



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

เรื่อง การวิเคราะห์กระบวนการอัดรีดอลูมิเนียมโดยใช้วิธีไฟต์ไนต์เอลิเมนต์
โดย ว่าที่ร้อยตรี อนุพงศ์ พรหมสวรรค์

ได้รับอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(อาจารย์ ดร.มงคล หวังสถิตย์วงศ์)

12 มีนาคม 2550

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ประธานกรรมการ

(อาจารย์ ดร.สรังสี เดชเจริญ)

กรรมการ

(อาจารย์ ดร.ศศิธร พิทักษ์ฐาปนพงษ์)

กรรมการ

(อาจารย์ ดร.วิชัย รุ่งเรืองอนันต์)

การวิเคราะห์กระบวนการอัดรีดอลูมิเนียมโดยใช้วิธีไฟต์ในต์เอลิเมนต์

ว่าที่ร้อยตรี อนุพงศ์ พรหมสวรรค์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต ภาควิชาวิศวกรรมการผลิต

บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ปีการศึกษา 2549

ลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ชื่อ : ว่าที่ร้อยตรี อนุพงศ์ พรหมสวรรค์
ชื่อวิทยานิพนธ์ : การวิเคราะห์กระบวนการอัดรีดอลูมิเนียมโดยใช้วิธีไฟต์ไนต์เอลิเมนต์
สาขาวิชา : วิศวกรรมการผลิต
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : อาจารย์ ดร.สุรังสี เตชเจริญ
อาจารย์ ดร.ศศิธร พิทักษ์ฐานปนพงษ์
ปีการศึกษา : 2549

บทคัดย่อ

ในกระบวนการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดในอุตสาหกรรมนั้น ส่วนใหญ่ใช้ประสบการณ์ของผู้ออกแบบและการลองผิดลองถูกเป็นหลัก ซึ่งวิธีการนี้มีค่าใช้จ่ายสูง และใช้เวลานานในการผลิตแม่พิมพ์อัดรีด งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาอิทธิพลของลักษณะแม่พิมพ์ที่มีต่อการไหลของอลูมิเนียมในการอัดรีด โดยศึกษาจากการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อนำผลการศึกษาไปปรับใช้เพื่อช่วยแก้ปัญหาและเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตในอุตสาหกรรมได้ ในการศึกษาครั้งนี้ได้ใช้คุณสมบัติอลูมิเนียม 6063 ในการจำลองการอัดรีด ตัวแปรที่ศึกษาคือ มุมพอกเกิด อัตราส่วนการอัดรีด ความเร็วอัดรีดเข้า และปริมาตรของพอกเกิด โดยศึกษาแม่พิมพ์อัดรีด 2 แบบ ผลที่ได้แสดงว่า อัตราส่วนการอัดรีด และมุมพอกเกิดมีผลต่อความเร็วอัดรีดออก ส่วนความเร็วอัดรีดเข้า และปริมาตรพอกเกิดนั้นจะมีผลต่อความเสียหายที่เกิดขึ้นกับอลูมิเนียมที่ถูกอัดรีด

(วิทยานิพนธ์มีจำนวนทั้งสิ้น 61 หน้า)

คำสำคัญ : การอัดรีด, พอกเกิด, อลูมิเนียม, แม่พิมพ์



อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

Name : Mr.Anupong Promsawan
Thesis Title : Analysis of Aluminium Extrusion Process using Finite Element Methode
Major Field : Production Engineering
King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok
Thesis Advisors : Dr.Surangsee Dechjarone
Dr.Sasithorn Pitagtapanapong
Academic Year : 2006

Abstract

The design process of extrusion die in manufacturing is based on designer's experience and using trials and errors. This requires high level of resources including time and expense. This study aims to understand the extrusion process and the effects of pocket design parameters on the extrudate velocity by systematically investigating via finite element analysis. It focuses on the extrusion of aluminium 6063. The parameters examined are pocket angle, extrusion ratio, input velocity and pocket volume. Two different profiles are investigated. It is found that the extrusion ratio and pocket angle has strong influence on metal flow velocity. On the other hand, initial velocity and pocket volume has greater effect on damage of the extrudates.

(Total 61 pages)

Keywords : Extrusion, Pocket, Aluminium, Die



Advisor

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ อาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์ที่ได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ของการวิจัยมาโดยตลอด และทุนการวิจัยที่ได้รับจากทุนอุดหนุนการวิจัยของบัณฑิตวิทยาลัย จึงขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัยที่ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยครั้งนี้มา พร้อมทั้งบริษัท เอ็มทีเอสเมท จำกัด สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยที่ให้ความร่วมมือไว้ ณ ที่นี้ด้วย และอาจารย์ภายในภาคทุกท่านที่ได้ให้ความรู้ เพื่อนๆ ภายในภาควิชาที่กดดันจนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลงได้

ท้ายนี้ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ซึ่งสนับสนุนในด้านการเงินและให้กำลังใจ แก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

อนุพงศ์ พรหมสวรรค์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ซ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 สมมติฐานการวิจัย	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.5 ขั้นตอนการวิจัย	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 การอัดรีด (Extrusion)	4
2.2 อลูมิเนียม	9
2.3 การวิเคราะห์โดยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์	10
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย	14
3.1 ส่วนประกอบในกระบวนการอัดรีด	14
3.2 วิธีการจำลองการอัดรีดด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	17
3.3 การกำหนดตัวแปรในการจำลองการอัดรีด	20
3.4 การวิเคราะห์ผลการอัดรีดจากแบบจำลอง	23
บทที่ 4 ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผล	26
4.1 การเปรียบเทียบผลการจำลองกับงานวิจัยอื่นๆ	26
4.2 ความเร็วอัดรีดออกในแบบแม่พิมพ์ที่ 1	30
4.3 ความเร็วอัดรีดออกในแบบแม่พิมพ์ที่ 2	35
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	39
5.1 อภิปรายผลการทดลอง	39
5.2 สรุปผลการทดลอง	40
5.3 ข้อเสนอแนะ	41
เอกสารอ้างอิง	42

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ก	45
ผลงานวิจัย เรื่อง การศึกษาอิทธิพลของมมพอกเกิดของแม่พิมพ์ ที่มีต่อความเร็วในกระบวนการอัดรีดอลูมิเนียม	46
ภาคผนวก ข	54
ผลงานวิจัย เรื่อง การศึกษาอิทธิพลของลักษณะพอกเกิดแม่พิมพ์ ต่อความเร็วในกระบวนการอัดรีดอลูมิเนียม 6063	55
ประวัติผู้วิจัย	61

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1-1 แสดงปริมาณการส่งออกสินค้า 5 อันดับ ของปี พ.ศ. 2545	1
3-1 ค่าตัวแปรที่ใช้กำหนดในสมการที่ 3-1	18
3-2 ค่าคุณสมบัติคงที่ของอลูมิเนียม 6063	18
3-3 ค่าตัวแปรที่ใช้กับแม่พิมพ์แบบที่ 1	22
3-4 ค่าตัวแปรที่ใช้กับแม่พิมพ์แบบที่ 2	23

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2-1 ลักษณะการอัดรีดแบบโดยตรง และแบบโดยอ้อม	4
2-2 แสดงลักษณะของชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการอัดรีดอลูมิเนียม	7
2-3 แสดงการไหลของกระบวนการอัดรีดผ่านแม่พิมพ์ที่ได้ชิ้นงานกลวง	7
2-4 แสดงมุมของแม่พิมพ์ที่มีการไหลของอลูมิเนียม	8
2-5 ลักษณะของอิเล็กเมนต์ในชิ้นงานจากวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์	11
2-6 ลักษณะค่าความเค้น และอุณหภูมิจากการอัดรีดอลูมิเนียมผ่านแม่พิมพ์ด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์	13
3-1 ลักษณะแท่งอลูมิเนียมและส่วนบรรจุแท่งอลูมิเนียม	15
3-2 ส่วนประกอบของแม่พิมพ์	15
3-3 แบบแม่พิมพ์ที่ 1	16
3-4 แบบแม่พิมพ์ที่ 2	16
3-5 ลักษณะช่วงเตรียมการอัดรีดในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์	17
3-6 การกำหนดการเคลื่อนที่ของกระบวนการอัดรีด	19
3-7 แสดงวัตถุหลังจากการแบ่งอิเล็กเมนต์	20
3-8 พฤติกรรมของแรงอัดรีดที่เปลี่ยนไปตามการเคลื่อนที่อัดรีด	23
3-9 ระยะที่ใช้ในการวัดผลของความเร็ว	24
4-1 ตัวอย่างการแสดงผลของความเค้นที่ได้จากการอัดรีดแม่พิมพ์แบบที่ 1	27
4-2 ตัวอย่างการแสดงผลของความเค้นที่ได้จากการอัดรีดแม่พิมพ์แบบที่ 2	27
4-3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับเวลาในการอัดรีดที่มุมพอกเกิดต่างๆ กันในแม่พิมพ์แบบที่ 1 (อัตราส่วนการอัดรีดที่ 2.04)	28
4-4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับเวลาในการอัดรีดที่มุมพอกเกิดต่างๆ กันในแม่พิมพ์แบบที่ 1 (อัตราส่วนการอัดรีดที่ 2.79)	28
4-5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับเวลาในการอัดรีดที่มุมพอกเกิดต่างๆ กันในแม่พิมพ์แบบที่ 2 (อัตราส่วนการอัดรีดที่ 5)	29
4-6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับเวลาในการอัดรีดที่มุมพอกเกิดต่างๆ กันในแม่พิมพ์แบบที่ 2 (อัตราส่วนการอัดรีดที่ 6)	29
4-7 กราฟความเร็วของอลูมิเนียมที่ออกจากแม่พิมพ์อัดรีดกับมุมพอกเกิดที่อัตราส่วนการอัดรีดต่างๆ กัน (อัตราส่วนการอัดรีดที่ 6 ค่า)	30

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-8 กราฟความเร็วของอลูมิเนียมที่ออกจากแม่พิมพ์อัดรีดกับมุมพอกเกิด ที่อัตราส่วนการอัดรีดต่างๆ กันในแม่พิมพ์แบบที่ 1 เทียบความเร็วการอัดรีด ที่ออกจากแม่พิมพ์กับอัดรีดเข้าเป็นเปอร์เซ็นต์	31
4-9 กราฟความเร็วออกกับมุมพอกเกิด ที่ความเร็วการอัดรีดที่ต่างๆ กัน (อัตราส่วนการอัดรีดที่ 2.04)	32
4-10 กราฟความเร็วออกกับมุมพอกเกิด เทียบความเร็วการอัดรีดที่ออกจากแม่พิมพ์ กับอัดรีดเข้า โดยเทียบความเร็วเป็นเปอร์เซ็นต์ (อัตราส่วนการอัดรีดที่ 2.04)	32
4-11 กราฟความเร็วออกกับมุมพอกเกิด ที่ความเร็วการอัดรีดออกที่ต่างๆ กัน (อัตราส่วนการอัดรีดที่ 2.79)	33
4-12 กราฟความเร็วออกกับมุมพอกเกิด เทียบความเร็วการอัดรีดที่ออกจาก แม่พิมพ์กับอัดรีดเข้า โดยเทียบความเร็วเป็นเปอร์เซ็นต์ (อัตราส่วนการอัดรีดที่ 2.79)	33
4-13 กราฟความเร็วออกของอลูมิเนียมกับมุมพอกเกิด ที่ปริมาตรช่องพอกเกิด ต่างๆ กัน (อัตราส่วนการอัดรีดที่ 2.04)	34
4-14 กราฟความเร็วออกของอลูมิเนียมกับมุมพอกเกิด โดยสังเกตปริมาตร ช่องพอกเกิดต่างๆ กัน (อัตราส่วนการอัดรีดที่ 2.79)	35
4-15 ความเร็วอลูมิเนียมที่ถูกออกกับมุมพอกเกิดต่างๆ กัน โดยการเปลี่ยน E_r และ R ในแม่พิมพ์แบบที่ 2	36
4-16 แสดงผลการศึกษาเทียบกับ อัตราส่วนการอัดรีด 5 และ 6 กับอัตราส่วน การลดขนาดที่ 3 ในมุมพอกเกิดที่กำหนด	37
4-17 แสดงผลการศึกษาเทียบกับ อัตราส่วนการอัดรีด 5 และ 6 กับอัตราส่วน การลดขนาดที่ 2 ในมุมพอกเกิดที่กำหนด	37
4-18 ผลการศึกษาเทียบกับ อัตราส่วนการอัดรีด และอัตราส่วนการลดขนาด ในมุมพอกเกิดที่กำหนด (อัตราส่วนการอัดรีดที่ 5)	38

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันนี้สินค้าส่งออกของประเทศไทยลำดับต้นๆ คือ อุปกรณ์และส่วนประกอบอิเล็กทรอนิกส์ ดังตารางที่ 1-1 ซึ่งอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนเหล่านี้ ได้รับการส่งเสริมและสนับสนุนจากภาครัฐบาลเพื่อสร้างรายได้เข้าประเทศ โดยชิ้นส่วนหนึ่งที่มีปริมาณการผลิตมาก คือ ตัวระบายความร้อนของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ (Heat Sink)

ตารางที่ 1-1 แสดงปริมาณการส่งออกสินค้า 5 อันดับ ของปี พ.ศ. 2545 [1]

ชนิดสินค้า	จำนวนการส่งออก (ล้านบาท)
เครื่องคอมพิวเตอร์ อุปกรณ์และส่วนประกอบ	320,570.9
แผงวงจรไฟฟ้า	148,065.0
รถยนต์ อุปกรณ์และส่วนประกอบ	125,270.9
เสื้อผ้าสำเร็จรูป	116,698.6
ยางพารา	74,604.1

วัสดุที่ใช้ทำตัวระบายความร้อนในปัจจุบัน คือ อลูมิเนียม และกระบวนการผลิตที่นิยมกัน คือ การอัดรีด อย่างไรก็ตามรูปแบบของตัวระบายความร้อนมีการพัฒนาให้ซับซ้อนขึ้นอยู่ตลอดเวลา เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการระบายความร้อน ภายใต้ข้อจำกัดในเรื่องขนาดและน้ำหนัก เมื่อนำไปเป็นส่วนประกอบของวงจรไฟฟ้า ยังผลให้เกิดปัญหา คือ ผู้ผลิตในประเทศ ขาดความรู้ความเข้าใจในกระบวนการและเทคโนโลยีการอัดรีด ทำให้ไม่สามารถผลิตชิ้นส่วนที่มีรูปแบบซับซ้อนได้ หรือไม่สามารผลิตได้เร็วทันความต้องการของตลาด

แม่พิมพ์จึงเป็นส่วนสำคัญสำหรับการผลิตชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการผลิต เพื่อขึ้นรูปชิ้นงานให้เป็นไปตามที่ต้องการ โดยในการผลิตส่วนระบายความร้อนในอุตสาหกรรม ส่วนใหญ่จะใช้กระบวนการอัดรีดกับวัสดุอลูมิเนียม ซึ่งปัญหาที่เกิดในการผลิตนั้นจะส่งผลต่อผลิตภัณฑ์ที่อัดรีด เช่น การคดงอ หักเสียหาย ไม่ได้รูปทรงที่ต้องการ ซึ่งวิธีการแก้ไขที่ใช้กันแพร่หลายคือการลองผิดลองถูก (Trial and Error) ในการออกแบบแม่พิมพ์ แต่ในประเทศที่มีการพัฒนานั้น จะใช้การทำแบบจำลองการอัดรีดแทน ในการลดค่าใช้จ่ายพร้อมทั้งเวลาในการทำแม่พิมพ์ทดลอง และสามารถพัฒนาการผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีความหลากหลาย เพื่อเพิ่มคุณประโยชน์ในการใช้งาน และมูลค่าที่จะเพิ่มขึ้น

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาพฤติกรรมของกระบวนการอัดรีดอลูมิเนียม โดยมีจุดประสงค์เพื่อเพิ่มความเร็วของกระบวนการอัดรีด วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element) สามารถศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อความเร็วและผลที่เกิดขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็ว เช่น การเคลื่อนตัวของอลูมิเนียม อุณหภูมิ การเสียรูปของชิ้นงาน และจากความรู้ของการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดที่ได้จากงานวิจัยจะสามารถนำไปใช้เพื่อพัฒนากระบวนการอัดรีดในอุตสาหกรรมจริงต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาองค์ประกอบที่มีผลต่อกระบวนการอัดรีดอลูมิเนียม โดยเฉพาะส่วนที่มีผลต่อความเร็วในการอัดรีด

1.2.2 เพื่อศึกษาการออกแบบแม่พิมพ์การอัดรีด ที่ต้องการจะเพิ่มความเร็วในการอัดรีด โดยใช้วิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์

1.2.3 เพื่อเป็นแหล่งความรู้ในการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีด ให้กับอุตสาหกรรมการอัดรีดอลูมิเนียม สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้

1.3 สมมติฐานการวิจัย

1.3.1 อลูมิเนียมที่ใช้มีคุณสมบัติเป็นเอกพันธ์ (Homogeneous) และไอโซโทรปิก (Isotropic)

1.3.2 ลักษณะของแม่พิมพ์มีผลต่อความเร็วออกในการอัดรีด

1.3.3 กระบวนการอัดรีดแท่งอลูมิเนียมมีผลต่อความเร็วการอัดรีด

1.3.4 การจำลองการอัดรีดโดยใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์นั้น สามารถให้ผลของการอัดรีดชิ้นงานใกล้เคียงกับผลจากการอัดรีดจริง

1.4 ขอบเขตการศึกษา

1.4.1 ศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการอัดรีดอลูมิเนียมชนิด 6063

1.4.2 ใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์แบบสามมิติ

1.4.3 ใช้การอัดรีดแบบโดยตรง (Direct Extrusion) โดยไม่มีการหล่อลื่น

1.4.4 แบบจำลองการอัดรีด แท่งอลูมิเนียมกลม เส้นผ่าศูนย์กลาง 20 เซนติเมตร

1.4.5 ในการจำลองการอัดรีดจะใช้แม่พิมพ์อัดรีด 2 แบบ

1.4.6 ขอบเขตของตัวแปรที่ศึกษามีดังต่อไปนี้

1.4.6.1 ศึกษาอิทธิพลของการเปลี่ยนมุมในพอกเกิดของแม่พิมพ์อัดรีด

1.4.6.2 ศึกษาอิทธิพลของความเร็วเข้าในการอัดรีด

1.4.6.3 ศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนของการอัดรีด

1.4.6.4 ศึกษาอิทธิพลของการเปลี่ยนขนาดของแท่งอลูมิเนียม

1.5 ขั้นตอนการวิจัย

1.5.1 ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการอัดรีดอลูมิเนียม และวิเคราะห์ตัวแปรที่มีผลต่อกระบวนการ

1.5.2 จำลองการอัดรีดอลูมิเนียมในรูปแบบไม่ซับซ้อนภายในโปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์

1.5.3 เปรียบเทียบผลที่ได้กับงานวิจัย

1.5.4 ทำการเพิ่มความเร็วของการอัดรีดอลูมิเนียมในโปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์

1.5.5 ศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อความเร็วในการออกแบบแม่พิมพ์ จากผลที่ได้จากการจำลอง

1.5.6 จำลองกระบวนการอัดรีดอลูมิเนียมในแบบที่ซับซ้อนขึ้น

1.5.7 ปรับปรุงรูปแบบเพื่อเพิ่มความเร็วในกระบวนการอัดรีด

1.5.8 ประมวลผลการทดลองและเขียนผลการวิจัย

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 เป็นแนวทางในการพัฒนากระบวนการอัดรีดเพื่อเพิ่มความเร็วในการผลิตชิ้นงาน

1.6.2 ทำให้เข้าใจพฤติกรรมของการอัดรีดอลูมิเนียมขณะอัดรีด

1.6.3 เพื่อพัฒนาความรู้ทางไฟไนท์เอลิเมนต์ให้สามารถใช้งานได้จริงในอุตสาหกรรม

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

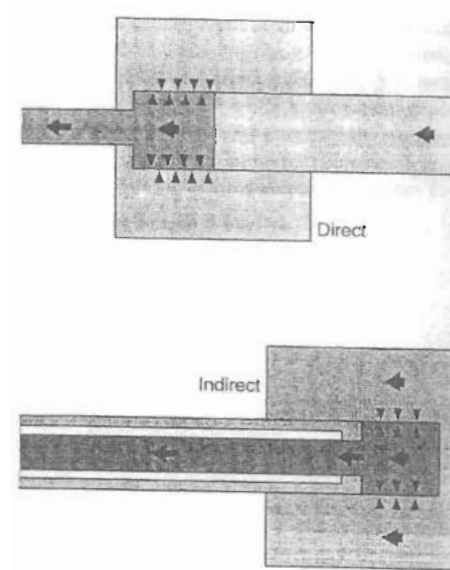
2.1 การอัดรีด (Extrusion)

การอัดรีด คือ วิธีการขึ้นรูปโลหะก่อนโดยการใส่แรงกดตัวอัดรีดขึ้นวัตถุดิบให้ออกมาตามแบบแม่พิมพ์ที่ได้กั้นไว้ภายในภาชนะที่ใช้อัด เพื่อให้ได้แบบของชิ้นงานตามแบบแม่พิมพ์จากการอัดรีดนั้นโครงสร้างของชิ้นงานก่อนออกจากแม่พิมพ์จะไม่คงที่ แต่เมื่อออกจากแม่พิมพ์จะมีสถานะคงที่จนเมื่อใกล้สิ้นสุดการอัดรีดในวัสดุไหลไม่ต่อเนื่อง ซึ่งกระบวนการอัดรีดโดยทั่วไปจะต้องทำการออกแบบแม่พิมพ์เพื่อให้ได้ชิ้นงานตามที่ต้องการ แล้วหลังจากนั้นจะทำการอัดรีดเพื่อให้ได้ชิ้นงานโดยการควบคุมกระบวนการอัดรีด [4]

2.1.1 ลักษณะกระบวนการอัดรีด

กระบวนการอัดรีดแบบโดยตรงหรือเดินหน้า (Direct หรือ Forward Extrusion) ชิ้นงานที่ผ่านแม่พิมพ์จะออกในทิศทางเดียวกับการเคลื่อนที่ของตัวอัดรีดตามภาพที่ 2-1 ทำให้การเคลื่อนที่ในการอัดรีดนั้นต้องให้แรงมากกว่าแรงเสียดทานที่ผนังภาชนะบรรจุ

กระบวนการอัดรีดแบบโดยอ้อมหรือถอยหลัง (Indirect หรือ Reverse หรือ Backward Extrusion) การเคลื่อนที่ของตัวอัดรีดจะสวนทางกับชิ้นงานที่ออกจากแม่พิมพ์ทำให้เกิดแรงเสียดทานที่ผนังภาชนะโดยส่วนใหญ่เกิดที่ก่อนออกจากแม่พิมพ์อัดรีด



ภาพที่ 2-1 ลักษณะการอัดรีดแบบโดยตรง และแบบโดยอ้อม (จากบนลงล่าง)

2.1.2 ผลิตรภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการอัดรีด

ชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการอัดรีดในแบบแม่พิมพ์ใหม่ จะต้องทำการปรับปรุงเพื่อใช้งานก่อนจะกลายเป็นผลิตรภัณฑ์ โดยผลิตรภัณฑ์อลูมิเนียมที่ได้จากการอัดรีดนั้นอยู่ในอุตสาหกรรมที่แตกต่างกันได้แก่

2.1.2.1 อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ อลูมิเนียมที่ถูกอัดรีดจะถูกแปรรูปไปเป็นส่วนประกอบสำคัญภายในวงจรไฟฟ้า เช่น กระจายความร้อน (Heat Sink) เพราะคุณสมบัติทางกลของอลูมิเนียมที่เหมาะสมกับการกระจายความร้อน และมีน้ำหนักเบา

