนขึ้นงานจากแบบจำลอง กับระยะของการเกิดจุดบกพร่องแบบโพรง จากข้อมูลจุดบกพร่องแบบโพรงในการผลิตทองเหลืองเส้น (รายละเอียดข้อมูลจุดบกพร่องแบบโพรงในการผลิตทองเหลืองเส้นแสดงในภาคผนวก ก)

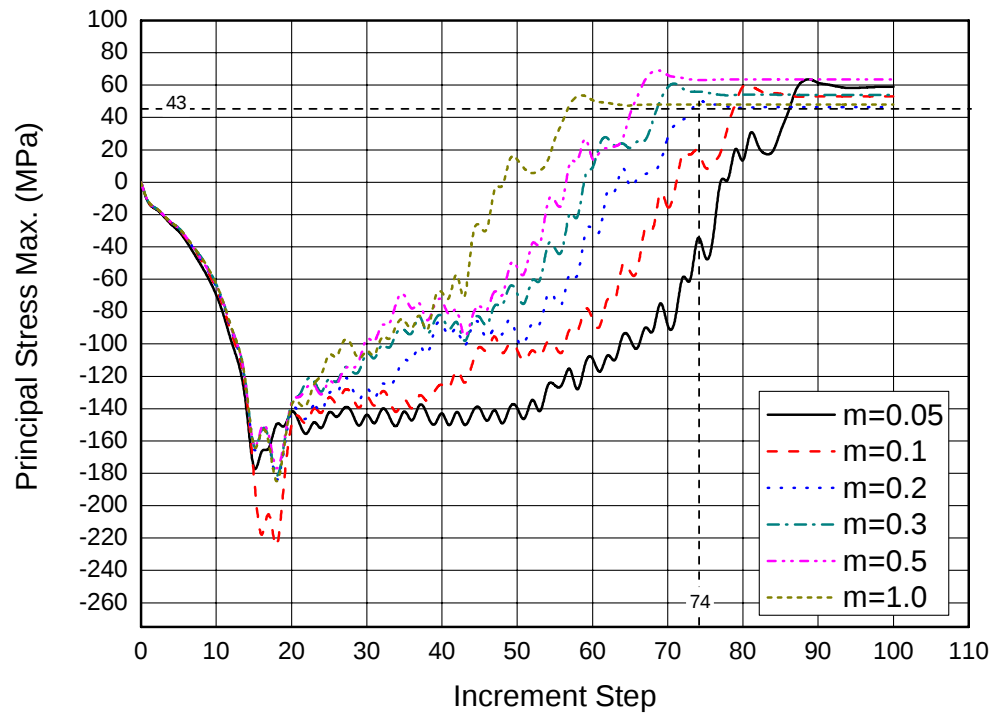


รูปที่ 4.1 บริเวณโหนดที่มีแนวโน้มจะเกิดจุดบกพร่องตามแนวแกนการอัดขึ้นรูป

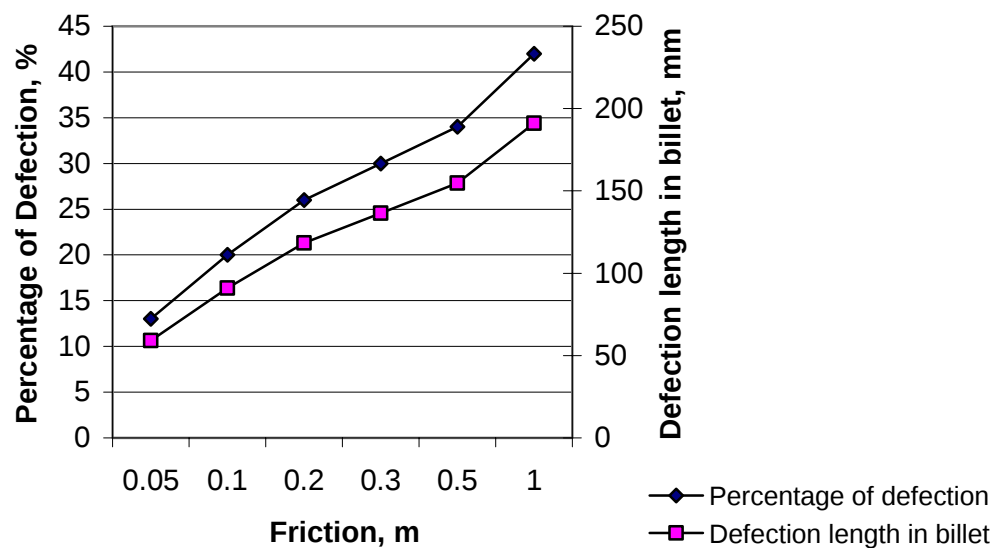
เนื่องจากการวิเคราะห์แบบจำลองจาก Contour Band และ Vector Plot สามารถแสดงผลให้เห็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการขึ้นรูปได้ แต่การวิเคราะห์ลักษณะดังกล่าวเป็นการยากสำหรับการบอกถึงตำแหน่งของโหนดที่มีแนวโน้มจะเกิดจุดบกพร่องในกระบวนการได้ ดังนั้นจึงวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของกระบวนการอัดรีดขึ้นรูปทองเหลือง ด้วยการนำค่าของความสัมพันธ์ระหว่างระยะการเคลื่อนที่และค่าความเค้นหลักสูงสุด จากผลที่แสดงแบบเส้นกราฟ เปรียบเทียบผลการประมวลโดยมีสมบัติของวัสดุตามกำหนดและมีความเสียดทาน 6 ระดับ ตามทฤษฎีของ Male และ Cockcroft [19] คือ 0.05 , 0.10 , 0.20 , 0.30 , 0.50 และ 1.00 โดยแท่งบิลเลทจะเกิดการขยายตัวเต็มกระบอกอัดคอนเทนเนอร์และผิวหน้าแม่พิมพ์ และแท่งขึ้นงานบิลเลทเกิดแรงต้านภายใน เมื่อถูกอัดตัว การเปลี่ยนรูปของแท่งบิลเลทต้องใช้แรงอัดมากขึ้น เพื่อให้แท่งบิลเลทที่มีขนาดใหญ่ไหลผ่านออกทางปากแม่พิมพ์ที่มีขนาดเล็กกว่า จึงทำให้เนื้อวัสดุมีความเครียดหรือการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างมาก โดยเฉพาะบริเวณก่อนทางเข้าปากแม่พิมพ์ จึงเป็นเหตุให้เกิดความเค้นสูงมาก ในแนวแกนวัสดุและมีแนวโน้มจะเกิดความเสียหายในแนวแกน หรือจุดบกพร่องแบบโพรงขึ้น เมื่อค่าความเค้นหลักสูงสุดที่มากกว่าค่าความเค้นครากของวัสดุ ตามหลักทฤษฎีความเค้นหลักสูงสุด คือ จะเริ่มเกิดจุดบกพร่องหรือรอยแตกของขึ้นงานขึ้น ระยะของการเกิดจุดบกพร่องมีความแตกต่างกัน และเปลี่ยนแปลงไปตามระดับความเสียดทานของกระบวนการ กล่าวคือ ระยะของการเริ่มเกิดจุดบกพร่องมีระยะทางสั้นลง ในกรณีที่ความเสียดทานของกระบวนการมีค่าสูงขึ้น และระยะของการเริ่มเกิดจุดบกพร่องมีระยะทางยาวขึ้น ในกรณีที่กระบวนการมีความเสียดทานน้อย มีผลปรากฏดังนี้

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองสำหรับเปรียบเทียบกับการผลิต

การวิเคราะห์	ผลการวิเคราะห์แบบจำลองที่มีค่าความเสียดทานระดับต่างๆ สำหรับความเร็วขึ้นรูป 728 mm/s และแม่พิมพ์ขนาดมุม 90°					
	0.05	0.1	0.2	0.3	0.5	1.0
ระยะการวิเคราะห์ (Increment Step)	87	80	74	70	66	58
ระยะการอัด (mm.)	395.85	364.00	336.70	318.50	300.30	263.90
ขนาดจุดบกพร่องที่บิลเลท (mm.)	59.15	91.00	118.30	136.50	154.70	191.10
เปอร์เซ็นต์ของจุดบกพร่อง (%)	13	20	26	30	34	42
ค่าความเค้นหลักสูงสุดของโหนดแรกที่เกิดขึ้นกำหนด (MPa)	58.52	61.85	52.63	86.61	52.51	53.58

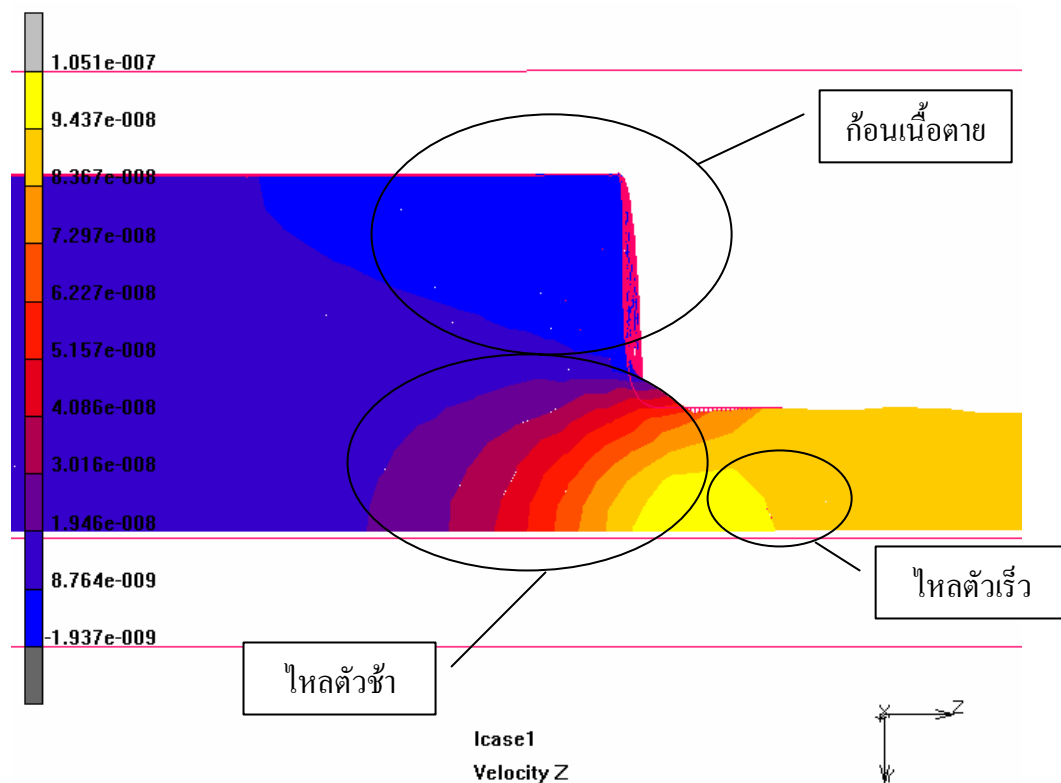


รูปที่ 4.2 เปรียบเทียบความเค้นหลักสูงสุดของโหนดแรกที่มีแนวโน้มจะเกิดจุดบกพร่องตามแนวแกน ที่ความเร็วขึ้นรูป 728 ม.ม./วินาที และมีความเสียดทานระดับต่าง ๆ สำหรับแม่พิมพ์ขนาด มุม 90 องศา



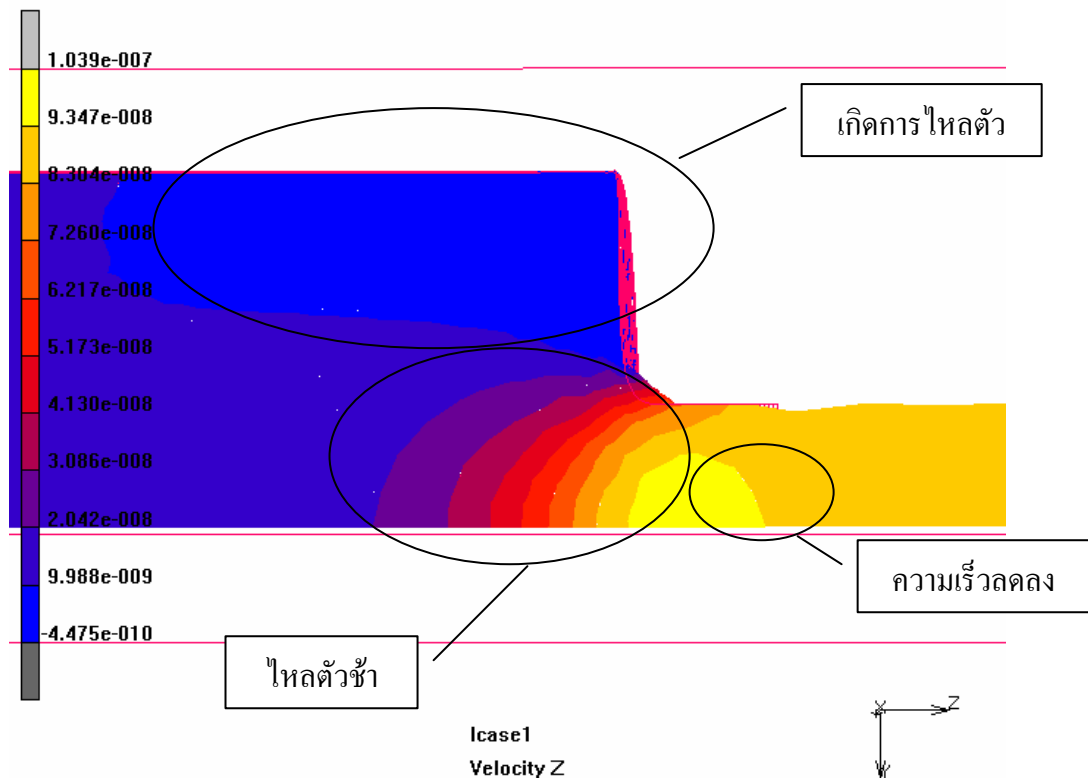
รูปที่ 4.3 เปอร์เซนต์และความยาวจุดบกพร่องในแท่งบิลเลตที่มีความเร็วขึ้นรูป 728 ม.ม./วินาที มุมแม่พิมพ์ 90 องศา และมีความเสียดทานระดับต่าง ๆ

การวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ สำหรับขั้นตอนนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบตำแหน่งที่เริ่มเกิดจุดบกพร่องกับข้อมูลจุดบกพร่องแบบโพรงในการผลิตทองเหลืองเส้น (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก) ด้วยการกำหนดสมบัติของวัสดุและความเสียหายระดับต่าง ๆ ตามที่ได้ศึกษา (รายละเอียดแสดงใน ภาคผนวก ข) พบว่าแบบจำลองที่วิเคราะห์การอัดรีดขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ ที่มีขนาดมุม 90 องศา ความเร็วของการขึ้นรูป 728 ม.ม./วินาที มีการเกิดจุดบกพร่องในทุกระดับความเสียหาย โดยแบบจำลองที่มีระดับความเสียหายต่ำสุดของการทดลอง คือ $m=0.05$ จะมีเปอร์เซ็นต์ของจุดบกพร่องที่เกิดขึ้นน้อยที่สุด คือ ร้อยละ 13 แต่เมื่อเพิ่มระดับความเสียหายในแบบจำลองให้สูงขึ้นจะส่งผลให้มีเปอร์เซ็นต์ของจุดบกพร่องมากขึ้นสูงสุด คือ ร้อยละ 42 ที่ระดับความเสียหาย $m=1.0$ แต่ระดับความเสียหายของแบบจำลอง ที่ให้ผลของการเกิดจุดบกพร่องใกล้เคียงกับข้อมูลการเกิดจุดบกพร่องแบบโพรงในการผลิตทองเหลืองมากที่สุด คือ $m=0.2$ โดยมีค่าความเค้นสูงสุดของโหนดแรกที่มีค่ามากกว่าความเค้นครากของวัสดุเท่ากับ 52.63 MPa ที่ตำแหน่งระยะการวิเคราะห์ Increment Step 74 หรือระยะการกดของแกนอัดเท่ากับ 336.70 ม.ม. สามารถคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของการขึ้นรูปขึ้นงานที่สมบูรณ์เท่ากับร้อยละ 74 หรือเปอร์เซ็นต์ของการเกิดจุดบกพร่องเท่ากับร้อยละ 26 จะสังเกตพบว่า เมื่อแบบจำลองที่ทดลองมีการเปลี่ยนแปลงระดับความเสียหายของการขึ้นรูป จะมีผลกระทบต่อ การเกิดจุดบกพร่องด้วย



รูปที่ 4.4 ความเร็วการไหลตัวของเนื้อวัสดุที่มีความแตกต่างกันและเกิดจุดบกพร่องแบบโพรงขึ้น

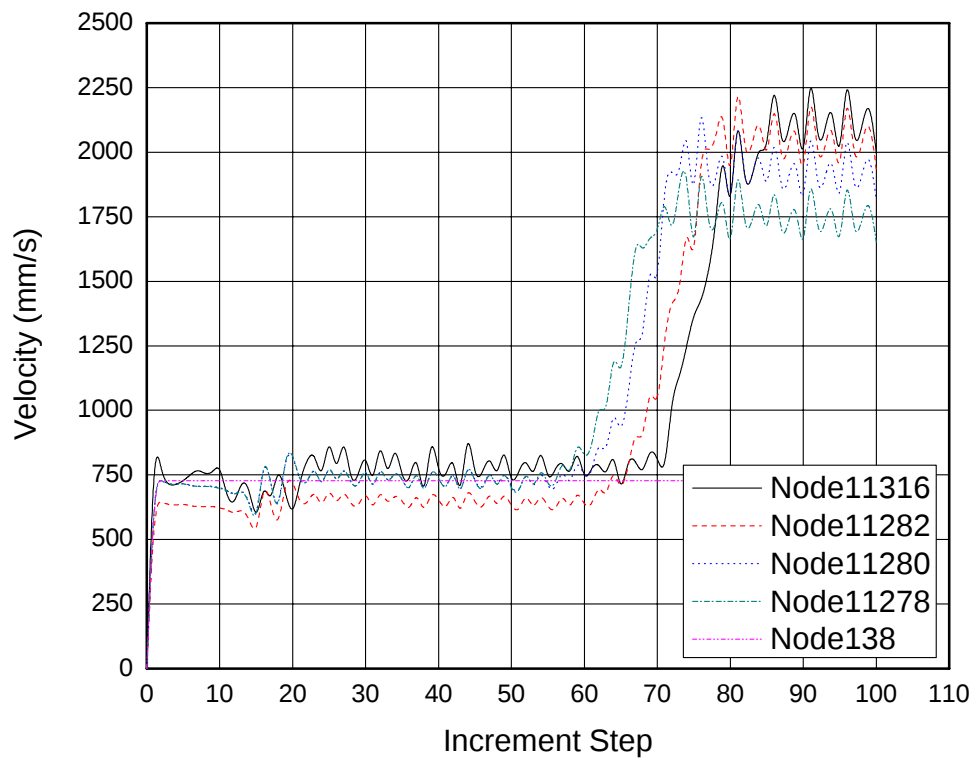
เมื่อพิจารณาถึงความเร็วการไหลตัวของของเนื้อโลหะบริเวณปากแม่พิมพ์ จะพบว่ามีความเร็วที่แตกต่างกัน โดยเนื้อโลหะบริเวณมุมอับของแม่พิมพ์ จะเกิดการหยุดการไหลตัวและเกิดเป็นก้อนเนื้อตายขึ้น ส่วนเนื้อโลหะบริเวณก่อนทางเข้าปากแม่พิมพ์จะมีความเร็วที่ลดต่ำลง เพื่อไหลตัวเข้าปากแม่พิมพ์ที่มีขนาดเล็กลง และเมื่อเนื้อวัสดุไหลผ่านปากแม่พิมพ์ได้แล้ว จะมีความเร็วสูงขึ้นเนื่องจากความเสียดทานที่กระทำจากเครื่องมือไม่มี แต่เมื่อวัสดุไหลตัวไปได้ในระยะหนึ่ง หลังจากเกิดจุดบกพร่องแล้ว ก้อนเนื้อตายจะแยกตัวและหลุดเข้าไปในปากแม่พิมพ์ ทำให้มีขนาดและความเค้นลดลง ส่งผลให้ความเร็วการไหลตัวของเนื้อโลหะบริเวณปากแม่พิมพ์ลดลงไปด้วย จึงไม่ปรากฏจุดบกพร่องแบบโพรงในบางช่วงของการอัด กล่าวคือ การเกิดจุดบกพร่องแบบโพรงดังกล่าวนี้ จะมีลักษณะของโพรงแบบสั้นและเล็ก เนื่องจากความเร็วการไหลตัวมีการเปลี่ยนแปลงสูงขึ้นและลดลงเป็นช่วง



รูปที่ 4.5 ความเร็วการไหลตัวของเนื้อวัสดุลดลงเมื่อก้อนเนื้อตายแยกตัวกัน

เมื่อทำการวิเคราะห์ความเร็วของโหนดที่ระยะต่าง ๆ ตามแกนกลางของแท่งบิลเลท เริ่มจากโหนดหมายเลข 138 ซึ่งเป็นโหนดแรกที่ไม่ไหลตัวผ่านเข้าปากแม่พิมพ์ มีความเร็วการไหลตัวคงที่ในระดับ 728 ม.ม./วินาที ตลอดกระบวนการขึ้นรูป ส่วนโหนดก่อนหน้าของโหนดที่เริ่มเกิดจุดบกพร่องคือ โหนด 11282 มีความเร็วการไหลตัว 1,775 ม.ม./วินาที มีระดับความเร็วการไหลตัวเฉลี่ย

972 ม.ม./วินาที สำหรับโหนดที่เริ่มเกิดจุดบกพร่องเป็นโหนดแรก คือ โหนดหมายเลข 11280 จะพบว่าความเร็วการไหลตัวของโหนดสูงถึง 2,165 ม.ม./วินาที มีความเร็วเฉลี่ย 1,126 ม.ม./วินาที และโหนดใกล้เคียงที่เกิดจุดบกพร่องตามมา คือ โหนด 11282 มีความเร็วการไหลตัวของโหนด 2,144 ม.ม./วินาที มีความเร็วการไหลตัวเฉลี่ย 1,156 ม.ม./วินาที และโหนดสุดท้ายของแท่งบิลเลทที่ไหลตัวผ่านปากแม่พิมพ์ คือ โหนด 11316 มีความเร็วการไหลตัวของโหนด 2,123 ม.ม./วินาที ที่ระยะการวิเคราะห์ 74 โดยมีความเร็วการไหลตัวเฉลี่ย 1,788 ม.ม./วินาที จะสังเกตเห็นได้ว่าความเร็วการไหลตัวของวัสดุหรือโหนดต่าง ๆ ที่เกิดจุดบกพร่องจะอยู่ในช่วงท้ายของแท่งบิลเลท ที่มีระดับความเร็วการไหลตัวเฉลี่ยรวม 1,471 ม.ม./วินาที



รูปที่ 4.6 ความเร็วการไหลตัวของโหนดที่เริ่มเกิดจุดบกพร่องและโหนดบริเวณใกล้เคียงที่ระดับความเลียดทาน 0.2 และมีขนาดมุมแม่พิมพ์ 90 องศา