2.1.2.2 อุตสาหกรรมก่อสร้างและตกแต่ง มีการนำมาใช้เป็นส่วนประกอบของบ้าน โดยที่นิยมใช้กันอยู่ในปัจจุบันคือ กรอบประตู หน้าต่าง หรือแปรรูปเป็นส่วนตกแต่งภายในบ้านอื่นๆ เพื่อเพิ่มความสวยงาม และความสะดวกในการใช้งานให้แก่สิ่งก่อสร้าง

2.1.2.3 อุตสาหกรรมรถยนต์และรถจักรยานยนต์ อลูมิเนียมที่จะใช้เป็นส่วนประกอบหรือใช้ตกแต่งนั้นก่อนจะผลิตต้องทำการปรับปรุงคุณสมบัติเพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งาน ซึ่งส่วนมากที่นิยมนำมาทำเป็นส่วนประดับให้

2.1.2.4 อุตสาหกรรมเครื่องใช้ภายในบ้าน ผลิตรภัณฑ์ที่ทำเป็นเครื่องใช้ได้แก่พวก บันไดพับ ด้ามไม้ถูพื้น หรือราวตากผ้า เป็นต้น โดยอลูมิเนียมที่ใช้จะมีการเพิ่มคุณสมบัติเข้าไปเพื่อให้เหมาะสมแก่การใช้งานแต่ละอย่าง

2.1.3 ชนิดของกระบวนการอัดรีดแบ่งตามอุณหภูมิอัดรีด

2.1.3.1 การอัดรีดแบบเย็น คือ การเปลี่ยนรูปโลหะก่อนโดยใช้วิธีการอัดรีดที่อุณหภูมิห้องหรือการอุ่นที่ตัวชิ้นวัสดุเพียงเล็กน้อย แต่การใช้งานวิธีนี้ใช้ได้กับโลหะบางชนิดที่สามารถใช้แรงอัดที่ความดันสูงสุดที่ใช้อัดรีดเพื่อการเปลี่ยนรูปโลหะไม่เกิน 1400 N/mm^2 ซึ่งวิธีนี้มีข้อดีคือ

- ก) ไม่เกิดปฏิกิริยากับออกไซด์ หรือแก๊ส และผลทางโลหะวิทยา
- ข) ได้คุณสมบัติทางกลที่สูง (ถ้าความร้อนที่ใช้เปลี่ยนรูปโลหะไม่ใช่ช่วงที่โลหะเปลี่ยนโครงสร้างกลับมา)
- ค) ช่วงในการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโลหะเกิดขึ้นไม่มาก
- ง) การหล่อลื่นเพื่อใช้ในการผลิตมีไม่มากนัก
- จ) ความเร็วในการผลิตดีกว่าเมื่อใช้ความร้อนไม่มากนัก

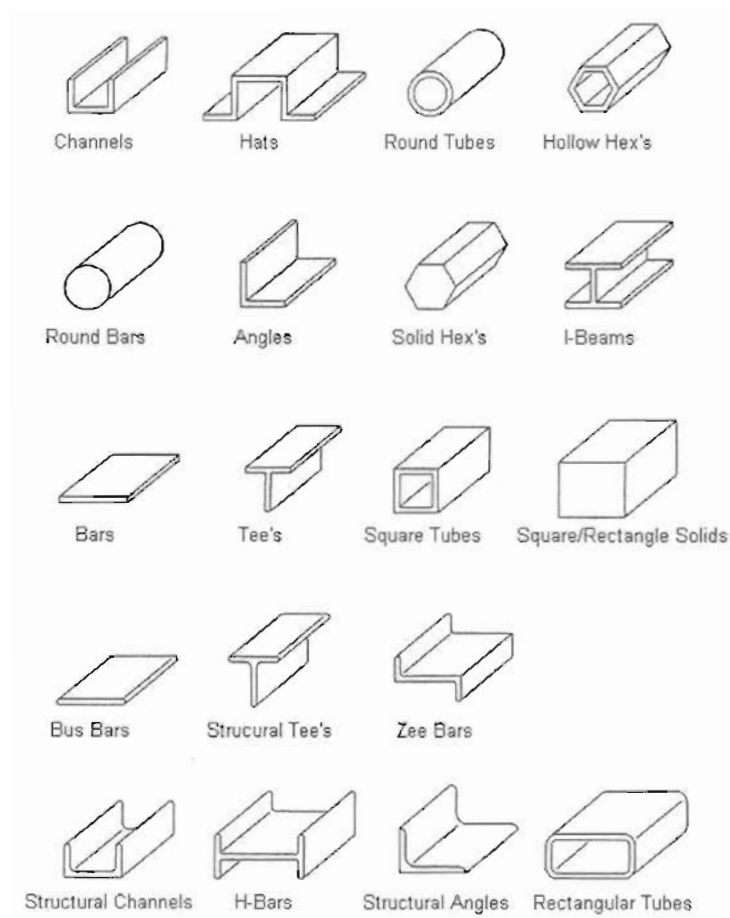
ความเร็วในการอัดรีดจะมีผลทำให้เกิดความเค้นไหล ซึ่งสามารถใช้การออกแบบแม่พิมพ์และการหล่อลื่นช่วยได้ โดยมีการทดลองที่ใช้มุมของแม่พิมพ์อัดรีดเพื่อให้ได้ชิ้นงานสำเร็จประมาณ 120 องศา เมื่อต้องการผิวชิ้นงานที่เรียบและเงางามต้องควบคุมผิวการหล่อลื่นที่บาง หากต้องการเพิ่มคุณภาพของผิวชิ้นงานควรต้องอุ่นที่ความร้อนไม่มากนัก ซึ่งสิ่งนี้ก็ถือเป็นการหล่อลื่นที่ดี และการปรับปรุงโครงสร้างโดยความร้อนกับวัตถุใดจะทำให้ลดความเค้นไหลที่เกิดและการใช้ความดันสูงก็จำเป็นด้วย

2.1.3.2 การอัดรีดแบบร้อน คือ การเปลี่ยนรูปโลหะก่อนโดยใช้วิธีการอัดรีดที่อุณหภูมิของตัวขึ้นวัตถุดิบและที่ภาชนะบรรจุระหว่าง $300-600^{\circ}\text{C}$ แต่ทั่วไปจะใช้ช่วง $450-500^{\circ}\text{C}$ ทำให้ความเค้นที่เกิดไม่น้อยมาก และการปรับความดันจากการอัดรีดที่หน้าตัดขวางของภาชนะบรรจุที่รูปร่างแม่พิมพ์ ซึ่งในงานวิจัยของ Olinawola [5] ได้ทำการศึกษาถึงผลของการอุ่นก่อน Billet ต่อคุณสมบัติของวัสดุ และในงานวิจัยของ Hanzah [6] ก็ได้ทำการทดสอบแม่พิมพ์เพื่อเพิ่มความสามารถในการทำงานที่ดีขึ้น โดยตัวแปรที่มีผลต่อคุณสมบัติกับโครงสร้างของขนาดชิ้นงานสำเร็จคือ ส่วนผสมของโลหะ สถานะของวัตถุดิบที่ภาชนะบรรจุ อัตราส่วนการอัดรีด (อัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดของวัตถุดิบต่อพื้นที่หน้าตัดรวมของช่องแม่พิมพ์) และความเร็วการอัดรีด เพราะได้มีการนำเอาตัวแปรทางอุณหภูมิ ความเร็วการอัดรีด และความดันการอัดรีดมาศึกษาความสัมพันธ์ กับผลของตัวแปรที่ทดลองต่อชิ้นงานและแม่พิมพ์จากกระบวนการอัดรีด [7, 8] เพื่อจะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีรูปทรงแตกต่างกันตามภาพที่ 2-2 ซึ่งปกติรูปทรงแบ่งตามความซับซ้อนดังนี้

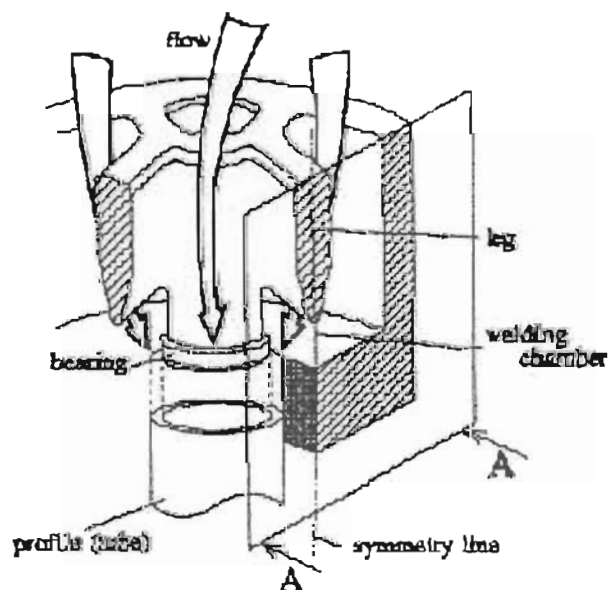
ก) รูปทรงตัน (Solid Shapes) ผลิตโดยการอัดรีดผ่านแม่พิมพ์ ซึ่งมีรูปทรงเหมาะสม

ข) รูปทรงกลวง (Hollow Products) เกิดจากการใช้ตัวสอด (Die Insert) หรือเป็นช่องแบ่ง (Mandrel) เพื่อทำให้เกิดโพรงที่ยึดติดกับตัวอัดรีด หรือเคลื่อนที่ภายในตัวอัดรีดหรือ Bridge (Spider) Section ติดกับแม่พิมพ์ ซึ่งมีการจำลองการไหลของกระบวนการอัดรีดผ่านแม่พิมพ์ที่มีผลต่อชิ้นงานกลวง [9, 10] ตามภาพที่ 2-3 โดยวิธีนี้ใช้เฉพาะวัสดุไหลแยกกันแล้วกลับมาติดกันก่อนออกจากแม่พิมพ์ โดยเชื่อมต่อกันด้วยความดันทำให้วัสดุทั้งสองเส้นทางติดกัน โดยใช้ได้กับการอัดรีดร้อนที่ใช้สารหล่อลื่นของอลูมิเนียมและตะกั่ว แต่จะทำให้เกิดรอยสารหล่อลื่นก็จะทำให้ไม่เชื่อมต่อติดกัน

ค) รูปทรงกึ่งกลวง (Semi-hollow Products) ปรากฏเป็นหน้าตัดตัน แต่เนื่องจากรูปทรงของหน้าตัดทำให้ไม่อาจใช้แม่พิมพ์หนึ่งชิ้น ลิ้นแม่พิมพ์ (Die Tongue) ใช้ขึ้นรูปทรงภายในต่อกับผิวภายนอกกรวยหน้าตัดขวางเล็กๆ ทำให้สามารถหักออกได้ จึงต้องใช้วิธีการอัดรีดแบบเดียวกันกับแบบการอัดรีดหน้าตัดกลวง



ภาพที่ 2-2 แสดงลักษณะของชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการอัดรีดอลูมิเนียม

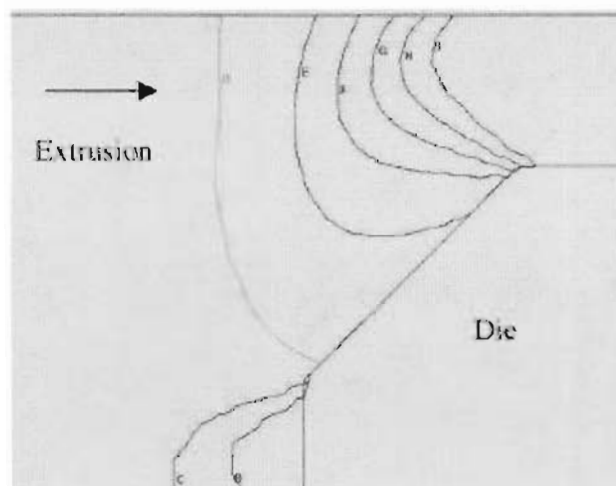


ภาพที่ 2-3 แสดงการไหลของกระบวนการอัดรีดผ่านแม่พิมพ์ที่ได้ชิ้นงานกลวง

2.1.4 ลักษณะการไหลของกระบวนการอัดรีด

ปกติในกระบวนการอัดรีดจะเกิดความเสียหายอย่างมาก ยิ่งในอลูมิเนียมแล้วจะยิ่งมีมากขึ้น ซึ่งจะเกิดแรงเฉือนที่สูงกว่าระดับพลาสติกที่ทำต่อก่อนอลูมิเนียมที่สัมผัสหน้าตัด โดยการขึ้นรูปโลหะนั้นจะมีบริเวณการเปลี่ยนรูปที่ไม่แน่นอน อันเกิดมาจากความเสียหายที่ในกระบอกอัดรีด ถ้าจะให้มีความบริเวณการเปลี่ยนรูปที่คงที่นั้นจะต้องมีการหล่อลื่นที่ดีพอในกระบอกอัดรีด

จากรายงานที่มีปรากฏสามารถทำให้เข้าใจการทำงานได้ในปัจจุบันว่ามีอยู่ 3 แบบ คือ ไม่มีการหล่อลื่น มีการหล่อลื่น และชนิดเฉพาะของปฏิกิริยาที่รู้ภายหลังจากการเปลี่ยนรูป (Back-end Defect) โดยในปัจจุบันอุตสาหกรรมทั่วไปจะใช้การบีบอัดแบบร้อนโดยไม่หล่อลื่น ก่อนการอัดรีดจะใส่ก่อนอลูมิเนียมโดยเว้นช่องว่างไว้จากแม่พิมพ์ เมื่อเริ่มมีการบีบอัดก่อน อลูมิเนียมจะถูกอัดให้เต็มช่องว่าง ซึ่งในแบบโดยอ้อมจะเกิดแรงเสียหายน้อยมากและการไหล จะเป็นแบบราบเรียบ แต่ก็ยังเกิดจุด Dead Metal Zone ที่บริเวณก่อนเข้าแม่พิมพ์อยู่ แม้เมื่อมีการหล่อลื่นก็ทำให้ลดลงไปได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น จึงได้ไม่มีการหล่อลื่นในการบีบอัด เมื่อมีการบีบอัดก่อนโลหะที่มีขนาดเล็กและไม่มีการหล่อลื่นจะทำให้เกิด Dead Metal Zone ที่เพิ่มขึ้น จากแรงเสียหายที่หน้าสัมผัสกับผิวกระบอกอัดที่มาก ซึ่งปกติจะทำมุมกับหน้าสัมผัสแม่พิมพ์ 45 องศา และเพื่อให้ได้ค่าที่แน่นอนจึงได้จำลองกระบวนการอัดรีดอลูมิเนียมเพื่อให้ทราบถึงผลของมุมของแม่พิมพ์, ปริมาณการไหล และขนาดแม่พิมพ์ตามภาพที่ 2-4 ที่มีผลต่อการออกแบบแม่พิมพ์กระบวนการอัดรีด [11, 12] จากเหตุนี้ผิวของกระบอกอัดรีดจะมีผลต่อคุณภาพของผิวชิ้นงานที่ได้ คุณสมบัติของชิ้นงานของการบีบอัดที่ดีคือ ผิวของชิ้นงานที่ดี



ภาพที่ 2-4 แสดงมุมของแม่พิมพ์ที่มีการไหลของอลูมิเนียม [12]

2.2 อลูมิเนียม

2.2.1 คุณสมบัติโดยทั่วไป

อลูมิเนียมเป็นโลหะที่มีลักษณะเฉพาะตัว คือมีน้ำหนักเบา ค่าความต้านแรงดึงต่ำ ทนต่อไอน้ำ ทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมีบางชนิด นำความร้อนและไฟฟ้าได้ดี สะท้อนแสง และความร้อนได้ดี สามารถตัดเฉือนและขึ้นรูปได้ง่าย และผิวสามารถปรับปรุงสีผิวได้ จากคุณสมบัติเฉพาะตัวดังที่ได้กล่าวมานี้จึงทำให้มีการนำไปใช้งานในอุตสาหกรรม ได้แก่ ชิ้นส่วนรถยนต์ ภาชนะใส่อาหาร กรอบประตู หน้าต่าง อุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับสารเคมี และชิ้นส่วนที่เกี่ยวข้องกับวงจรไฟฟ้า (ชิ้นส่วนที่ใช้ถ่ายเทความร้อน) ผิวอลูมิเนียมเป็นออกไซด์ได้ง่าย ซึ่งมีความแข็ง และจุดหลอมเหลวสูง (2060°C) ทนต่อการด่างและความชื้น ความสามารถของอลูมิเนียมขึ้นกับความบริสุทธิ์ของอลูมิเนียม

2.2.2 ประเภทของอลูมิเนียม

2.2.2.1 อลูมิเนียมบริสุทธิ์มาก และบริสุทธิ์มากเจือ Al 99.98 (สารเจือ $\leq 0.02\%$ ได้แก่ Fe, Si, Cu, Zn, Ti) มีคุณสมบัติทนการกัดกร่อนสูง สามารถดึงและรีดได้ดี เมื่อได้รับความร้อนสูงจะทำให้เกิดรูพรุน (เกรนหยาบ) เหมาะสมกับงานที่ต้องทนการกัดกร่อนสูง

2.2.2.2 อลูมิเนียมบริสุทธิ์ มีความบริสุทธิ์มากกว่า 99.8% คุณสมบัติใกล้เคียงกับอลูมิเนียมบริสุทธิ์มากมีความแตกต่างกันไม่มาก

2.2.2.3 อลูมิเนียมเจือ เป็นประเภทที่นำอลูมิเนียมมาทำการเพิ่มสารอื่นเพื่อเพิ่มคุณสมบัติตามที่ต้องการ โดยสารที่นำมาผสมจะอยู่ในลักษณะละลายอยู่ในเนื้ออลูมิเนียม และผสมก่อนอลูมิเนียมเป็นสารประกอบซึ่งจะมีคุณสมบัติที่ต้องการได้แก่

2.2.2.4 ซิลิกอน (Si) ใช้เพื่อเพิ่มสมบัติในการไหลตัว การป้อน และความต้านทานการฉีกขาดขณะร้อน โดยจะมีความแข็งสูงมากด้วย ทำให้สมบัติการยึดตัวและการไสกลึงลดลง

2.2.2.5 ทองแดง (Cu) ช่วยปรับปรุงสมบัติทางความแข็ง การไสกลึง และการนำความร้อน

2.2.2.6 แมกนีเซียม (Mg) ช่วยเพิ่มคุณสมบัติทางกล และช่วยให้ผิวสำเร็จมีความเงางาม สำหรับที่ใช้ในการตกแต่ง

2.2.2.7 เหล็ก (Fe) ปริมาณเหล็กในงานหล่อที่ผสมมีมากกว่า 1% จะช่วยป้องกันการติดแม่พิมพ์ แต่ส่วนมากใช้ในปริมาณที่ไม่เกิน 0.8% ช่วยเพิ่มสมบัติในการหล่อ การยึดตัว การต้านแรงกระแทกและการไสกลึง

2.2.2.8 แมงกานีส (Mn) ช่วยให้งานหล่อต่อเนื่องดีขึ้น และเพิ่มความสามารถการยึดตัวและหดตัวของชิ้นงานด้วย

2.2.2.9 สังกะสี (Zn) เมื่อเติมทองแดงและแมงกานีส จะช่วยปรับปรุงความสามารถทางความร้อนรวมทั้งการบ่มที่อุณหภูมิห้อง และช่วยให้การไหลตัวดีขึ้น

2.2.3 ประเภทของอลูมิเนียม

โดยจะใช้ปริมาณของสารเจือในการแบ่งประเภท ได้แก่

- 1xxx มีส่วนประกอบของอลูมิเนียมมากกว่า 99.0%
- 2xxx มีส่วนประกอบของทองแดงเป็นสารเจือหลัก
- 3xxx มีส่วนประกอบของแมงกานีสเป็นสารเจือหลัก
- 4xxx มีส่วนประกอบของซิลิกอนเป็นสารเจือหลัก
- 5xxx มีส่วนประกอบของแมกนีเซียมเป็นสารเจือหลัก
- 6xxx มีส่วนประกอบของแมกนีเซียมและซิลิกอนเป็นสารเจือหลัก
- 7xxx มีส่วนประกอบของสังกะสีเป็นสารเจือหลัก
- 8xxx มีธาตุอื่นๆ ผสมเป็นสารเจือหลัก

โดยอลูมิเนียมชนิด 6xxx เป็นชนิดที่ใช้นานมากในทางอุตสาหกรรมการอัดรีดเพราะมีคุณสมบัติที่เหมาะสมกับการใช้งานเนื่องจากส่วนผสมของ (Mg_2Si) ได้แก่ ด้านทานการสึกหรอดี ขึ้นรูปได้ง่าย ความแข็งที่ได้อยู่ระดับปานกลาง และผิวที่ได้จากการอัดรีดจะมีลักษณะดีในการตกแต่งเป็นส่วนประกอบของที่อยู่อาศัย ซึ่งจากส่วนผสมนี้ทำให้มีความแข็งปานกลางในระดับ T6 มีชนิดที่ใช้นานได้แก่ 6061 ใช้เป็นโครงสร้างแข็งแรงปานกลางจึงใช้เป็นองค์ประกอบของที่อยู่อาศัย 6063 ใช้ในงานด้านสถาปัตยกรรม โดยในระดับที่สูงกว่า 6063 กว้างๆ ได้ 3 แบบ ตามสารเจือ ความแข็งแรงและลักษณะของชิ้นงานที่ได้คือ มีส่วนประกอบของแมกนีเซียมซิลิไซด์ 1% สำหรับที่ความแข็งแรงมาก 0.8% สำหรับการใช้งานทั่วไป และ 0.7% สำหรับที่ต้องการประสิทธิภาพในการบีบอัดได้สูง ดังผลที่จะตามมานั้นมาจากปริมาณของส่วนผสมในชิ้นงานที่มีผลต่อชิ้นงานในด้านต่างๆ จึงได้นำเอาอลูมิเนียม 6063 มาทดลองถึงผลที่มีต่อการเสียหายของแม่พิมพ์ในกระบวนการอัดรีด [13]

2.3 การวิเคราะห์โดยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method: FEM) เป็นวิธีการหนึ่งในการแก้ปัญหาทางวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ โดยทำสภาวะและรูปร่างให้คล้ายกับสิ่งที่ต้องการวิเคราะห์ แล้ววิธีการนี้จะทำการแบ่งส่วน ของสิ่งที่จะวิเคราะห์ออกเป็นขนาดต่างๆ กันเรียกว่า (Element) แล้วแต่การวิเคราะห์ แล้วใช้สมการเชิงอนุพันธ์และเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดมา ซึ่งเมื่อเลือกวิธีการนี้คำนวณมานั้นจะได้ผลเป็นค่าตัวแปรต่างๆ กันตามตำแหน่งต่างๆ บนชิ้นงานที่คำนวณ โดยที่วิธีการนี้จะประมาณค่าที่มีค่าเป็นอนันต์ให้เป็นค่าจำนวนที่นับได้ (Finite) ซึ่งการจะให้ค่าจำนวนที่ใกล้เคียงกับสภาวะจริงที่เกิดขึ้นจะสัมพันธ์กับการกำหนดสภาวะเงื่อนไขต่างๆ ให้ใกล้เคียงความจริงที่สุด และได้มีการนำเอาวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาใช้ในการจำลองการทำงานของกระบวนการอัดรีดอลูมิเนียม เพื่อให้ทราบค่าตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อการอัดรีดดังในงานวิจัยของ Lof [14, 15] จากภาพที่ 2-5 โดยขั้นตอนทั่วไปของวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์มีดังต่อไปนี้

1. ทำการแบ่งขอบเขตรูปร่างของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยๆ ตามสภาวะการเกิดปัญหา
2. เลือกฟังก์ชันประมาณภายในเอลิเมนต์ เพื่อให้สอดคล้องกับปัญหาที่ต้องการ
3. สร้างสมการของเอลิเมนต์ โดยขั้นตอนนี้สามารถทำได้ 3 วิธี วิธีแรกคือการทำโดยตรง
วิธีการแปรผัน และวิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้าง
4. นำสมการของเอลิเมนต์ต่างๆ มาประกอบเข้ากัน ซึ่งจะทำให้เกิดระบบสมการรวม
(System of Simultaneous Equations)
5. ประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตเข้าในสมการเพื่อหาคำตอบในแต่ละตำแหน่งของปัญหา
6. ต่อมาคือการคำนวณในคำตอบอื่นที่ต้องการได้ เช่นเมื่อทราบค่าทางอุณหภูมิแล้วก็สามารถหาค่าความเครียด หรือความเค้นได้

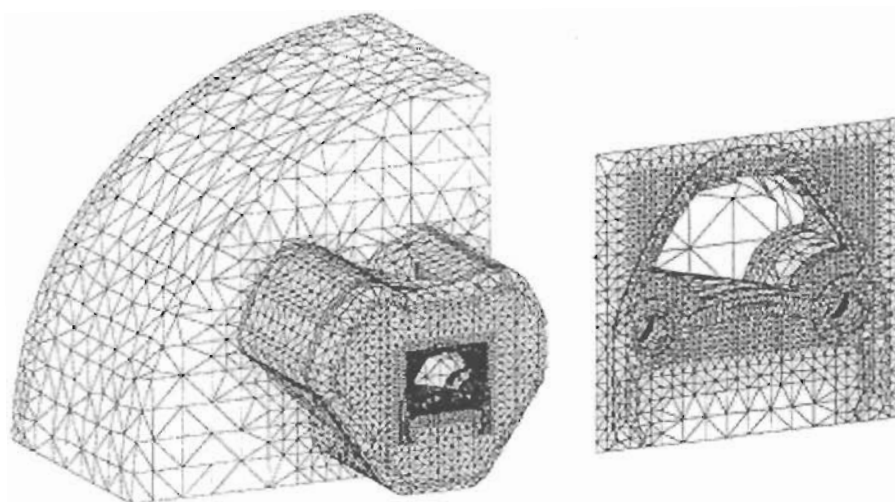


Fig. 11. Finite element mesh of the aluminium geometry.

ภาพที่ 2-5 ลักษณะของเอลิเมนต์ในงานจากวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ [14]

2.3.1 การวิเคราะห์การอัดรีดโดยใช้วิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์

การศึกษาและออกแบบกระบวนการขึ้นรูปวัสดุทั่วไปจะใช้วิธีการที่หลากหลายแตกต่างกันไปตามเหมาะสมของกระบวนการขึ้นรูปนั้นๆ หรือความคุ้มค่าเมื่อเทียบกับผลที่ได้รับ โดยในวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ เป็นวิธีทางหนึ่งที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในกระบวนการผลิตที่ต้องการ จำลองการผลิตกับการทดลองจริงในงานนั้นๆ เพื่อให้ได้ผลที่ใกล้เคียง จึงนำมาใช้ในการศึกษาผลที่จะเกิดกับกระบวนการอัดรีด หรือชิ้นงานที่ได้จากการอัดรีด และรวมไปถึงการออกแบบกระบวนการอัดรีด หรืออุปกรณ์ในการอัดรีดเพื่อให้ได้ชิ้นงานอัดรีดใหม่หรือเพิ่มประสิทธิภาพในการอัดรีด ดังจะได้นำแสดงการใช้วิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ในกระบวนการอัดรีด ที่แบ่งตามความต้องการดังต่อไปนี้

2.3.1.1 การศึกษากระบวนการอัดรีด

ปัญหาในงานผลิตของกระบวนการอัดรีดโดยทั่วไป ใช้แบบจำลองในการศึกษาเพราะสะดวกประหยัด และให้ผลที่ใกล้เคียงกับการอัดรีดจริง ดังในงานวิจัยของ Yang [16] ที่ศึกษาวิธีการอัดรีดร้อน จากแบบจำลองของโปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์กับ ALE (Arbitrary Lagrangian-Eulerian) และควบคุมคุณสมบัติการอัดรีดของอลูมิเนียม Al6061-T6&H13 เพื่อหาลักษณะการอัดรีดที่ช่วยพัฒนาคุณภาพของชิ้นงานอัดรีด เมื่อเปลี่ยนวัสดุอัดรีดเป็นวัสดุอลูมิเนียมผสม (Ti-6Al-4V) Li [17] ทำการจำลองการอัดรีดภายในโปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 2 มิติ (DEFORMTM 2D) รวมทั้งผลของอุณหภูมิจากความเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างการอัดรีด หลังจากนำผลการจำลองมาสรุปทำให้ทราบถึงลักษณะการไหลของวัสดุภายในกระบวนการอัดรีด ผลนี้จะสามารถนำไปปรับปรุงคุณภาพชิ้นงาน และกระบวนการอัดรีดให้ดีขึ้นได้ แต่สำหรับการอัดรีดอลูมิเนียมแบบกลวง Kim [10] ได้ศึกษาการจำลองจากวัสดุอลูมิเนียม 2 ชนิดคือ AA1050 และ AA1100 ทำการอุ่นวัสดุที่อุณหภูมิ 723°K ภายใต้กระบวนการอัดรีดที่ไม่มีการหล่อลื่นจากการศึกษาทำให้ทราบวิธีการอัดรีดที่คงที่ของระหว่างรอยต่อแท่งอลูมิเนียมแต่ละแท่ง และผิวแท่งอลูมิเนียมไม่เข้าไปเจอในรอยต่อระหว่างแท่งอลูมิเนียมด้วย

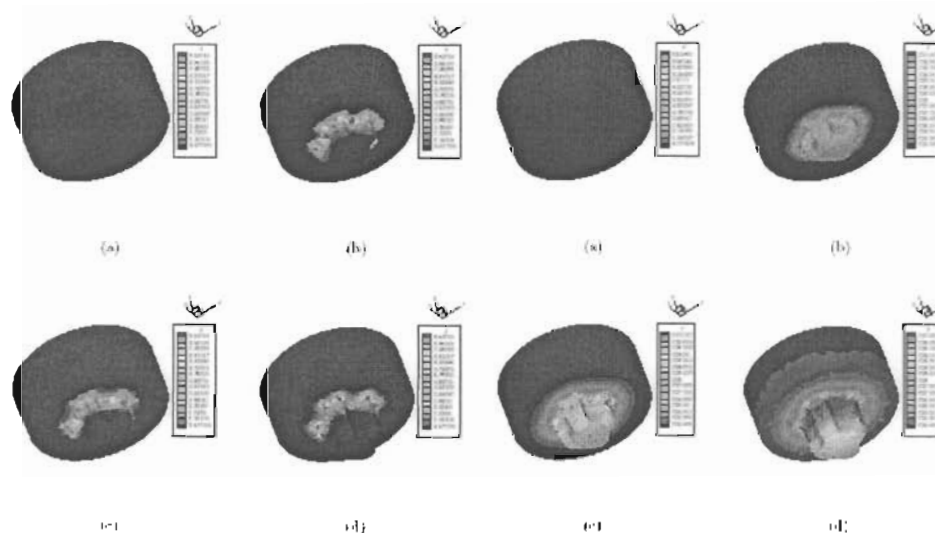
Li [18] ทำการจำลองปรากฏการณ์ระหว่างที่แท่งอลูมิเนียมต่อกันโดยใช้โปรแกรมเดียวกัน Li [17] ในตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อกระบวนการอัดรีดเพื่อลดผลกระทบต่อน้ำมันอลูมิเนียมอัดรีดและทำให้เข้าใจพฤติกรรมทางกลของกระบวนการอัดรีดมากยิ่งขึ้น และในปีเดียวกัน Duan [19] ได้เพิ่มเติมการจำลองเกี่ยวกับโครงสร้างของแท่งอลูมิเนียมที่เกิดการขึ้นรูป และจากการใช้โปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (FORGE2 V2.9.04) ในการจำลองผลการอัดรีด พร้อมทั้งควบคุมกระบวนการอัดรีดได้แก่ ความเร็วอัดรีดเข้า หรือการเตรียมแท่งอลูมิเนียม เพื่อทำให้ได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพมากขึ้น

2.3.1.2 การออกแบบกระบวนการอัดรีด

ขั้นตอนที่สำคัญก่อนการอัดรีดคือ การออกแบบทั้งกระบวนการผลิต หรือรูปแบบชิ้นงานตามที่ต้องการ วิธีที่ใช้กันส่วนใหญ่จะทำการศึกษาจากการจำลองการอัดรีดในทางฟิสิกส์ และคณิตศาสตร์ Arentoft [20] ใช้โปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (DEFORM) เพื่อนำผลที่ได้ไปช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการอัดรีด ในการออกแบบแม่พิมพ์ Kim [21] ทำการศึกษาการออกแบบแม่พิมพ์ด้วยวิธีศึกษาจากส่วนประกอบของวัสดุ (MMCs) ที่คล้ายกับไทเทเนียม (Ti) แล้วควบคุมอัตราความเครียด (Strain Rate) และใช้วิธีการออกแบบลักษณะแม่พิมพ์อัดรีดจากเทคนิค 2 ชนิดคือ Bazier Curve และ FPS (Flexible Polyhedron Search) ผลที่ได้ทำให้เพิ่มประสิทธิภาพการอัดรีด ซึ่งจะเพิ่มตามอัตราส่วนการอัดรีด (Extrusion Ratio)

งานวิจัยที่ศึกษาถึงการออกแบบแม่พิมพ์จากแบบจำลองการอัดรีดแบบ 3 มิติของ Lee [22, 23] จากผลการวิจัยที่ศึกษาในแบบแม่พิมพ์ที่ต่างกัน 2 แบบมีช่วงความยาวแบร์ริงคิงที่ 5 มม. ในสภาวะการอัดรีดที่ไม่คงที่ของวัสดุแข็งที่มีผลต่ออุณหภูมิ Thermo Rigid-viscoplastic

ทำให้ทราบว่าการออกแบบมีผลต่อคุณภาพของชิ้นงานอัดรีด และความเร็วอัดรีดออกที่ 1 มม. ต่อวินาที จะให้คุณภาพอัดรีดที่เกิดการเสียหายของชิ้นงานน้อยที่สุด หลังได้ผลการวิจัยแรกแล้ว ได้ทำการวิจัยเพิ่มเกี่ยวกับผลของความยาวแปรง ที่มีต่อคุณภาพการอัดรีดเทียบกับความเร็วอัดรีดออก ทำให้ทราบว่าความยาวแปรงสามารถใช้ในการควบคุมคุณภาพของชิ้นงานอัดรีดได้ในปีเดียวกัน Ulysse [24] ได้นำโปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (FIDAP) และวิธีการ SQP (Sequential Quadratic Programming) มาศึกษาพบว่าที่ความเร็วอัดรีดเข้าที่เหมาะสมจะทำให้ชิ้นงานเกิดการเสียหายน้อยที่สุด และการออกแบบจากงานวิจัยทำให้สามารถควบคุมคุณภาพของชิ้นงานอัดรีดได้ ส่วนในวัสดุอัดรีดที่แตกต่างกันเช่นในงานวิจัยของ Kang [25] จำลองกระบวนการอัดรีดอลูมิเนียมผสมทองแดงเพื่อศึกษาการออกแบบแม่พิมพ์ โดยใช้โปรแกรม (DEFORM) พยากรณ์ผลที่เกิดจากการอัดรีดสังเกตผลจากการกระจายของอุณหภูมิ ค่าความเค้น ความเครียดที่เกิดและความเค้นเฉลี่ยในแม่พิมพ์ที่ใหญ่กว่า และลดความเสียหายที่ผิวระหว่างแม่พิมพ์กับวัสดุจากการหล่อลื่นด้วยวิธีพ่นน้ำมันคาร์บอน เมื่อได้มีการศึกษาถึงการออกแบบแม่พิมพ์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการอัดรีดที่ต่างๆ กันในตัวแปรที่เพิ่มขึ้นทำให้ LaZghab [26] ได้ลงลึกถึงผลจากการตัดเฉือนที่ผิวสัมผัส โดยใช้โปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 2 มิติ (ALMA-2D) เพื่อจำลองการออกแบบกระบวนการอัดรีด และสัดส่วนของวัสดุ ผลจากการจำลองเทียบเคียงกับการอัดรีดจริงได้ใกล้เคียงกัน และผลที่ได้ทำให้สามารถนำไปปรับปรุงใช้กับการจำลองอัดรีดอลูมิเนียมแบบ 3 มิติ ต่อมาได้มีงานวิจัย Alfaro [27] ได้ทำการจำลองการอัดรีดอลูมิเนียม AA6063 แบบ 3 มิติ โดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อวิเคราะห์ชิ้นงานการอัดรีดผ่านแม่พิมพ์ที่ซับซ้อน จากงานวิจัยต่างๆ นี้แสดงให้เห็นว่าการวิเคราะห์กระบวนการอัดรีดโดยใช้การจำลองจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ตามภาพที่ 2-6 นั้นมีการพัฒนาต่อเนื่องอยู่ในปัจจุบัน



ภาพที่ 2-6 ลักษณะค่าความเค้น และอุณหภูมิจากการอัดรีดอลูมิเนียมผ่านแม่พิมพ์ด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ [27] (จากซ้ายมาขวา)

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการ และขั้นตอนในการดำเนินการวิจัยของการจำลองกระบวนการอัดรีดอลูมิเนียมผ่านแม่พิมพ์ เพื่อศึกษาความเร็วที่ได้จากการอัดรีด โดยการใส่ค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ในกระบวนการอัดรีดและคุณสมบัติของวัสดุอลูมิเนียม ภายในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ (ABAQUS) ดังต่อไปนี้

3.1 ส่วนประกอบในกระบวนการอัดรีด

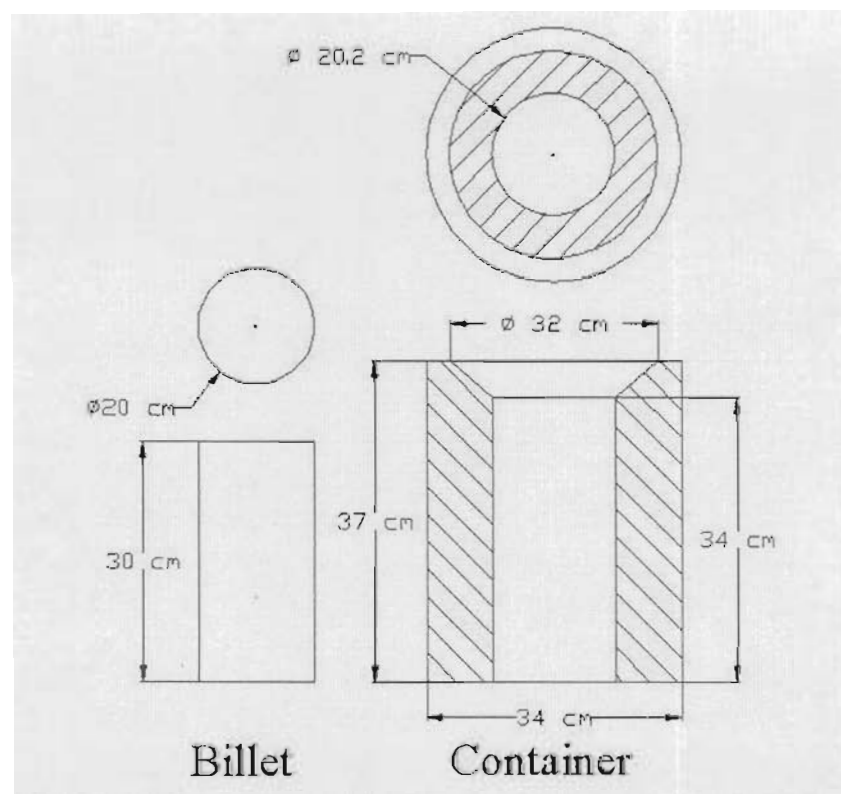
การกำหนดลักษณะของสิ่งที่ จะทำการอัดรีด ทำโดยแยกส่วนประกอบที่เกี่ยวข้องในการอัดรีดออกได้เป็น 2 ส่วนคือ แท่งอลูมิเนียม และแม่พิมพ์อัดรีด

3.1.1 แท่งอลูมิเนียม (Billet) ลักษณะกลมยาว เส้นผ่าศูนย์กลาง 20 เซนติเมตร และยาว 30 เซนติเมตร ดังภาพที่

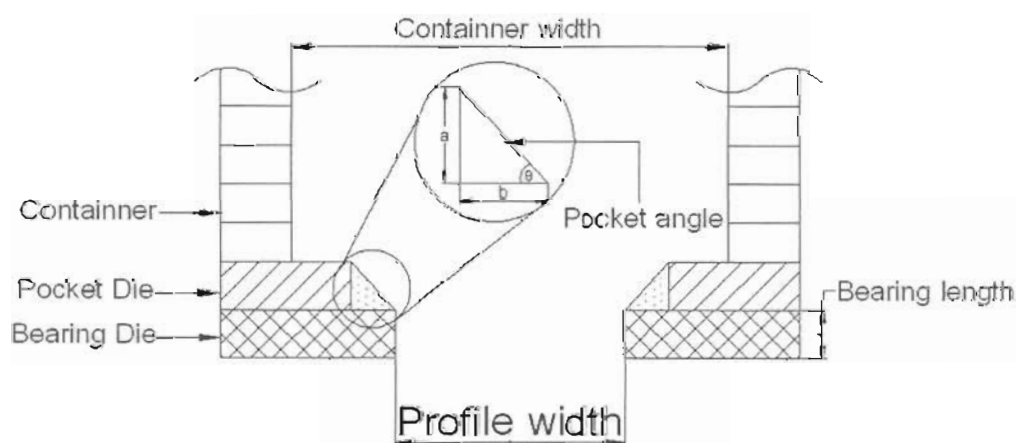
3.1.2 แม่พิมพ์อัดรีด (Extrusion Die) โดยภายในแม่พิมพ์จะประกอบไปด้วยส่วนต่างๆ ดังต่อไปนี้

3.1.2.1 ส่วนบรรจุแท่งอลูมิเนียมแบบกลวง (Container) มีช่องว่างกลมตรงส่วนกลาง เส้นผ่าศูนย์กลาง 20.2 เซนติเมตร ใช้ในการบรรจุแท่งอลูมิเนียมก่อนการอัดรีด ซึ่งจะต่อกับแม่พิมพ์ดังภาพที่ 3-1 ซึ่งในการศึกษานี้จะใช้วัสดุแบบเดียวกับแม่พิมพ์เพื่อความแข็งแรงในการรองรับแรงอัดรีดได้

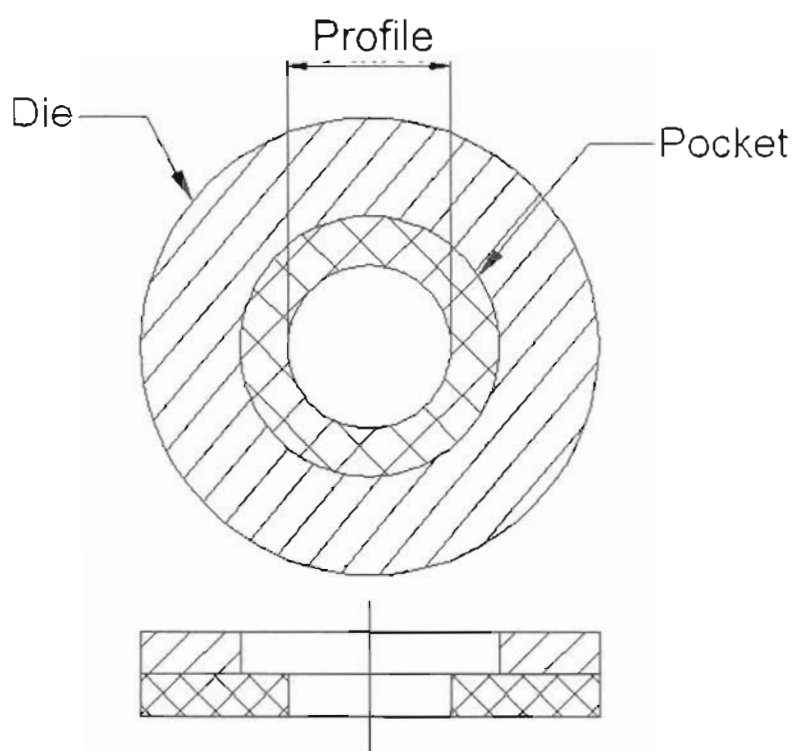
3.1.2.2 ส่วนแม่พิมพ์ (Die) เป็นส่วนที่สำคัญในการขึ้นรูปอัดรีดชิ้นงาน มีส่วนประกอบ 2 ส่วนคือ ส่วนลดขนาดแท่งอลูมิเนียม (Pocket Die) และส่วนอัดรีด (Bearing Die) จากหน้าที่ของส่วนลดขนาดแท่งอลูมิเนียม จะช่วยให้สามารถลดการเสียหายของชิ้นงานพร้อมทั้งอัดรีดได้สะดวกและต่อเนื่อง ซึ่งเป็นส่วนที่ใช้ควบคุมการเกิดบริเวณที่วัสดุหยุดนิ่ง (Dead Metal Zone) คือมุมของพอกเกิดแม่พิมพ์อัดรีด (Pocket Angle) แสดงดังภาพที่ 3-2 เป็นตัวที่ควบคุมการไหล หลังจากอัดรีดผ่านส่วนลดขนาดแล้วจะเข้าส่วนอัดรีด (Bearing Die) เพื่อจะเปลี่ยนรูปวัสดุให้เป็นไปตามรูปร่างแม่พิมพ์ที่กำหนดไว้ โดยควบคุมลักษณะการเปลี่ยนรูปจากความยาวของส่วนอัดรีด (Bearing Length) ดังในภาพที่ 3-2 โดย a = ความลึกของแบริ่ง มีหน่วยเป็นเซนติเมตร และ b = ความยาวของแบริ่งมีหน่วยเป็นเซนติเมตร โดยในงานวิจัยนี้จะใช้แม่พิมพ์ทั้ง 2 แบบเพื่อศึกษาอิทธิพลของ Pocket ต่อ Die ในกระบวนการอัดรีดในแม่พิมพ์แบบที่ 1 เพื่อลดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของแท่งอลูมิเนียมลง ดังภาพที่ 3-3 และในแม่พิมพ์แบบที่ 2 เป็นการเปลี่ยนรูปร่างหน้าตัดแท่งอลูมิเนียมจากทรงกลมเป็นรูป 4 แฉก ดังภาพที่ 3-4



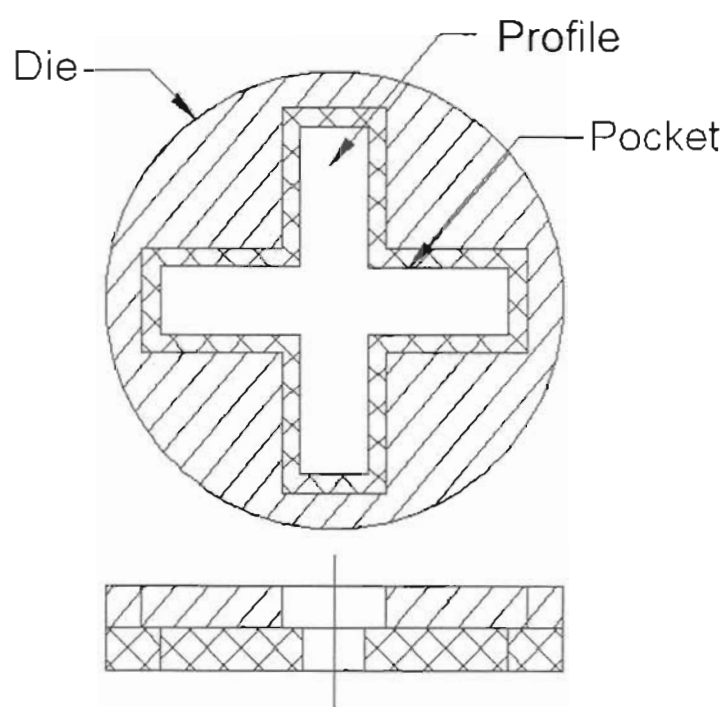
ภาพที่ 3-1 ลักษณะแท่งอลูมิเนียมและส่วนบรรจุแท่งอลูมิเนียม