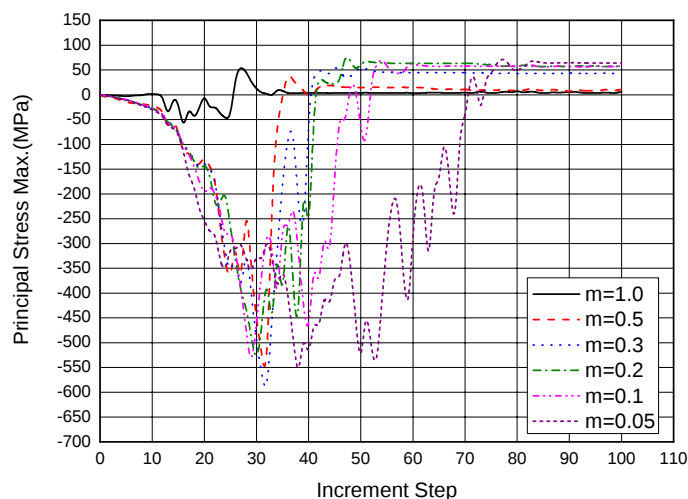
ดังนั้นการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ของกระบวนการอัดรีดขึ้นรูปทองเหลือง ด้วยการกำหนดสมบัติวัสดุและตัวแปรตามที่กำหนด (รายละเอียดแสดงใน ภาคผนวก ข) มีผลให้เกิดรอยแตกในแนวแกนหรือเกิดจุดบกพร่องแบบโพรงเช่นเดียวกับผลการผลิตทองเหลืองเส้น (แสดงรายละเอียดใน ภาคผนวก ก) จึงใช้สมบัติของวัสดุที่ได้ศึกษาและใช้หลักการทำนายความเสียหายด้วยทฤษฎีความเค้นหลักสูงสุด สำหรับการวิเคราะห์แนวโน้มของการเกิดจุดบกพร่อง จากแบบจำลองที่มีความเร็วการขึ้นรูป ขนาดมุมของแม่พิมพ์ และความเลียดทานระดับต่าง ๆ ที่ได้กำหนดไว้ต่อไป

4.2 การวิเคราะห์แบบจำลองตามตัวแปรที่กำหนด

การศึกษาจุดบกพร่องแบบโพรง ด้วยการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ จะปรากฏผลของการวิเคราะห์ในลักษณะเช่นใด เมื่อกระบวนการมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วการขึ้นรูป 4 ระดับ คือ 500 , 1,000 , 1,500 และ 2,000 มม./วินาที ขนาดมุมของแม่พิมพ์ 3 ขนาด คือ 90 องศา 60 องศา และ 30 องศา มีระดับของความเสียหายที่แตกต่างกัน 6 ระดับ คือ 0.05 , 0.1 , 0.2 , 0.3 , 0.5 และ 1.0 ซึ่งการวิเคราะห์ตำแหน่งของการเริ่มเกิดจุดบกพร่อง ในแบบจำลองจะอาศัยทฤษฎีความเค้นหลักสูงสุด สำหรับโหนดที่มีค่าความเค้นหลักสูงสุดที่สูงเกินกว่าค่าความเค้นครากของวัสดุ เป็นโหนดแรกตามแนวแกนของการขึ้นรูป เพื่อความสะดวกและเข้าใจได้ง่ายสำหรับการวิเคราะห์ผล จึงแบ่งผลข้อมูลจากการประมวลผลของแบบจำลอง ตามขนาดมุมของแม่พิมพ์จำนวน 3 กลุ่ม คือการวิเคราะห์แบบจำลองที่มีขนาดมุมของแม่พิมพ์ 90 องศา 60 องศา และ 30 องศา ซึ่งปรากฏผลการวิเคราะห์แบบจำลองดังนี้

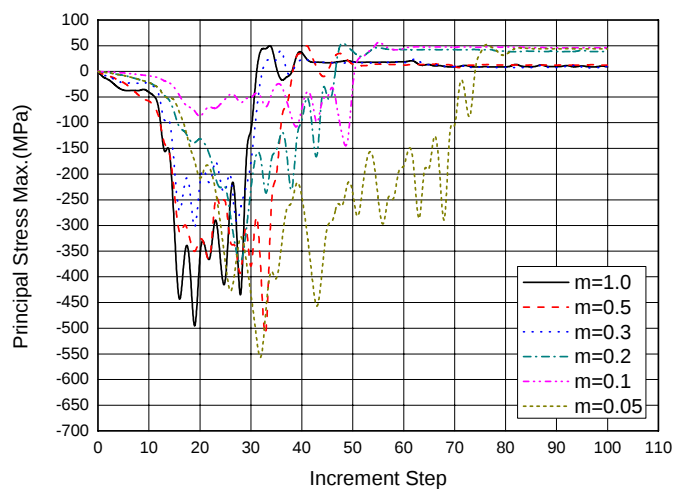
4.2.1 การวิเคราะห์แบบจำลองที่มีขนาดมุมของแม่พิมพ์ 90°

การวิเคราะห์หาตำแหน่งของการเริ่มเกิดจุดบกพร่องแบบโพรงในชิ้นงานอัดรีดขึ้นรูป ที่มีพิจารณาจากความเปลี่ยนแปลงของความเร็วการขึ้นรูปและความเสียหายระดับต่าง ๆ สำหรับแบบจำลองแม่พิมพ์ที่มีขนาดมุม 90 องศา พบว่าระยะของการเริ่มเกิดจุดบกพร่องมีความแตกต่างกัน และเปลี่ยนแปลงไปตามตัวแปรของกระบวนการที่กำหนดไว้ ทั้งขนาดของความเร็วในการขึ้นรูป และระดับความเสียหายของกระบวนการ โดยมีผลปรากฏดังนี้

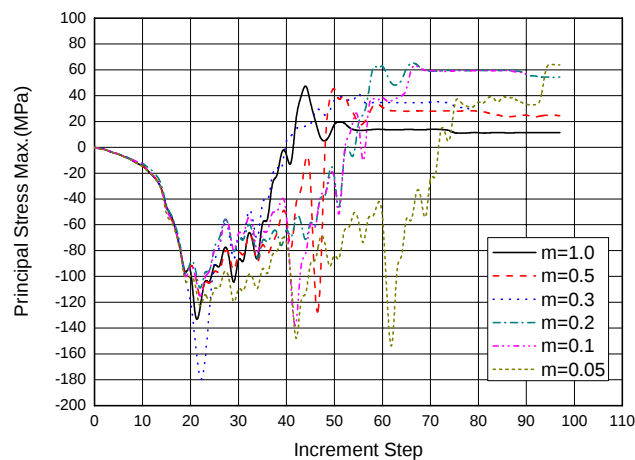


รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบความเค้นหลักสูงสุดของโหนดแรกที่มีแนวโน้ม จะเกิดจุดบกพร่องตามแนวแกนที่ความเร็วขึ้นรูป 2,000 มม./วินาที และมีความเสียหายระดับต่าง ๆ สำหรับแม่พิมพ์ขนาดมุม 90°

เมื่อนำข้อมูลจากประวัติการสร้างเส้นของความเค้นหลักสูงสุดของโหนดแรก ที่มีค่ามากกว่าค่าความเค้นครากของวัสดุมาสร้างเส้นกราฟ เปรียบเทียบระยะการวิเคราะห์ที่ค่าของความเสียหาย ระดับต่าง ๆ จะแสดงพฤติกรรมของโหนดนั้น ๆ ที่เกิดขึ้นในกระบวนการให้เห็น โดยช่วงแรกของกระบวนการโหนด จะได้รับความเค้นให้เกิดการเสียรูปแบบอัด จนกระทั่งเนื้อเต็มกระบอกอัด คอนเทนเนอร์และแผ่นแม่พิมพ์ วัสดุจึงไหลตัวออกจากปากแม่พิมพ์ด้วยความเร็วที่เพิ่มขึ้น และมีการยืดตัวออกตามทิศทางการขึ้นรูป ถ้าวัสดุมีความเร็วการไหลตัวด้านทางออกกับด้านทางเข้าปากแม่พิมพ์ที่แตกต่างกันมาก จะยังผลให้เกิดรอยแตกหรือจุดบกพร่องขึ้นตามแนวแกนกลาง ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีของ Avitzur [17] ที่ได้อธิบายถึงพฤติกรรมดังกล่าวไว้แล้วในบทที่ผ่านมา



รูปที่ 4.8 เปรียบเทียบความเค้นหลักสูงสุดของโหนดแรกที่มีแนวโน้มจะเกิดจุดบกพร่องตามแนวแกนที่ความเร็วขึ้นรูป 1,500 ม.ม./วินาที และมีความเสียหายระดับต่าง ๆ สำหรับแม่พิมพ์ขนาดมุม 90°



รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบความเค้นหลักสูงสุดของโหนดแรกที่มีแนวโน้มจะเกิดจุดบกพร่องตามแนวแกนที่ความเร็วขึ้นรูป 1,000 ม.ม./วินาที และมีความเสียหายระดับต่าง ๆ สำหรับแม่พิมพ์ขนาดมุม 90°

เมื่อพิจารณากระบวนการวิเคราะห์ของการขึ้นรูปที่ขึ้นงานเริ่มเกิดจุดบกพร่องสำหรับแม่พิมพ์มุม 90 องศา ดังผลที่ได้แสดงจะพบว่า จุดบกพร่องที่เกิดขึ้นจะมีระยะตำแหน่งของการเกิดที่ต่างกัน ในแต่ละระดับความเร็วและระดับความเสียดทานที่แตกต่างกันดังนี้

ตารางที่ 4.2 ระยะเวลาวิเคราะห์ Increment Steps ที่เริ่มเกิดจุดบกพร่องสำหรับแม่พิมพ์ขนาดมุม 90°

ความเร็วของการขึ้นรูป (mm/s)	ระยะเวลาวิเคราะห์ที่เริ่มเกิดจุดบกพร่องในชิ้นงานที่ระดับความเสียดทานต่าง ๆ (Increment Steps)					
	0.05	0.1	0.2	0.3	0.5	1.0
500	-	-	-	-	-	-
1000	94	66	58	55	50	44
1500	84	56	48	44	39	32
2000	76	53	47	42	36	27

เพื่อให้ระยะการอัดของแบบจำลองใกล้เคียงกับกระบวนการอัดรีดขึ้นรูปจริง จึงกำหนดให้มีระยะป้องกันการกระแทกของเครื่องมือ 5 มม. จากความยาวของแท่งบิลเลท 460 มม. ดังนั้นระยะการเคลื่อนที่ของแกนอัด จึงมีความยาว 455 มม. โดยแบ่งเป็นช่วงระยะของการวิเคราะห์ Increment Step สำหรับแบบจำลองเป็น 100 ช่วง การวิเคราะห์และความยาวของแต่ละช่วงการวิเคราะห์มีค่าเท่ากับ 4.55 มม. ดังนั้นจึงสามารถแสดงค่าระยะทางของการเคลื่อนที่แกนอัดได้ดังนี้

ตารางที่ 4.3 ระยะการเคลื่อนที่ของแกนอัดที่เริ่มเกิดจุดบกพร่องสำหรับแม่พิมพ์ที่มีขนาดมุม 90°

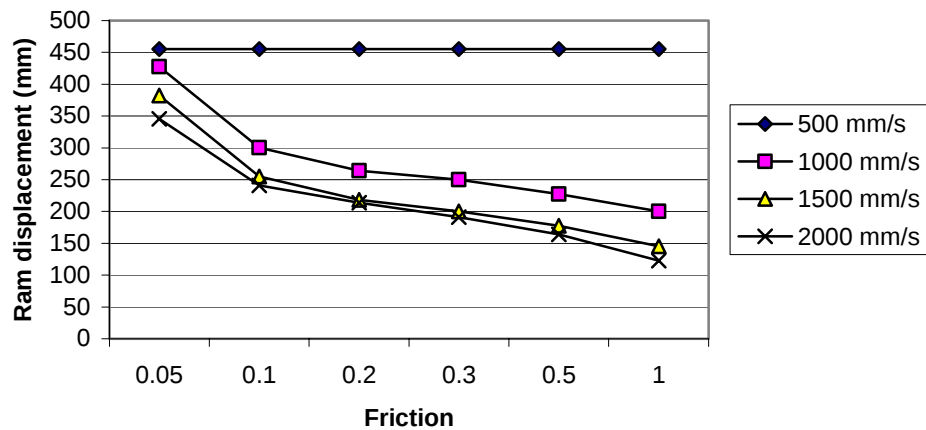
ความเร็วของการขึ้นรูป (mm/s)	ระยะการเคลื่อนที่ของแกนอัดที่เริ่มเกิดจุดบกพร่องที่ความเสียดทานระดับต่าง ๆ (Increment Steps × 4.55 mm)					
	0.05	0.1	0.2	0.3	0.5	1.0
500	-	-	-	-	-	-
1000	427.70	300.30	263.90	250.25	227.50	200.20
1500	382.20	254.80	218.40	200.2	177.45	145.60
2000	345.80	241.15	213.85	191.10	163.80	122.85

จากผลการทดลองจะแสดงให้เห็นได้ว่า การอัดรีดขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ที่มีขนาดมุม 90 องศา ที่มีความเร็วการขึ้นรูปที่ระดับต่ำสุดของการทดลองคือ 500 มม./วินาที จะไม่ปรากฏการเกิดจุดบกพร่องในแบบจำลองที่วิเคราะห์ แต่เมื่อทำการทดลองโดยเพิ่มความเร็วของการขึ้นรูปให้สูงขึ้น ตั้งแต่ระดับ 1,000-2,000 มม./วินาที จะส่งผลให้มีจุดบกพร่องเกิดขึ้นในแบบจำลอง โดยความเร็วของการขึ้นรูปที่สูงขึ้นจะส่งผลให้มีระยะของการเริ่มเกิดจุดบกพร่องที่สั้นลง หรือมีความยาวของจุดบกพร่องมากขึ้น ส่วนค่าความเค้นหลักสูงสุด จะแสดงถึงขนาดของรอยแตกของจุดบกพร่องที่เกิดขึ้น ถ้าค่าความเค้นหลักสูงสุดมีค่ามาก จะแสดงถึงรอยแตกที่มีขนาดใหญ่ตามไปด้วย ดังแสดงผลค่าความเค้นหลักสูงสุดของโหนด ดังนี้

ตารางที่ 4.4 ค่าความเค้นหลักสูงสุดของโหนดที่วิเคราะห์สำหรับแม่พิมพ์ที่มีขนาดมุม 90°

ความเร็วของการขึ้นรูป (mm/s)	ค่าความเค้นหลักสูงสุดของโหนดแรกที่มีค่ามากกว่าความเค้นครากของวัสดุ ที่ระดับความเสียดทานต่าง ๆ (MPa)					
	0.05	0.1	0.2	0.3	0.5	1.0
500	-	-	-	-	-	-
1000	64.03	63.27	56.99	45.43	50.12	53.31
1500	44.55	51.05	63.09	67.56	60.09	62.08
2000	64.11	60.02	83.46	49.26	48.14	57.79

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง ระดับความเสียดทานที่กำหนดในแบบจำลอง กับระยะตำแหน่งของการเริ่มเกิดจุดบกพร่องจะพบว่า การเพิ่มระดับของความเสียดทานในแบบจำลอง จะส่งผลให้ระยะของการเริ่มเกิดจุดบกพร่องสั้นลง หรือมีความยาวของจุดบกพร่องที่มากขึ้น เนื่องจากเนื้อวัสดุจะยึดเกาะตัวที่ผิวหน้าแม่พิมพ์ โดยเฉพาะบริเวณมุมอับของการขึ้นรูป ซึ่งจะก่อให้เกิดการหยุดตัวหรือที่เรียกว่า ก้อนเนื้อตาย (Dead Metal Zone) เกิดขึ้น ซึ่งแบบจำลองที่มีระดับความเสียดทานสูงจะทำให้วัสดุสามารถรวมตัวเป็นก้อนเนื้อตายได้ง่ายและมีปริมาณมาก ดังนั้นการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ แสดงให้เห็นได้ว่าการเกิดจุดบกพร่องตามแนวแกนของชิ้นงานสำหรับแม่พิมพ์ ที่มีขนาดมุม 90 องศา มีความสัมพันธ์กับความเร็วของการขึ้นรูป และระดับความเสียดทานของกระบวนการด้วย สามารถสร้างเป็นเส้นกราฟ เพื่อเปรียบเทียบระยะการเคลื่อนที่ของแกนอัด ที่เริ่มเกิดจุดบกพร่องในชิ้นงานสำหรับแม่พิมพ์มุม 90 องศา ที่ความเร็วการขึ้นรูปและความเสียดทานระดับต่าง ๆ ได้ดังนี้

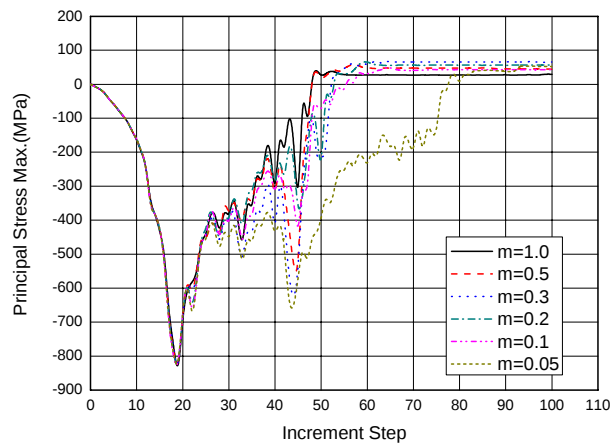


รูปที่ 4.10 ระยะการเคลื่อนที่ของแกนอัดที่เริ่มเกิดจุดบกพร่องในชิ้นงานสำหรับแม่พิมพ์มุม 90°

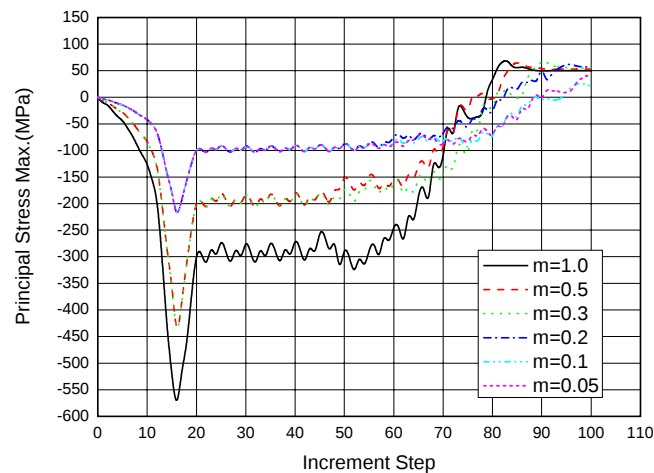
จากรูปแสดงระยะการเคลื่อนที่ของแกนอัดที่ชิ้นงาน เริ่มเกิดจุดบกพร่องสำหรับแม่พิมพ์มุม 90° องศา พบว่าไม่ปรากฏจุดบกพร่อง ในแบบจำลองที่ความเร็วขึ้นรูป 500 ม.ม./วินาที แต่สำหรับแบบจำลองที่มีความเร็วขึ้นรูปที่สูงขึ้นในระดับ 1,000 , 1,500 และ 2,000 ม.ม./วินาที จะเกิดจุดบกพร่องขึ้น โดยมีแนวโน้มที่คล้ายคลึงกัน คือ มีระยะของการเกิดจุดบกพร่องที่สั้นลง เมื่อมีระดับความเสียดทานเพิ่มขึ้น ดังนั้นการวิเคราะห์การเกิดจุดบกพร่องแบบโพรงด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในชิ้นงานอัดรีดขึ้นรูป สำหรับแม่พิมพ์มุม 90° องศา พบว่าตัวแปรด้านความเร็วของการขึ้นรูป และระดับความเสียดทานในกระบวนการมีผลกระทบต่อระยะของการเริ่มเกิดจุดบกพร่อง ที่แตกต่างกันเมื่อค่าตัวแปรดังกล่าว มีการเปลี่ยนแปลง โดยจุดบกพร่องจะปรากฏให้เห็นที่ระยะกคมาก เมื่อความเร็วการขึ้นรูปและความเสียดทานน้อย และจุดบกพร่องจะปรากฏให้เห็นที่ระยะกคสั้นลง เมื่อความเร็วการขึ้นรูปและความเสียดทานเพิ่มมากขึ้น

4.2.2 การวิเคราะห์แบบจำลองที่มีขนาดมุมของแม่พิมพ์ 60°

การวิเคราะห์หาตำแหน่งของการเริ่มเกิดจุดบกพร่องแบบโพรงในชิ้นงานอัดรีดขึ้นรูป ที่มีพิจารณา จากความเปลี่ยนแปลงของความเร็ว การขึ้นรูปและความเสียดทานระดับต่าง ๆ สำหรับแบบจำลองแม่พิมพ์ที่มีขนาดมุม 60° องศา พบว่าระยะของการเริ่มเกิดจุดบกพร่องมีความแตกต่างกัน และเปลี่ยนแปลงไปตามตัวแปรของกระบวนการที่กำหนดไว้ ทั้งขนาดของความเร็วในการขึ้นรูปและระดับความเสียดทานของกระบวนการ โดยมีผลปรากฏดังนี้



รูปที่ 4.11 เปรียบเทียบความเค้นหลักสูงสุดของโหนดแรกที่มีแนวโน้มจะเกิดจุดบกพร่องตามแนวแกนที่ความเร็วขึ้นรูป 2,000 ม.ม./วินาที และมีความเสียหายระดับต่าง ๆ สำหรับแม่พิมพ์ขนาดมุม 60°



รูปที่ 4.12 เปรียบเทียบความเค้นหลักสูงสุดของโหนดแรกที่มีแนวโน้มจะเกิดจุดบกพร่องตามแนวแกนที่ความเร็วขึ้นรูป 1,500 ม.ม./วินาที และมีความเสียหายระดับต่าง ๆ สำหรับแม่พิมพ์ขนาดมุม 60°

เมื่อนำข้อมูลความเค้นหลักของโหนดที่วิเคราะห์มาสร้างเส้นกราฟ เปรียบเทียบระยะการวิเคราะห์ที่ค่าของความเสียหายระดับต่าง ๆ จะแสดงพฤติกรรมของโหนดนั้น ๆ ที่เกิดขึ้นในกระบวนการให้เห็นเช่นเดียวกับการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ขนาดมุม 90 องศา โดยช่วงแรกของกระบวนการโหนดจะได้รับความเค้นให้เกิดการเสียรูปแบบอัดจนเต็มกระบอกอัดคอนเทนเนอร์ วัสดุจึงไหลตัวออกจากแม่พิมพ์ด้วยความเร็วที่เพิ่มขึ้น และมีการยึดตัวตามทิศทางของการขึ้นรูป ถ้าวัสดุมีความเร็วการไหล

ตัวด้านทางออกกับด้านทางเข้าปากแม่พิมพ์ที่แตกต่างกันมาก จะมีผลให้เกิดรอยแตกขึ้นตามแนวแกนกลาง ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีของ Avitzur [17] ดังที่ได้อธิบายไว้แล้วในบทที่ผ่านมา

ตารางที่ 4.5 ระยะการวิเคราะห์ Increment Steps ที่เริ่มเกิดจุดบกพร่องสำหรับแม่พิมพ์ขนาดมุม 60°

ความเร็วของการขึ้นรูป (mm/s)	ระยะการวิเคราะห์ที่เริ่มเกิดจุดบกพร่องในชิ้นงานที่ระดับความเสียหายต่างๆ (Increment Steps)					
	0.05	0.1	0.2	0.3	0.5	1.0
500	-	-	-	-	-	-
1000	-	-	-	-	-	-
1500	-	-	90	89	87	82
2000	93	74	58	55	53	49

เพื่อให้ระยะการอัดของแบบจำลองใกล้เคียงกับกระบวนการอัดรีดขึ้นรูปจริง จึงกำหนดให้มีระยะป้องกันการแตกของเครื่องมือ 5 มม. จากความยาวแท่งบิลเลท 460 มม. ดังนั้นการเคลื่อนที่ของแกนอัดจึงมีความยาว 455 มม. โดยแบ่งเป็นช่วงระยะของการวิเคราะห์ สำหรับแบบจำลองเป็น 100 ช่วง ซึ่งความยาวของแต่ละช่วงการวิเคราะห์มีค่าเท่ากับ 4.55 มม. สามารถแสดงค่าระยะทางของการเคลื่อนที่แกนอัดได้ดังนี้