ภาพที่ 3-2 ส่วนประกอบของแม่พิมพ์



ภาพที่ 3-3 แบบแม่พิมพ์ที่ 1

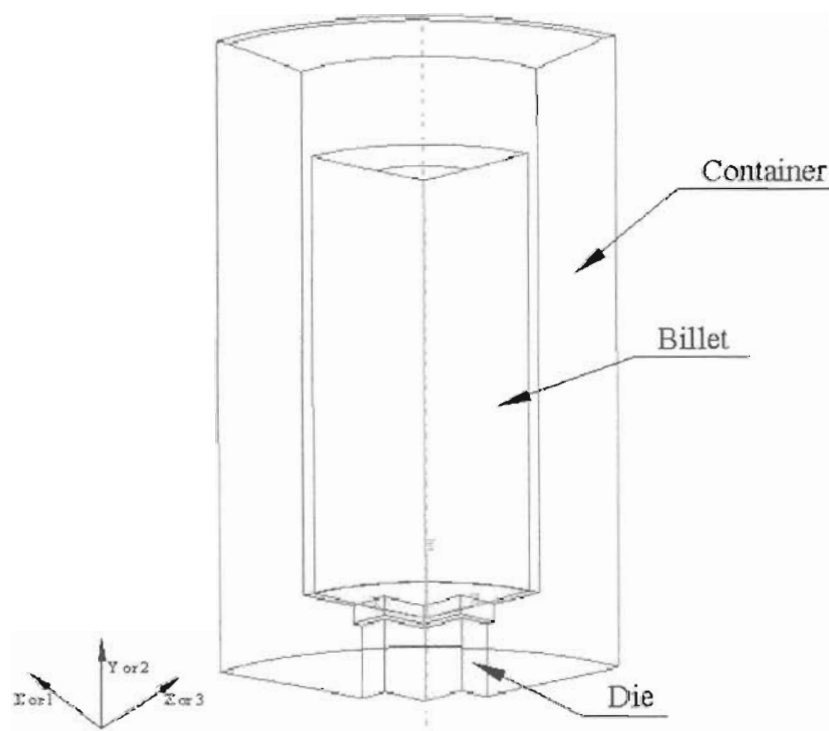


ภาพที่ 3-4 แบบแม่พิมพ์ที่ 2

3.2 วิธีการจำลองการอัดรีดด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การจำลองการอัดรีดในงานวิจัยนี้ ใช้โปรแกรมที่คำนวณทางไฟไนต์เอลิเมนต์แบบสามมิติ ABAQUS Version 6.4-1 ซึ่งมีขั้นตอนในการเตรียมการจำลองกระบวนการอัดรีด (Simulation Process) ในการศึกษาโดยแบ่งเป็น

3.2.1 การกำหนดขนาดและรูปร่าง (Part Module) เมื่อได้แบบส่วนประกอบทั้งหมดในการอัดรีดเพื่อทำการจำลองแล้ว ซึ่งในส่วนนี้ของโปรแกรมใช้เพื่อเขียนแบบแล้วขึ้นรูปเป็นสามมิติ โดยในงานวิจัยนี้จะเขียนเพียงหนึ่งในสี่ของแบบทั้งหมดดังภาพที่ 3-5 เพราะในการวิจัยจะทำการจำลองเป็นแบบจำลองที่สมมาตร (Symmetry) ได้แก่ ส่วนแท่งอลูมิเนียมกลม และส่วนบรรจุรวมกับแม่พิมพ์อัดรีดมีขนาดตามภาพที่ 3-1



ภาพที่ 3-5 ลักษณะช่วงเตรียมการอัดรีดในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

3.2.2 การกำหนดคุณสมบัติของวัสดุ (Material Properties) การศึกษาการจำลองกระบวนการอัดรีด ส่วนที่สำคัญในการหาค่าที่เกิดจากการเปลี่ยนรูปที่ถูกต้องนั้นจำเป็นต้องมีการกำหนดคุณสมบัติวัสดุส่วนประกอบที่ต้องการศึกษาคือ แท่งอลูมิเนียมที่จะทำการอัดรีด กำหนดให้คุณสมบัติของอลูมิเนียมเป็นชนิด 6063 เป็นแบบ Elasto-viscoplastic โดย Flow Stress (σ_f) มีพฤติกรรมตามสมการที่ 3-1 [15] โดยพิจารณาที่ 3 อุณหภูมิคือ 400, 500, 600 องศาเซลเซียส ส่วนค่าคุณสมบัติที่คงที่จะแสดงที่ตารางที่ 3-2

$$\sigma_f(\dot{\epsilon}, T) = s_m \sinh^{-1} \left[\left(\frac{\dot{\epsilon} + \dot{\epsilon}_0(T)}{A} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \right)^{\frac{1}{m}} \right] \quad (3-1)$$

- โดย σ_f = ค่าความเค้นไหลของวัสดุ
 S_m = ค่าแรงที่กระทำกับอลูมิเนียม
 T = อุณหภูมิ
 $\dot{\epsilon}$ = อัตราส่วนความเครียดที่เพิ่มขึ้น
 $\dot{\epsilon}_0$ = อัตราส่วนความเครียดที่จุดเริ่มต้น
 A = เวลา
 Q = ค่าพลังงานเสียรูปของวัสดุ
 R = ค่าสัมประสิทธิ์คงที่ของอากาศ
 m = ค่าคงที่จำเพาะของวัสดุ
 E = ค่ามอดุลัสความยืดหยุ่น
 v = อัตราส่วนปัวร์ซอง

ตารางที่ 3-1 ค่าตัวแปรที่ใช้กำหนดในสมการที่ 3-1 [17]

Parameter	ค่าที่ใช้
elastic properties: E (GPa)	40
($T = 773$ องศาเซลวิน) v	0.35
Plastic properties: $\dot{\epsilon}_0$ (1/s)	0.005
S_m (MPa)	25
m	5.4
A (1/s)	6×10^9
Q (kJ/kg)	1.4×10^5
R (kJ/°K)	8.314

ตารางที่ 3-2 ค่าคุณสมบัติคงที่ของอลูมิเนียม 6063 [4]

คุณสมบัติทางกลที่คงที่	
ความหนาแน่น	2700 kg/m^3
สัมประสิทธิ์การขยายตัว	$2.5 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$

3.2.3 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition) กำหนดให้ดังต่อไปนี้

3.2.3.1 แท่งอลูมิเนียมมีอุณหภูมิเริ่มต้นที่ 400°C

3.2.3.2 ส่วนบรรจุกับแม่พิมพ์ให้อยู่กับที่

3.2.3.3 สัมประสิทธิ์เสียดทานที่หน้าสัมผัสระหว่างแท่งอลูมิเนียมกับส่วนอื่นๆ

มีค่า 0.15

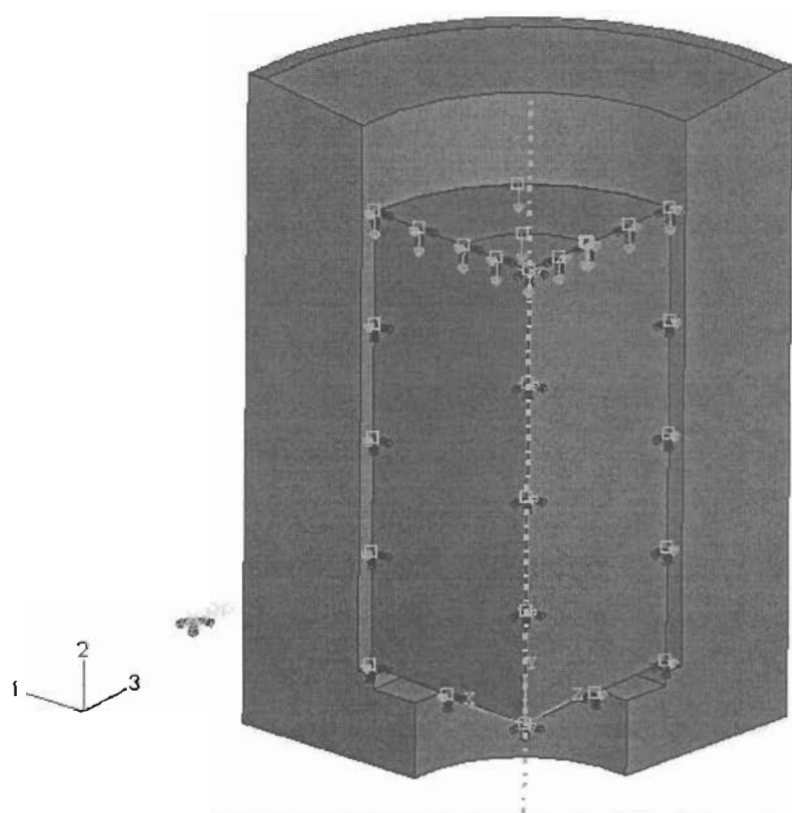
3.2.3.4 กำหนดกระบวนการอัดรีด ให้เป็นการอัดรีดแบบ Dynamic/Explicit

3.2.3.5 การเคลื่อนที่ของแท่งอลูมิเนียมมีระยะการเคลื่อนที่คงที่ที่ 12.5 เซนติเมตร ในแนวแกน 2 โดยในการควบคุมความเร็วอัดรีดเข้า 1 ซม.ต่อวินาที ซึ่งจะใช้เวลาเป็นตัวกำหนด ที่อยู่ภายใต้ตัวควบคุมช่วงความเร็ว (Amplitude)

3.2.3.6 ด้านข้างของแท่งอลูมิเนียม มีให้เคลื่อนที่ในแนวแกน 1 และ 2

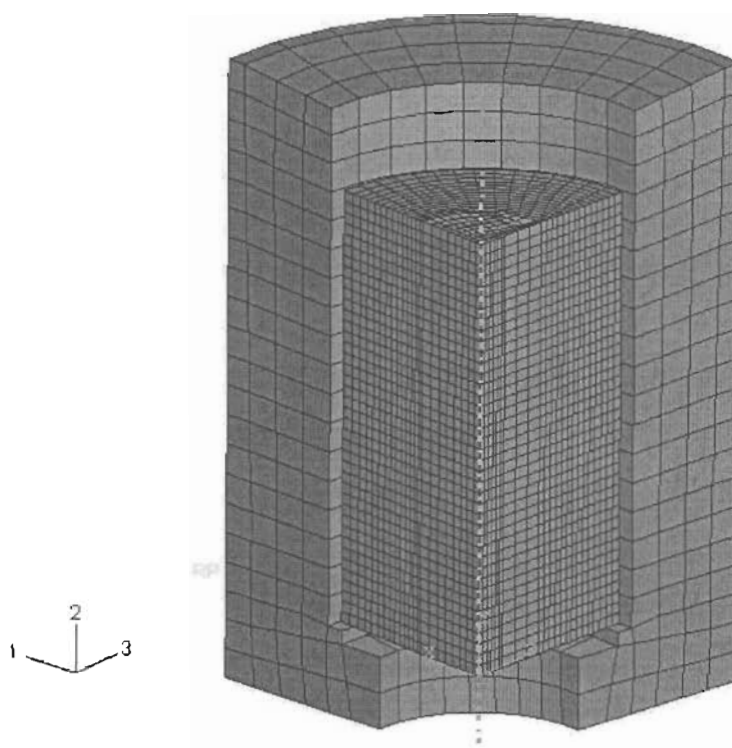
3.2.3.7 การอัดรีดเป็น Adiabatic คือมีความร้อนเกิดขึ้นจากการเสียดรูป แต่ไม่มีการถ่ายเทความร้อนระหว่างกัน

ทั้งหมดที่ได้กำหนดกระบวนการอัดรีดแสดงเป็นสัญลักษณ์ที่แบบจำลองดังภาพที่ 3-6 โดยผ่านจากช่วงของส่วนบรรจุแท่งอลูมิเนียมลงผ่านแม่พิมพ์อัดรีดให้ได้ Profile ตามแบบที่ต้องการ



ภาพที่ 3-6 การกำหนดการเคลื่อนที่ของกระบวนการอัดรีด

3.2.4 การกำหนดเอลิเมนต์ในแบบจำลอง (Mesh Setting) เป็นขั้นตอนในการแบ่งส่วนเอลิเมนต์ของส่วนประกอบในการอัดรีด เพื่อกำหนดขอบเขตการคำนวณในบริเวณที่ต้องการ โดยส่วนบรรจุแท่งอลูมิเนียมและแม่พิมพ์อัดรีดกำหนดคุณสมบัติเอลิเมนต์เป็น R3D4 วัตถุแข็งเกร็งคือเป็นเอลิเมนต์ที่มีรูปทรง 4 หน้าที่มีจุดอ้างอิงในแต่ละหน้าเพื่อใช้ในการคำนวณ และเมื่อถูกแรงกระทำรูปร่างจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงใดๆ ทั้งสิ้น แต่แท่งอลูมิเนียมในการอัดรีดจะกำหนดให้คำนวณแบบ 3 มิติ เอลิเมนต์ C3D8R คือเป็นเอลิเมนต์ที่มีรูปทรง 8 หน้าที่มีจุดอ้างอิงในแต่ละหน้าเพื่อใช้ในการคำนวณ ไม่มีการถ่ายเทความร้อนระหว่างเอลิเมนต์ และสามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ พร้อมทั้งให้เอลิเมนต์รอบนอกมีความละเอียดมากกว่าบริเวณใกล้ศูนย์กลาง เพราะเอลิเมนต์บริเวณรอบนอกแท่งอลูมิเนียมจะต้องสัมผัสกับแม่พิมพ์ และเกิดการเปลี่ยนรูปมาก แต่ส่วนเอลิเมนต์ด้านในแท่งอลูมิเนียมที่ไม่สัมผัสแม่พิมพ์จะมีขนาดใหญ่กว่ารอบนอก เพื่อช่วยลดเวลาที่ไม่จำเป็นในการจำลองลงได้ ดังแสดงในภาพที่ 3-7



ภาพที่ 3-7 แสดงวัตถุหลังจากการแบ่งเอลิเมนต์

3.3 การกำหนดตัวแปรในการจำลองการอัดรีด

ในแบบจำลองการอัดรีดเพื่อการศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อความเร็ว นั้น มีตัวแปรหลายตัวที่ต้องมีการกำหนดให้สามารถจำลองกระบวนการเพื่อเก็บผลที่ได้ไปใช้ในการวิเคราะห์ จึงได้แบ่งการจำลองตามตัวแปรที่จะส่งผลดังต่อไปนี้

แม่พิมพ์แบบที่ 1 รูปแบบของแม่พิมพ์เป็นการลดขนาดทรงกลมของแท่งอลูมิเนียมเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 เซนติเมตร ตามภาพที่ 3-3 ให้ลดลงเหลือเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 เซนติเมตร หรือลดลง 40% โดยมีการปรับเปลี่ยนค่าตัวแปรในการจำลองที่ละตัว โดยตัวแปรสำคัญที่ใช้ศึกษามีดังต่อไปนี้

1. มุมของพอกเกิด (Pocket Angle, θ) ทำการเลือกมุมพอกเกิดอ้างอิงจากงานวิจัยต่างๆ ซึ่งมุมพอกเกิดที่มีการใช้ประจำแบ่งตามช่วงค่ามุมได้ 6 ค่าคือ 20, 30, 40, 50, 60 และ 70 องศา โดยการทำนาระยะของส่วนช่องพอกเกิดของแม่พิมพ์อัดรีดจากสมการหาค่ามุมพอกเกิดที่ (3-2) ที่ปริมาตรพอกเกิดคงที่ พร้อมทั้งกำหนดให้ความยาวของแปรงแม่พิมพ์คงที่ที่ค่า 5 เซนติเมตร

$$\theta \text{ (Pocket Angle)} = \tan^{-1} (a/b) \quad (3-2)$$

2. อัตราส่วนการอัดรีด (Extrusion Ratio) คัดจากพื้นที่หน้าตัดของแท่งอลูมิเนียมก่อนเข้าแม่พิมพ์เทียบกับพื้นที่หน้าตัดของอลูมิเนียมที่ได้ออกจากแม่พิมพ์ ดังแสดงในสมการที่ (3-3)

$$Er \text{ (Extrusion Ratio)} = \text{Billet Cross Section Area} / \text{Profile Cross Section Area} \quad (3-3)$$

ซึ่งในงานวิจัยนี้กำหนดรัศมีหน้าตัดหลังออกจากแม่พิมพ์เป็น 6, 6.5, 6.7, 6.8 และ 7 เซนติเมตร คิดเป็นอัตราส่วนการอัดรีดที่ 2.04, 2.16, 2.22, 2.37 และ 2.79 โดยใช้ปริมาตรพอกเกิด 100 ลบ.ซม. และความเร็วอัดรีดที่ 1 ซม.ต่อวินาที

3. ความเร็วอัดรีด (Extrusion Velocity) ในงานวิจัยนี้ใช้ความเร็วของระยะการเคลื่อนที่ด้านบนแท่งอลูมิเนียมเทียบกับเวลาที่ใช้ในการอัดรีด หรือเรียกว่าความเร็วการเคลื่อนที่ของตัวกดอัดรีด (Ram Velocity) ดังแสดงในสมการที่ (3-4) ซึ่งมีค่าที่ใช้คือ 0.83, 1 และ 2.5 เซนติเมตรต่อวินาที

$$V_r \text{ (Ram Velocity)} = S_r / t_r \quad (3-4)$$

โดย V_r คือ ความเร็วการเคลื่อนที่ของตัวกดอัดรีด, ซม.ต่อวินาที

S_r คือ ระยะทางที่ผิวหน้าสัมผัสด้านบนของแท่งอลูมิเนียมเคลื่อนที่ลงมา

t_r คือ เวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของผิวหน้าสัมผัสด้านบนของแท่งอลูมิเนียม

4. ปริมาตรพอกเกิด (Pocket Volume, V) คัดจากพื้นที่ในส่วนช่องพอกเกิดจากแม่พิมพ์แบบที่ 1 ที่ใช้พื้นที่ระหว่างรัศมีวงนอก (r_1) กับพื้นที่ระหว่างรัศมีวงใน (r_2) จากความลึกของพอกเกิด (h) โดยกำหนดให้ใช้หน่วยเป็นเซนติเมตรตามสมการที่ (3-5) แล้วทำการสุ่มค่าเพื่อหาปริมาตรที่เหมาะสม โดยในงานวิจัยกำหนดให้ใช้ปริมาตร ไม่มีพอกเกิด, 50, 100, 150 และ 200 ลูกบาศก์เซนติเมตร

$$V \text{ (Pocket Volume)} = \pi h(r_1^2 - r_2^2) \quad (3-5)$$

จากตัวแปรข้างต้นนี้ ค่าตัวแปรที่ใช้กับแม่พิมพ์อัดรีดแบบที่ 1 ได้แจกแจงดังแสดงในตารางที่ 3-3

ตารางที่ 3-3 ค่าตัวแปรที่ใช้กับแม่พิมพ์อัดรีดแบบที่ 1

ตัวแปร	ค่าของตัวแปร
ความเร็วอัดรีดเข้า	0.83, 1 และ 2.5 ซม.ต่อวินาที
มุมพอกเกิด	20, 30, 40, 50, 60 และ 70 องศา
อัตราส่วนการอัดรีด	2.04, 2.16, 2.22, 2.37 และ 2.79
ปริมาตรพอกเกิด	0 (ไม่มีพอกเกิด), 50, 100, 150 และ 200 ลูกบาศก์เซนติเมตร

แม่พิมพ์แบบที่ 2 ตามภาพที่ 3-4 เป็นการลดขนาดจากแท่งอลูมิเนียมกลมเป็นชิ้นงานหน้าตัดรูปวงขนานเท่ากันในแต่ละแขนงที่แปรผันตามอัตราส่วนการอัดรีด โดยในส่วนของค่าความเร็วจะกำหนดให้คงที่ที่ 1 ซม.ต่อวินาที และเปลี่ยนตัวแปรปริมาตรพอกเกิดเป็นอัตราส่วนการลดขนาดอัดรีด เพราะมีลักษณะใกล้เคียงกัน แต่จะมีผลต่อตัวแปรที่ต้องการศึกษาแตกต่างกัน ตัวแปรที่ศึกษาคือ

1. อัตราส่วนการอัดรีด (Extrusion Ratio) อัตราส่วนการอัดรีดที่ใช้ในแม่พิมพ์แบบที่ 2 นี้จะใช้ 5 และ 6 เพื่อให้สามารถจำลองในแม่พิมพ์อัดรีดได้ เมื่อจะกำหนดขนาดแม่พิมพ์โดยควบคุมความกว้างของพอกเกิด พร้อมทั้งให้ค่าความยาวของช่องพอกเกิดคงที่
2. มุมพอกเกิด (Pocket Angle) จะใช้มุมพอกเกิดเพียง 4 มุม ได้แก่ แบบไม่มีพอกเกิด 30, 40, 50 และ 60 องศา เพราะสืบเนื่องจากการจำลองแบบแม่พิมพ์อัดรีดที่ 1 ว่ามุมที่ควรจะให้ความเร็วการอัดรีดออกสูงจะอยู่ในช่วงมุมพอกเกิดเหล่านี้
3. อัตราส่วนการลดขนาดอัดรีด (Reduction Ratio) ในแม่พิมพ์แบบที่ 2 จะเปลี่ยนจากการใช้ปริมาตรที่ส่วนพอกเกิดเป็นอัตราการลดขนาด ที่ค่าปริมาตรใกล้เคียงปริมาตรแม่พิมพ์แบบที่ 1 ซึ่งมาจากการเปรียบเทียบ

$$Re \text{ (Reduction Ratio)} = \text{Pocket Cross Section Area} / \text{Profile Cross Section Area} \quad (3-6)$$

จากตัวแปรข้างต้นนี้ ค่าตัวแปรที่ใช้กับแม่พิมพ์อัดรีดแบบที่ 2 ได้แจกแจงดังแสดงในตารางที่ 3-4

ตารางที่ 3-4 ค่าตัวแปรที่ใช้กับแม่พิมพ์อัดรีดแบบที่ 2

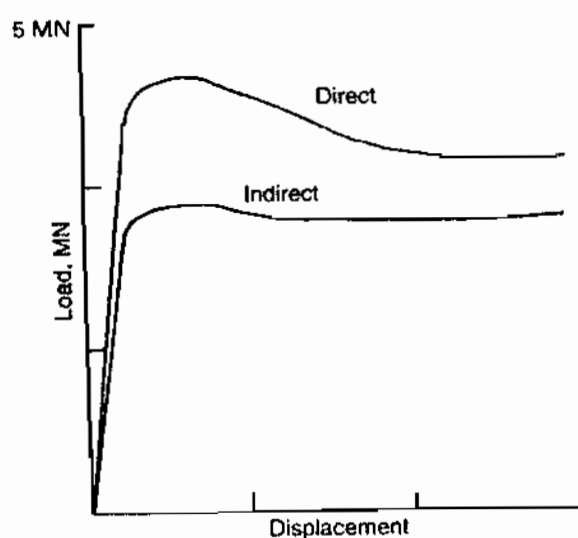
ตัวแปร	ค่าของตัวแปร
อัตราส่วนการลดขนาด	0 (ไม่มีพอกเกิด), 1.5, 2 และ 3
มุมพอกเกิด	30, 40, 50 และ 60 องศา
อัตราส่วนการอัดรีด	5 และ 6

3.4 การวิเคราะห์ผลการอัดรีดจากแบบจำลอง

3.4.1 การวัดค่าแรงเพื่อเทียบกับพฤติกรรม

ในงานวิจัยที่ใช้การคำนวณการอัดรีดอลูมิเนียมแบบโดยตรงทางไฟไนท์เอลิเมนต์ ต้องมีการเทียบผลที่ได้ว่าสามารถใช้ในการวิเคราะห์ได้หรือไม่ ในการเปรียบเทียบจะต้องมีค่าที่น่าเชื่อถือหรือมีการยอมรับ ซึ่งสิ่งที่ใช้อ้างอิงในงานด้านวัสดุนั้น จะต้องใช้พฤติกรรมของแรงเพื่อเทียบกับแรงอัดรีดที่ได้จากการจำลอง

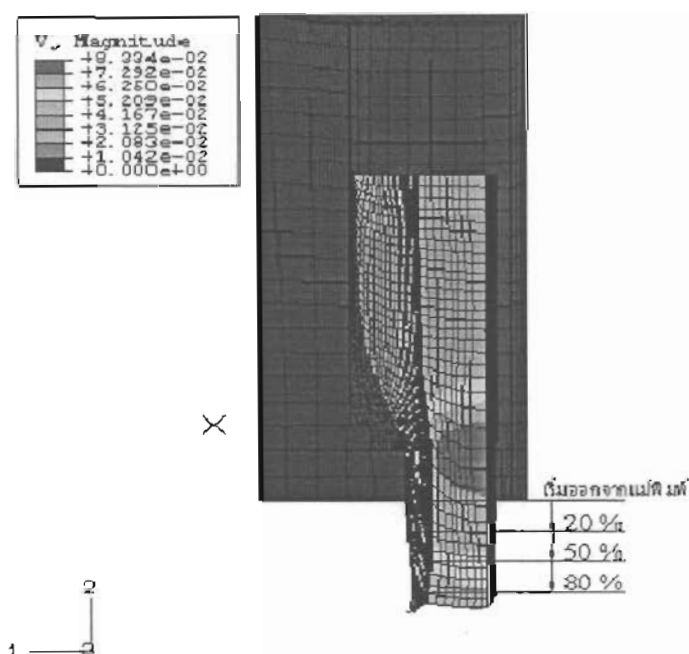
ซึ่งการวัดค่าแรงอัดรีดจะวัดจากแรงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นกับพื้นที่หน้าตัดแท่งอลูมิเนียมด้านบนในแนวระนาบที่ 1 กับ 3 ของแท่งอลูมิเนียมที่ถูกอัดรีดในระยะเวลาทุกๆ 1 วินาที ตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงวินาทีที่ 13 แล้วเก็บผลแรงอัดรีดที่ได้เพื่อเขียนกราฟค่าแรงเทียบกับการเคลื่อนที่ตามระยะเวลาต่อจากนั้นจึงนำไปเทียบกับเส้นพฤติกรรมแรงในการอัดรีดแบบโดยตรง (Direct Extrusion) ดังภาพที่ 3-8 โดย Lof [14] ว่ามีการเปลี่ยนแปลงเป็นไปในแนวทางเดียวกันหรือไม่ หากกราฟแรงอัดรีดที่ได้จากการจำลองมีแนวทางเดียวกันกับเส้นพฤติกรรมของแรงในการอัดรีดแบบโดยตรง แสดงว่าผลของการจำลองการอัดรีดอลูมิเนียมแบบโดยตรงนี้สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์ได้



ภาพที่ 3-8 พฤติกรรมของแรงอัดรีดที่เปลี่ยนไปตามการเคลื่อนที่อัดรีด [14]

3.4.2 การวัดความเร็วที่ได้หลังอัดรีดอลูมิเนียม

เมื่อเปรียบเทียบผลของแรงในการอัดรีดแล้ว จากกราฟแรงอัดรีดที่ได้จะต้องหาเวลาที่ค่าของแรงอัดรีดเริ่มคงที่ เพื่อทำการวัดความเร็วอัดรีดที่เวลานั้นๆ เพราะถือว่าความเร็วอัดรีดในช่วงนั้นเป็นความเร็วอัดรีดจริง แล้วทำการเก็บข้อมูลของความเร็วที่ออกจากแม่พิมพ์อัดรีดของแท่งอลูมิเนียม โดยเริ่มจากการวัดค่าความเร็วที่เกิดตามแนวระนาบ 1 กับ ซึ่งตั้งฉากกับทิศทางการอัดรีดทั้งหมดของพื้นที่หน้าตัดของแท่งอลูมิเนียมที่ถูกอัดรีดออกจากแม่พิมพ์ ตั้งแต่เริ่มออกจากแม่พิมพ์ถึงปลายอลูมิเนียมที่ออกจากแม่พิมพ์ โดยวัดที่ระยะต่างๆ กันในแต่ละช่วงพื้นที่หน้าตัดคือ 20, 50 และ 80 เปอร์เซ็นต์ของระยะอลูมิเนียมที่ถูกอัดรีดออกจากแม่พิมพ์ ดังแสดงในภาพที่ 3-9



ภาพที่ 3-9 ระยะที่ใช้ในการวัดผลของความเร็ว

3.4.3 การวัดผลการเสียรูปที่เกิดกับอลูมิเนียมอัดรีด

เมื่อเก็บผลของความเร็วอัดรีดในอลูมิเนียมที่ออกจากแม่พิมพ์อัดรีดนั้น ส่วนที่สำคัญอีกสิ่งหนึ่งในการอัดรีดคือ ความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับปัจจัยจากความเร็วที่ได้จากการอัดรีดในหน้าตัดของอลูมิเนียมที่แตกต่างกัน จนเกิดการเสียรูปกับอลูมิเนียมที่ถูกอัดรีด ในงานวิจัยนี้ จึงได้ทำการเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนการเบี่ยงเบนของความเร็ว (Deviation) ในหน้าตัดอลูมิเนียมที่ถูกอัดรีดจากสมการที่ (3-7)

$$d \text{ (Deviation)} = (A_i - \bar{A})^2 \quad (3-7)$$

โดย A_i คือ ความเร็วอัตราตอกแต่ละช่วงเวลา 0.5 วินาที ตั้งแต่เริ่มอัตราตอกลูมิเนียม
ออกจนถึงวินาทีที่ 5

$\bar{A}$ คือ ความเร็วอัตราตอกเฉลี่ยทั้งหมด

เมื่อคำนวณหาค่าอัตราส่วนความเบี่ยงเบนของความเร็ว เทียบกับค่าที่จะทำให้เกิดความ
เสียหายต่อลูมิเนียมอัตราตอกว่าในแต่ละตัวแปรมีค่ามากกว่า 5 เปอร์เซนต์ถือว่าลูมิเนียมที่อัตราตอก
ในกรณีนั้นๆ มีโอกาสเกิดการเสียหายได้ แต่ถ้าหากมีค่าน้อยกว่า 5 เปอร์เซนต์ แสดงว่า
การเสียหายที่เกิดกับชิ้นงานอัตราตอกนั้นอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้

บทที่ 4

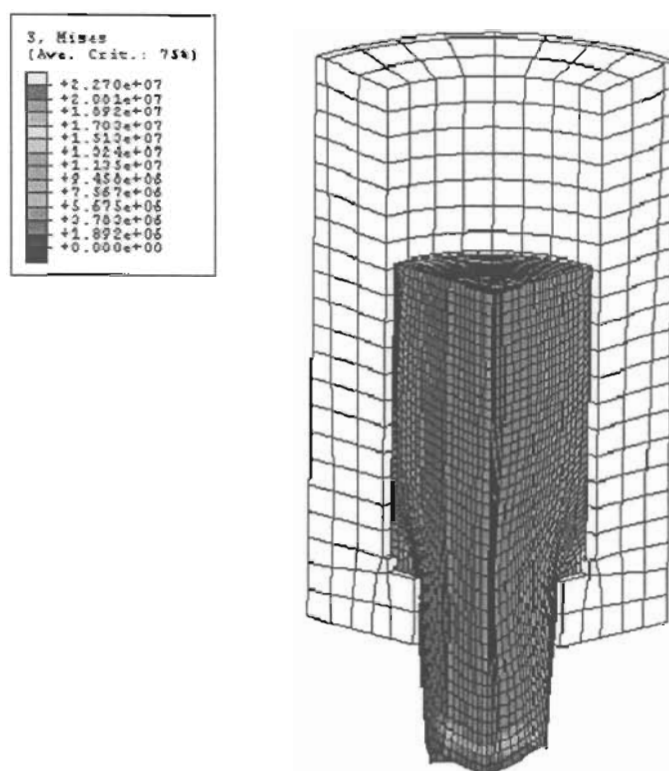
ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผล

เมื่อทำการจำลองกระบวนการอัดรีดลูมิเนียมในบทที่ 3 จากตัวแปรต่างๆ ที่ได้ควบคุม โดยในบทนี้จะได้นำผลการจำลองมาทำการประมวล ในบทนี้จะเปรียบเทียบผลการจำลองกับ ผลวิจัยอื่น และแจกแจงถึงผลของตัวแปรที่มีผลต่อคุณภาพของชิ้นงาน พร้อมความเร็วของการ อัดรีด ซึ่งจะใช้ในการออกแบบลักษณะของแม่พิมพ์อัดรีดต่อไป ที่จะได้ทำการแบ่งตามหัวข้อ ของตัวแปรดังต่อไปนี้

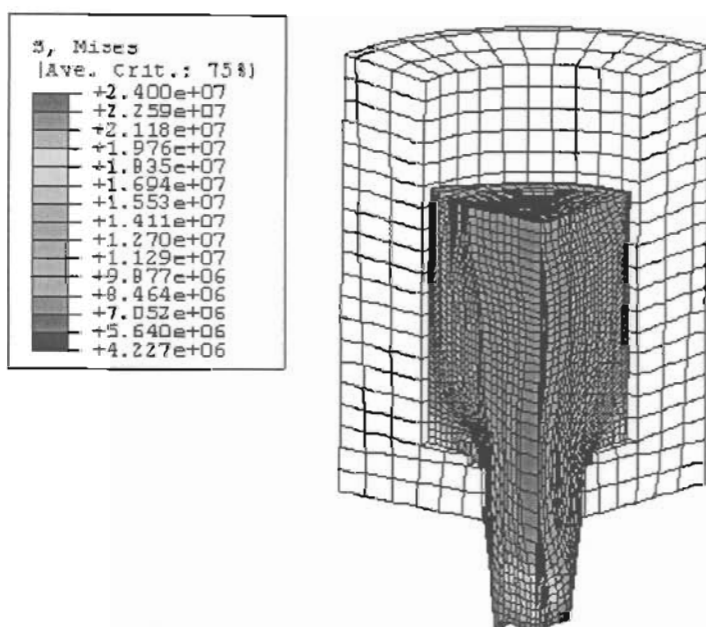
4.1 การเปรียบเทียบผลการจำลองกับงานวิจัยอื่นๆ

ภาพที่ 4-1 และ 4-2 แสดงการจำลองการอัดรีด พร้อมทั้งแสดงระดับค่าการกระจายตัวของความเค้นของ Profile การอัดรีด เพื่อให้เข้าใจลักษณะการกระจายตัวของตัวแปรง่ายขึ้น คล้ายกับงานวิจัยของ Alfaro [27] ซึ่งจะเห็นว่าที่บริเวณมุมของพอกเกิดติดกับขอบมีสีแตกต่าง กับบริเวณอื่นเป็นจุดที่เกิด Dead Metal Zone

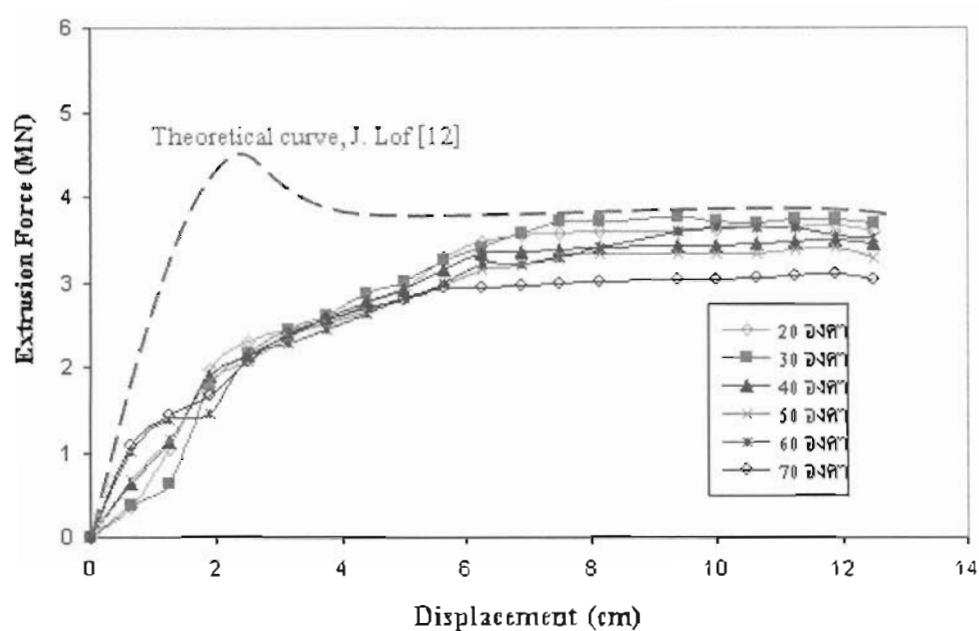
การเทียบผลแรงอัดรีดของแม่พิมพ์อัดรีด หลังจากนำผลของแรงอัดรีดที่ได้มาเทียบกับ เวลาที่ต่างกันของแม่พิมพ์แบบที่ 1 ของอัตราส่วนการอัดรีดที่ 2.04 และ 2.79 เขียนได้เป็น กราฟดังภาพที่ 4-3 และ 4-4 พร้อมทั้งของแม่พิมพ์แบบที่ 2 ของอัตราส่วนการอัดรีดที่ 5 และ 6 เขียนได้เป็นกราฟดังภาพที่ 4-5 และ 4-6 แสดงให้เห็นแรงในกระบวนการอัดรีดจากแม่พิมพ์ อัดรีดนั้น มีแนวทางในการเปลี่ยนแรงช่วงต้นของการอัดรีดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในเวลาอันสั้น แล้วแรงอัดรีดจึงลดลงเล็กน้อยจากนั้นแรงอัดรีดจะเพิ่มอย่างสม่ำเสมอ และแรงอัดรีดที่ได้มีค่า ใกล้เคียงกับลักษณะกับค่าแรงอัดรีดของงานวิจัยของ Lof [15] ซึ่งเป็นการเปลี่ยนค่าแรงอัดรีด กับการเคลื่อนที่ของกระบอกอัดรีดตามพฤติกรรมของการขึ้นรูปของการอัดรีดแบบโดยตรง จึง แสดงว่าผลจากการทดลองตามแบบจำลองในงานวิจัยนี้ สามารถใช้วิเคราะห์เพื่อศึกษาผล ที่ต้องการได้ และในการจำลองนี้ได้ใช้ช่วงการเก็บผลของความเร็วอัดรีดออกในช่วงที่ค่าแรงต้น มีความเสถียรเพื่อให้ได้ความเร็วอัดรีดออกที่สม่ำเสมอ ซึ่งจากกราฟภาพที่ 4-3, 4-4, 4-5 และ 4-6 มีค่าที่แตกต่างกันนั้นมาจากค่าอัตราส่วนการอัดรีด และลักษณะของแม่พิมพ์อัดรีด หรือ ขนาดของ Profile ที่แตกต่างกัน โดยเมื่อเทียบตามลักษณะของแม่พิมพ์อัดรีด แล้วแม่พิมพ์ ที่ขนาด Profile ที่เล็กกว่าจะให้ค่าแรงที่มากกว่า ต่อมาเทียบด้วยอัตราส่วนการอัดรีดที่น้อยกว่า จะให้ค่าแรงที่มากกว่าตาม



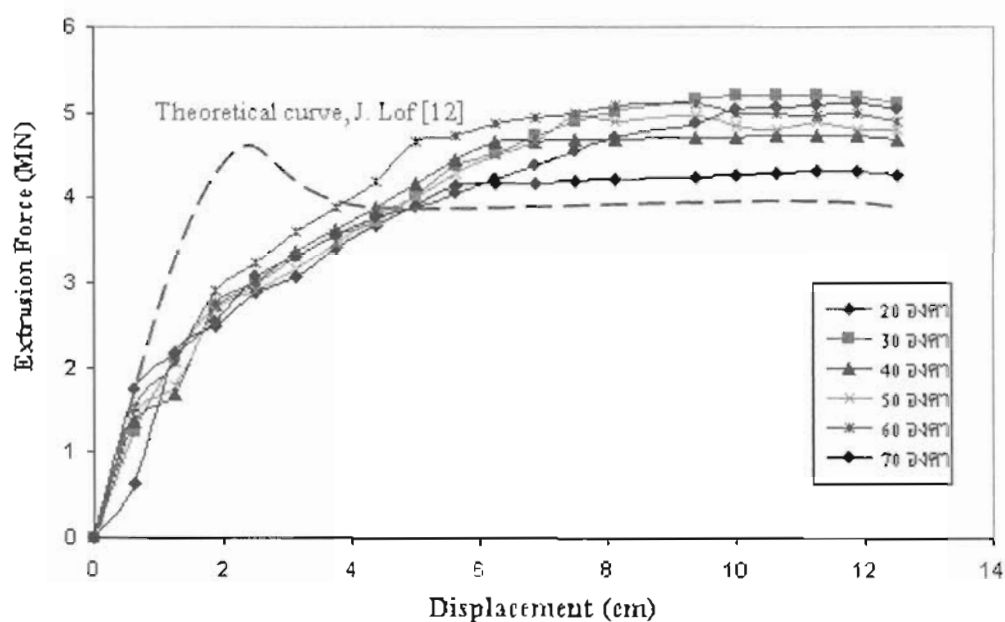
ภาพที่ 4-1 ตัวอย่างการแสดงผลของความเค้นที่ได้จากการอัดรีดแม่พิมพ์แบบที่ 1



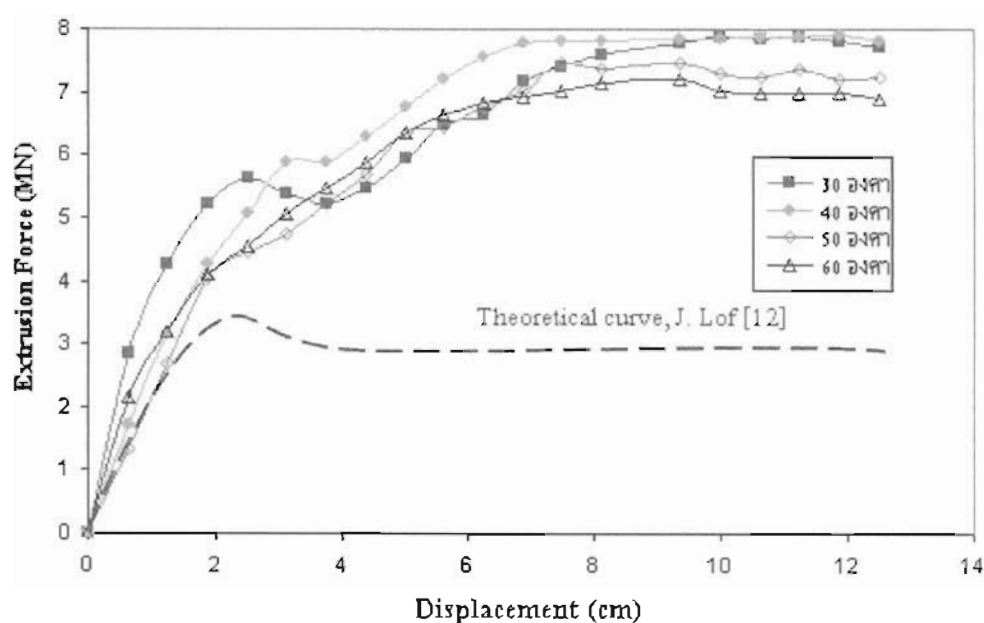
ภาพที่ 4-2 ตัวอย่างการแสดงผลของความเค้นที่ได้จากการอัดรีดแม่พิมพ์แบบที่ 2



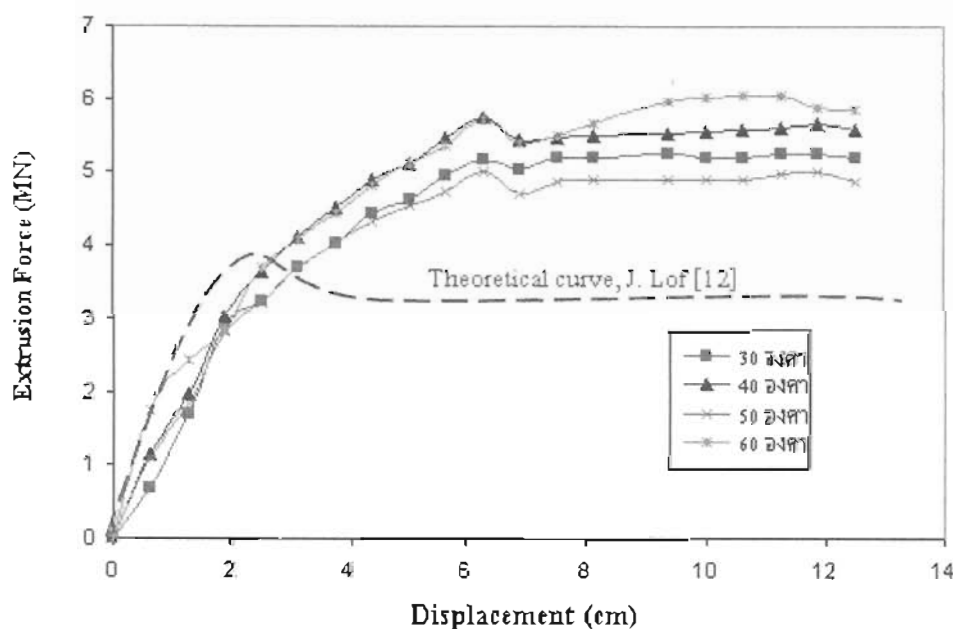
ภาพที่ 4-3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับเวลาในการอัดรีดที่มุมพอกเกิดต่างๆ กันในแม่พิมพ์แบบที่ 1 (อัตราส่วนการอัดรีดเท่ากับ 2.04 ความเร็วอัดรีดเข้า 1 ชม.ต่อวินาที ปริมาตรพอกเกิด 100 ลบ.ซม.)



ภาพที่ 4-4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับเวลาในการอัดรีดที่มุมพอกเกิดต่างๆ กันในแม่พิมพ์แบบที่ 1 (อัตราส่วนการอัดรีดเท่ากับ 2.79 ความเร็วอัดรีดเข้า 1 ชม.ต่อวินาที ปริมาตรพอกเกิด 100 ลบ.ซม.)