ตารางที่ 4.6 ระยะการเคลื่อนที่ของแกนอัดที่เริ่มเกิดจุดบกพร่องสำหรับแม่พิมพ์ที่มีขนาดมุม 60°

ความเร็วของการขึ้นรูป (mm/s)	ระยะการเคลื่อนที่ของแกนอัดที่เริ่มเกิดจุดบกพร่องที่ความเสียหายระดับต่างๆ (Increment Steps $\times$ 4.55 mm)					
	0.05	0.1	0.2	0.3	0.5	1.0
500	-	-	-	-	-	-
1000	-	-	-	-	-	-
1500	-	-	409.50	404.95	395.85	373.10
2000	423.15	336.70	263.90	250.25	241.15	222.95

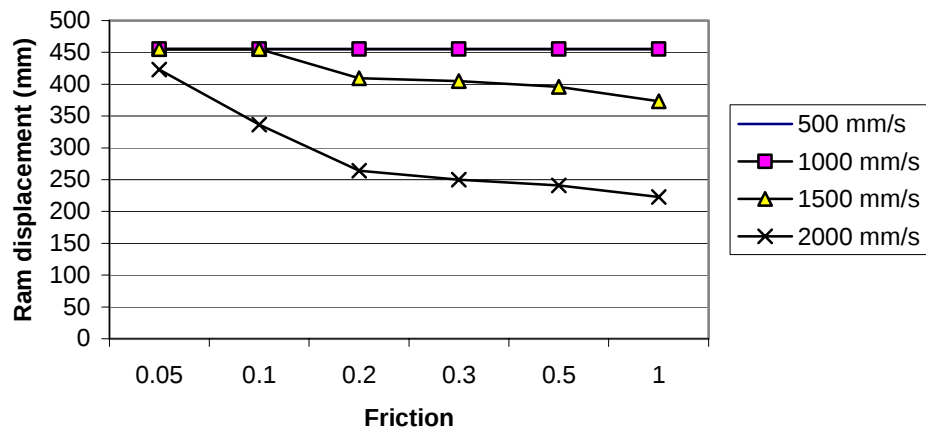
ผลการทดลองที่แสดงจะสังเกตได้ว่า การอัดรีดขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ที่มีขนาดมุม 60 องศา ที่มีความเร็วการขึ้นรูปของการทดลองที่ระดับ 500 และ 1,000 มม./วินาที จะไม่ปรากฏการเกิดจุดบกพร่องใน

แบบจำลองที่วิเคราะห์ แต่เมื่อทำการทดลองโดยเพิ่มความเร็วของการขึ้นรูปให้สูงขึ้นในระดับ 1,500 และ 2,000 ม.ม./วินาที จะส่งผลให้มีจุดบกพร่องเกิดขึ้นในแบบจำลอง โดยความเร็วของการขึ้นรูปที่สูงขึ้น จะส่งผลให้มีระยะของการเริ่มเกิดจุดบกพร่องที่สั้นลง หรือมีความยาวของจุดบกพร่องมากขึ้น ส่วนค่าความเค้นหลักสูงสุดจะแสดงถึงขนาดของรอยแตกของจุดบกพร่องที่เกิดขึ้น ถ้าค่าความเค้นหลักสูงสุดมีค่ามาก จะแสดงถึงรอยแตกที่มีขนาดใหญ่ตามไปด้วย ดังแสดงผลค่าความเค้นหลักสูงสุดของโหนด ดังนี้

ตารางที่ 4.7 ค่าความเค้นหลักสูงสุดของโหนดที่วิเคราะห์สำหรับแม่พิมพ์ที่มีขนาดมุม 60°

ความเร็วของการขึ้นรูป (mm/s)	ค่าความเค้นหลักสูงสุดของโหนดแรกที่มีค่ามากกว่าความเค้นครากของวัสดุ ที่ระดับความเสียดทานต่าง ๆ (MPa)					
	0.05	0.1	0.2	0.3	0.5	1.0
500	-	-	-	-	-	-
1000	-	-	-	-	-	-
1500	-	-	62.0791	60.05	55.90	67.15
2000	54.59	44.54	62.7422	67.09	53.57	53.91

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเสียดทานที่กำหนดในแบบจำลองกับระยะตำแหน่งของการเริ่มเกิดจุดบกพร่อง จะพบว่า การเพิ่มระดับของความเสียดทานในแบบจำลอง จะส่งผลให้ระยะของการเริ่มเกิดจุดบกพร่องสั้นลง หรือมีความยาวของจุดบกพร่องที่มากขึ้น เนื่องจากเนื้อวัสดุจะยึดเกาะตัวที่ผิวหน้าแม่พิมพ์ โดยเฉพาะบริเวณมุมอับของการขึ้นรูป ซึ่งจะก่อให้เกิดการหลุดตัวหรือที่เรียกว่า ก้อนเนื้อตายเกิดขึ้น ซึ่งแบบจำลองที่มีระดับความเสียดทานสูง จะทำให้วัสดุสามารถรวมตัวเป็นก้อนเนื้อตายได้ง่ายและมีปริมาณมาก และจากผลการทดลองที่ระดับความเร็วของการขึ้นรูป 1,500 ม.ม./วินาที จะไม่ปรากฏจุดบกพร่องขึ้นที่มีความเสียดทาน 0.05 และ 0.1 เนื่องจากความเร็วของการขึ้นรูปที่ระดับความเสียดทานดังกล่าวมีค่าน้อย ซึ่งไม่มากพอที่จะสร้างความเค้นในชิ้นงานให้สูงเกินความเค้นครากของวัสดุได้ ดังนั้น การวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ แสดงให้เห็นได้ว่าการเกิดจุดบกพร่องตามแนวแกนของชิ้นงานสำหรับแม่พิมพ์ที่มีขนาดมุม 60 องศา มีความสัมพันธ์กับความเร็วของการขึ้นรูปและระดับความเสียดทานของกระบวนการด้วย สามารถสร้างเป็นเส้นกราฟเพื่อเปรียบเทียบระยะการเคลื่อนที่ของแกนอัด ที่เริ่มเกิดจุดบกพร่องในชิ้นงาน สำหรับแม่พิมพ์มุม 60 องศา ที่ความเร็วการขึ้นรูปและความเสียดทานระดับต่าง ๆ ได้ดังนี้

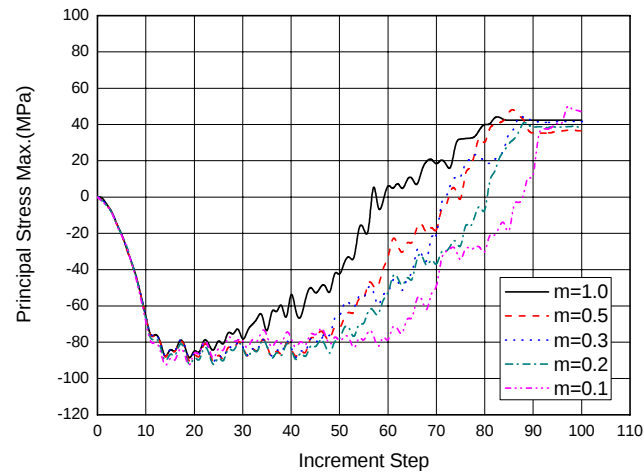


รูปที่ 4.13 ระยะการเคลื่อนที่ของแกนอัดที่เริ่มเกิดจุดบกพร่องในชิ้นงานสำหรับแม่พิมพ์มุม 60°

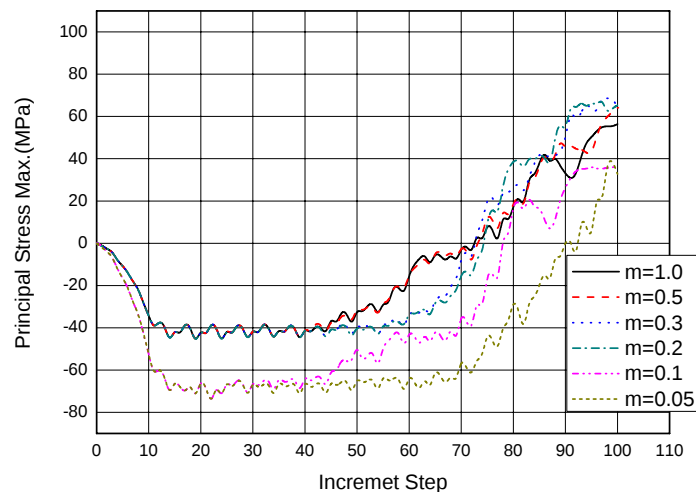
จากรูปแสดงระยะการเคลื่อนที่ของแกนอัดที่ชิ้นงาน เริ่มเกิดจุดบกพร่องสำหรับแม่พิมพ์มุม 60° ปรากฏว่า ไม่ปรากฏจุดบกพร่องในทุกระดับความเสียดทาน จากแบบจำลองที่มีความเร็วของการขึ้นรูป 500 และ 1,000 มม./วินาที แต่สำหรับการขึ้นรูปที่มีระดับของความเสียดทาน 0.05 และ 0.1 ในแบบจำลองที่ใช้ความเร็วขึ้นรูป 1,500 มม./วินาที จะไม่ปรากฏจุดบกพร่องขึ้น เนื่องจากความเสียดทานและความเร็วของการขึ้นรูป ที่ระดับดังกล่าวมีค่าน้อยและไม่มากพอที่จะสร้างก้อนเนื้อตาย ให้มีขนาดวิกฤติได้ และไม่สามารถที่จะทำให้ความเค้นในชิ้นงานสูง เกินความเค้นครากของวัสดุได้ สำหรับแบบจำลองที่มีความเร็วขึ้นรูปที่สูงขึ้นในระดับ 2,000 มม./วินาที มีการเกิดจุดบกพร่องในทุกระดับค่าความเสียดทานและมีความยาวของจุดบกพร่องมากขึ้น เมื่อระดับความเสียดทานเพิ่มขึ้น

4.2.2 การวิเคราะห์แบบจำลองที่มีขนาดมุมของแม่พิมพ์ 30°

การวิเคราะห์หาตำแหน่งของการเริ่มเกิดจุดบกพร่องแบบโพรงในชิ้นงานอัดรีดขึ้นรูป ที่มีพิจารณาจากความเปลี่ยนแปลงของความเร็วการขึ้นรูปและความเสียดทานระดับต่าง ๆ สำหรับแบบจำลองแม่พิมพ์ที่มีขนาดมุม 30° ปรากฏว่าระยะของการเริ่มเกิดจุดบกพร่องมีความแตกต่างกัน และเปลี่ยนแปลงไปตามตัวแปรของกระบวนการที่กำหนดไว้ ทั้งขนาดของความเร็วในการขึ้นรูป และระดับความเสียดทานของกระบวนการ โดยมีผลปรากฏดังนี้



รูปที่ 4.14 เปรียบเทียบความเค้นหลักสูงสุดของโหนดแรกที่มีแนวโน้มจะเกิดจุดบกพร่องตามแนวแกนที่ความเร็วขึ้นรูป 2,000 ม.ม./วินาที และมีความเสียดทานระดับต่าง ๆ สำหรับแม่พิมพ์ขนาดมุม 30°



รูปที่ 4.15 เปรียบเทียบความเค้นหลักสูงสุดของโหนดแรกที่มีแนวโน้มจะเกิดจุดบกพร่องตามแนวแกนที่ความเร็วขึ้นรูป 1,500 ม.ม./วินาที และมีความเสียดทานระดับต่าง ๆ สำหรับแม่พิมพ์ขนาดมุม 30°

เมื่อนำข้อมูลของความเค้นหลักสูงสุดของโหนดที่วิเคราะห์ มาสร้างเส้นกราฟเปรียบเทียบ ระยะเวลาวิเคราะห์ ที่ค่าของความเสียดทานระดับต่าง ๆ จะแสดงพฤติกรรมของโหนดนั้น ๆ ที่เกิดขึ้นในกระบวนการให้เห็นเช่นเดียวกันกับการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ขนาดมุม 90 องศา และ 60 องศา โดยโหนดที่วิเคราะห์ในช่วงแรกของกระบวนการจะได้รับความเค้นให้เกิดการเสียรูปแบบอัดจนเต็มกระบอกอัดคอนเทนเนอร์ วัสดุจึงไหลตัวออกจากแม่พิมพ์ด้วยความเร็วที่เพิ่มขึ้น และมีการยึดตัวตามทิศทาง

การขึ้นรูป ถ้าวัสดุมีความเร็วการไหลตัวด้านทางออกกับด้านทางเข้าปากแม่พิมพ์ที่แตกต่างกันมาก จะมีผลให้เกิดรอยแตกขึ้นตามแนวแกนกลาง ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีของ Avitzur [17]

ตารางที่ 4.8 ระยะการวิเคราะห์ Increment Steps ที่เริ่มเกิดจุดบกพร่องสำหรับแม่พิมพ์ขนาดมุม 30°

ความเร็วของการขึ้นรูป (mm/s)	ระยะการวิเคราะห์ที่เริ่มเกิดจุดบกพร่องในชิ้นงานที่ระดับความเสียดทานต่างๆ (Increment Steps)					
	0.05	0.1	0.2	0.3	0.5	1.0
500	-	-	-	-	-	-
1000	-	-	-	-	-	-
1500	-	-	91	90	89	86
2000	-	97	88	87	85	82

เพื่อให้ระยะการอัดของแบบจำลองใกล้เคียงกับกระบวนการอัดรีดขึ้นรูปจริง จึงกำหนดให้มีระยะป้องกันการแตกของเครื่องมือ 5 มม. จากความยาวแท่งบิลเลท 460 มม. ดังนั้นการเคลื่อนที่ของแกนอัดจึงมีความยาว 455 มม. โดยแบ่งเป็นช่วงระยะของการวิเคราะห์ Increment Step สำหรับแบบจำลองเป็น 100 ช่วง ซึ่งความยาวของแต่ละช่วงการวิเคราะห์มีค่าเท่ากับ 4.55 มม. สามารถแสดงค่าระยะทางของการเคลื่อนที่แกนอัดได้ดังนี้

ตารางที่ 4.9 ระยะการเคลื่อนที่ของแกนอัดที่เริ่มเกิดจุดบกพร่องสำหรับแม่พิมพ์ที่มีขนาดมุม 30°

ความเร็วของการขึ้นรูป (mm/s)	ระยะการเคลื่อนที่ของแกนอัดที่เริ่มเกิดจุดบกพร่องที่ความเสียดทานระดับต่างๆ (Increment Steps $\times$ 4.55 mm)					
	0.05	0.1	0.2	0.3	0.5	1.0
500	-	-	-	-	-	-
1000	-	-	-	-	-	-
1500	-	-	414.05	409.50	404.95	391.30
2000	-	441.35	400.40	395.85	386.75	373.10

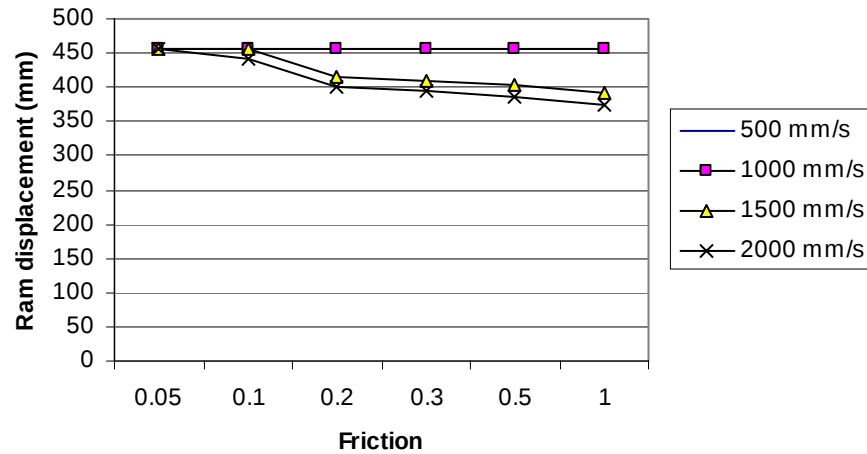
ผลการทดลองที่แสดงจะสังเกตได้ว่า การอัดรีดขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ที่มีขนาดมุม 30 องศา ที่มีความเร็วการขึ้นรูปของการทดลองที่ระดับ 500 และ 1,000 ม.ม./วินาที จะไม่ปรากฏการเกิดจุดบกพร่องในแบบจำลองที่วิเคราะห์ แต่เมื่อทำการทดลองโดยเพิ่มความเร็วของการขึ้นรูปให้สูงขึ้นในระดับ 1,500 และ 2,000 ม.ม./วินาที จะส่งผลให้มีจุดบกพร่องเกิดขึ้นในแบบจำลอง โดยความเร็วของการขึ้นรูปที่สูงขึ้นจะส่งผลให้มีระยะของการเริ่มเกิดจุดบกพร่องที่สั้นลง หรือมีความยาวของจุดบกพร่องมากขึ้น ส่วนค่าความเค้นหลักสูงสุด จะแสดงถึงขนาดของรอยแตกของจุดบกพร่องที่เกิดขึ้น ถ้าค่าความเค้นหลักสูงสุดมีค่ามาก จะแสดงถึงรอยแตกที่มีขนาดใหญ่ตามไปด้วย ดังแสดงผลค่าความเค้นหลักสูงสุดของโหนด ดังนี้

ตารางที่ 4.10 ค่าความเค้นหลักสูงสุดของโหนดที่วิเคราะห์สำหรับแม่พิมพ์ที่มีขนาดมุม 30°

ความเร็วของการขึ้นรูป (mm/s)	ค่าความเค้นหลักสูงสุดของโหนดแรกที่มีค่ามากกว่าความเค้นครากของวัสดุ ที่ระดับความเสียดทานต่างๆ (MPa)					
	0.05	0.1	0.2	0.3	0.5	1.0
500	-	-	-	-	-	-
1000	-	-	-	-	-	-
1500	-	-	66.8421	68.39	59.54	63.99
2000	-	60.58	63.8996	59.69	70.96	48.77

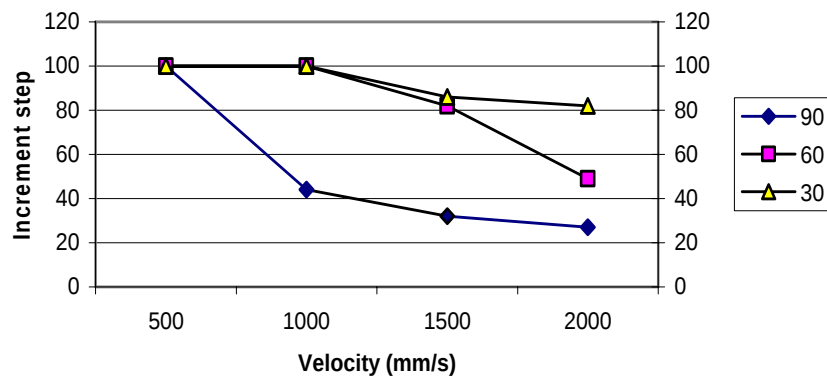
เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเสียดทานที่กำหนด ในแบบจำลองกับระยะตำแหน่งของการเริ่มเกิดจุดบกพร่อง จะพบว่า การเพิ่มระดับของความเสียดทานในแบบจำลอง จะส่งผลให้ระยะของการเริ่มเกิดจุดบกพร่องสั้นลง หรือมีความยาวของจุดบกพร่องที่มากขึ้น เนื่องจากเนื้อวัสดุจะยึดเกาะตัวที่ผิวหน้าแม่พิมพ์ โดยเฉพาะบริเวณมุมอับของการขึ้นรูปซึ่งจะก่อให้เกิดการหลุดตัวหรือที่เรียกว่า ก้อนเนื้อตาย เกิดขึ้น ซึ่งแบบจำลองที่มีระดับความเสียดทานสูง จะทำให้วัสดุสามารถรวมตัวเป็นก้อนเนื้อตายได้ง่ายและมีปริมาณมาก จากผลการทดลองที่ระดับความเร็วของการขึ้นรูป 1,500 ม.ม./วินาที จะไม่ปรากฏจุดบกพร่องขึ้นที่มีความเสียดทาน 0.05 และ 0.1 และสำหรับการทดลองที่ระดับความเร็วของการขึ้นรูป 2,000 ม.ม./วินาที จะไม่ปรากฏจุดบกพร่องขึ้นที่มีความเสียดทาน 0.05 เนื่องจากความเร็วการขึ้นรูปที่ระดับความเสียดทานดังกล่าวมีค่าน้อย ซึ่งไม่มากพอที่จะสร้างความเค้นในชิ้นงานให้สูงเกินความเค้นครากของวัสดุได้ ดังนั้น การวิเคราะห์แบบจำลองของไฟไนต์เอลิเมนต์ แสดงให้เห็นได้ว่าการเกิดจุดบกพร่องตามแนวแกนของชิ้นงาน สำหรับแม่พิมพ์ที่มีขนาดมุม 30 องศา มีความสัมพันธ์กับความเร็วของการขึ้นรูป และระดับความเสียดทานของกระบวนการด้วย สามารถสร้างเป็นเส้นกราฟ เพื่อเปรียบเทียบระยะการเคลื่อนที่ของแกนอัดที่เริ่ม

เกิดจุดบกพร่องในชิ้นงานสำหรับแม่พิมพ์มุม 30 องศา ที่ความเร็วการขึ้นรูปและความเสียดทานระดับต่าง ๆ ได้ดังนี้

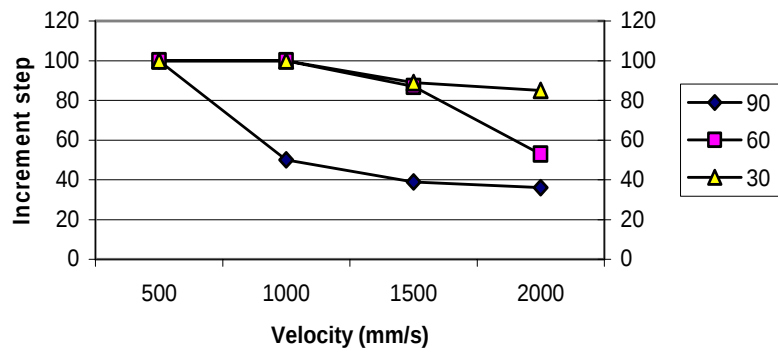


รูปที่ 4.16 ระยะการเคลื่อนที่ของแกนอัดที่เริ่มเกิดจุดบกพร่องในชิ้นงานสำหรับแม่พิมพ์มุม 30°

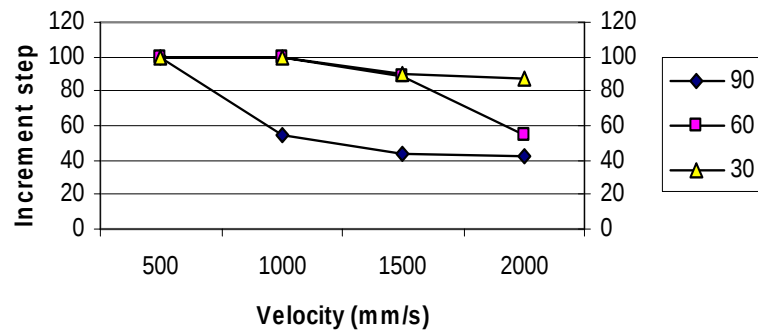
จากรูปแสดงระยะการเคลื่อนที่ของแกนอัดที่ขึ้นงาน เริ่มเกิดจุดบกพร่องสำหรับแม่พิมพ์มุม 60 องศา พบว่าไม่ปรากฏจุดบกพร่องในทุกระดับความเสียดทาน จากแบบจำลองที่มีความเร็วของการขึ้นรูป 500 และ 1,000 ม.ม./วินาที แต่สำหรับการขึ้นรูปที่มีระดับของความเสียดทาน 0.05 และ 0.1 ในแบบจำลองที่ใช้ความเร็วขึ้นรูป 1,500 ม.ม./วินาที จะไม่ปรากฏจุดบกพร่องขึ้น เนื่องจากความเสียดทานและความเร็วของการขึ้นรูป ที่ระดับดังกล่าวมีค่าน้อยและไม่มากพอที่จะสร้างก้อนเนื้อตาย ให้มีขนาดวิกฤติได้ และไม่สามารถที่จะทำให้ความเค้นในชิ้นงานสูง เกินความเค้นครากของวัสดุได้ สำหรับแบบจำลองที่มีความเร็วขึ้น รูปที่สูงขึ้นในระดับ 2,000 ม.ม./วินาที มีการเกิดจุดบกพร่องในทุกระดับค่าความเสียดทานและมีความยาวของจุดบกพร่องมากขึ้น เมื่อระดับความเสียดทานเพิ่มขึ้น



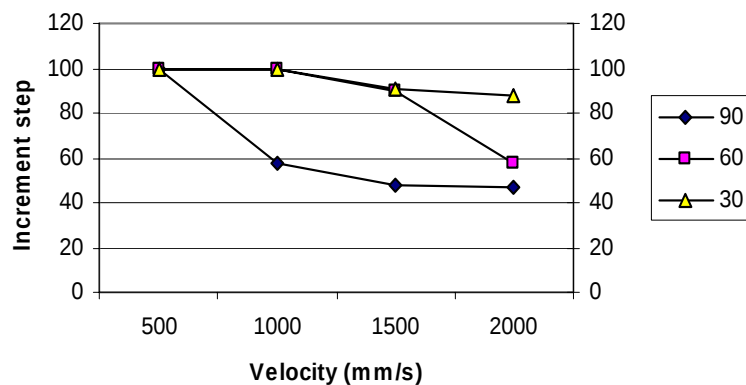
รูปที่ 4.17 การเปรียบเทียบระยะทางการเคลื่อนที่ของแกนอัดที่ทำให้ชิ้นงานเริ่มเกิดจุดบกพร่อง ที่มีระดับความเสียดทาน 1.0 สำหรับแม่พิมพ์ขนาดมุม 30° 60° และ 90°



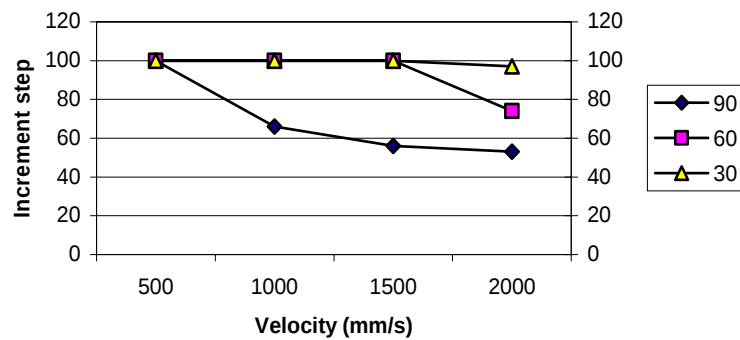
รูปที่ 4.18 การเปรียบเทียบระยะทางการเคลื่อนที่ของแกนอัดที่ทำให้ชิ้นงานเริ่มเกิดจุดบกพร่อง
ที่มีระดับความเสียหาย 0.5 สำหรับแม่พิมพ์ขนาดมุม 30° 60° และ 90°



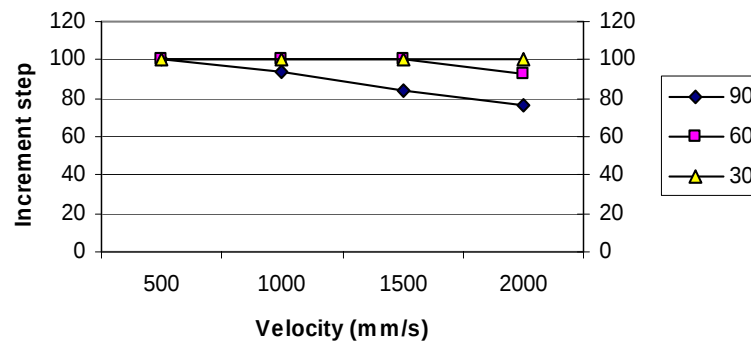
รูปที่ 4.19 การเปรียบเทียบระยะทางการเคลื่อนที่ของแกนอัดที่ทำให้ชิ้นงานเริ่มเกิดจุดบกพร่อง
ที่มีระดับความเสียหาย 0.3 สำหรับแม่พิมพ์ขนาดมุม 30° 60° และ 90°



รูปที่ 4.20 การเปรียบเทียบระยะทางการเคลื่อนที่ของแกนอัดที่ทำให้ชิ้นงานเริ่มเกิดจุดบกพร่อง
ที่มีระดับความเสียหาย 0.2 สำหรับแม่พิมพ์ขนาดมุม 30° 60° และ 90°



รูปที่ 4.21 การเปรียบเทียบระยะทางการเคลื่อนที่ของแกนอัดที่ทำให้ชิ้นงานเริ่มเกิดจุดบกพร่อง ที่มีระดับความเสียดทาน 0.1 สำหรับแม่พิมพ์ขนาดมุม 30° 60° และ 90°



รูปที่ 4.22 การเปรียบเทียบระยะทางการเคลื่อนที่ของแกนอัดที่ทำให้ชิ้นงานเริ่มเกิดจุดบกพร่อง ที่มีระดับความเสียดทาน 0.05 สำหรับแม่พิมพ์ขนาดมุม 30° 60° และ 90°

เพื่อเปรียบเทียบระยะทางการเคลื่อนที่ของแกนอัด ที่ทำให้ชิ้นงานเริ่มเกิดจุดบกพร่อง สำหรับแม่พิมพ์ทุกขนาดมุม ทำให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของระยะการเริ่มเกิดจุดบกพร่องที่เปลี่ยนไป ตามขนาดของความเร็วขึ้นรูป และระดับของความเสียดทานได้ชัดเจนยิ่งขึ้น และแสดงให้เห็นว่าการเกิดจุดบกพร่องตามแนวแกนมีแนวโน้มที่จะเกิดเร็วขึ้น เมื่อเปลี่ยนแปลงขนาดความเร็ว การขึ้นรูปและความเสียดทานให้สูงขึ้นหรืออย่างใดอย่างหนึ่ง ในแต่ละขนาดมุมของแม่พิมพ์ เนื่องจากความเร็วของการขึ้นรูป ระดับความเสียดทานและขนาดมุมของแม่พิมพ์ มีผลต่อการเกาะติดของเนื้อวัสดุบริเวณผิวกระบอกอัด และผิวหน้าแม่พิมพ์ที่มีผลต่อขนาดของก้อนเนื้อตาย และส่งผลกระทบต่อระดับการเกิดความเค้นในชิ้นงานในที่สุด ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีของ Avitzur [17] ที่กล่าวถึงการไหลตัวในงานขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์รูปกรวย และค่าความเค้นหลักสูงสุด จะแสดงถึงขนาดของรอยแตกของจุดบกพร่องที่เกิดขึ้น ถ้าค่าความเค้นหลักสูงสุดมีค่ามาก จะแสดงถึงรอยแตกที่มีขนาดใหญ่ตามไปด้วย ระดับความเร็วของการขึ้นรูปและความเสียดทาน มีผลกระทบต่อความเค้นที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน และรูปแบบการไหลตัว

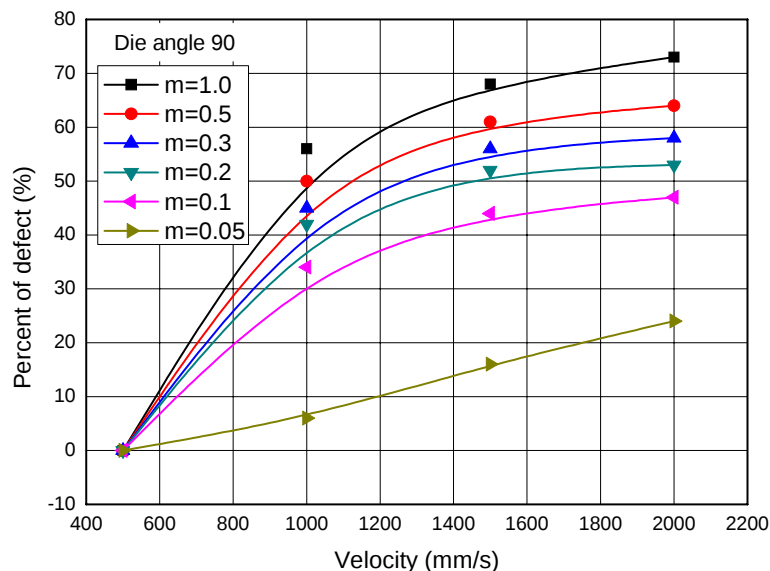
ของเนื้อวัสดุชิ้นงาน ซึ่งเป็นไปตามบทสรุปของ Lange [1] และ Saha [10] ที่กล่าวถึงตัวแปรที่มีผลกระทบต่อกระบวนการอัดรีดขึ้นรูปโลหะ

4.3 การสร้างเส้นแนวโน้มแสดงขอบเขตความสามารถในการอัดรีดขึ้นรูป

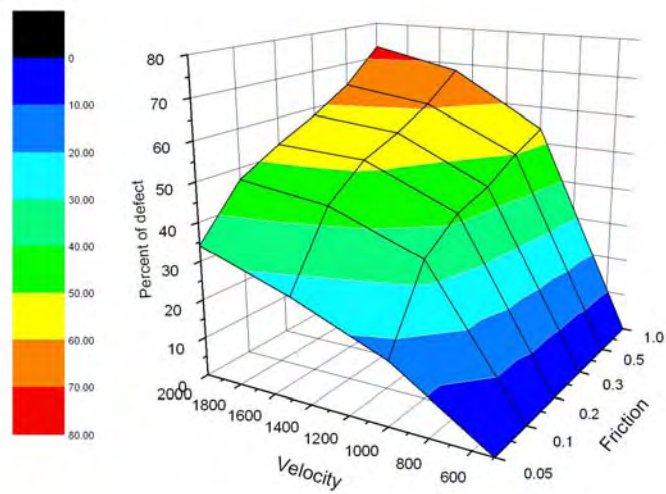
การวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ในงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของความเร็วของการขึ้นรูปและการเปลี่ยนแปลงขนาดของมุมแม่พิมพ์ ที่มีต่อการเกิดความเสียหายในแนวแกนการอัดรีดขึ้นรูป ซึ่งสามารถสร้างเส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วการขึ้นรูป และการเปลี่ยนแปลงขนาดของมุมแม่พิมพ์ดังกล่าว ภายใต้อิทธิพลของความเสียหายในระดับต่าง ๆ ให้ออกมาในรูปของเส้นแนวโน้มแสดงขอบเขตความสามารถในการอัดรีดขึ้นรูปได้ โดยปรากฏผลดังนี้

4.3.1 วิเคราะห์ปริมาณของการเกิดจุดบกพร่อง

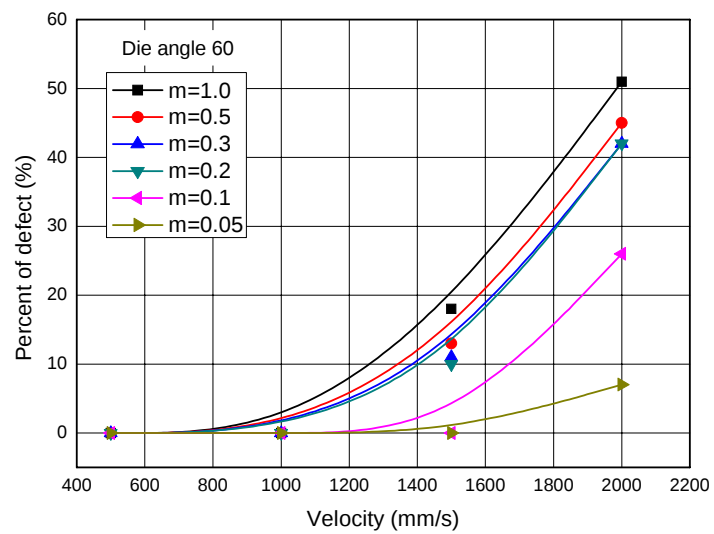
การวิเคราะห์ปริมาณของการเกิดจุดบกพร่อง ในชิ้นงานอัดรีดขึ้นรูปทองเหลือง สามารถพิจารณาได้จากระยะการวิเคราะห์ Increment Steps หรือระยะการเคลื่อนที่ของแกนอัดที่ความเค้นหลักสูงสุด เริ่มมีค่ามากกว่าค่าความเค้นครากของวัสดุตั้งที่ได้กล่าวไว้แล้วในข้างต้น ด้วยแบบจำลองที่มีระดับความเร็วขึ้นรูปและมุมของแม่พิมพ์ขนาดต่าง ๆ ในระดับความเสียหายที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งปรากฏผลการประมวลจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ดังนี้



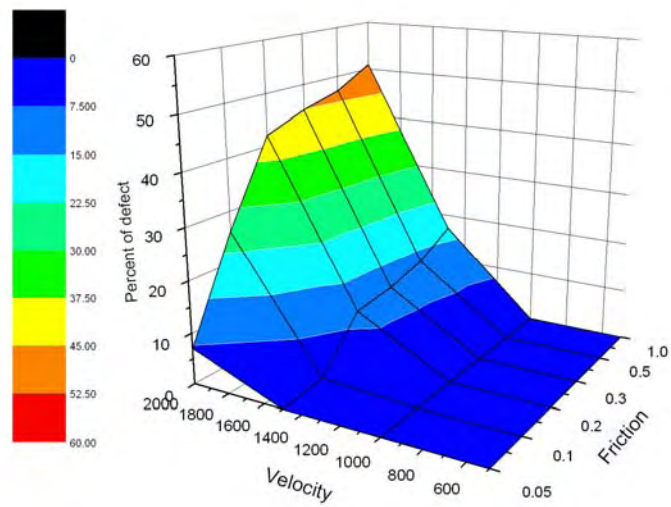
รูปที่ 4.23 ปริมาณเปอร์เซ็นต์จุดบกพร่องในแท่งบิลเลทที่ความเร็วขึ้นรูปและความเสียหายต่าง ๆ สำหรับแม่พิมพ์มุม 90°



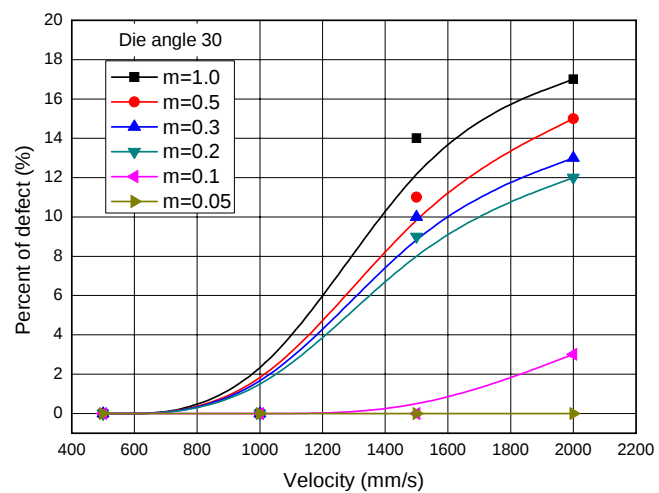
รูปที่ 4.24 ปริมาณเปอร์เซ็นต์จุดบกพร่องในแท่งบิลเลทที่ความเร็วขึ้นรูปและความเสียดทานต่าง ๆ สำหรับแม่พิมพ์มุม 90° แบบสามมิติ



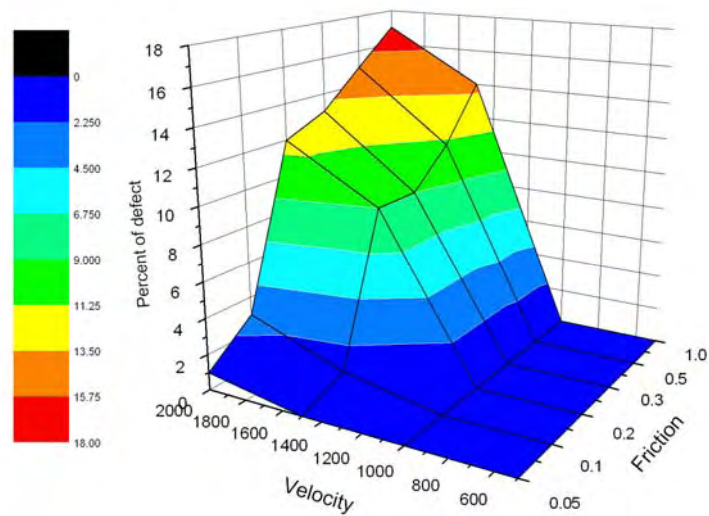
รูปที่ 4.25 ปริมาณเปอร์เซ็นต์จุดบกพร่องในแท่งบิลเลทที่ความเร็วขึ้นรูปและความเสียดทานต่าง ๆ สำหรับแม่พิมพ์มุม 60°



รูปที่ 4.26 ปริมาณเปอร์เซ็นต์จุดบกพร่องในแท่งบิลเลทที่ความเร็วขึ้นรูปและความเสียดทานต่าง ๆ สำหรับแม่พิมพ์มุม 60° แบบสามมิติ



รูปที่ 4.27 ปริมาณเปอร์เซ็นต์จุดบกพร่องในแท่งบิลเลทที่ความเร็วขึ้นรูปและความเสียดทานต่าง ๆ สำหรับแม่พิมพ์มุม 30°



รูปที่ 4.28 ปริมาณเปอร์เซ็นต์จุดบกพร่องในแท่งบิลเลทที่ความเร็วขึ้นรูปและความเสียดทานต่าง ๆ สำหรับแม่พิมพ์มุม 30° แบบสามมิติ

ตารางที่ 4.11 เปอร์เซนต์ของจุดบกพร่องในชิ้นงานสำหรับแม่พิมพ์มุม 90°

ความเร็วของ การขึ้นรูป (mm/s)	เปอร์เซ็นต์ของจุดบกพร่องในชิ้นงานที่ระดับความเสียดทานต่าง ๆ (Percent)					
	0.05	0.1	0.2	0.3	0.5	1.0
500	0	0	0	0	0	0
1000	6	34	42	45	50	56
1500	16	44	52	56	61	68
2000	24	47	53	58	64	73

ตารางที่ 4.12 ปริมาณเปอร์เซ็นต์ของจุดบกพร่องในชิ้นงานสำหรับแม่พิมพ์มุม 60°

ความเร็วของ การขึ้นรูป (mm/s)	เปอร์เซ็นต์ของจุดบกพร่องในชิ้นงานที่ระดับความเลียดทานต่าง ๆ (Percent)					
	0.05	0.1	0.2	0.3	0.5	1.0
500	0	0	0	0	0	0
1000	0	0	0	0	0	0
1500	0	0	10	11	13	18
2000	7	26	42	42	45	51

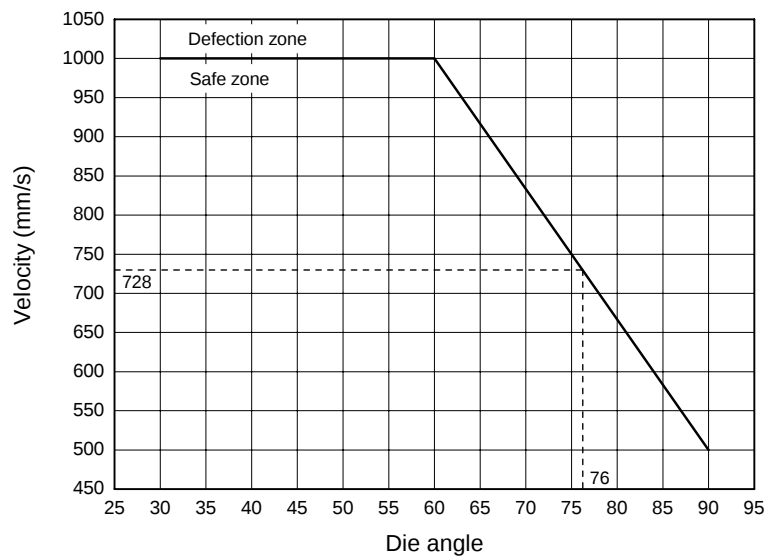
ตารางที่ 4.13 ปริมาณเปอร์เซ็นต์ของจุดบกพร่องในชิ้นงานสำหรับแม่พิมพ์มุม 30°

ความเร็วของ การขึ้นรูป (mm/s)	เปอร์เซ็นต์ของจุดบกพร่องในชิ้นงานที่ระดับความเลียดทานต่าง ๆ (Percent)					
	0.05	0.1	0.2	0.3	0.5	1.0
500	0	0	0	0	0	0
1000	0	0	0	0	0	0
1500	0	0	9	10	11	14
2000	0	3	12	13	15	17

การวิเคราะห์ปริมาณจุดบกพร่องที่เกิดขึ้น ในแบบจำลองทุกค่าตัวแปรที่กำหนด พบว่ามีเปอร์เซ็นต์ของจุดบกพร่องที่เกิดขึ้น ในปริมาณที่แตกต่างกันต่างระดับความเร็วการขึ้นรูป ความเลียดทาน และขนาดมุมของแม่พิมพ์ และเมื่อพิจารณาด้านความเร็วขึ้นรูปที่ไม่มีการเกิดจุดบกพร่อง จะสามารถสร้างเป็นเส้นกำหนดของเขตการขึ้นรูป โดยไม่เกิดจุดบกพร่องหรือขอบเขตความสามารถในการอัดรีดขึ้นรูปได้ดังรายละเอียดในหัวข้อต่อไป

4.3.2 สร้างเส้นแนวโน้มนำแสดงขอบเขตความสามารถในการอัดรีดขึ้นรูป

เมื่อนำความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของการขึ้นรูปกับขนาดมุมของแม่พิมพ์ ที่อยู่ภายใต้สภาวะของความเสียดทานระดับต่าง ๆ ของแบบจำลองมาพิจารณาหาแนวทางหลักเล็ง การเกิดจุดบกพร่องในงาน จะสามารถนำไปใช้สำหรับการออกแบบ สำหรับสร้างแม่พิมพ์ให้มีลักษณะที่เหมาะสมกับความเร็วของการขึ้นรูป ในการทำงานปกติที่มีสภาวะความเสียดทานระดับต่าง ๆ ได้อย่างเหมาะสม และจะสามารถสร้างเส้นแนวโน้มนำแสดงขอบเขตความสามารถในการอัดรีดขึ้นรูปทองเหลืองได้



รูปที่ 4.29 เส้นแนวโน้มนำแสดงขอบเขตความสามารถในการอัดรีดขึ้นรูปทองเหลืองที่ระดับ

ความเสียดทาน 0.2

สำหรับการวิจัยนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อลดจุดบกพร่องแบบโพรงในงานอัดรีดขึ้นรูปทองเหลือง ที่มีระดับความเร็วการขึ้นรูป 728 ม.ม./วินาที ขนาดมุมของแม่พิมพ์ 90 องศา และความเสียดทานเท่ากับ 0.2 จึงได้เส้นแสดงขอบเขตความสามารถในการอัดรีดขึ้นรูปดังแสดงตามรูปที่ 4.27 ประกอบการพิจารณาหาวิธีการสำหรับลดจุดบกพร่อง และสามารถจำแนกออกได้ดังนี้

ปรับเปลี่ยนระดับความเร็วของการขึ้นรูป

เพื่อไม่ให้มีผลกระทบต่อกระบวนการออกแบบและสร้างแม่พิมพ์ในลักษณะใหม่ จึงเห็นสมควรเลือกใช้แม่พิมพ์ขนาดมุมเท่าเดิม คือ 90 องศา แต่ทำการปรับลดความเร็วในการขึ้นรูปในกระบวนการผลิตให้อยู่ที่ระดับ 500 ม.ม./วินาที