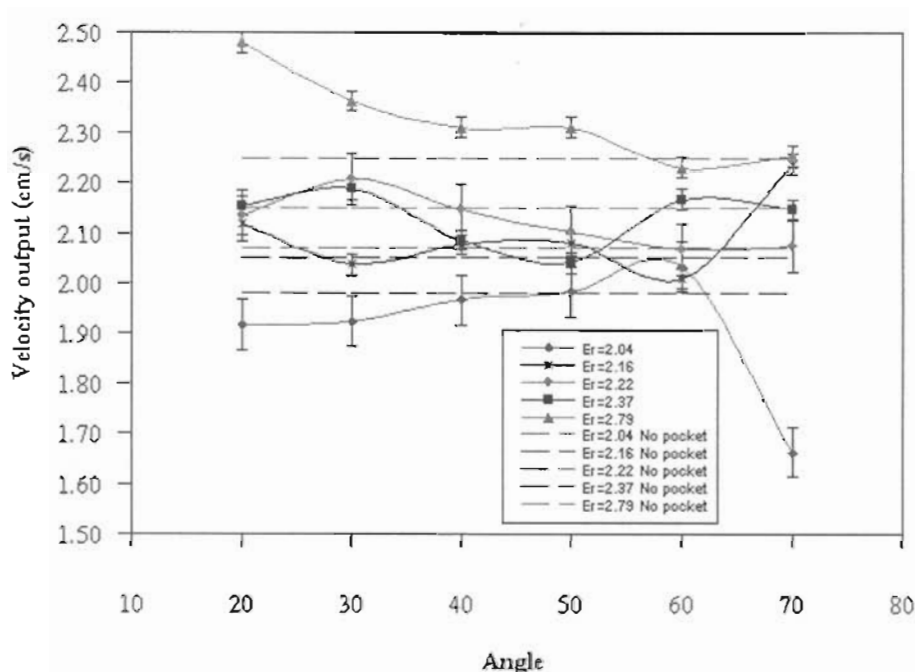
ภาพที่ 4-5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับเวลาในการอัดรีดที่มุมพอกเกิดต่างกันในแม่พิมพ์แบบที่ 2 (อัตราส่วนการอัดรีดเท่ากับ 5 ความเร็วอัดรีดเข้า 1 ชม.ต่อวินาที อัตราส่วนการอัดรีด 3)



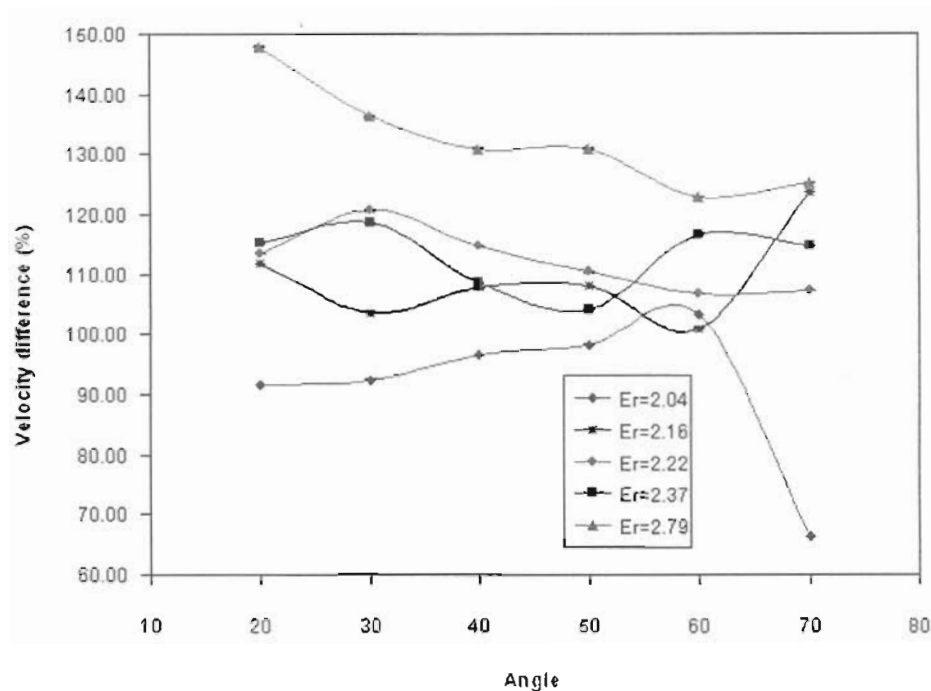
ภาพที่ 4-6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับเวลาในการอัดรีดที่มุมพอกเกิดต่างกันในแม่พิมพ์แบบที่ 2 (อัตราส่วนการอัดรีดเท่ากับ 6 ความเร็วอัดรีดเข้า 1 ชม.ต่อวินาที อัตราส่วนการอัดรีด 3)

4.2 ความเร็วอัตราไดรต์ออกในแบบแม่พิมพ์ที่ 1

4.2.1 อิทธิพลของมุมพอกเกิดที่มีผลต่อความเร็วของอลูมิเนียมที่ออกจากแม่พิมพ์พอกเกิด ดังแสดงในกราฟภาพที่ 4-7 และ 4-8 อิทธิพลของมุมพอกเกิดที่ปริมาตรช่องพอกเกิด 100 ลบ.ซม. ความเร็วอัตราไดรต์ 1 ซม.ต่อวินาที สังเกตได้ว่าในแต่ละอัตราส่วนการอัตราไดรต์นั้นมุมพอกเกิดที่ให้ค่าความเร็วของอลูมิเนียมที่ออกจากแม่พิมพ์มากที่สุด และมีค่าความเบี่ยงเบนความเร็วอัตราไดรต์ที่น้อยๆ คือมุมพอกเกิดที่ระหว่าง 30-60 องศา ซึ่งจะเกิดการเสียหายต่อชิ้นงานน้อยกว่ามุมอื่นๆ



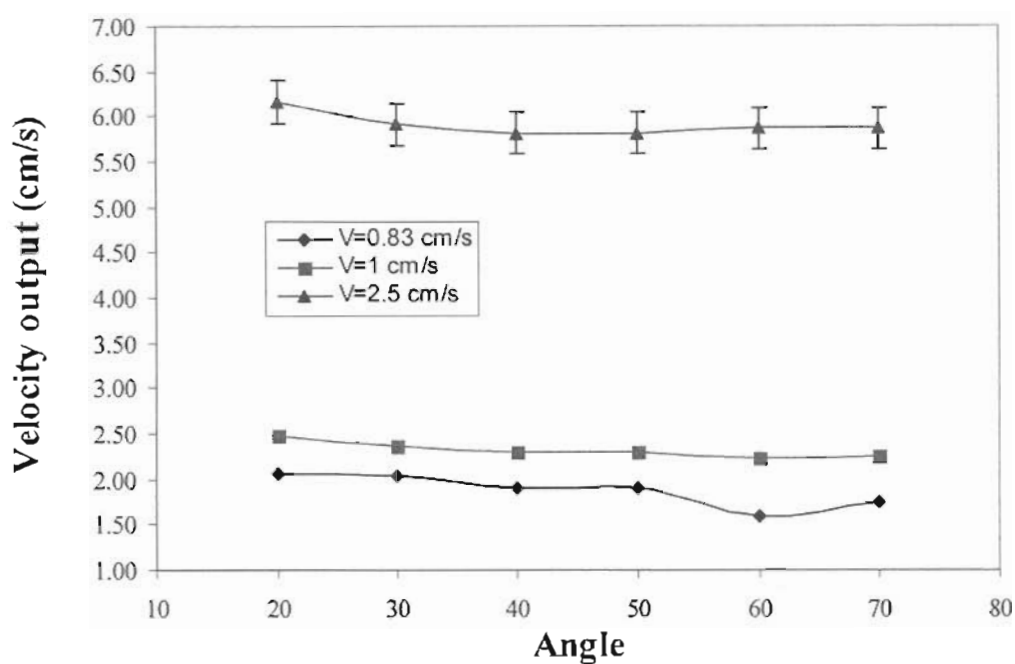
ภาพที่ 4-7 กราฟความเร็วของอลูมิเนียมที่ออกจากแม่พิมพ์อัตราไดรต์กับมุมพอกเกิดที่อัตราส่วนการอัตราไดรต์ต่างๆ กันในแม่พิมพ์แบบที่ 1 (ปริมาตรช่องพอกเกิด 100 ลบ.ซม. ความเร็วอัตราไดรต์เข้า 1 ซม.ต่อวินาที)



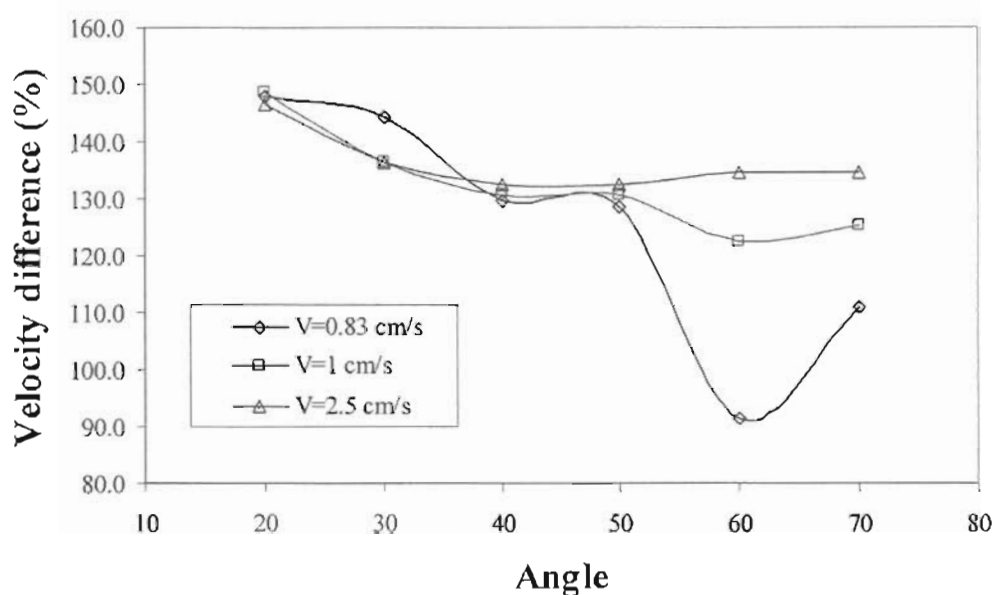
ภาพที่ 4-8 กราฟความเร็วของลูมิเนียมที่ออกจากแม่พิมพ์อัดรีดกับมุมพอกเกิดที่อัตราส่วนการอัดรีดต่างๆ กันในแม่พิมพ์แบบที่ 1 เทียบความเร็วการอัดรีดที่ออกจากแม่พิมพ์กับอัดรีดเข้าเป็นเปอร์เซ็นต์ (ปริมาตรช่องพอกเกิด 100 ลบ.ซม. ความเร็วอัดรีดเข้า 1 ซม.ต่อวินาที)

4.2.2 อิทธิพลของอัตราส่วนการอัดรีด ดังแสดงในภาพที่ 4-9 และ 4-11 สิ่งแรกคืออัตราส่วนการอัดรีดที่ให้ค่าความเร็วลูมิเนียมที่ออกจากแม่พิมพ์อัดรีดมากที่สุดที่ 2.79 ซึ่งค่าที่ได้นี้ใกล้เคียงกับผลการวิจัยของ Saha [8] ส่วนที่ความเร็วลูมิเนียมที่ออกจากแม่พิมพ์อัดรีดของแบบแม่พิมพ์อัดรีดมีพอกเกิดใกล้เคียงกับแบบแม่พิมพ์อัดรีด ไม่มีพอกเกิดคือที่ค่าอัตราส่วนการอัดรีดที่ 2.04 และ 2.79

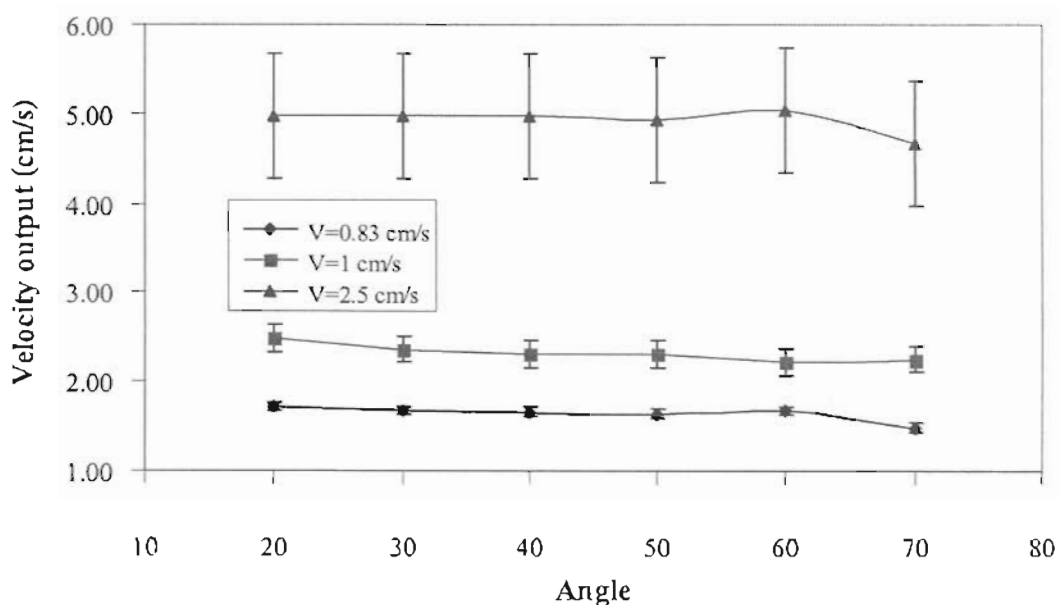
4.2.3 อิทธิพลของความเร็วอัดรีดเข้า จากการแสดงข้อมูลเป็นกราฟในอัตราส่วนการอัดรีด 2.04 และ 2.79 ความเร็วอัดรีด 1 ซม.ต่อวินาที ปริมาตรช่องพอกเกิดแม่พิมพ์อัดรีด 100 ลบ.ซม. ดังภาพที่ 4-9, 4-10, 4-11 และ 4-12 จะสังเกตว่าความเร็วอัดรีดเข้าที่อัตราส่วนการอัดรีดทั้งสองที่มีผลต่อความเร็วลูมิเนียมที่ออกจากแม่พิมพ์อัดรีด และไม่ทำให้เกิดค่าความเบี่ยงเบนความเร็วมากจนมีผลต่อความเสียหายที่ลูมิเนียมอัดรีดคือ ความเร็วอัดรีด 1 ซม.ต่อวินาที โดยลักษณะของผลที่ได้ในงานวิจัยกับของงานวิจัยของ Lee [22] มีแนวทางคล้ายกันคือความเร็วอัดรีดจะส่งผลต่อความเสียหายของชิ้นงาน เนื่องจากความเร็วที่เหมาะสมจะไม่ทำให้เกิดความเสียหาย และยังส่งผลให้ความเร็วอัดรีดออกเร็วเพิ่มขึ้นได้



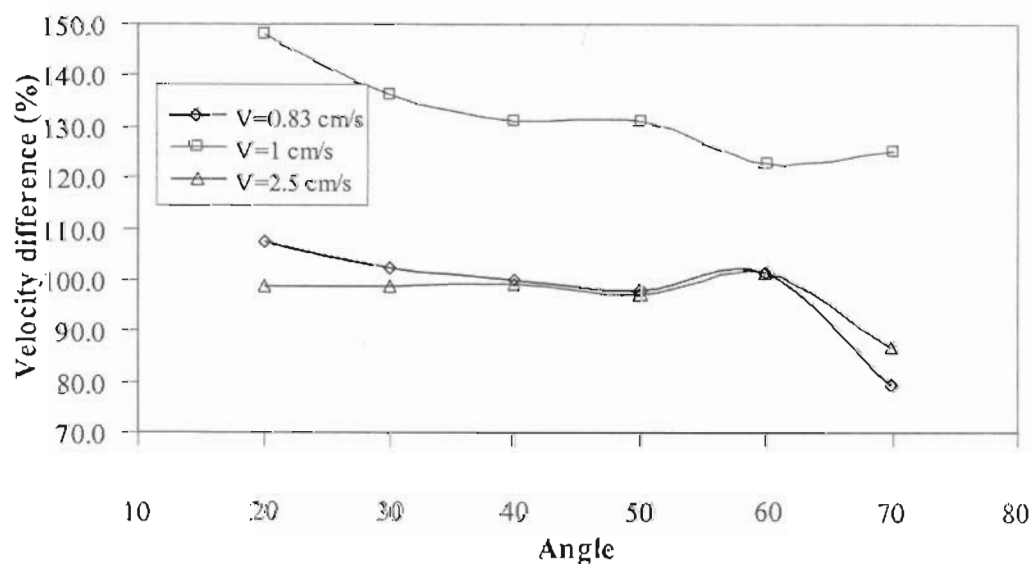
ภาพที่ 4-9 กราฟความเร็วออกกับมุมพอกเกิด ที่ความเร็วการอัดรีดที่ต่างๆ กัน (อัตราส่วนการอัดรีด 2.04 ความเร็วอัดรีดเข้า 1 ซม.ต่อวินาที ปริมาตรช่องพอกเกิด 100 ลบ.ซม.)



ภาพที่ 4-10 กราฟความเร็วออกกับมุมพอกเกิด เทียบความเร็วการอัดรีดที่ออกจากแม่พิมพ์ กับอัดรีดเข้า โดยเทียบความเร็วเป็นเปอร์เซ็นต์ (อัตราส่วนการอัดรีด 2.04 ความเร็วอัดรีดเข้า 1 ซม.ต่อวินาที ปริมาตรช่องพอกเกิด 100 ลบ.ซม.)

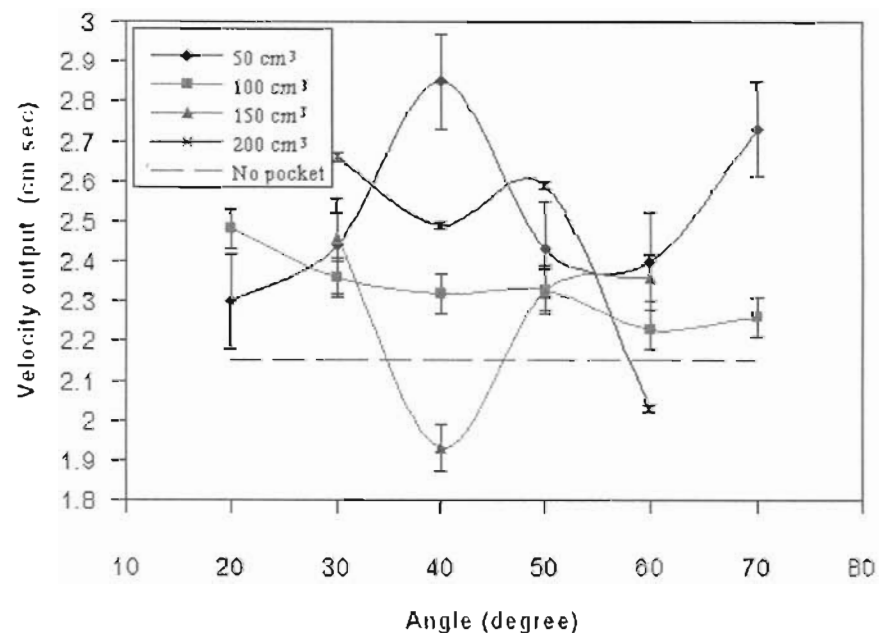


ภาพที่ 4-11 กราฟความเร็วออกกับมุมพอกเกิด ที่ความเร็วการอัดรีดออกที่ต่างๆ กัน (อัตราส่วนการอัดรีด 2.79 ความเร็วอัดรีดเข้า 1 ซม.ต่อวินาที ปริมาตรช่องพอกเกิด 100 ลบ.ซม.)

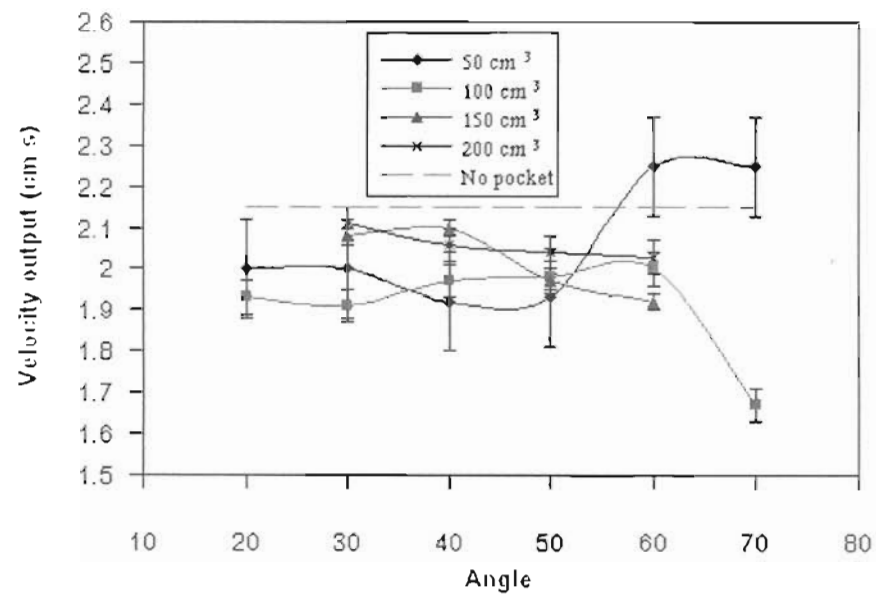


ภาพที่ 4-12 กราฟความเร็วออกกับมุมพอกเกิด เทียบความเร็วการอัดรีดที่ออกจากแม่พิมพ์ กับอัดรีดเข้า โดยเทียบความเร็วเป็นเปอร์เซ็นต์ (อัตราส่วนการอัดรีด 2.79 ความเร็วอัดรีดเข้า 1 ซม.ต่อวินาที ปริมาตรช่องพอกเกิด 100 ลบ.ซม.)