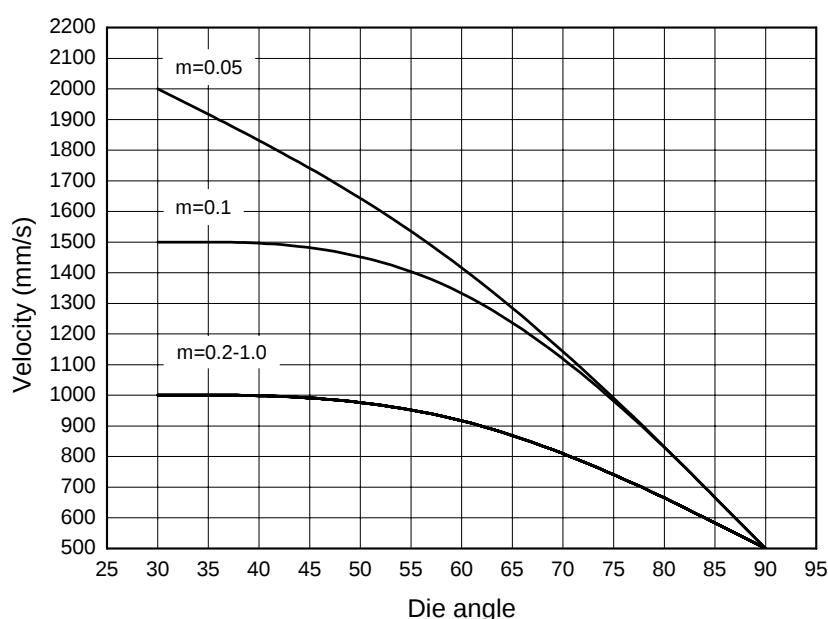
ปรับเปลี่ยนขนาดมุมของแม่พิมพ์

เพื่อไม่ให้มีผลกระทบต่อการทำงานปกติและอัตราการผลิตที่ไม่เปลี่ยนแปลง จึงเห็นสมควรเลือกใช้ความเร็วการขึ้นรูปของการทำงานปกติ 728 ม.ม./วินาที และใช้แม่พิมพ์ที่มีขนาดมุม 76 องศา

ปรับเปลี่ยนระดับความเร็วของการขึ้นรูปและขนาดมุมของแม่พิมพ์

เพื่อให้มีอัตราการผลิตสูงสุด โดยไม่เกิดจุดบกพร่อง จึงพิจารณาความเหมาะสมระหว่างความเร็วขึ้นรูปสูงสุดกับขนาดมุมของแม่พิมพ์ที่ไม่ทำให้เกิดจุดบกพร่อง คือ ความเร็วการขึ้นรูป 1,000 ม.ม./วินาที และใช้แม่พิมพ์ที่มีขนาดมุม 60 องศา

การนำผลการวิเคราะห์ไปใช้ประโยชน์ได้กว้างขวางขึ้น สำหรับการผลิตที่มีสภาวะความเสียดทานระดับต่าง ๆ ที่เกิดจากความแตกต่างของเครื่องมือ โดยเฉพาะคุณภาพผิวของแม่พิมพ์และวัสดุที่ใช้สร้างแม่พิมพ์ที่มีผลต่อระดับความเสียดทาน จึงสร้างเส้นความสามารถในการอัดรีดขึ้นรูปทองเหลืองที่ระดับความเสียดทานต่าง ๆ ดังนี้



รูปที่ 4.30 เส้นแนวโน้มแสดงขอบเขตความสามารถในการอัดรีดขึ้นรูปทองเหลืองที่ระดับความเสียดทานต่าง ๆ

เนื่องจากความเสียดทานระดับ 0.2 , 0.3 , 0.5 และ 1.0 มีผลต่อการเกิดความเค้นและการยืดเกาะตัวของก้อนเนื้อตาย จึงให้ผลของการเกิดจุดบกพร่องในระดับความเร็วของการขึ้นรูป และในขนาดมุมของแม่พิมพ์ที่เหมือนกัน จึงใช้เส้นความสามารถในการขึ้นรูปเส้นเดียวกันได้ จากการประมวลผลของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ตามเงื่อนไขที่กำหนด จะพบว่าระดับความเร็วของการขึ้นรูป ขนาดมุมของแม่พิมพ์ และระดับความเสียดทานของกระบวนการเป็นองค์ประกอบหนึ่ง ที่มีความสำคัญต่อความสามารถในการขึ้นรูปทองเหลือง โดยไม่เกิดจุดบกพร่องแบบโพรงตามแนวแกน ซึ่งจุดบกพร่องจะมีโอกาสเกิดขึ้นในกระบวนการที่มีความเร็วของการขึ้นรูปและขนาดมุมของแม่พิมพ์ในแต่ละระดับความเสียดทาน ตกอยู่ในบริเวณพื้นที่เหนือเส้นขอบเขตการขึ้นรูป ดังแสดงตามรูปที่ 4.28 และ หากมีการออกแบบขนาดมุมของแม่พิมพ์ และควบคุมความเร็วขึ้นรูปขณะทำการผลิต ในแต่ละระดับความเสียดทาน ให้อยู่ในบริเวณพื้นที่ใต้เส้นแสดงขอบเขตความสามารถในการอัดรีดขึ้นรูป ที่สร้างขึ้นมีผลให้อาจที่จุดบกพร่องจะไม่เกิดขึ้นในชิ้นงานได้ ดังนั้นจะพบว่า แนวทางการแก้ปัญหาจุดบกพร่องแบบโพรง สำหรับของงานอัดรีดขึ้นรูปทองเหลือง ด้วยการวิเคราะห์พฤติกรรมทางกลของโลหะในกระบวนการขึ้นรูป จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถทำนายผล การเกิดจุดบกพร่องได้ และการหาความเหมาะสมระหว่างความเร็วขึ้นรูปกับขนาดมุมของแม่พิมพ์ ที่ระดับความเสียดทานต่าง ๆ จะสามารถลดจุดบกพร่องดังกล่าวลงได้

บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ

การลดจุดบกพร่องแบบโพรง ในงานอัดรีดขึ้นรูปทองเหลืองหน้าตัดหกเหลี่ยม โดยวิเคราะห์การแตกหักของวัสดุจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งการเริ่มเกิดจุดบกพร่องสามารถพิจารณาได้จากโหนดที่มีค่าความเค้นหลักสูงสุดเกินค่าความเค้นครากของวัสดุเป็นโหนดแรก จากจำนวนโหนดที่เลือกตามแนวแกนกลางการอัดรีดขึ้นรูปชิ้นงาน ภายใต้การเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรด้านความเร็ว การขึ้นรูปและขนาดมุมของแม่พิมพ์อัดรีดขึ้นรูปที่มีความเสียดทานระดับต่าง ๆ ความสัมพันธ์ของการเกิดจุดบกพร่องในสภาวะเงื่อนไขของความเร็วการขึ้นรูป และขนาดมุมของแม่พิมพ์อัดรีดขึ้นรูปที่มีความเสียดทานระดับต่าง ๆ สามารถนำไปสร้างเส้นแสดงขอบเขตความสามารถ ในการอัดรีดขึ้นรูปทองเหลือง เพื่อเป็นประโยชน์สำหรับการหลีกเลี่ยงการผลิตชิ้นงานที่มีจุดบกพร่อง ด้วยการควบคุมความเร็วของการขึ้นรูปให้เหมาะสมกับขนาดมุมแม่พิมพ์ที่สร้างขึ้น โดยมีระดับความเสียดทานต่าง ๆ

5.1 สรุปผล

การจำลองกระบวนการอัดรีดขึ้นรูปทองเหลือง ด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ทำให้สามารถหาค่าตัวแปรได้ กระบวนการที่มีความเหมาะสมต่อการไหลตัวของวัสดุในกระบวนการได้คืบขึ้น ได้แนวทางสำหรับหลีกเลี่ยงการเกิดจุดบกพร่อง และสามารถแก้ไขปัญหการเกิดจุดบกพร่อง แบบโพรงได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งผลการทดลองที่ผ่านมาสามารถสรุปได้ว่าความเร็วของการขึ้นรูป และขนาดมุมของแม่พิมพ์ที่ใช้สำหรับการผลิตในสภาวะความเสียดทานระดับต่าง ๆ เป็นตัวแปรกระบวนการหนึ่งที่มีความสำคัญต่อการเกิดจุดบกพร่องแบบโพรงในชิ้นงานทองเหลือง ที่ผ่านกระบวนการอัดรีดขึ้นรูป ซึ่งผลการกระหนดดังกล่าว ทำให้ต้องมีการควบคุมความเร็วของการขึ้นรูปสำหรับแม่พิมพ์ที่มีขนาดมุมที่แตกต่างกันออกไป ตามสภาวะของความเสียดทานที่มีการเปลี่ยนแปลงไปในระดับต่าง ๆ

การวิเคราะห์ผลจากแบบจำลอง เพื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลการเกิดจุดบกพร่องจากการผลิต ตามตัวแปรกำหนดที่ได้จากการทดสอบสมบัติทางกลของวัสดุ (รายละเอียดตาม ภาคผนวก ข) พบว่ามีการเกิดจุดบกพร่องแบบโพรงขึ้น สำหรับการอัดรีดขึ้นรูปด้วยความเร็ว 728 ม.ม./วินาที ด้วยแม่พิมพ์ที่มีขนาดมุม 90 องศา ในทุกระดับค่าของความเสียดทาน อันเนื่องมาจากอิทธิพลของตัวแปรความเร็วที่สูงมีผลให้เกิดความเค้นได้สูงกับชิ้นงาน และมุมของแม่พิมพ์ขนาดใหญ่มีลักษณะดังกล่า ทำให้การไหลตัวของเนื้อวัสดุงานผ่านปากแม่พิมพ์เป็นไปได้ยาก ซึ่งเป็นการง่ายที่จะเกิดก้อนเนื้อตายขนาดใหญ่จากการยึดเกาะตัวของเนื้อโลหะที่บริเวณผิวหน้าของแม่พิมพ์ โดยระยะตำแหน่งของการเริ่มเกิดจุดบกพร่องจะมีความสัมพันธ์กับระดับค่าความเสียดทานของกระบวนการ กล่าวคือ ระยะตำแหน่ง

ของการเริ่มเกิดจุดบกพร่อง จะเกิดได้เร็วขึ้นเมื่อมีระดับความเสียหายของกระบวนการสูงขึ้น ดังนั้น จะเห็นได้ว่าความเร็ว และความเสียหายที่เปลี่ยนแปลงไป จะมีผลต่อระยะตำแหน่งของการเกิดจุดบกพร่องเปลี่ยนแปลงไปด้วย และหากมีการเปลี่ยนแปลงขนาดมุมของแม่พิมพ์ด้วยแล้ว จะสามารถหาความเหมาะสมของการลดจุดบกพร่องในชิ้นงานลงได้ จึงทำการวิเคราะห์แบบจำลองตามตัวแปรที่กำหนดและมีการทดลองปรับขนาดมุมของแม่พิมพ์ที่ขนาดมุม 30 องศา 60 องศา และ 90 องศา ต่อไป การวิเคราะห์ผลจากแบบจำลองตามตัวแปรที่กำหนดและแม่พิมพ์ที่มีขนาดมุม 30 องศา 60 องศา และ 90 องศา พบว่านอกจากระดับความเร็วของการขึ้นรูป และระดับความเสียหายของกระบวนการจะมีผลต่อการเกิดจุดบกพร่องแล้วนั้น ขนาดมุมของแม่พิมพ์ที่ใช้ในการผลิต ยังมีความสัมพันธ์ต่อการเกิดจุดบกพร่องภายในชิ้นงานด้วย โดยแบบจำลองที่มีขนาดมุมใดจะให้ผล การเกิดจุดบกพร่องมากและในทางตรงกันข้าม สำหรับแบบจำลองของแม่พิมพ์ที่มีขนาดมุมเล็กจะให้ผล การเกิดจุดบกพร่องน้อยที่สุดในการทดลอง

การเกิดจุดบกพร่องสูงสุด เมื่อทำการวิเคราะห์ผลจากแบบจำลองแม่พิมพ์ที่มีขนาดมุม 90 องศา ด้วยระดับความเร็วของการขึ้นรูปที่ 2,000 มม./วินาที ในระดับความเสียหาย 0.05 , 0.1 , 0.2 , 0.3 , 0.5 และ 1.0 มีเปอร์เซ็นต์จุดบกพร่องที่เกิดขึ้นเท่ากับร้อยละ 24 , 47 , 53 , 58 , 64 และ 73 ตามลำดับ เนื่องจากต้องใช้แรงขึ้นรูปที่ระดับสูงมาก สำหรับการดันแท่งบิลเลทให้เกิดการไหลตัว เพื่อขึ้นรูปผ่านช่องปากแม่พิมพ์ด้วยความรวดเร็ว จึงเป็นผลให้เนื้อวัสดุเกิดความเค้นสูงและมีรูปแบบการไหลตัวไม่เป็นระเบียบตามทฤษฎีการวิเคราะห์การไหลตัวในกระบวนการของ Lange [1] ประกอบกับลักษณะของแม่พิมพ์เป็นมุมฉาก และความเสียหายของกระบวนการที่มีค่ามาก ทำให้เนื้อวัสดุขึ้นงานหรือแท่งบิลเลทเกิดการไหลตัวเพื่อขึ้นรูปผ่านปากแม่พิมพ์ได้ยากขึ้น จึงเป็นการง่ายที่ความเค้นและความเสียหายระดับดังกล่าว จะทำให้เนื้อวัสดุเกาะยึดผิวหน้าแผ่นแม่พิมพ์และรวมตัวกันเกิดเป็นก้อนเนื้อตายที่มีขนาดใหญ่ขึ้นบริเวณมุมอับของแม่พิมพ์ ซึ่งนำไปสู่การเกิดจุดบกพร่องแบบโพรงขึ้นในที่สุด ซึ่งมีลักษณะแนวโน้มน็อคคloggingและเป็นไปตามทฤษฎีของ Altan และ Gegel [4] และทฤษฎีของ Avitzur [21] เมื่อลดความเร็วของการขึ้นรูปและลดระดับของความเสียหายลง จะส่งผลให้มีเปอร์เซ็นต์จุดบกพร่องที่เกิดขึ้นลดลงไป และไม่ปรากฏการเกิดจุดบกพร่องที่ความเร็วของการขึ้นรูปต่ำสุดของการทดลอง คือ 500 มม./วินาที เนื่องจากความเร็วของการขึ้นรูปที่ระดับดังกล่าว มีผลต่อการเปลี่ยนขนาดและรูปร่างของชิ้นงานอย่างช้า ๆ ชิ้นงานจึงเกิดความเค้นบริเวณช่องปากแม่พิมพ์น้อยลงอย่างต่อเนื่องจนเสร็จสิ้นกระบวนการขึ้นรูป เมื่อทำการทดลองและวิเคราะห์ผลจากแบบจำลองที่มีขนาดมุมของแม่พิมพ์เล็กลง คือ 60 องศา ด้วยระดับความเร็วของการขึ้นรูปและระดับความเสียหายที่เท่ากันกับการวิเคราะห์แบบจำลองที่มีขนาดมุมของแม่พิมพ์ 90 องศา จะสังเกตพบว่าเปอร์เซ็นต์ของจุดบกพร่องที่เกิดขึ้นลดลง เนื่องจากลักษณะของแม่พิมพ์มีมุมที่ลาดเอียง จึงทำให้การไหลตัวของชิ้นงานผ่านปากแม่พิมพ์สะดวกยิ่งขึ้น ถึงแม้ว่าจะใช้ความเร็วและความเสียหาย

ทานในระดับเดียวกัน แต่ระยะตำแหน่งของการเกิดจุดบกพร่องจะห่างออกไป และมีแนวโน้มที่ไม่เกิดจุดบกพร่องมากขึ้น จากผลการทดลองดังกล่าวพบว่า มีการเกิดจุดบกพร่องที่ความเร็วของการขึ้นรูป 2,000 ม.ม./วินาที ในทุกระดับของความเสียหาย แต่ไม่มีเปอร์เซ็นต์ของจุดบกพร่องในทุกระดับความเสียหาย ปรากฏขึ้นเลยสำหรับความเร็วของการขึ้นรูป 500 และ 1,000 ม.ม./วินาที ส่วนที่ความเร็วระดับ 1,500 ม.ม./วินาที ไม่มีเปอร์เซ็นต์ของจุดบกพร่องในระดับความเสียหายต่ำ คือ 0.05 และ 0.1 เหตุที่มีผลของการเกิดจุดบกพร่องในบางการทดลองดังกล่าว เนื่องจากมุมของแม่พิมพ์ที่มีขนาดเล็กลง มีความมุมลาดเอียง เป็นผลทำให้ชิ้นงานเกิดการไหลตัวที่สะดวกยิ่งขึ้น การเกิดก้อนเนื้อตายลดลงและความเค้นที่เกิดจากการขึ้นรูปอย่างรวดเร็วจึงลดลง

เมื่อวิเคราะห์ผลจากแบบจำลอง ที่มีขนาดมุมแม่พิมพ์เล็กที่สุดของการทดลอง คือ 30 องศา พบว่ามีการเกิดจุดบกพร่องน้อยที่สุดของการทดลอง โดยจะไม่ปรากฏผลของการเกิดจุดบกพร่องในทุกระดับความเสียหายของการทดลองที่ความเร็วขึ้นรูป 500 และ 1,000 แต่สำหรับความเร็วของการขึ้นรูป 1,500 และ 2,000 ม.ม./วินาที จะไม่ปรากฏผลของการเกิดจุดบกพร่องในระดับความเสียหายต่ำ และเปอร์เซ็นต์ของการเกิดจุดบกพร่องจะมีปริมาณมากขึ้น เมื่อมีความเร็วของการขึ้นรูปและระดับความเสียหายสูงขึ้น เนื่องจากขนาดมุมของแม่พิมพ์ที่มีความลาดเอียง จึงสะดวกต่อการไหลตัวของเนื้อวัสดุมากขึ้น ความเค้นที่เกิดจากความเร็วของการขึ้นรูป จะมีค่าลดลงถึงแม้ว่าจะมีความเสียหายในแบบจำลองมากก็ตาม เนื้อวัสดุจึงไม่ยึดเกาะผิวหน้าแม่พิมพ์และไม่ยึดติดกันมาก สามารถแยกตัวออกจากกันได้ง่าย จึงเป็นผลให้เกิดก้อนเนื้อตายน้อยลง ความเร็วการไหลตัวของเนื้อโลหะบริเวณด้านปากทางเข้าและปากทางออกของแม่พิมพ์ จึงไม่แตกต่างกันมาก ซึ่งมีลักษณะแนวโน้มสอดคล้องและเป็นไปตามทฤษฎีของ Avitzur [17] และทฤษฎีของ Wagener และ Wolf [26] ที่กล่าวถึงผลกระทบของความเสียหาย ส่วนผลกระทบด้านขนาดมุมของแม่พิมพ์ที่มีต่อการเกิดจุดบกพร่องแบบโพรง เป็นไปตามรายงานการวิจัยที่ Dae-Cheol Ko และ Byung-Min Kim [22] ได้กล่าวไว้ ดังนั้นเมื่อนำผลการประมวลจากแบบจำลอง มาพิจารณาหาแนวทางเพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดจุดบกพร่องแบบโพรงตามแนวแกนของผลิตภัณฑ์ทองเหลืองเส้นหน้าตัดหกเหลี่ยม ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดรีดขึ้นรูป โดยพิจารณาจากค่าระดับตัวแปรความเร็วของการขึ้นรูปและขนาดมุมของแม่พิมพ์ที่ความเสียหายระดับต่าง ๆ ของการทดลอง ที่มีผลให้แบบจำลองไม่ปรากฏการเกิดจุดบกพร่องขึ้น จะพบว่าสามารถหลีกเลี่ยงจุดบกพร่องแบบโพรง หรือความเสียหายในแนวแกนของชิ้นงานได้ หากมีการควบคุมความเร็วของการขึ้นรูป ในกระบวนการผลิตให้สัมพันธ์กับการออกแบบลักษณะขนาดมุมของแม่พิมพ์ ที่ใช้สำหรับกระบวนการผลิตที่มีความเสียหายระดับต่าง ๆ ให้เหมาะสม และสำหรับกระบวนการอัดรีดขึ้นรูป ที่ใช้ระดับความเร็วของการขึ้นรูป 728 ม.ม./วินาที ด้วยแม่พิมพ์ที่มีขนาดมุม 90 องศา ของงานวิจัยนี้ มีแนวทางหลีกเลี่ยงการผลิตชิ้นงานที่มีจุดบกพร่องโดยอาศัยความสัมพันธ์ความเร็วการขึ้นรูป และขนาดมุมของแม่พิมพ์ที่สภาวะความเสียหายระดับ

ต่าง ๆ จากหลักการสร้างเส้นขอบเขตความปลอดภัยของการขึ้นรูปในงานอัดรีดขึ้นรูปของ Reddy และคณะ [25] สามารถแบ่งออกเป็น 3 วิธีการ ได้แก่ การออกแบบขนาดมุมของแม่พิมพ์ เพื่อไม่ให้เกิดผลกระทบต่ออัตราการผลิต ด้วยแม่พิมพ์ที่มีขนาดมุม 76 องศา ใช้ความเร็วของการขึ้นรูปเท่าเดิม คือ 728 ม.ม./วินาที วิธีการที่สองเป็นการควบคุมการผลิต เพื่อไม่ให้มีผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงของการออกแบบ และสร้างแม่พิมพ์ลักษณะใหม่ โดยใช้ความเร็วของการขึ้นรูปประมาณ 500 ม.ม./วินาที แต่ยังใช้แม่พิมพ์ที่มีขนาดมุมเท่าเดิม คือ 90 องศา และวิธีการสุดท้ายเป็นการออกแบบและควบคุมการผลิต เพื่อให้ได้อัตราการผลิตสูงสุดโดยไม่เกิดจุดบกพร่องขึ้น คือ การใช้ความเร็วของการขึ้นรูปประมาณ 1,000 ม.ม./วินาที และแม่พิมพ์มีขนาดมุม 60 องศา ดังที่ได้กล่าวรายละเอียดไว้แล้วในบทที่ผ่านมา สำหรับการอัดรีดขึ้นรูปที่มีค่าความเสียดทานในระดับต่าง ๆ มีวิธีแนวทางการลดจุดบกพร่องเช่นเดียวกัน ด้วยการเลือกใช้ค่าความเร็วของการขึ้นรูปและขนาดมุมของแม่พิมพ์ที่มีระดับความเสียดทานต่าง ๆ นั้น ให้อยู่ในบริเวณพื้นที่ได้เส้นแสดงขอบเขตความสามารถในการขึ้นรูปที่สร้างขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

การลดจุดบกพร่องแบบโพรงในชิ้นงานอัดรีดขึ้นรูปทองเหลือง จากการวิเคราะห์พฤติกรรมเชิงกลของชิ้นงาน ด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ที่มีการกำหนดตัวแปรกระบวนการด้านความเร็วขึ้นรูป และขนาดมุมของแม่พิมพ์ ที่สภาวะความเสียดทานในระดับต่าง ๆ เป็นลักษณะของการวิเคราะห์ที่ต้องกำหนดสภาวะขอบเขตที่ถูกต้อง หรือมีความเหมาะสมแก่แบบจำลอง หากมีการกำหนดสภาวะขอบเขตและช่วงของการวิเคราะห์ที่เหมาะสม จะเป็นประโยชน์ต่อการใช้งานได้อย่างกว้างขวางต่อการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ การเพิ่มประสิทธิภาพของการควบคุมกระบวนการผลิต และช่วยลดความสูญเสียที่อาจเกิดขึ้นในกระบวนการผลิตได้ เช่น การวิเคราะห์ขนาดมุมของแบบจำลองในหลายระดับ เพิ่มความถี่ของช่วงข้อมูลด้านความเร็วขึ้นรูป และการขึ้นรูปที่อัตราการลดพื้นที่หน้าตัดขนาดต่าง ๆ เป็นต้น