4.2.4 อิทธิพลของปริมาตรพอกเกิด ผลการจำลองแสดงในภาพที่ 4-13 และ 4-14 แยกตามอัตราส่วนการอัดรีดที่ 2.04 และ 2.79 ที่ความเร็วอัดรีดเข้า 1 ซม.ต่อวินาที สังเกตได้จากกราฟความเร็วออกของอลูมิเนียมอัดรีดที่มุมพอกเกิดต่างๆ กัน ที่แต่ละปริมาตรพอกเกิดนั้น แนวโน้มที่ได้ไม่สามารถสรุปได้ชัดเจน ในความสัมพันธ์ของปริมาตรพอกเกิดกับความเร็วออกของอลูมิเนียมอัดรีด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Li [11] ที่พบว่าปริมาตรพอกเกิดของแม่พิมพ์ ไม่มีผลกับความเร็วอัดรีดออก แต่สามารถสังเกตเห็นความสัมพันธ์ได้ว่าที่ปริมาตรพอกเกิดที่ 200 ล.บ.เซนติเมตร จะมีค่าความเบี่ยงเบนความเร็วอัดรีดที่น้อยกว่าค่าอื่น แสดงว่าที่ปริมาตรพอกเกิดที่มากนั้นจะเกิดการเสียหายได้น้อยกว่าปริมาตรพอกเกิดที่น้อยกว่า



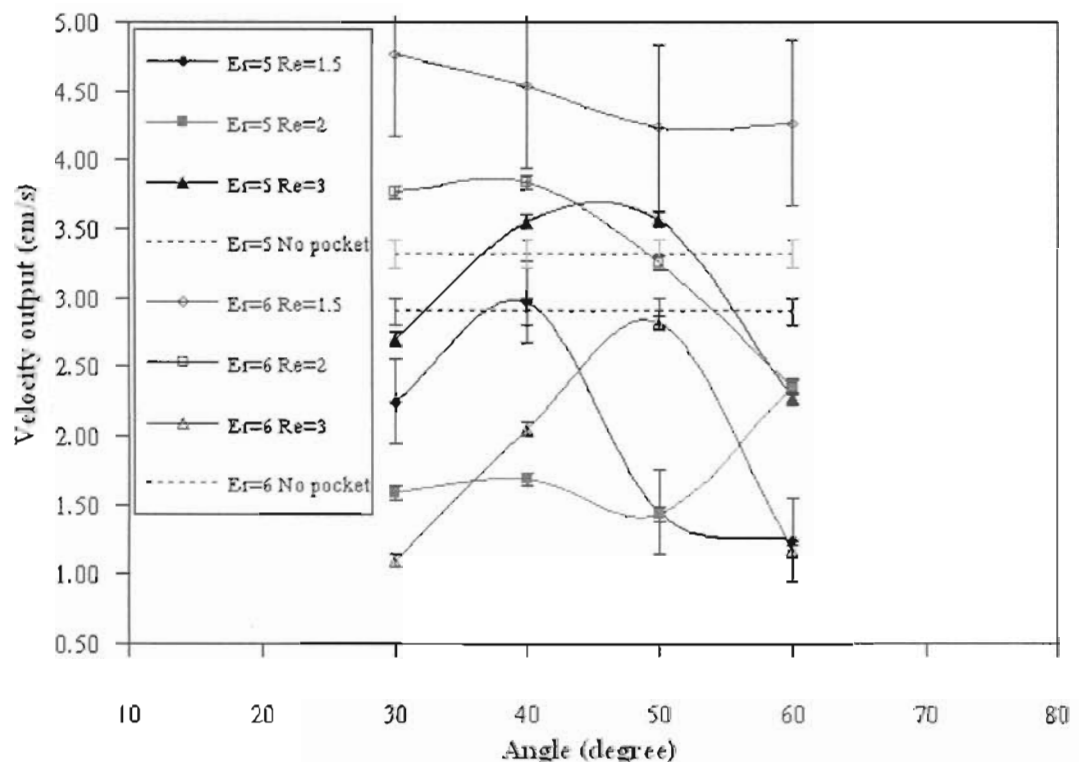
ภาพที่ 4-13 กราฟความเร็วออกของอลูมิเนียมกับมุมพอกเกิด ที่ปริมาตรช่องพอกเกิดต่างๆ กัน (อัตราส่วนการอัดรีด 2.04 ความเร็วอัดรีดเข้า 1 ซม.ต่อวินาที)



ภาพที่ 4-14 กราฟความเร็วออกของอลูมิเนียมกับมุมพอกเกิด โดยสังเกตปริมาตรช่องพอกเกิด
ต่างๆ กัน (อัตราส่วนการอัดรีด 2.79 ความเร็วอัดรีดเข้า 1 ซม.ต่อวินาที)

4.3 ความเร็วอัดรีดออกในแบบแม่พิมพ์ที่ 2

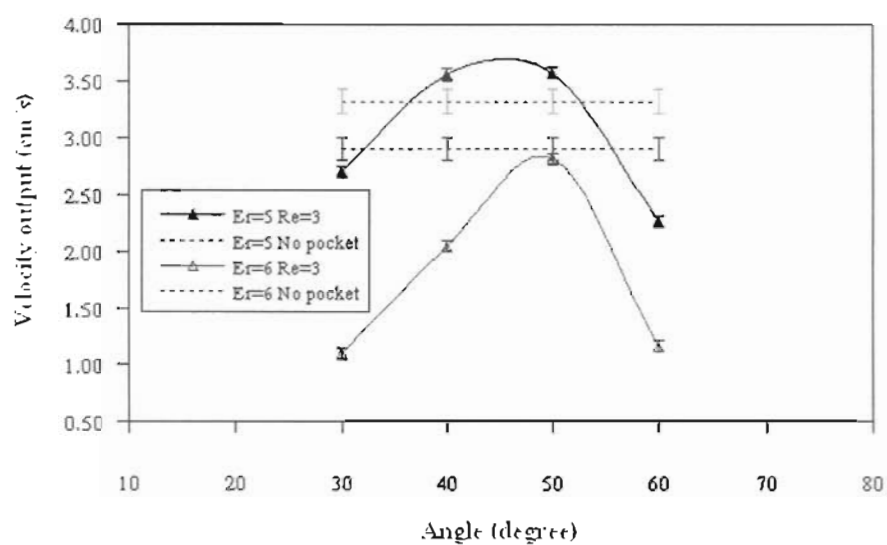
จากการเปลี่ยนแบบแม่พิมพ์ และตัวแปรที่ได้ทำการพิจารณาจากแบบแม่พิมพ์แบบที่ 1 เพื่อความเหมาะสม จึงได้ทำการทดลองกับแม่พิมพ์แบบใหม่ ทำให้ได้ผลการศึกษาจากตัวแปร
รวมดังภาพที่ 4-15 และได้แยกการแสดงผลของตัวแปรดังต่อไปนี้



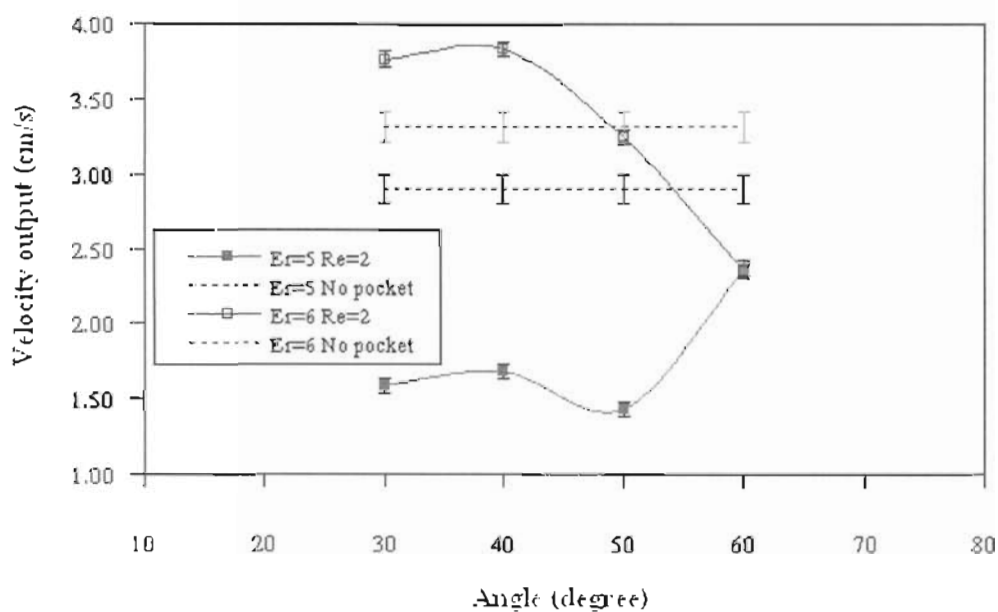
ภาพที่ 4-15 ความเร็วอลูมิเนียมที่ถูกออกกับมุมพอกเกิดต่างๆ กัน
โดยการเปลี่ยน Er และ Re ในแม่พิมพ์แบบที่ 2

4.3.1 อิทธิพลของมุมพอกเกิดจากภาพที่ 4-15 พบว่ามุมพอกเกิดที่ส่วนใหญ่จะให้ความเร็วอัดรีดสูงสุดที่ไม่ทำให้อลูมิเนียมที่ถูกอัดรีดเสียหายได้แก่ มุมพอกเกิดที่ 40 และ 50 องศา แต่ในบางกรณี (เช่นที่ $Er = 5$, Re (อัตราส่วนการอัดรีด) = 3) จะได้ค่าความเร็วอัดรีดออกมาจากที่มุมพอกเกิด 30 และ 60 องศา มีค่าความเบี่ยงเบนความเร็วที่มากแสดงว่ามีโอกาสเกิดการเสียหายของอลูมิเนียมที่อัดรีดได้

4.3.2 อิทธิพลของอัตราส่วนการอัดรีด จากผลที่ได้นำมาประมวลเทียบอัตราส่วนการอัดรีดที่ต่างกันดังภาพที่ 4-15 โดยใช้ค่าคงที่ความเร็วเข้าที่ 1 เซนติเมตรต่อวินาที เทียบอัตราส่วนการลดขนาดที่ 3 กับแบบไม่มีพอกเกิด เขียนเป็นภาพที่ 4-16 จากภาพพบว่าที่อัตราส่วนการอัดรีดที่ 5 จะให้ความเร็วอัดรีดออกมากกว่าอัตราส่วนการอัดรีดที่ 6 จากผลการเปรียบเทียบนี้ แสดงว่าแนวโน้มของความเร็วอัดรีดที่มากกว่าจะเกิดที่อัตราส่วนการอัดรีดที่น้อยกว่า คือ มีความสัมพันธ์ของอัตราส่วนการอัดรีดกับความเร็วอัดรีดที่เป็นส่วนกลับกัน

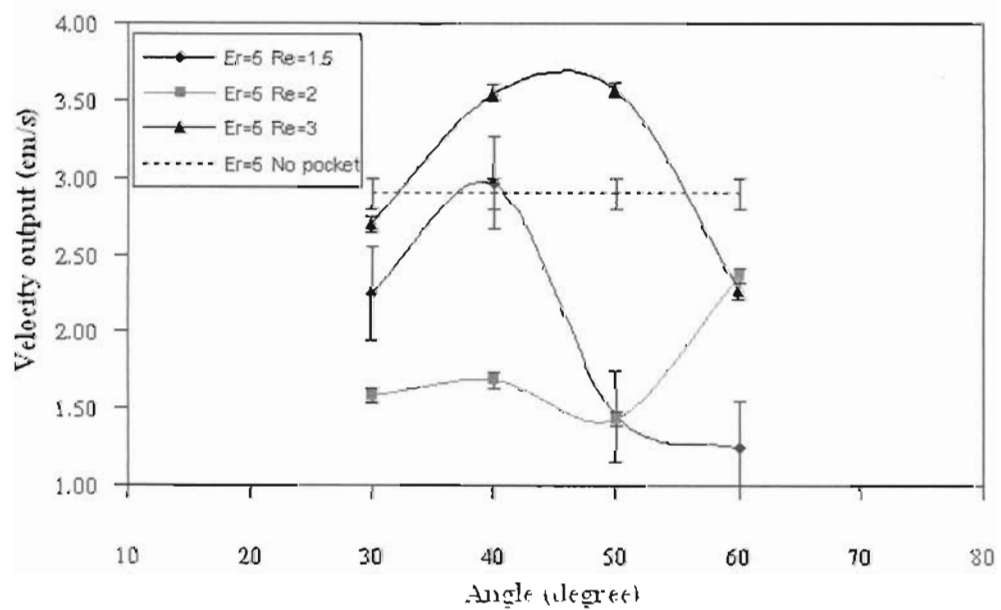


ภาพที่ 4-16 แสดงผลการศึกษาเทียบกับ อัตราส่วนการอัดรีด 5 และ 6 กับอัตราส่วนการลดขนาด (Re) ที่ 3 ในมุมพอกเก็ตที่กำหนด (ความเร็วการอัดรีดเข้าที่ 1 ซม.ต่อวินาที)



ภาพที่ 4-17 แสดงผลการศึกษาเทียบกับ อัตราส่วนการอัดรีด 5 และ 6 กับอัตราส่วนการลดขนาด (Re) ที่ 2 ในมุมพอกเก็ตที่กำหนด (ความเร็วการอัดรีดเข้าที่ 1 ซม.ต่อวินาที)

4.3.3 อิทธิพลของอัตราส่วนการลดขนาดอัดรีด เมื่อนำผลการศึกษามาเขียนเป็นกราฟ แบ่งตามอัตราส่วนการอัดรีดที่ 5 ดังภาพที่ 4-18 พบว่าอัตราส่วนการลดขนาดที่ให้ค่าความเร็วอัดรีดมากที่สุดพร้อมทั้งมีค่าความเบี่ยงเบนของความเร็วออกที่น้อยที่สุดนั้น เป็นค่าอัตราส่วนการลดขนาด (Re) ที่ 3 และที่อัตราส่วนการลดขนาด (Re) ที่ 1.5 จะให้ค่าความเบี่ยงเบนของความเร็วออกมากที่สุด หรือเกิดการเสียหายของชิ้นงานที่มากกว่าค่าอัตราส่วนการลดขนาดทั้งสองค่า



ภาพที่ 4-18 ผลการศึกษาเทียบกับ อัตราส่วนการอัดรีด และอัตราส่วนการลดขนาด ในมุมพอกเกิดที่กำหนด (ความเร็วอัดรีดเข้า 1 ซม.ต่อวินาที อัตราการอัดรีด 5)

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 อภิปรายผลการทดลอง

5.1.1 จากหัวข้อที่ 4.1 ถือเป็นสิ่งสำคัญในการอ้างอิงผลการจำลองว่ามีความใกล้เคียงกราฟพฤติกรรมของความเค้นที่เปลี่ยนตามการเคลื่อนที่ ทำให้ผลที่จากการจำลองจะสามารถใช้ในการวิเคราะห์การขึ้นรูปอลูมิเนียมโดยวิธีการอัดรีด เพื่อศึกษาถึงปัจจัยของส่วนประกอบแม่พิมพ์ที่มีอิทธิพลต่อความเร็วอัดรีดอลูมิเนียมออกจากแม่พิมพ์ ซึ่งจากผลการจำลองที่ได้เป็นไปตามพฤติกรรมของภาพที่ 3-9 ส่งผลให้การจำลองในงานวิจัยสามารถใช้ในการนำมาวิเคราะห์ได้

5.1.2 ในแม่พิมพ์แบบที่หนึ่ง ได้ศึกษาตามปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความเร็วอลูมิเนียมที่อัดรีดออกจากแม่พิมพ์ ดังในหัวข้อที่ 4.2.1 ผลการจำลองอิทธิพลของมุมการไหลพอกเกิดแม่พิมพ์อัดรีดได้ผลมุมการไหลที่ให้ค่าความเร็วอัดรีดออกจากแม่พิมพ์มากส่วนใหญ่คือ 30-60 องศา ทำให้มุมที่เหมาะสมต่อการออกแบบมุมการไหลควรจะอยู่ในช่วงมุมที่ได้จากการจำลองนี้ ซึ่งผลที่ได้ก็อีกอย่างจากการเลือกมุมการไหลที่ถูกต้องจะทำให้อลูมิเนียมที่ถูกอัดรีดไม่เกิดการเสียหาย

5.1.3 อิทธิพลของอัตราส่วนการอัดรีดในแม่พิมพ์แบบที่ 1 ในหัวข้อ 4.2.2 ได้ผลอัตราการอัดรีดที่ทำให้ความเร็วอัดรีดออกมีค่ามากที่สุดคือ 2.79 ส่วนค่าอัตราการอัดรีดที่ทำให้ค่าความเร็วออกของแม่พิมพ์แบบมีพอกเกิดใกล้เคียงกับแม่พิมพ์แบบไม่มีพอกเกิดคือ 2.10 และ 2.16 จากผลที่ได้วิเคราะห์ได้ว่าอัตราการอัดรีดที่มากจะทำให้ความเร็วออกที่ได้มากตาม เป็นการแปรผันแบบโดยตรง แต่หากใช้อัตราการอัดรีดที่มากเกินไป และน้อยเกินไปจะส่งผลทำให้อลูมิเนียมที่ถูกอัดรีดเสียหายได้ จากค่าความเบี่ยงเบนของความเร็วที่เกิดขึ้น

5.1.4 อิทธิพลของความเร็วอัดรีดเข้าในแม่พิมพ์แบบที่ 1 ในหัวข้อ 4.2.3 ทำให้ได้ผลว่าความเร็วอัดรีดเข้าที่มีผลต่อความเร็วออก เพิ่มในสัดส่วนความเร็วอัดรีดเข้าเปรียบเทียบกับความเร็วออกที่มากที่สุดคือที่ 1 ซม.ต่อวินาที เพราะความเร็วนี้สามารถให้ค่าความเร็วออกเมื่อเทียบกับความเร็วที่เข้าได้สัดส่วนที่มาก และมีค่าความเบี่ยงเบนความเร็วอัดรีดออกตามแนวขวางที่น้อยมาก ซึ่งไม่ส่งผลต่อการเสียรูปของอลูมิเนียมที่ถูกอัดรีด

5.1.5 อิทธิพลของปริมาณพอกเกิดในแม่พิมพ์แบบที่ 2 จากหัวข้อที่ 4.2.4 ปริมาณพอกเกิดของแม่พิมพ์อัดรีดนั้นไม่มีผลต่อความเร็วออก แต่จะมีผลต่อค่าความเบี่ยงเบนตามแนวขวางของความเร็วอัดรีด โดยในปริมาตรพอกเกิดแม่พิมพ์ที่น้อยจะมีค่าความเบี่ยงเบนที่มากกว่า ปริมาตรพอกเกิดที่มาก เช่นในปริมาตรพอกเกิดที่ 200 ลบ.ซม. จะมีค่าความเบี่ยงเบนความเร็วออกที่น้อยกว่าที่ปริมาตรพอกเกิดที่ 50 ลบ.ซม. อันจะทำให้โอกาสที่จะเกิดความเสียหายของอลูมิเนียมที่ถูกอัดรีดน้อยตามไปด้วย

5.1.6 หลังจากที่ได้เปลี่ยนแบบของแม่พิมพ์เป็นแบบที่ 2 แล้วพร้อมทั้งได้กำหนดปัจจัยที่จะศึกษาเพื่อแสดงว่าจากผลการจำลองในแม่พิมพ์แบบที่ 1 นั้นสามารถใช้ในการออกแบบแม่พิมพ์ได้ มาหาค่าอิทธิพลของมุมการไหลของพอกเกิดในแม่พิมพ์แบบที่ 2 จากหัวข้อที่ 4.3.1 ค่ามุมการไหลที่ให้ค่าความเร็วอัตราไหลออกมากที่สุดของแต่ละตัวแปรคือ 40-50 องศา ซึ่งอยู่ในช่วงที่ได้ออกแบบแม่พิมพ์ไว้จากข้อมูลของแม่พิมพ์แบบที่ 1

5.1.7 โดยจากอิทธิพลอัตราส่วนการอัดรีดของแม่พิมพ์แบบที่ 2 ในหัวข้อที่ 4.3.2 พบว่าอัตราส่วนการอัดรีดมีความสัมพันธ์กับความเร็วอัตราไหลออกเป็นแบบผกผันกัน คือ เมื่อเทียบความเร็วอัตราไหลในค่าอัตราส่วนการอัดรีดที่ 5 จะมากกว่าค่าอัตราส่วนการอัดรีดที่ 6

5.1.8 อิทธิพลของอัตราส่วนการลดขนาดในแม่พิมพ์แบบที่ 2 จากหัวข้อที่ 4.3.3 ได้ผลว่าที่อัตราส่วนการลดขนาดที่น้อยจะมีค่าความเบี่ยงเบนของความเร็วมากกว่า ซึ่งคล้ายกับผลปริมาตรพอกเกิดของแม่พิมพ์แบบที่ 1 แสดงว่าที่อัตราส่วนการลดขนาดที่น้อยจะทำให้เกิดการเสียหายของอลูมิเนียมที่ถูกอัดรีดมากขึ้น จึงควรหลีกเลี่ยงการกำหนดให้อัตราส่วนการลดขนาดที่ต่ำ

5.2 สรุปผลการทดลอง

ในการจำลองการอัดรีดในแม่พิมพ์ทั้งสองแบบที่ได้แสดงพบว่า

5.2.1 ในแม่พิมพ์แบบที่ 1 พบว่าสามารถแยกตัวแปรเป็น 2 ชนิดตามผลที่ได้จากตัวแปรคือตัวแปรที่มีผลต่อความเร็วได้แก่ อัตราส่วนการอัดรีด และมุมพอกเกิด ส่วนตัวแปรที่มีผลต่อความเสียหายของอลูมิเนียมที่อัดรีดได้แก่ ความเร็วอัตราไหลเข้า และปริมาตรส่วนพอกเกิดของแม่พิมพ์

5.2.2 เมื่อนำผลที่ได้มากำหนดตัวแปรในแม่พิมพ์แบบที่ 2 สามารถกำหนดตัวแปรที่มีความเร็วอัตราไหลออกมากที่สุด คือมุมพอกเกิดที่ 40-50 องศา และอัตราส่วนการอัดรีดที่ 6 ส่วนตัวแปรที่ทำให้ความเสียหายเกิดขึ้นน้อยหรือไม่เกิดคือความเร็วอัตราไหลเข้าที่ 1 cm/s และหลีกเลี่ยงการใช้อัตราส่วนการลดขนาดที่ 1.5

เมื่อนำการจำลองทั้งสองแบบมาพิจารณา ทำให้สามารถกำหนดตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบได้ดังนี้ ความเร็วอัตราไหลเข้าที่ควรใช้ในการอัดรีดประมาณ 1 cm/s เพื่อป้องกันความเร็วอัตราไหลที่เร็วเกินไปจะทำให้ชิ้นงานเสียหายได้ มุมพอกเกิดของแม่พิมพ์ที่จะช่วยเพิ่มความเร็วอัตราไหลออกของชิ้นงานอยู่ในช่วงประมาณ 40-50 องศา และควรหลีกเลี่ยงการใช้อัตราส่วนการลดขนาดที่น้อย เพื่อป้องกันชิ้นงานเสียหายอันเกิดจากการเปลี่ยนขนาดที่ต่างกันมากเกินไป แต่อัตราส่วนการอัดรีดนั้นจะถูกกำหนดโดยแบบที่จะใช้อัดรีดอลูมิเนียมแล้ว จึงไม่สามารถที่จะออกแบบได้เองแต่ก็จะมีค่ามากไว้ ส่วนปริมาตรของพอกเกิดนั้นก็มีผลต่อความเสียหายของชิ้นงาน โดยปริมาตรพอกเกิดแม่พิมพ์ที่มีค่าน้อยชิ้นงานจะมีการเสียหายมากกว่าที่มีค่ามากกว่า จึงควรเลือกใช้ปริมาตรพอกเกิดแม่พิมพ์ที่มีค่ามากไว้คล้ายกับลักษณะของอัตราส่วนการอัดรีด

โดยข้อมูลเบื้องต้นที่ได้จากงานวิจัยนี้ สามารถนำไปปรับใช้กับงานอัดรีดจริง หรือนำไปปรับใช้ในแบบที่มีความซับซ้อนมากขึ้นได้ ก่อให้เกิดประโยชน์กับอุตสาหกรรมอัดรีดต่อไป

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 หากต้องการตรวจสอบผลการวิเคราะห์ว่าเป็นผลที่ถูกต้อง หรือใกล้เคียงอย่างไร สามารถทำการเทียบผลจากการอัดรีดจริงกับผลการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์

5.3.2 จากผลที่ได้ ถ้าสามารถนำไปอัดรีดจริงได้จะทำให้เข้าใจการวิเคราะห์มากขึ้น และเพื่อการพัฒนาไปใช้ในการผลิตจริง โดยการออกแบบตามผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจริง

5.3.3 จากผลการทดลองที่ได้พัฒนาแล้ว ควรทำการฝึกอบรมบุคลากรในสายงานที่เกี่ยวข้องเพื่อนำไปปฏิบัติใช้จริงในอุตสาหกรรม

5.3.4 ในงานวิจัยนี้ สามารถต่อยอดการวิจัยพัฒนาโดยใช้การคำนวณทางไฟไนต์เอลิเมนต์ในการออกแบบแม่พิมพ์ที่มีความซับซ้อนมากขึ้น เพื่อให้สามารถใช้เป็นแหล่งความรู้ในการอ้างอิงเพื่อการออกแบบจริง และแข่งขันทางธุรกิจในการร่วมมือกับต่างประเทศในการร่วมกันพัฒนา เพราะจะช่วยลดค่าใช้จ่ายที่เสียไปจากการพึ่งพาเทคโนโลยีจากต่างประเทศ และช่วยในการถ่ายทอดเทคโนโลยีให้กับอุตสาหกรรมภายในประเทศได้

เอกสารอ้างอิง

1. กรมศุลกากร กระทรวงพาณิชย์. ข้อมูลลำดับสินค้าส่งออกมากที่สุด 5 อันดับแรก ปี 2545. กรุงเทพมหานคร : กรมศุลกากร, 2545.
2. อนุพงศ์ พรหมสวรรค์, สุวัจน์ เตชเจริญ และ ศศิธร พิทักษ์ฐานพงษ์. การศึกษาอิทธิพลของมุมพอกเกิดของแม่พิมพ์ที่มีต่อความเร็วในกระบวนการอัดรีดอลูมิเนียม. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมอุตสาหการแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 13, ณ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จังหวัดเชียงใหม่, 2547.
3. _____. การศึกษาอิทธิพลของลักษณะพอกเกิดแม่พิมพ์ต่อความเร็วในกระบวนการอัดรีดอลูมิเนียม 6063. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 19, ณ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จังหวัดภูเก็ต, 2548.
4. Sheppard, T. **Extrusion of Aluminium Alloys**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1999.
5. O.O. Onawola and M.B. Adeyemi. "Warm compression and extrusion test of aluminium." **Material Processing Technology**. 136 (2003) : 7-11.
6. Hanif Hamzah. "Weld Integrity on a Die." **ET 2000**. (2000) : 273-275.
7. P.K. Saha. "Thermodynamics and tribology in aluminium extrusion." **Wear**. 218 (1998) : 179-190.
8. P.K. Saha. "Factor affecting speed and pressure in 6063 aluminium extrusion." **Aluminium Extrusion Technology**. (1998) : 39-43.
9. J. Gasiotczyk and J. Richert. "Application of FEM Modeling to Simulate Metal Flow Through Porthole Dies." **ET 2000**. (2000) : 195-201.
10. Y.T. Kim, K. Ikeda and T. Murakami. "Metal flow in porthole die extrusion of aluminium." **Material Processing Technology**. 121 (2002) : 107-115.
11. Q. Li, et al. "Finite element investigations upon the influence of pocket die designs on metal flow in aluminium extrusion Part I. Effect of pocket angle and volume on metal flow." **Material Processing Technology**. 135 (2003) : 189-196.