การวิเคราะห์พฤติกรรมดังกล่าว จะเกิดประสิทธิภาพและมีความเหมาะสมกับการผลิตในแต่ละแห่ง ก็ต่อเมื่อมีการกำหนดสมบัติของวัสดุ และสภาวะขอบเขตตามสภาพการทำงานแต่ละแห่งด้วย จึงจะให้ผลของการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ มีความใกล้เคียงกับการผลิตจริงมากที่สุด การเกิดจุดบกพร่องในแนวแกนของชิ้นงานอัดรีดขึ้นรูป นอกเหนือจากความเร็วขึ้นรูปและขนาดมุมของแม่พิมพ์แล้ว ยังมีตัวแปรด้านอื่น ๆ ที่แตกต่างกันไปตามสภาวะการทำงานผลิตของแต่ละแห่ง มีทั้งที่สามารถควบคุมได้และไม่สามารถควบคุมได้ ซึ่งในสภาวะการผลิตจริงจะมีตัวแปรต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นร่วมกันและมีอิทธิพลต่อขบวนการอัดรีดขึ้นรูป เช่น ข้อจำกัดด้านความสามารถในการสร้างแม่พิมพ์ที่แตกต่างกันของหน่วยงานผลิตแต่ละแห่ง ความสะอาดของผิวแท่งบิลเลทและแม่พิมพ์ ระดับความ

เรียบและการสึกหรอของผิวแม่พิมพ์ที่มีผลต่อความเสียหาย สิ่งสกปรกและสิ่งปลอมปนที่มีอยู่ใน
 ชีงงาน ผลกระทบที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในสถานที่ผลิตแต่ละแห่ง ที่มีผลต่อ
 อุณหภูมิแท่งบิลเลท ขณะลำเลียงออกจากเตาอบ ความสามารถของเครื่องมือเครื่องจักรที่เปลี่ยนแปลง
 ไปตามอายุการใช้งาน เป็นต้น ดังนั้นเพื่อให้เป็นประโยชน์ต่อการศึกษาวิจัยการลดจุดบกพร่องของ
 ชีงงานอัดรีดขึ้นรูปของผู้ที่จะศึกษาวิจัยต่อไป ควรให้ความสำคัญและคำนึงถึงตัวแปรที่เป็นปัจจัย
 กระทบเพิ่มเติมโดยรอบในด้านต่าง ๆ สำหรับผู้ที่ต้องการศึกษาวิธีการลดจุดบกพร่องแบบโพรงด้วย
 การวิเคราะห์พฤติกรรมเชิงกล จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ควรพิจารณาเพิ่มเติมในส่วนต่าง ๆ
 ดังนี้

1. วิเคราะห์แบบจำลองที่มีอัตราการผลิตขนาดของพื้นที่หน้าตัดในขนาดต่าง ๆ
2. วิเคราะห์แบบจำลองที่มีอุณหภูมิของชีงงานในระดับต่างๆ
3. วิเคราะห์แบบจำลองที่มีความเร็วการขึ้นรูปและขนาดมุมของแม่พิมพ์ในระดับที่ละเอียดมากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

1. Lange, K., 1991, **Handbook of Metal Forming**, McGraw-Hill, New York, pp. 13.1-16.49.
2. Lof, J., 1973, **Developments in Finite Simulations of Aluminium Extrusion**, The Netherlands, pp.1-20.
3. ดำรง ไชยธีรานุวัตรศิริ, 2521, **การขึ้นรูปโลหะ**, บริษัท ซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัด, หน้า 33-57.
4. Altan, T., Oh, S. and Gegel, H.L., 1983, **Metal Forming : Fundamental and Application**, American Society for Metals, pp. 83-87.
5. ประเสริฐ ก้วยสมบูรณ์, โลหะวิทยา, ศูนย์ผลิตตำราเรียน สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, หน้า 104-108, 121-128.
6. จงกล รัตสุข, 2525, **โลหะวิทยาเบื้องต้นและวัสดุวิศวกรรม**, สำนักพิมพ์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, หน้า 72-76.
7. Pearson, E.C. and Parkins, N.R., **The Extrusion of Metal**, London, Chapman and Hall LTD., pp. 150-155.
8. Laue, K. and Stenger, H., **Extrusion:Processes, Machinery, Tooling**, American Society for Metals, pp. 5-161.
9. Avitzur, B., 1975, "Limit Analysis of Flow Through Conical Converging Dies", **Journal of The Franklin Institute**, Vol. 299, pp. 339-358.
10. Pradip K. S., 2000, **Aluminum Extrusion Technology**, ASM International, pp. 6-27.
11. สมชัย ตันทวิรุพห์, สมชัย นรเศรษฐ์โสภณ และกรรณชัย กัลยาศิริ, 2549, "ผลกระทบของตัวแปรในกระบวนการดัดขึ้นรูปแบบเย็นต่อสมบัติเชิงกลของแท่งอลูมิเนียม", **การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 20 18-20 ตุลาคม 2549 จังหวัดนครราชสีมา**.

12. Barker, K.J., Avitzur, B. and Walter, C.H., 1976, "The Analytical Determination of Friction for Flow Through Conical Converging Dies", **Journal of The Franklin Institute**, Vol. 301, pp. 263-277.
13. Reddy, N.V., Dixit, P.M. and Lal, G.K., 1996 "Central Bursting and Optimal of Profile for Axisymmetric Extrusion", **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, Vol. 118, pp. 579-583.
14. เดช พุทธเจริญทอง, 1998, การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์, ศูนย์สื่อเสริมกรุงเทพ, หน้า 16-24, 166-220.
15. Dowling, N.E., 1999, **Mechanical Behavior of Materials**, 2nd ed., Prentice Hall, New Jersey, pp. 127-156.
16. Kobayashi, S., Oh, S.I. and Altan, T., 1989, **Metal Forming and the Finite Element Method**, Oxford University Press, pp. 1-10, 58-109.
17. Avitzur, B., 1983, **Handbook of Metal-Forming Process**, A Wiley-Interscience Publication, pp. 61-63, 950-953.
18. MSC.Marc, Version 2003, **MSC.Marc Volume A: Theory and User Information**, MSC. Software Corporation, pp. 8.22-8.35.
19. Male, A.T. and Cockcroft, M.G. 1964, "A method for the determination of the Coefficient of Friction of Metals under Conditions of Bulk Plastic Deformation", **Journal of the Institute of Metals**, pp. 38-46.
20. Young, W.C. and Budynas, R.G., 2002, **Roark's Formulas for Stress and Strain**, McGraw-Hill, New York, pp. 48-93.
21. Avitzur, B., 1968 "Analysis of Central Bursting Defects in Extrusion and Wire Drawing", **Journal of Engineering for Industry**, pp. 79-91.

22. Dae-Cheol Ko and Byung-Min Kim, 1998, "The Prediction of Central Burst Defects in Extrusion and Wire Drawing", **Journal of Materials Processing Technology**, pp. 19-24.
23. Hung-Kuk Oh and Byung-Woo Ryu, 1985, "Effects of Process Variables on The Deformation Field in Extrusion Through Conical Dies", **Journal of Mechanical Working Technology**, pp. 71-86.
24. 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.
25. 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.
26. 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 February 4-8, 1996 at Anaheim, Germany**.
27. พัทธน์ เลิศโกวิทย์, 2544, การปรับปรุงคุณภาพของทองเหลืองเส้น, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า ข.
28. จินดา เปี่ยมราสี, 2543, การวิเคราะห์ความเค้นบริเวณปากแม่พิมพ์อัดรีดอะลูมิเนียม 6063 รูปร่างยู โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องมือและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า ข.
29. กิตติศักดิ์ เผือกสะอาด, 2544, การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อการออกแบบแม่พิมพ์ อีควอลิเซอร์ชัฟเฟอร์, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องมือและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า ข.

30. <http://www.ataco.co.th>, 26 สิงหาคม 2548
31. Rowe, G.W., 1977, **Principle of Industrial Metal Working Processes**, Edward Arnold, pp.92-134.

ภาคผนวก ก

ข้อมูลจุดบกพร่องแบบโพรงในการผลิตทองเหลืองเส้น

ตาราง ก.1 ข้อมูลจุดบกพร่องแบบโพรงในการผลิตทองเหลืองเส้นของกลุ่มตัวอย่าง

ลำดับที่	การเกิดโพรง		อุณหภูมิ (C°)	แรงอัด (kN)	ความเร็ว (mm/s)
	เกิดโพรง	ไม่เกิดโพรง			
1.	/		724	1000	716
2.		/	748	550	728
3.	/		732	500	731
4.	/		747	450	724
5.	/		745	500	717
6.		/	724	550	734
7.	/		726	750	732
8.	/		735	450	732
9.	/		750	400	752
10.		/	729	550	723
11.	/		736	550	723
12.	/		728	650	735
13.	/		737	500	739
14.	/		739	550	728
15.	/		738	500	731
16.	/		728	550	725
17.	/		729	800	719
18.	/		738	500	724
19.	/		726	900	717
20.	/		747	500	726
ค่าเฉลี่ย			735	585	728
ค่าสูงสุด			750	1000	752
ค่าต่ำสุด			724	400	716

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลจุดบกพร่องแบบโพรงในกลุ่มตัวอย่างทองเหลืองเส้นความยาว 16 เมตร/เส้น

ลำดับ	ความยาวโพรง (ชม.)	ลำดับ	ความยาวโพรง (ชม.)	ลำดับ	ความยาวโพรง (ชม.)	ลำดับ	ความยาวโพรง (ชม.)
1.	330	26.	300	51.	380	76.	282
2.	315	27.	310	52.	370	77.	300
3.	304	28.	330	53.	265	78.	295
4.	315	29.	325	54.	370	79.	360
5.	315	30.	330	55.	304	80.	370
6.	315	31.	315	56.	318	81.	306
7.	303	32.	304	57.	370	82.	380
8.	300	33.	302	58.	350	83.	337
9.	298	34.	340	59.	330	84.	340
10.	254	35.	345	60.	350	85.	306
11.	258	36.	348	61.	330	86.	302
12.	254	37.	370	62.	370	87.	274
13.	258	38.	390	63.	340	88.	285
14.	290	39.	400	64.	340	89.	310
15.	270	40.	400	65.	337	90.	340
16.	275	41.	410	66.	290	91.	370
17.	305	42.	390	67.	280	92.	350
18.	290	43.	420	68.	270	93.	330
19.	275	44.	400	69.	255	94.	270
20.	350	45.	430	70.	314	95.	304
21.	355	46.	420	71.	345	96.	282
22.	265	47.	400	72.	304	97.	330
23.	260	48.	410	73.	302	98.	275
24.	355	49.	370	74.	340	99.	340
25.	275	50.	390	75.	330	100.	325
				ความยาวโพรงสูงสุด (%)			26.88
				ความยาวโพรงต่ำสุด (%)			15.88

ภาคผนวก ข

สมบัติของทองเหลือง Brass 60/40

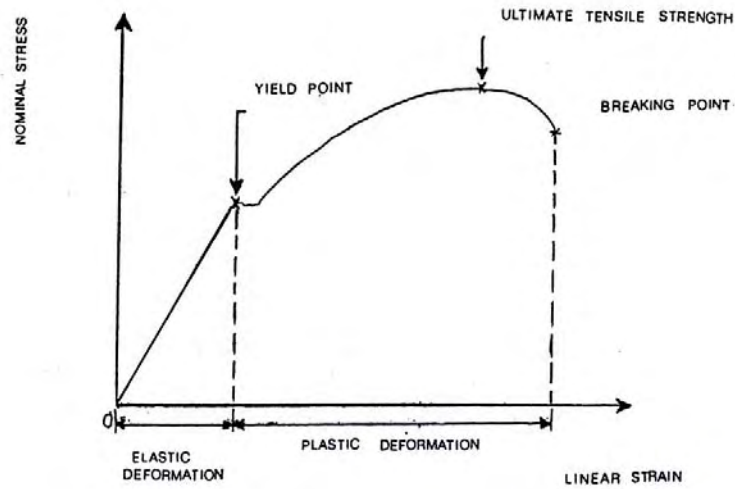
การศึกษาพฤติกรรมเชิงกลของวัสดุภายใต้กระบวนการขึ้นรูปโลหะ ด้วยการวิเคราะห์แบบจำลอง ไฟไนต์เอลิเมนต์ มีความจำเป็นที่จะต้องกำหนดสมบัติทางกลให้เหมาะสมในแบบจำลอง สำหรับการศึกษสมบัติทางกลของทองเหลือง จึงแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ สมบัติทางกลของทองเหลือง และความเสียหายของทองเหลือง Brass60/40 ในกระบวนการอัดรีดขึ้นรูป

ข.1 สมบัติทางกลของทองเหลือง Brass60/40

เพื่อให้ได้ค่าสมบัติดังกล่าวที่ถูกต้อง จึงต้องทดสอบหาสมบัติทางกลซึ่ง Lange [1] และ Rowe [31] ได้กล่าวถึงกระบวนการอัดรีดขึ้นรูปทองเหลือง เป็นการขึ้นรูปโลหะแบบก้อน (Bulk Forming) สมบัติทางกลของวัสดุ จึงสัมพันธ์กับรูปแบบการไหลตัวของโลหะ ความยากง่ายของการขึ้นรูป และการเลือกขนาดของเครื่องจักรที่ใช้ขึ้นรูปโลหะ เป็นต้น ซึ่งโลหะที่มีความสามารถในการไหลตัวต่ำ จะต้องใช้แรงในการขึ้นรูปของเครื่องจักรสูงกว่าโลหะที่มีความสามารถในการไหลตัวสูง ในกระบวนการขึ้นรูปโลหะทุกรูปแบบ ชิ้นงานที่ทำการขึ้นรูปจะเกิดแรงมากระทำต่อชิ้นงาน ทำให้เกิดความเค้น ซึ่งมีอยู่ 2 ช่วง คือ ช่วงการยืดหยุ่นตัว และช่วงการเปลี่ยนรูปอย่างถาวรของโลหะ ดังนั้นในการคำนวณหาแรงที่จะทำให้ชิ้นงานเปลี่ยนรูปร่างไปตามที่ต้องการ ก็จะต้องมีการคำนวณหาความเครียดที่เกิดขึ้นจริง (True Strain) ณ ตำแหน่งที่ต้องเปลี่ยนรูปร่างชิ้นงาน เพื่อไปหาความเค้นที่เกิดขึ้นจริง (True Stress) แล้วจึงสามารถไปคำนวณหาแรงที่ใช้ในการขึ้นรูปได้ ซึ่งเพื่อความสะดวกในการปฏิบัติงานจึงต้องมีการสร้างกราฟ ความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นจริง (True Stress-True Strain Curve) และ Nominal Stress-Linear Strain Curve ของวัสดุชนิดนั้น ๆ ขึ้นมาภายใต้เงื่อนไขของการขึ้นรูปที่ต้องการมีรายละเอียดดังนี้

ข.1.1 เส้นโค้งความสัมพันธ์ความเค้นปกติกับความเครียดที่เกิดขึ้นในเชิงเส้นตรง

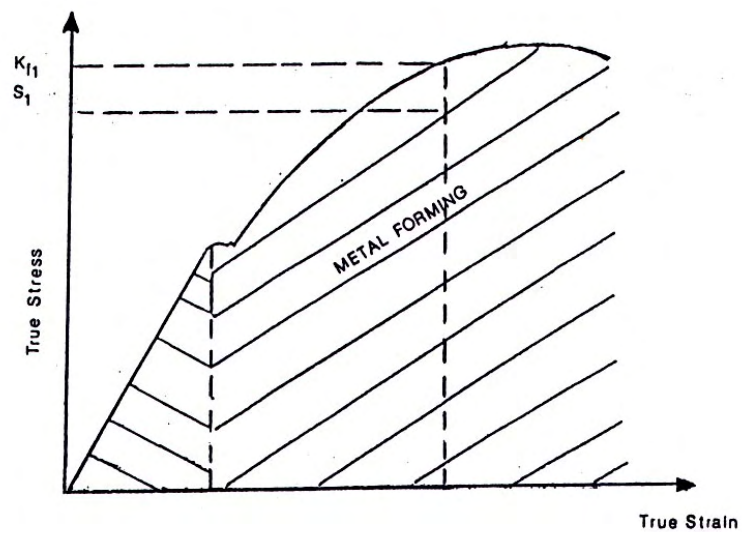
เมื่อได้รับแรงกระทำแก่ชิ้นงานที่ระดับต่าง ๆ จะเกิดความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นที่เกิดขึ้นตามปกติกับความเครียดที่เกิดขึ้นในเชิงเส้นตรง (Nominal Stress-Linear Strain Curve) สามารถนำมาใช้งานได้ อย่างถูกต้องภายในช่วงการยืดหยุ่นตัว (Elastic Deformation) ของชิ้นงาน



รูปที่ ข.1 กราฟความสัมพันธ์ความเค้นที่เกิดขึ้นตามปกติกับความเครียดที่เกิดขึ้นในเชิงเส้นตรง [31]

ข.1.1.1 เส้นโค้งการไหล

ความเค้นที่เกิดขึ้นจริงกับความเครียดที่เกิดขึ้นจริง เมื่อได้รับแรงกระทำที่ระดับต่าง ๆ โดยกราฟได้ถูกนำมาใช้ในงานขึ้นรูปโลหะได้อย่างถูกต้องในช่วงการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรของโลหะชิ้นงาน



รูปที่ ข.2 กราฟความสัมพันธ์ความเค้นจริงกับความเครียดจริง [31]

ข.1.1.2 คำนิยาม

ค่านิยามที่ใช้สำหรับมาตรฐานการทดสอบสมบัติของวัสดุมีดังนี้

- การทดสอบแรงดึง (Tension Test) เป็นการดึงชิ้นงานบนเครื่องทดสอบแรงดึง พร้อมกับหาค่าสมบัติทางกลที่ต้องการ
- ความแข็งแรง (Strength) หมายถึง สมบัติทางกลของวัสดุ โดยพิจารณาจากความสามารถในการต้านแรงที่มากกระทำ ซึ่งในการระบุความแข็งแรงของวัสดุนั้น จะต้องบอกถึงเงื่อนไขที่ทำการทดสอบมาด้วย เช่น ลักษณะแรงกระทำภายนอก อุณหภูมิขณะทำการทดสอบ
- กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด (Stress-Strain Curve) เป็นกราฟที่เขียนขึ้นเพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด ขณะมีแรงมากระทำต่อวัสดุ โดยค่าความเค้นจะอยู่ในแกนตั้ง และความเครียดจะอยู่ในแนวแกนนอน
- พิกัดความเป็นสัดส่วน (Proportional Limit) หมายถึง ค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุยอมรับได้ โดยความเค้นจะเป็นสัดส่วน โดยตรงกับความเครียดตามกฎของฮุก (Hook's Law) กราฟในช่วงนี้จะเป็นเส้นตรงและตอนปลายของกราฟ ช่วงนี้จะต่อกับเส้นโค้งซึ่งมีค่าความชันค่าหนึ่งจุดต่อเนื่อง เรียกว่า จีดจำกัดของการแปรผัน
- พิกัดความยืดหยุ่น (Elastic Limit) หมายถึง พฤติกรรมของวัสดุได้รับความเค้น ซึ่งอยู่ในช่วงของการคืนรูป ไม่เกิดการเปลี่ยนรูปร่างถาวร คือ เมื่อปล่อยแรงดึงวัสดุจะกลับคือสู่สภาพเดิม แสดงว่า จีดจำกัดของความยืดหยุ่น คือ ค่าความเค้นสูงสุดที่โลหะสามารถทนได้ โดยไม่เกิดการเสียรูปร่างถาวรหรือขนาดของความเค้นต่ำสุดที่วัสดุเริ่มเสียรูปร่างถาวรได้
- จุดคราก (Yield Point) จากการทดสอบแรงดึงนั้น ถ้าเพิ่มแรงดึงขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงค่าความเค้นค่าหนึ่งซึ่งโลหะสามารถเสียรูปร่างไปได้เอง โดยไม่ต้องเพิ่มแรงมากระทำและความเค้นไม่เพิ่มเลย จุดแสดงระดับความเค้นนี้ เรียกว่า จุดครากของวัสดุเป็นจุดสำคัญที่ต้องคำนึงถึง ในการออกแบบชิ้นส่วนของเครื่องจักรกล เพราะเป็นจุดที่บอกให้ทราบว่าวัสดุหรือชิ้นส่วนจะเกิดการนิโคขาดหรือเกิดความเสียหายถ้าได้รับความเค้นมากกว่าจุดนี้
- ความเค้นคราก (Yield Stress) หมายถึง ค่าความเค้นที่จุดครากและค่าความเค้นนี้ จะทำให้วัสดุมีการเปลี่ยนรูปร่างถาวร ไม่มีจุดที่แน่นอนที่แสดงให้เห็นถึงจุดที่ Elastic Strain สิ้นสุดและจุดที่ Plastic Strain เริ่มต้นสำหรับการออกแบบของวิศวกรอเมริกัน ซึ่งในกรณีวัสดุประาได้กำหนดให้

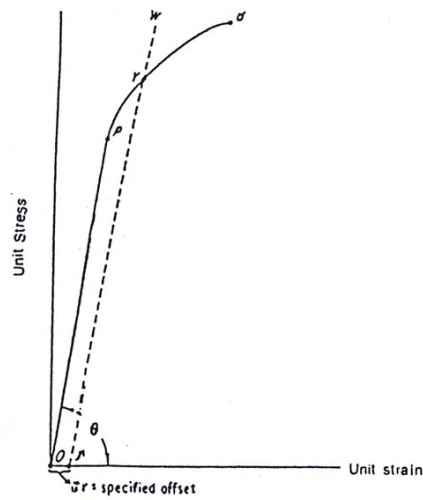
ร้อยละ 0.2 ของ Plastic Strain ที่เกิดขึ้นใน Stress-Strain Curve ดังรูปที่ 3 และในกรณีที่เป็วัสดุเหนียวกราฟของ Flow Curve ดังที่แสดงในรูปที่ 4 จะแสดงจุดความเค้นครากได้ชัดเจน

$$\sigma_{0.2\%} = \frac{F_{0.2}}{S_0} \quad (\text{ข.1})$$

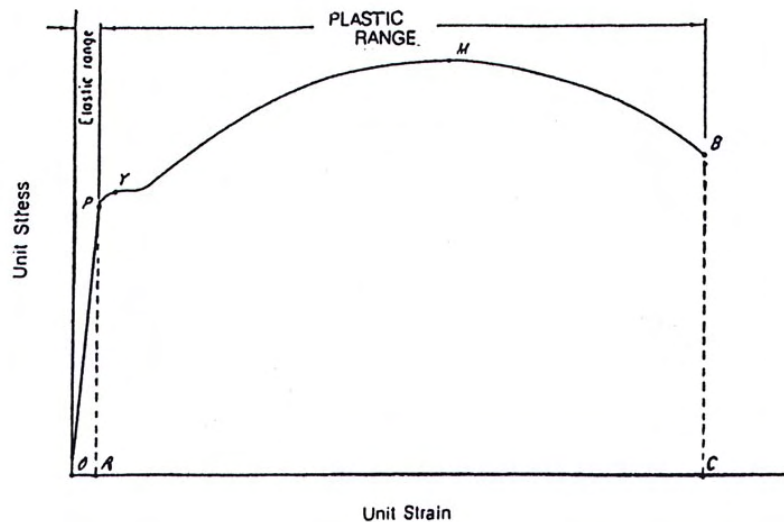
เมื่อกำหนดให้ $\sigma_{0.2\%}$ คือ ความเค้นครากตัวที่ 0.2 %

$F_{0.2}$ คือ แรงดึงครากตัวที่ 0.2 % Strain

S_0 คือ พื้นที่หน้าตัดก่อนทดสอบ



รูปที่ ข.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของวัสดุเปราะ [31]



รูปที่ ข.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของวัสดุเหนียว [31]

- ความแข็งแรงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength) ความแข็งแรงสูงสุดของวัสดุที่สามารถทนได้ก่อนเกิดการแตกหัก สำหรับวัสดุเหนียวค่าความแข็งแรงสูงสุด จะอยู่ที่จุดสูงสุดบนกราฟความสัณพันธ์นี้ และสำหรับวัสดุเปราะค่าความแข็งแรงสูงสุด จะเป็นค่าเดียวกับค่าความแข็งแรงแตกหัก

$$\sigma_{tu} = \frac{F_{t_{max}}}{S_0} \quad (ข.2)$$

เมื่อกำหนดให้ σ_{tu} คือ ความเค้นอัดสูงสุด

$F_{t_{max}}$ คือ แรงดึงสูงสุด

- เปอร์เซ็นต์การยืด (Percent Elongation) เปอร์เซ็นต์การยืด คือ ปริมาณความยืดที่เกิดจากการดึง จักรงานเป็นค่าที่ใช้บอกถึงความอ่อนเหนียว (Ductile) ของโลหะค่าการยืดตัว (Elongation) สามารถหาได้โดยสมการที่ 2

$$\epsilon_t = \left(\frac{l_1 - l_0}{l_0} \right) \times 100 \quad (ข.3)$$

เมื่อกำหนดให้ ϵ_t คือ อัตราการยืดตัว

l_0 คือ ความสูงก่อนการดึง

l_1 คือ ความสูงหลังการดึง

- การลดลงของพื้นที่ (Percent Reduction of Area) เป็นค่าที่หาได้จากการเอาพื้นที่หน้าตัดเดิมลบด้วยพื้นที่หน้าตัดสุดท้าย แล้วหารด้วยพื้นที่หน้าตัดเดิม แล้วทำเป็นเปอร์เซ็นต์ด้วยการเอา 100 คูณ ดังนี้

$$Z_{tB} = \left(\frac{A_0 - A_{tB}}{A_0} \right) \times 100 \quad (ข.4)$$

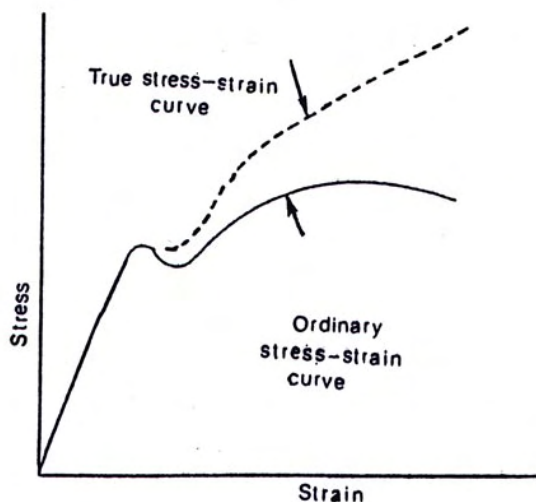
เมื่อกำหนดให้ Z_{tB} คือ อัตราการลดลงของพื้นที่หลังจากขึ้นทดสอบแตกหัก เมื่อเปรียบเทียบกับพื้นที่ก่อนทดสอบ

A_{tB} คือ พื้นที่หลังจากการดึงทดสอบ

A_0 คือ พื้นที่ก่อนการดึงทดสอบ

- โมดูลัสของความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) หรือ โมดูลัสของยัง (Young's Modulus or Modulus of Elasticity) จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด พิจารณาส่วนที่เป็นเส้นตรงของกราฟความชัน ในส่วนนี้ซึ่งมีค่าเท่ากับความเค้นส่วนความเครียด ซึ่งเป็นค่าคงที่เรียกค่านี้ว่า ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความแข็งแรง (Stiffness) ซึ่งเป็นค่าความต้านทานของวัสดุต่อการเกิดการเสียรูปร่างแบบคืนตัว

- ความเค้นและความเครียดจริง (True Stress-True Strain) เป็นความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นจริง ขณะทำการดึงทดสอบ โดยพิจารณาจากพื้นที่หน้าตัดที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งค่าความเค้นจริงที่ได้จะมีค่าสูงกว่าความเค้นปกติ



รูปที่ ข.5 กราฟเปรียบเทียบความเค้นความเครียดปกติกับความเค้นความเครียดจริง [31]

$$\text{True Stress } \sigma_f = \frac{F_i}{A_i} = S(1 + e) \quad (\text{ข.5})$$

$$\text{True Strain } \phi = \ln\left(\frac{l_i}{l_0}\right) = \ln(1 + e) \quad (\text{ข.6})$$

สำหรับค่าความเค้นความเครียดจริงของวัสดุโลหะชนิดใดชนิดหนึ่ง จะมีความสัมพันธ์กันดังสมการ

$$\sigma_f = C\phi^n \quad (\text{ข.7})$$

เมื่อกำหนดให้ C คือ ค่าคงที่ของวัสดุเรียกว่า Strength Coefficient

n คือ strain hardening exponent

- ความเค้นและความเครียดวิศวกรรม (Engineering Stress-Engineering Strain Curve) เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของความเค้น ที่เกิดขึ้นตามปกติกับความเครียดในเชิงเส้นตรง เมื่อได้รับแรงกระทำแก่ชิ้นงานในระดับต่าง ๆ โดยเส้นกราฟนี้สามารถนำมาใช้งานได้อย่างถูกต้อง ภายใต้วงการยืดหยุ่นตัวของโลหะชิ้นงานนั้น จะได้สมการดังนี้

$$\text{Nominal Stress } S = \frac{F_1}{A_0} \quad (\text{ข.8})$$

$$\text{Linear Strain } e = \frac{l_1 - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l} \quad (\text{ข.9})$$

ข.1.1.3 การสร้างเส้นโค้งการไหลของโลหะ

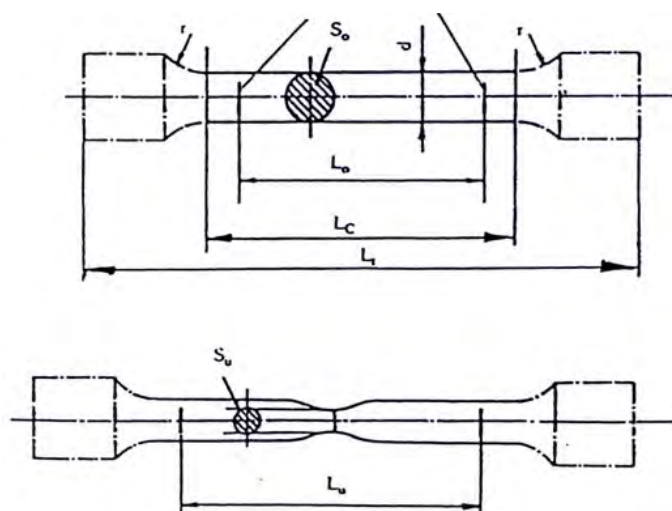
การสร้างเส้นโค้งการไหล (Flow curve) ของโลหะมีวิธีการสร้างอยู่ 3 วิธี คือ

- การทดสอบแบบดึง (Tension Test) การทดสอบแบบนี้จะเห็นได้ว่าเส้นกราฟ True Stress-True strain ในช่วงการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร จะอยู่สูงกว่าเส้นกราฟ Nominal Stress-Linear Strain การทดสอบแบบนี้นิยมใช้กับกระบวนการขึ้นรูปชิ้นงานโลหะ ที่มีความเค้นดึงเกิดขึ้นอย่างเดียว
- การทดสอบแบบกดอัด (Compression Test) เป็นการทดสอบโดยการกดหรืออัดชิ้นงาน ซึ่งการทดสอบแบบนี้ จะเห็นได้ว่าเส้นกราฟ True Stress-True Strain ในช่วงการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร จะอยู่ต่ำกว่าเส้นกราฟ Nominal Stress-Linear Strain Curve การทดสอบแบบนี้ นิยมใช้กับกระบวนการขึ้นรูปชิ้นงานโลหะที่มีความเค้นอัดเกิดขึ้นอย่างเดียว
- การทดสอบแบบบิด (Torsion Test) เป็นการทดสอบ โดยการจับชิ้นงานบิดหรือให้แรงเฉือน แก่ชิ้นงาน การทดสอบแบบนี้นิยมใช้กับการขึ้นรูปชิ้นงานโลหะ ที่มีความเค้นเฉือนเกิดขึ้นอย่างเดียว

ข. 1.2 การทดสอบแรงดึง

การทดสอบแบบดึงเป็นการหาสมบัติทางกลอีกประเภทหนึ่ง ที่ต้องทำการทดสอบอยู่เสมอ เพื่อนำผลไปใช้ในการออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกล โดยการดึงชิ้นงานออกจากกัน และบันทึกหน่วยวัดแรงตลอดเวลาจนกว่าชิ้นงานจะขาดออกจากกัน ส่วนความเครียดนั้นสามารถหาได้จากความยาวเกจ (Gauge Length) ที่เปลี่ยนไปอยู่ตลอดเวลาเทียบกับความยาวเกจเดิม โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ก็จะได้อาณาความเครียดที่เกิดขึ้นตลอดเวลา จนกว่างานจะขาดออกจากกัน ซึ่งในการวัดการยืดตัวจะใช้ลิเนียร์สเกลเป็นตัววัดค่าการยืดตัวของชิ้นงาน ที่พิจารณาจะต้องมีการเตรียมให้เหมาะสม เพื่อหาค่าแรงดึงที่ใช้ในการทดสอบ จะทำให้สามารถทราบถึงคุณสมบัติทางกลของวัสดุชิ้นงาน ที่ทำการทดสอบให้ได้ค่าใกล้เคียงค่าจริง

- วัสดุชิ้นงานทดสอบ การเตรียมชิ้นงานทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน มอก. 244 ดังแสดงรายละเอียดในรูปที่ ข.6 และตารางที่ ข.1 ซึ่งเป็นวัสดุชิ้นงานกลมมีความยาวก่อนดึง $L_0 = 5.65\sqrt{S_0}$



รูปที่ ข.6 แสดงภาพลักษณะชิ้นทดสอบภาคตัดวงกลม [31]

ตาราง ข.1 แสดงขนาดของชิ้นทดสอบหน้าตัดกลม

พื้นที่ หน้าตัด S_0 (มม. ²)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง d (มม.)	ความยาว ก่อนดึง L_0 (มม.)	ความยาว ขนาดต่ำสุด $L_c = 5.5d$ (มม.)	รัศมีของบ่า ต่ำสุด r (มม.)	เกณฑ์ความคลาดเคลื่อน ของเส้นผ่านศูนย์กลาง $\pm$ (มม.)
12.5	3.99	20	22	4	0.02
25	5.64	28	31	5	0.03
50	7.98	40	44	8	0.04
100	11.28	56	62	10	0.05
150	13.82	69	76	13	0.06
200	15.96	80	88	15	0.07
400	22.56	113	124	23.5	0.08

- หมายเหตุ 1. ปลายยึดและส่วนขนานของชิ้นทดสอบ จะต้องมีความยาวเท่ากัน โดยเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของการของการรวมแกนจะต้องอยู่ภายในกำหนด 0.03 มม.
2. เส้นผ่านศูนย์กลางคอคอดความยาวขนานจะต้องต่างกันไม่เกิน 0.03 มม.
3. ในกรณีพิเศษชิ้นทดสอบ ซึ่งทดสอบซึ่งเส้นผ่านศูนย์กลางแตกต่างจากตารางที่ ข.1 อาจใช้ความยาวก่อนดึงเท่ากับ $5.65\sqrt{S_0}$ คือ ประมาณ 5 เท่าเส้นผ่านศูนย์กลาง

ข.1.2.1 วิธีการทดสอบ

รายละเอียดของวิธีการทดสอบการดึงมีขั้นตอนดังนี้

- การทดสอบโดยการดึง

1. นำชิ้นงานไปจับที่หัวจับของเครื่องดึง
2. ปรับเกวียด ของเครื่องไว้ที่ตำแหน่งศูนย์ และให้ความเร็วในการดึง 0.5 มม./นาที
3. ให้แรงกระทำแก่ชิ้นงานแก่ชิ้นงาน จากนั้นก็คงที่แรงไว้ที่ระดับนั้น
4. วัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และความยาวของชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลงไป
5. เพิ่มแรงขึ้นเป็นระยะ ๆ และวัดผลที่เกิดขึ้น

- สร้างเส้นโค้งความเค้นความเครียด การสร้างเส้นโค้งความเค้นความเครียดปกติ (Nominal Stress-Linear Strain Curve) โดยนำผลที่ได้มาคำนวณและแทนค่าที่วัดได้ในสมการที่ (ข.5) และ (ข.6)

- สร้างเส้นโค้งความเค้นความเครียดจริง (True Stress-True Strain Curve) โดยนำผลที่ได้มาคำนวณและสร้าง บนกราฟเดียวกันกับ การสร้างเส้นโค้งความเค้นความเครียดปกติ Nominal Stress-Linear Strain Curve โดยแทนค่าที่วัดได้ในสมการที่ (4) และ (5)

จากสมการ Power-law และจาก Flow curve $Kf = C\phi^n$ ($y=ax+b$) $n = a$, $\text{Log}C = b$ จะได้ค่า $C = 10^b$

ข. 1.3 การทดสอบแรงอัด

การทดสอบแรงอัดเป็นการทดสอบ เพื่อหาสมบัติเชิงกลของวัสดุอีกวิธีหนึ่ง ลักษณะการทดสอบแรงอัดจะตรงกันข้ามกับการทดสอบแรงดึง คือ การให้แรงอัดหรือกดลงบนชิ้นทดสอบ จนกระทั่งชิ้นทดสอบเริ่มเปลี่ยนรูปในลักษณะขยายตัวออกทางด้านข้าง หรือมีการแตกของชิ้นงานทดสอบ ระหว่างแผ่นกดจะลดน้อยลง เนื่องจากผลของความเสียดทาน ชิ้นทดสอบจะป่องออก และสภาพความเค้นก็ไม่ใช่มิติอีกต่อไป ถ้ามีการหล่อลื่นอย่างดี ตัวอย่างเช่น ใช้แผ่นพลาสติกหรือการเชาร่องเพื่อให้สารหล่อลื่นเข้าไปได้ จะทำให้ความเสียดทานลดน้อยลง สำหรับ Flow stress ซึ่งเกือบจะเป็นความเค้นในหนึ่งมิติ

$$k_f = \frac{F}{A} = \frac{Al}{A_0 l_0} = \frac{F(l_0 - \Delta l)}{A_0 \cdot l_0} = \frac{F}{A_0} \cdot e^{\phi_v} \quad (\text{ข.10})$$

$$\phi_v = \ln\left(\frac{l_0 - \Delta l}{l_0}\right) \quad (\text{ข.11})$$

สำหรับงานขึ้นรูปโลหะ นิยมใช้เส้นการไหลตัวจากการทดสอบแรงอัดด้วยขึ้นทดสอบ ที่มีอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางต่ำ การทดสอบโลหะเหนียวใช้ $L_0/d_0 = 3$ สำหรับวัสดุเปราะจะใช้ $L_0/d_0 = 1.5-2$ เพราะสามารถหาค่าการไหลตัวที่ความเครียดจริงมีค่าเกิน 2.0 ได้สะดวกกว่า การทดสอบแรงดึง โดยทั่วไปความเครียดของงานอัดรีดขึ้นรูปโลหะมีค่ามากกว่า 2 ถึง 4 และอัตราความเครียดใช้งาน ($\dot{\epsilon}$) ประมาณ 100 S^{-1} ซึ่งเป็นอัตราความเครียดระดับกลาง ส่วนเส้นการไหลที่ได้จากการทดสอบแรงดึงนั้น อัตราความเครียดจะอยู่ระดับต่ำ ซึ่งเหมาะสำหรับเป็นข้อมูลในงานโครงสร้างและงานออกแบบทั่ว ๆ ไป นอกจากนี้การหาเส้นการไหลตัวในงานขึ้นรูปโลหะจำเป็นต้องคำนึงถึงผลกระทบของอุณหภูมิ และการควบคุมอัตราความเครียดจริงให้คงที่ด้วย เมื่อขึ้นทดสอบได้รับแรงทดสอบมากกว่าแรงที่จุดคราก เป็นผลให้ขึ้นทดสอบจะเริ่มเปลี่ยนรูปถาวร เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกและอะตอมภายในเนื้อขึ้นทดสอบ ขึ้นทดสอบจะสามารถรับแรงได้มากขึ้นที่เรียกว่า ความเครียดแข็ง (Strain Hardening) ในเนื้อขึ้นทดสอบ ความสัมพันธ์ของความเค้นจริงและความเครียดจริง ในช่วงเหนือจุดครากหรือในช่วงการเปลี่ยนรูปถาวรอาจแทนด้วยสมการ

$$\sigma = H \tilde{\epsilon}^n \quad (\text{ข.12})$$

ซึ่งเป็นสมการความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นจริงและความเครียดจริง ที่ให้ผลสอดคล้องกับผลของการทดสอบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงที่ก่อนเกิดคอคอดที่ขึ้นทดสอบจะขาดจากกัน ในที่นี้ n คือ ตัวเลขยกกำลังของความเครียดแข็ง (Strain Hardening Exponent) และ H คือ สัมประสิทธิ์ความแข็งแรงของวัสดุขึ้นทดสอบ และถ้าจุด σ และ $\tilde{\epsilon}$ ในกระดาษลอก-ลอกจะได้กราฟเส้นตรง และสามารถหาค่า H ได้ที่จุดตัดที่ $\tilde{\epsilon}$ มีค่าเท่ากับ 1 ส่วนความลาดชันของเส้นตรงจะเป็นค่า n ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ถ้ามีค่าเท่ากับศูนย์จะหมายความว่า วัสดุจะมีการยืดตัวแบบถาวรอย่างสมบูรณ์ แต่ถ้า n มีค่าเท่ากับ 1 จะหมายถึง การยืดตัวจะเป็นแบบยืดหยุ่นและ H จะมีค่าเท่ากับมอดูลัส (E) ของวัสดุ เพื่อหาค่า H และ n อาจเขียนในรูปสมการลอก คือ

$$\log \sigma = n \log \tilde{\epsilon} + \log H \quad (\text{ข.13})$$

ซึ่งเป็นสมการเส้นตรงในแกน X-Y คือ

$$y = mx + b \quad (\text{ข.14})$$

เมื่อกำหนดให้ $y = \log \sigma$

$$x = \log \tilde{\epsilon}$$

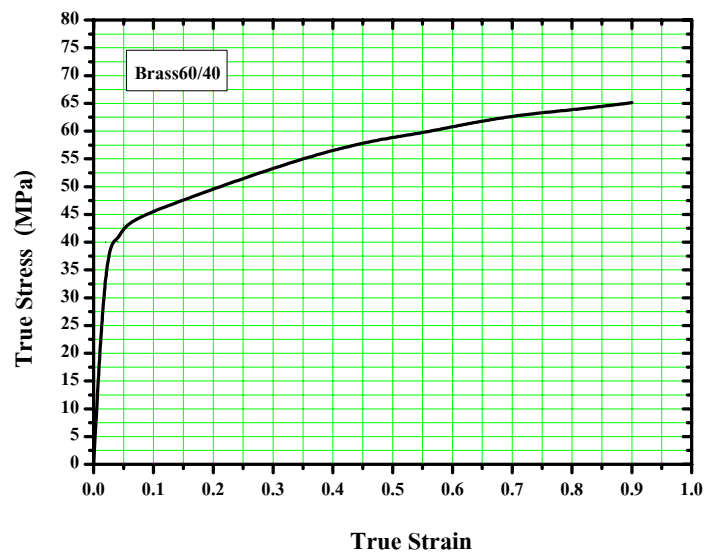
$$m = n$$

$$b = \log H$$

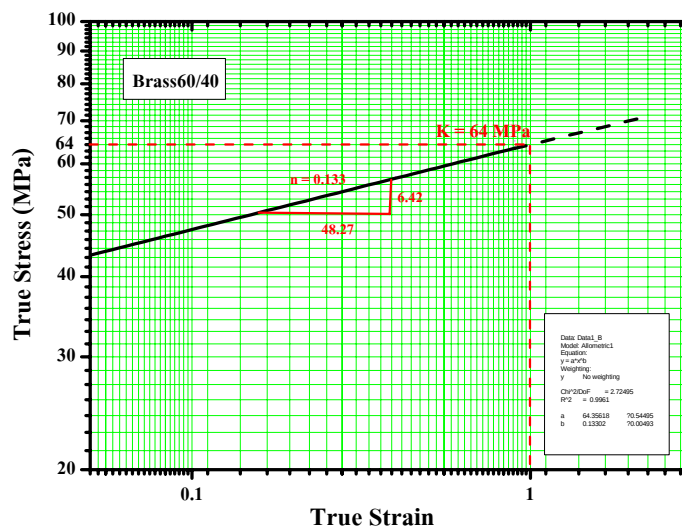
เมื่อกำหนดจุดระหว่าง σ และ $\tilde{\epsilon}$ ลงบนกราฟลอก-ลอกจะได้เส้นตรง ซึ่งมีความลาดเท่ากับ n และ $H = \sigma$ ที่จุดตัด $\tilde{\epsilon} = 1$

ข. 1.4 ผลการทดสอบสมบัติทางกล

เมื่อทำการทดสอบแรงอัดของชิ้นทดสอบทองเหลือง จะได้เส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจากการทดสอบ จากนั้นจึงนำค่าที่ได้ไปคำนวณและสร้างเส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นจริงและความเครียดจริงในกราฟล็อก-ล็อก (log-log) สุดท้ายทำการหาค่าจากสมการยกกำลัง (Power law) ของเส้นการไหล (Flow curve) ด้วยวิธี Least Squares จะได้ค่า $\sigma = K\varepsilon^n$ หรือ $(y=ax+b)$ เมื่อ $n = a$, $\text{Log}C = b$ เท่ากับ $K=64$ และ $n=0.133$



รูปที่ ข.7 เส้นแสดงความสัมพันธ์ความเค้นและความเครียดของทองเหลือง Brass60/40

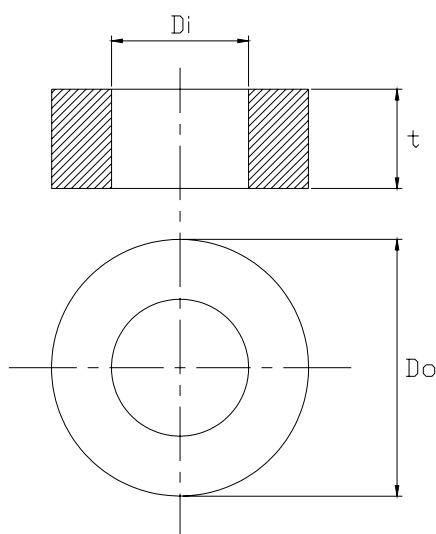


รูปที่ ข.8 เส้นโค้งการไหลของทองเหลือง Brass60/40

ข. 2 ความเสียหายของเหล็ก Brass60/40 ในกระบวนการอัดรีดขึ้นรูป

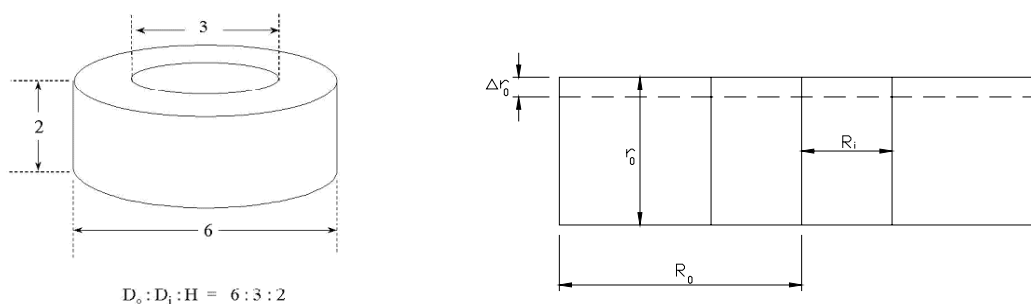
Male และ Cockcroft [19] กล่าวถึงหลักการในการศึกษาความเสียหายระหว่างแม่พิมพ์กับชิ้นงานที่อุณหภูมิต่าง ๆ กัน เราอาศัยเทคนิคที่เรียกว่า Ring Compression Test เป็นการศึกษาความเสียหายภายใต้ช่วงการเปลี่ยนรูปอย่างถาวรของวัสดุ โดยใช้แม่พิมพ์แผ่นเรียบจำนวน 2 แผ่น กดชิ้นงานให้ความสูงลดลงประมาณร้อยละ 50 จะทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของชิ้นงานขยายออกเป็นสัดส่วนกับเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก เหมือนกับลักษณะที่เกิดในการอัดทรงกระบอกตัน อัตราการขยายของเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน จะค่อย ๆ ลดลงเมื่อขนาดของสัมประสิทธิ์ความเสียหายเพิ่มมากขึ้น จนกระทั่งเกิดการหลุดตัวของเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน จากนั้นคำนวณเปอร์เซ็นต์การลดขนาดของความสูงและเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของชิ้นงาน และนำค่าที่ได้เปรียบเทียบกับตารางมาตรฐาน จะได้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายระหว่างผิวชิ้นงานกับผิวแม่พิมพ์ออกมา วิธีการนี้เป็นวิธีการทดสอบที่ง่าย ไม่ต้องใช้อุปกรณ์การวัดแรงและเครื่องมือที่ซับซ้อน การทดสอบมีใช้กันอย่างกว้างขวางโดยไม่จำกัดขอบเขตของความเร็วในการขึ้นรูป อุณหภูมิ และสารหล่อลื่น เพียงแต่เรานำสภาวะในการทำงานจริงมาจำลองกับการทดสอบก็ได้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายในสภาวะนั้น

สัมประสิทธิ์ความเสียหายระหว่างแม่พิมพ์ และชิ้นงานทุกขั้นตอนในการขึ้นรูปโลหะ มีผลต่อความเค้น ความดัน รูปแบบการไหลตัว อุณหภูมิ และแรงขึ้นรูป ดังนั้นวิธีที่ใช้ในการทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหาย ในการขึ้นรูปจะนิยมใช้วิธีการทดสอบแรงอัดขึ้นทดสอบ รูปวงแหวน ซึ่งพัฒนาโดย เมลต์ และ ค็อกคร็อฟ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินหาค่าความเค้น ในการไหลตัวของวัสดุและเพื่อประเมินหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหาย โดยการทดลองจะต้องอยู่บนสมมติฐานที่ว่า การเปลี่ยนรูปของวัสดุจะต้องเป็นแบบสม่ำเสมอ และมีความเสียหายที่คงที่ตลอดการขึ้นรูป หลักการที่ใช้ในการทดสอบ เพื่อหาค่าความเสียหายในช่วงการเปลี่ยนรูปถาวรของขึ้นทดสอบ คือ การหาขนาดความสูงและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของขึ้นทดสอบที่เปลี่ยนไป เมื่อนำขึ้นทดสอบรูปวงแหวนมากดบนแม่พิมพ์แผ่นราบที่มีค่าความแข็ง ชนิดของวัสดุขึ้นทดสอบและค่าความละเอียดผิวควรเหมือนแม่พิมพ์จริง เพื่อให้ได้อัตราส่วนของความสูงลดลงประมาณร้อยละ 50 โดยมีขนาดของวงแหวนในอัตราส่วน $D_0 : D_f : t$ เท่ากับ $6 : 3 : 2$ ขณะทำการขึ้นรูปการกดขึ้นทดสอบทิศทางของแรงกด จะอยู่ในแนวตั้งฉากกับผิวขึ้นทดสอบ ทำให้ขึ้นทดสอบเกิดการไหลตัวในทิศทางขนานกับผิวแม่พิมพ์ ถ้าเราสังเกตที่เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของขึ้นทดสอบ ที่อาจจะเพิ่มขึ้นหรือลดลง ซึ่งจะขึ้นอยู่กับการค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหาย ที่เกิดขึ้นระหว่างผิวขึ้นทดสอบกับผิวแม่พิมพ์ โดยการเปลี่ยนรูปของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของขึ้นทดสอบมีอยู่ 3 ลักษณะ คือ

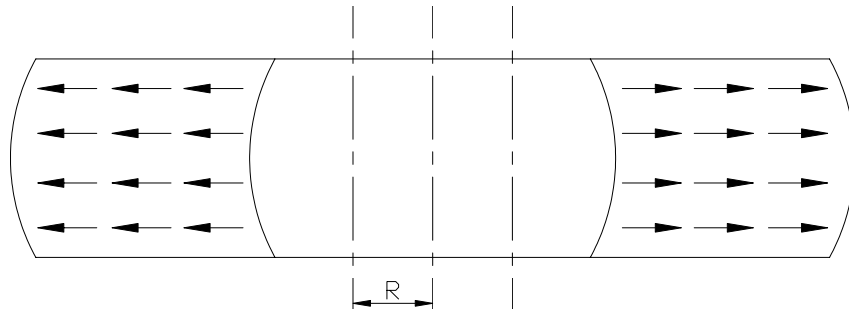


รูปที่ ข.9 ขนาดของชิ้นทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหาย [19]

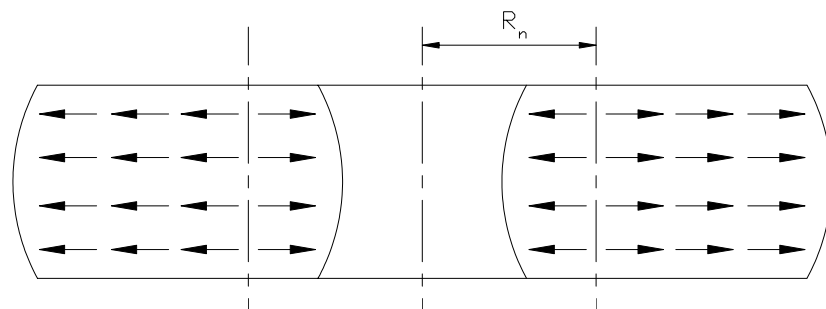
1. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่าเดิม แสดงว่าความเสียหายเท่ากับ 0 ซึ่งจะเกิดเมื่อมีการไหลตัวของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในนอก และเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของวงแหวน ที่เป็นสัดส่วนต่อกัน แต่ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของวงแหวนมีขนาดเท่าเดิม
2. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเพิ่มขึ้น แสดงว่าความเสียหายมีค่าน้อย เมื่อวงแหวนเกิดการไหลตัวตามแรงเฉือนที่เกิดขึ้น แต่ความเสียหายที่เกิดขึ้นมีค่าน้อย จึงไม่เกิดการหดตัวกลับของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน ดังนั้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในจึงมีค่าเพิ่มขึ้น
3. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในลดลง แสดงว่าความเสียหายมีค่ามาก เมื่อวงแหวนเกิดการไหลตัวตามแรงเฉือนที่เกิดขึ้น อัตราการขยายตัวของวงแหวนจะเริ่มลดลง เนื่องจากความเสียหายที่มีมากพอที่จะทำให้เกิดการหดตัวของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของชิ้นทดสอบ ดังนั้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในจึงมีค่าลดลง



รูปที่ ข.10 วงแหวนก่อนการทดสอบ



รูปที่ ข.11 การเปลี่ยนรูปเนื่องจากความเสียดทานต่ำ



รูปที่ ข.12 การเปลี่ยนรูปเนื่องจากความเสียดทานสูง

ความเสียดทานที่เกิดขึ้นบนผิวด้านบนและด้านล่างของแผ่นวงกลมแบนราบ สามารถอธิบายได้โดยค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานคูลอมบ์ ดังนี้

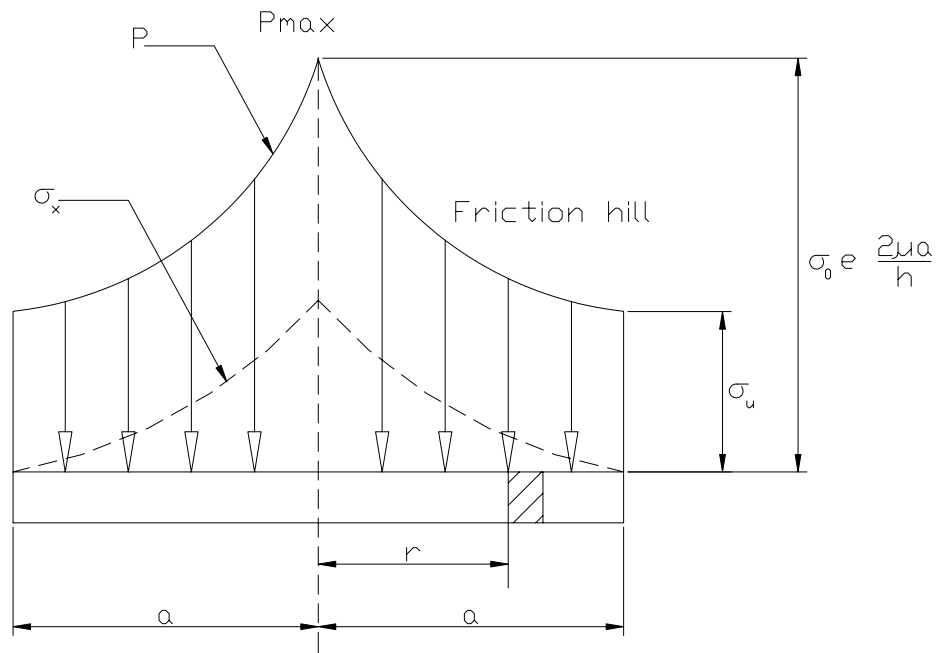
$$\mu = \frac{\tau_i}{\rho} \quad (\text{ข.15})$$

เมื่อกำหนดให้ τ_i = ความเค้นเฉือนที่ผิวสัมผัส

ρ = ความเค้นตั้งฉากที่ผิวสัมผัส

โดยที่ความดันที่เกิดขึ้นบนแผ่นวงกลมแบนราบ จะมีการกระจายแบบสมมาตรรอบแกนและความดันจะมากที่สุดที่จุดศูนย์กลางแผ่น ซึ่งลักษณะเช่นนี้จะเรียกว่า Friction Hill โดยมีสมการดังนี้

$$\rho = \sigma_o e^{\frac{2\mu}{h}(a-r)} \quad (\text{ข.16})$$



รูปที่ ข.13 Friction Hill ที่เกิดขึ้นบนแผ่นจานกลม

จากสมการที่ ข.16 สามารถหาสมการความดันเฉลี่ยได้ดังนี้

$$\bar{\rho} = \frac{\int_0^a 2\pi\rho r dr}{\pi a^2} = \frac{\sigma_0}{2} \left(\frac{h}{\mu a} \right)^2 \left[e^{2\mu a/h} - \frac{2\mu a}{h} - 1 \right] \quad (\text{ข.17})$$

ตามทฤษฎีของ Von mises จะให้ความสัมพันธ์ของแรงภายใต้สภาวะ Sticking คือ

$$T_i = T_o = k = \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}} \quad \text{ได้ดังนี้}$$

$$\rho = \sigma_0 \left[1 + \frac{2}{\sqrt{3}} \times \frac{[a-r]}{h} \right] \quad (\text{ข.18})$$

ข. 2.1 วิธีการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

วิธีการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน จากการทดสอบแรงอัดขึ้นทดสอบรูปวงแหวน (Ring Compression Test) ระหว่างชิ้นงานกับแม่พิมพ์ โดยอาศัยกฎของคูลอมบ์ตามทฤษฎีของ เมลล์ และค็อกคร็อบ (Male and Cockcroft) สามารถหาได้ตามขั้นตอนดังนี้

ข. 2.1.1 หาค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน

หาค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของชิ้นทดสอบสามารถหาได้ดังนี้

$$\% \text{Reduction in Internal Diameter} = \frac{d_0 - d_1}{d_0} \times 100 \quad (\text{ข.19})$$

เมื่อ d_0 = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในก่อนกด

d_1 = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในหลังกดทดสอบ

ข. 2.1.2 หาเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความสูง

หาเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความสูงของชิ้นทดสอบ สามารถหาได้ดังนี้

$$\% \text{Reduction in Height} = \frac{h_0 - h_1}{h_0} \times 100 \quad (\text{ข.20})$$

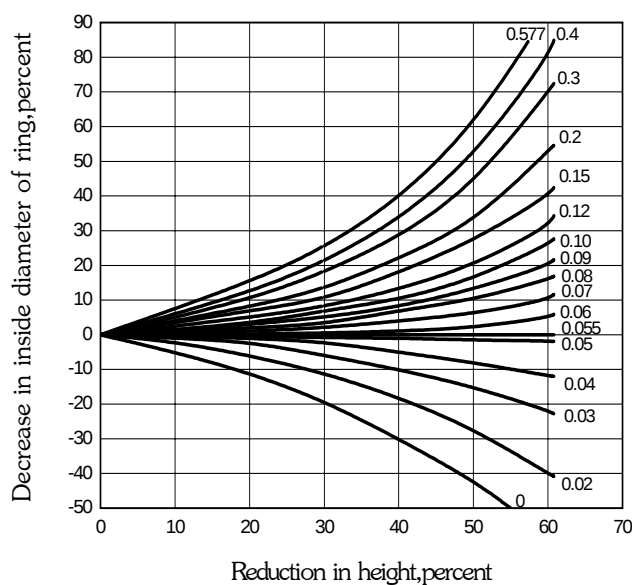
เมื่อ h_0 = ขนาดความสูงของชิ้นทดสอบก่อนกด

h_1 = ขนาดความสูงของชิ้นทดสอบหลังกด

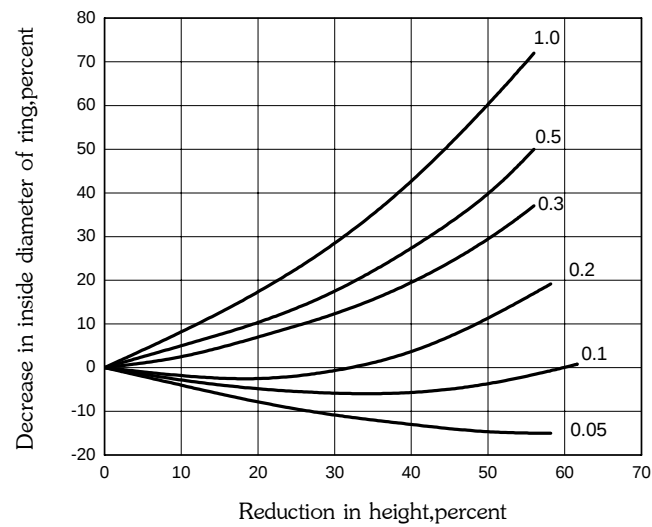
ข. 2.1.3 อ่านค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายจากกราฟเปรียบเทียบ

นำค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในและค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความสูงของชิ้นทดสอบไปอ่านค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายจากกราฟตามทฤษฎีของเมลล์และค็อกคร็อป

(Male and Cockcroft)



รูปที่ ข.14 กราฟเปรียบเทียบความเสียหาย μ ตามทฤษฎีของเมลล์และค็อกคร็อป



รูปที่ ข.15 กราฟเปรียบเทียบความเสียดทาน m ตามทฤษฎีของเมลล์และค็อกคร็อบ

ข. 2.1.4 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดสอบ

- แม่พิมพ์แผ่นเรียบ
- ชุดรองแม่พิมพ์
- เครื่องอัดไฮดรอลิกส์
- อุปกรณ์วัดขนาดเวอร์เนียร์คาลิปเปอร์ ความละเอียด 0.05 มม.



รูปที่ ข.16 แม่พิมพ์แผ่นเรียบ



รูปที่ ข.17 ชุดรองแม่พิมพ์

ข. 2.1.5 ขั้นตอนการทดสอบ

- เตรียมเครื่องอัดไฮดรอลิกส์ ติดตั้งชุดรองแม่พิมพ์บนแท่นเครื่อง และจับยึดแม่พิมพ์โดยให้แม่พิมพ์อยู่ตรงกลางเครื่อง
- วัดความสูงชิ้นงานและวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของชิ้นงานทุกชิ้นและบันทึก
- นำชิ้นงานวางบนกึ่งกลางแม่พิมพ์
- ทำการขึ้นรูปชิ้นงานโดยให้ความสูงลดลงประมาณร้อยละ 50 ของความสูงเดิม
- นำชิ้นงานออกมาวัดขนาดความสูงและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในและบันทึกค่า
- ทำการวิเคราะห์และสรุปผล

ตารางที่ ข.2 แสดงผลการทดสอบความเสียดทาน

อุณหภูมิ (°C)	ขนาดชิ้นงานก่อน การขึ้นรูป			ขนาดชิ้นงานหลัง การขึ้นรูป			% reduction in ID	% reduction in height	μ	m
	h	Øใน	Øนอก	h	Øใน	Øนอก				
750	8.56	12.60	25.50	4.5	12.70	33.63	-0.794	47.430	0.05	0.2

ดังนั้นการวิเคราะห์พฤติกรรมทางกล ของโลหะสำหรับกระบวนการอัดรีดขึ้นรูปทองเหลือง ด้วยการประมวลผลแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อหาแนวทางลดจุดบกพร่องแบบโพรง ที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน จึงต้องกำหนดสมบัติและสถานะต่าง ๆ ที่สำคัญของวัสดุทองเหลือง ในแบบจำลองของกระบวนการอัดรีดขึ้นรูป ดังแสดงรายละเอียดตามตารางที่ ข.3 แสดงสมบัติของวัสดุทองเหลือง ที่กำหนดในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

ตารางที่ ข. 3 แสดงสมบัติของวัสดุทองเหลือง Brass60/40 ที่กำหนดในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

สมบัติของวัสดุชิ้นงาน	ทองเหลือง Brass 60/40
มอดุลัสยืดหยุ่น E	105 (GPa)
ค่าคงตัววัสดุ K	64 (MPa)
ความเค้นคราก σ	43 (MPa)
ค่าสัมประสิทธิ์ความเครียดแข็ง n	0.133
อัตราส่วนของปัวซอง ν	0.3
ความเสียดทาน m	0.2
ความหนาแน่น (Mass Density)	$8.12e^{-9}$ (g/cm ³)
ความเร็วขึ้นรูป (Forming Velocity)	0.5 – 2.0 (m/s)
การนำความร้อน (Thermal Conductivity)	122 (W/m·K)
ความจุความร้อนจำเพาะ (Heat Cap.)	3.105 (J/kg·K)
สัมประสิทธิ์การขยายตัว (Thermal Expansion Coefficient)	$2.07e^{-5}$ ($\mu\text{m/m}\cdot\text{K}$)

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	นายฉัตรแก้ว สุริยะภา
วัน เดือน ปีเกิด	29 เมษายน 2518
ประวัติการศึกษา	
ระดับอาชีวศึกษา	ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง แผนกวิชาช่างเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตขอนแก่น พ.ศ. 2538
ระดับปริญญาตรี	ครุศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตขอนแก่น พ.ศ. 2540
	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล พ.ศ. 2544
ระดับปริญญาโท	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมระบบการผลิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี พ.ศ. 2549
ทุนการศึกษาหรือทุนวิจัย	โครงการพัฒนานุเคราะห์ สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล พ.ศ. 2545
ประวัติการทำงาน	อาจารย์ ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น พ.ศ. 2540-ปัจจุบัน

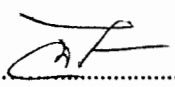
17 ก.ค. 2550

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ข้อตกลงว่าด้วยการโอนลิขสิทธิ์ในวิทยานิพนธ์

วันที่ 28 เดือน มิถุนายน พ.ศ. 2550

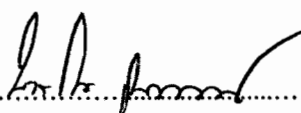
ข้าพเจ้า (นาย/นาง/นางสาว) นัศรแก้ว สุริยะภา รหัสประจำตัว 45410814
เป็นนักศึกษาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ระดับปริญญา ☒ โท ☐ เอก
หลักสูตร วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมระบบการผลิต คณะ วิศวกรรมศาสตร์
อยู่บ้านเลขที่ 92/4 หมู่ที่ 8 ตรอก/ซอย ถนน ตำบล/แขวง ตีลา
อำเภอ/เขต เมือง จังหวัด ขอนแก่น รหัสไปรษณีย์ 40000 ขอโอนลิขสิทธิ์ในวิทยานิพนธ์ให้กับ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี โดยมี รศ.ดร.เอก ไชยสวัสดิ์
ตำแหน่ง คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ เป็นผู้รับโอนลิขสิทธิ์และมีข้อตกลงดังนี้

1. ข้าพเจ้าได้จัดทำวิทยานิพนธ์เรื่อง การลดอุณหภูมิของแบบโครงในงานอัดรีดขึ้นรูปทองเหลือง
หน้าตัดหกเหลี่ยม ซึ่งอยู่ในความควบคุมของ ดร.พงษ์ศักดิ์ ถึงสุข ตามมาตรา 14 แห่ง พ.ร.บ. ลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2537
และถือว่าเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
2. ข้าพเจ้าตกลงโอนลิขสิทธิ์จากผลงานทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากการสร้างสรรค์ของข้าพเจ้าในวิทยานิพนธ์
ให้กับมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ตลอดจนอายุแห่งการคุ้มครองลิขสิทธิ์ตามมาตรา 23 แห่ง
พระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2537 ตั้งแต่วันที่ได้รับอนุมัติโครงร่างวิทยานิพนธ์จากมหาวิทยาลัย
3. ในกรณีที่ข้าพเจ้าประสงค์จะนำวิทยานิพนธ์ไปใช้ในการเผยแพร่ในสื่อใด ๆ ก็ตาม ข้าพเจ้าจะต้องระบุ
ว่าเป็นวิทยานิพนธ์เป็นผลงานของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีทุก ๆ ครั้งที่มีการเผยแพร่
4. ในกรณีที่ข้าพเจ้าประสงค์จะนำวิทยานิพนธ์ไปเผยแพร่หรืออนุญาตให้ผู้อื่นทำซ้ำหรือดัดแปลงหรือ
เผยแพร่ต่อสาธารณชนหรือกระทำการอื่นใด ตามมาตรา 27, มาตรา 28 และมาตรา 29 และมาตรา 30 แห่ง
พระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2537 โดยมีค่าตอบแทนในเชิงธุรกิจ ข้าพเจ้าจะกระทำได้เมื่อได้รับความยินยอมเป็น
ลายลักษณ์อักษรจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ลงชื่อ  ผู้โอนลิขสิทธิ์
(นาย นัศรแก้ว สุริยะภา)

ลงชื่อ  ผู้รับโอนลิขสิทธิ์
(รศ.ดร.เอก ไชยสวัสดิ์)

ลงชื่อ  พยาน
(ดร.พงษ์ศักดิ์ ถึงสุข)

ลงชื่อ  พยาน
(รศ.ดร.บวรโชค ผู้พัฒน์)