12. _____. "Finite element investigations upon the influence of pocket die designs on metal flow in aluminium extrusion Part II. Effect of pocket geometry configurations on metal flow." **Material Processing Technology**. 135 (2003) : 197-203.
13. A.F.M. Arif, A.K. Sheikh and S.Z. Qamar. "A study of die failure mechanisms in aluminium extrusion." **Material Processing Technology**. 134 (2003) : 318-328.
14. J. Lof, et al. "FEM Simulation of the Material Flow in the Bearing Area of the Aluminium Extrusion Process." **ET 2000**. (2000) : 211-222.
15. J. Lof. **Development in finite element simulation of Aluminium Extrusion**. Wageningen: Ponsen & Looijen, 2000.
16. D.Y. Yang, K. Park and Y.S. Kang. "Integrated finite element simulation for the hot extrusion of complicated Al alloy profiles." **ET 2000**. (2001) : 211-222.
17. L.X. Li, et al. "A study on hot of Ti-6Al-4V using simulations and experiments." **Mechanical Sciences**. 44 (2002) : 2415-2425.
18. Q. Li, C. Harris and M.R. Jolly. "Finite element modelling simulation of transverse welding phenomenon in aluminium extrusion process." **Materials and Design**. 24 (2003) : 493-496.
19. X. Duan and T. Sheppard. "Simulation and control of microstructure evolution during hot extrusion of hard aluminium alloys." **Materials Science and Engineering**. A351 (2003) : 282-292.
20. M. Arentoft, et al. "Physical and mathematical modeling of extrusion processes." **Materials Processing Technology**. 106 (2000) : 2-7.
21. N.H. Kim, C.G. Kang and B.M. Kim. "Die design optimization for axisymmetric hot extrusion of metal matrix composites." **Mechanical Sciences**. 43 (2001) : 1507-1520.
22. G. Lee, et al. "Analysis and design of flat-die hot extrusion process 1. Three-dimensional finite element analysis." **Mechanical Sciences**. 44 (2002) : 915-934.
23. G. Lee and Y. Im. "Analysis and design of flat-die hot extrusion process 2. Numerical design of bearing lengths." **Mechanical Sciences**. 44 (2002) : 935-946.

24. P. Ulysse. "Extrusion die design for flow balance using FE and optimization methods." **Mechanical Sciences**. 44 (2002) : 319-341.
25. C.G. Kang, Y.J. Jung and H.C. Kwon. "Finite element simulation of die design for hot extrusion process of Al/Cu clad composite and its experimental investigation." **Materials Processing Technology**. 124 (2002) : 49-56.
26. S. LaZghab, T. Aukrust and K. Holthe. "Adaptive exponential finite elements for the shear boundary layer in the bearing channel during extrusion." **Comput. Methods Appl. Mech. Engrg**. 191 (2002) : 1113-1128.
27. I. Alfaro, et al. Three-dimensional simulation of Aluminium extrusion by the α -shape based Natural Element Method." **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**. (2005) : 25-30.

ภาคผนวก ก

ผลงานวิจัย เรื่อง

“การศึกษาอิทธิพลของมูมพอกเก้ตของแม่พิมพ์ที่มีต่อความเร็วในกระบวนการอัดรีดลูมิเนียม”

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทยครั้งที่ 13

วันที่ 20-22 ตุลาคม พ.ศ. 2547

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

จังหวัดเชียงใหม่

การศึกษาอิทธิพลของมุมพอกเกิดของแม่พิมพ์ที่มีต่อความเร็วในกระบวนการอัดรีดอลูมิเนียม

อนุพงษ์ พรหมสวรรค์, ศศิธร พิทักษ์ฐานพงษ์, สุรังสี เฉลิมเจริญ

ภาควิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

1518 ถนนพิบูลสงคราม กรุงเทพฯ 10800

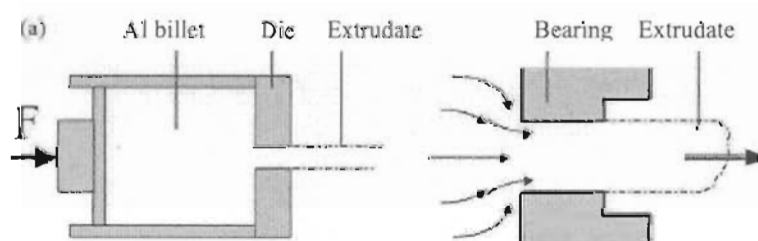
คำหลัก : การอัดรีด, มุมพอกเกิด, อลูมิเนียม, แม่พิมพ์

บทคัดย่อ

การอัดรีด (Extrusion) คือกระบวนการขึ้นรูปชิ้นงาน โดยการนำแท่งวัตถุดิบ (billet) มาอัดรีดผ่านแม่พิมพ์ให้เป็นรูปร่างตามต้องการ ซึ่งการออกแบบแม่พิมพ์นั้นมีความสำคัญเป็นอย่างมากต่อชิ้นงานที่ได้ ส่วนมากการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์ในปัจจุบันยังคงใช้วิธีการลองผิดลองถูก ทำให้เสียค่าใช้จ่ายและเวลา งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการศึกษาอิทธิพลของมุมพอกเกิดที่มีผลต่อความเร็วในกระบวนการอัดรีดอลูมิเนียม 6063 โดยศึกษาด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ ในการทำแบบจำลองการอัดรีดอลูมิเนียมแท่งกลมผ่านแม่พิมพ์เพื่อลดขนาด โดยทำการปรับเปลี่ยนมุมพอกเกิดของแม่พิมพ์ที่ค่าต่าง ๆ กัน แล้ววิเคราะห์ข้อมูลความเร็วในการอัดรีดของแต่ละมุม ผลการวิจัยทำให้ทราบถึงมุมพอกเกิดของแม่พิมพ์ที่มีเวลาในการอัดรีดอลูมิเนียมสำเร็จที่น้อยที่สุด ผลที่ได้นี้จะช่วยลดค่าใช้จ่ายและเวลาในการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์ที่ผลิตกันในปัจจุบันลงได้ พร้อมทั้งเป็นแนวทางในการพัฒนาอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการอัดรีดต่อไป

1. บทนำ

กระบวนการอัดรีดในปัจจุบันแบ่งได้เป็น 2 ประเภทหลัก คือการอัดรีดโดยตรง (direct extrusion) และการอัดรีดโดยอ้อม (indirect extrusion) แต่ประเภทที่ใช้กันมากได้แก่การอัดรีดโดยตรงที่มีทั้งการอัดรีดร้อนและการอัดรีดเย็น [O.O. Onawola 2003, T. Sheppard 1999, P.K. Saha 1998] วัสดุที่ใช้ในการอัดรีดนั้นต้องมีคุณสมบัติที่สำคัญคือ ต้องไม่แข็งจนเกิดการแตกกระจายหรืออ่อนจนไม่สามารถขึ้นรูปได้ ส่วนประกอบในการอัดรีดที่สำคัญคือแม่พิมพ์ที่ใช้ในการเปลี่ยนรูปวัสดุให้เป็นตามที่ต้องการดังแสดงในรูปที่ 1



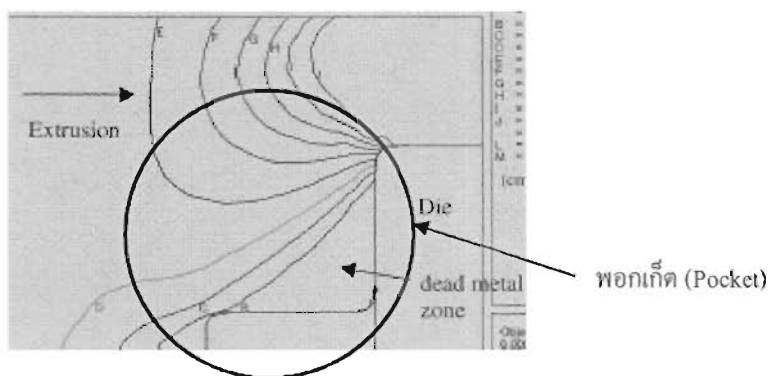
รูปที่ 1 : แสดงกระบวนการอัดรีดแบบโดยตรง [T. Bjork(2001)]

ในการผลิตแม่พิมพ์อัดรีดในภาคอุตสาหกรรมโดยส่วนใหญ่ยังคงจะเป็นการลองผิดลองถูกในการทำแม่พิมพ์ทำให้เสียทั้งเวลากับค่าใช้จ่ายเป็นอันมาก ดังนั้นการศึกษาการออกแบบแม่พิมพ์โดยใช้การคำนวณทางคณิตศาสตร์เข้าช่วยจึงมีความสำคัญ ตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อการเปลี่ยนรูปของวัสดุขณะที่อยู่ในแม่พิมพ์และหลังจากออกจากแม่พิมพ์ได้แก่ อุณหภูมิการขึ้นแท่งวัสดุ แรงที่ใช้อัดรีด รูปทรงของช่องทางออกของแม่พิมพ์ ความเร็วในการอัดรีด และมุมของพอกเกิด (มุมของช่วงที่เกิดการเปลี่ยนรูปวัสดุ) เป็นต้น ตัวแปรต่างๆนี้สามารถนำมาวิเคราะห์ผ่านทางแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดย วิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element method: FEM) [Q. Li 2003, J. Gasioreczyk 2000]

งานวิจัยที่ศึกษาการออกแบบและวิเคราะห์การอัดรีดโดยใช้วิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ทั้งแบบสองมิติ และแบบสามมิติสามารถดูได้จาก [Q. Li 2003, Y.K. Kim 2002, J. Lof 2000, P.K. Saha 1998] โดยงานวิจัยเหล่านี้มีจุดประสงค์เพื่อออกแบบแม่พิมพ์ที่มีประสิทธิภาพในการอัดรีดเพิ่มมากขึ้น ในงานวิจัยที่เสนอมานี้ได้ใช้โปรแกรมคำนวณทางคณิตศาสตร์ศึกษาถึงผลของตัวแปร เช่น ขนาดของพอกเกิด ปริมาณการไหลของโลหะ และมุมการไหล ที่มีผลต่อชิ้นงานที่มาจาก การอัดรีดโลหะ โดยมีเป้าหมายเพื่อพัฒนาการขึ้นรูปชิ้นงานที่ไม่มีความเสียหาย อันจะส่งผลกับต้นทุนการผลิตที่ลดลงได้

2. แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของกระบวนการอัดรีดอลูมิเนียม

การจำลองกระบวนการอัดรีดในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์แบบสามมิติ (ABAQUS) วัสดุที่ใช้คืออลูมิเนียม 6063 ที่มีคุณสมบัติตามที่แสดงไว้ในตารางที่ 1 โดยกำหนดให้บิลเลตทรงกระบอกยาว 30 ซม. เส้นผ่านศูนย์กลาง 20 ซม. ทำการลดขนาดลงเหลือเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 ซม. การจำลองจะเป็นลักษณะสมมาตรหนึ่งในสี่ของการอัดรีดจริงเพื่อช่วยลดเวลาในการคำนวณ ส่วนของแม่พิมพ์กำหนดให้เป็นวัสดุแข็งไม่เคลื่อนที่มีมุมของพอกเกิดเป็นแบบที่ใช้ทั่วไปในอุตสาหกรรมคือแบบมาตรฐานดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 : แสดงลักษณะมุมพอกเกิดของแม่พิมพ์แบบมาตรฐาน (Standard pocket) [Q. Li(2003)]

ความหนาแน่น	2700 kg/m ³
ความยืดหยุ่น	40 Gpa
สัดส่วนของปิวของ	0.35
การขยายตัวเริ่มที่อุณหภูมิอ้างอิง 20 องศาเซลเซียส	1 x 10 ⁻⁵ / °C
ความร้อนจำเพาะ	900 J/kg °C
การนำความร้อนที่ 0 องศาเซลเซียส	198 W/m °C

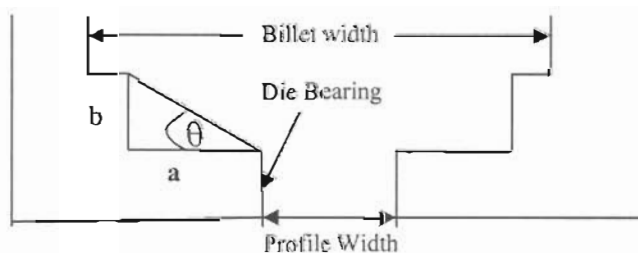
ตารางที่ 1 : คุณสมบัติของอลูมิเนียม 6063 [J. Lof 2000]

คุณสมบัติของอลูมิเนียมกำหนดให้เป็นแบบ elasto-viscoplastic โดย flow stress (σ_f) มีพฤติกรรมตามสมการ

$$\sigma_f(\dot{\gamma}, T) = S_m \sinh^{-1} \left(\left[\frac{(\dot{\gamma} + \Delta\gamma(T)) \exp(Q)}{A} \right]^{1/n} \right) \quad (1)$$

โดยพิจารณาที่ 3 อุณหภูมิคือ 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส ในการจำลองกระบวนการอัดรีดกำหนดให้มีการอุ่นแท่งอลูมิเนียมที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส สัมประสิทธิ์ความเสียหายระหว่างผิวของแม่พิมพ์กับแท่งวัสดุมีค่า 0.15 การอัดรีดกระทำที่ความเร็วคงที่ที่ 2.5 ซม.ต่อวินาที

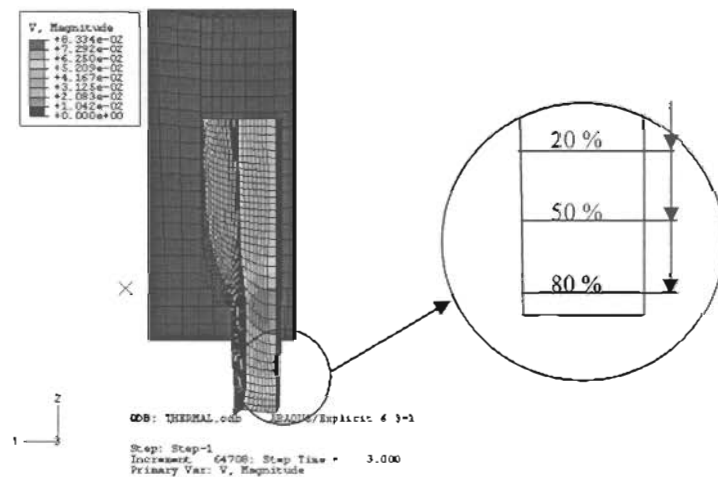
ตัวแปรที่ศึกษาคือ มุมของพอกเกิด (θ) ดังแสดงในรูปที่ 3 โดยกำหนดค่า θ และ b แล้วปรับเปลี่ยนค่า a ให้สัมพันธ์กับ θ แล้ววัดค่าความเร็วของชิ้นงานที่วัดออกจากแม่พิมพ์ที่ระยะต่างๆกันพร้อมทั้งค่าความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นในแท่งวัสดุ



รูปที่ 3 : แสดงส่วนประกอบในการออกแบบแม่พิมพ์ในการทดลอง

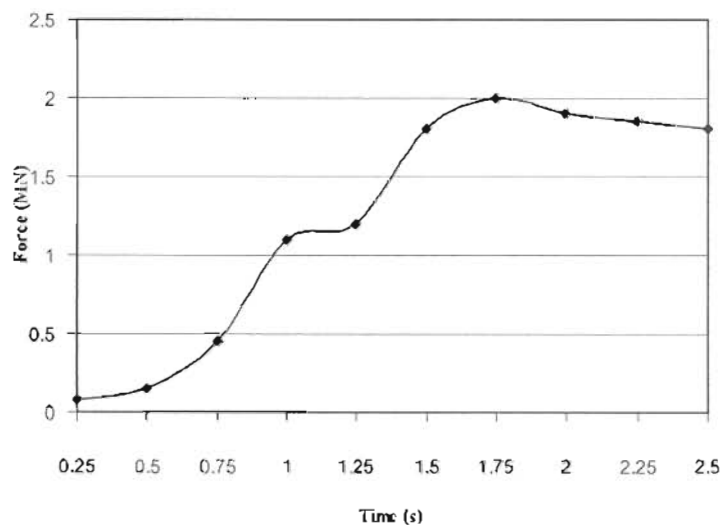
3. ผลการวิเคราะห์จากแบบจำลอง

ค่ามุมของพอกเกิดที่ใช้คือ 20°, 30°, 45°, 60°, 70° และค่า b ที่ใช้คือ 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5 ซม. วัดจาก 3 ตำแหน่งที่ 20%, 50% และ 80% ของระยะทั้งหมดของวัสดุที่ไหลผ่านแม่พิมพ์



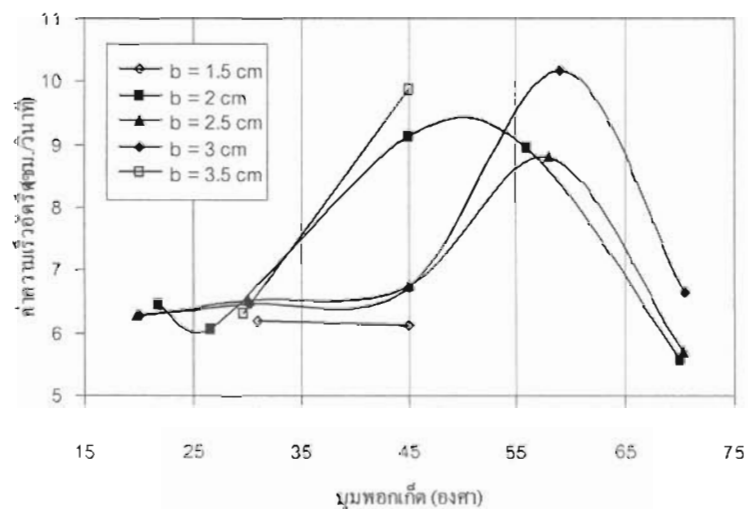
รูปที่ 4 : แสดงจุดวัดผลความเร็วของการอัดรีดหลังจากแม่พิมพ์ที่มุมพอกเกิด 49° $b = 2$ cm โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของจุดที่วัดต่อส่วนที่ใหญ่ผ่านออกจากแม่พิมพ์ทั้งหมด

รูปที่ 4 แสดงค่าความเร็วของการอัดรีดหลังจากแม่พิมพ์และตำแหน่งที่ทำกรวัดความเร็ว เพื่อนำไปพิจารณาว่าชิ้นงานอลูมิเนียมที่ได้เสียหายหรือไม่ นอกจากนี้ค่าแรงที่ใช้ในการอัดรีด โดยวัดได้จากแบบจำลองนั้นได้แสดงไว้ในรูปที่ 5 โดยพบว่าแรงที่ใช้ในการอัดรีดมีลักษณะเพิ่มขึ้นในช่วงแรก จนมีสภาพเสถียรแล้วจึงลดลงในช่วงหลังของการอัดรีด ผลที่ได้นี้สอดคล้องกับผลการวิจัยโดย T. Sheppard (1999).



รูปที่ 5 : แสดงแรงที่ใช้ในแต่ละช่วงของการอัดรีด

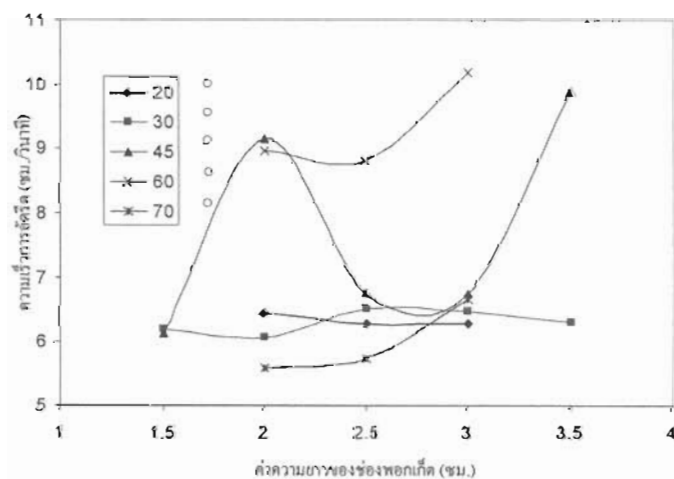
3.1 ความเร็วของการอัดรีดที่มุมพอกเกิดต่างกัน



รูปที่ 6 : แสดงค่าความเร็วของอุทกนิยามที่ออกจากแม่พิมพ์ที่มุมพอกเกิดต่างๆ

ผลการวิเคราะห์ความเร็วอัดรีดที่ได้กับมุมพอกเกิด แสดงได้ในรูปที่ 6 โดยจะเห็นว่าที่ค่า $b = 2, 2.5, 3$ ซม. จะมีค่ามุมพอกเกิดที่ให้ค่าความเร็วที่สูงสุด ในขณะที่ค่า $b = 3.5$ ซม. มีแนวโน้มที่ความเร็วจะสูงขึ้น ส่วน $b = 1.5$ ซม. มีแนวโน้มที่จะลดลงไปเล็กน้อย

3.2 ผลของความยาวของพอกเกิดต่อการอัดรีด

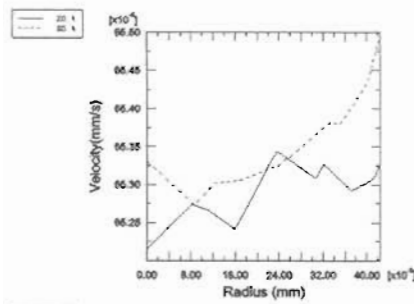


รูปที่ 7 : แสดงค่า b ของพอกเกิดต่อค่าความเร็วของอุทกนิยามที่ออกจากแม่พิมพ์

ผลการวิเคราะห์ความเร็วอัดรีดที่ได้กับค่า b แสดงได้ในรูปที่ 7 โดยจะเห็นว่าที่ค่า $\theta = 45^\circ, 60^\circ$ จะมีค่าความยาวพอกเกิดที่ให้ค่าความเร็วที่สูงขึ้น ในขณะที่ค่า $\theta = 20^\circ, 30^\circ, 70^\circ$ นั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงของค่าความเร็วที่น้อยจนเกือบคงที่

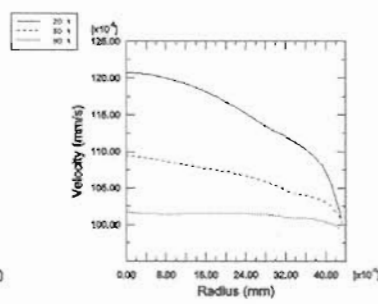
3.3 ความสม่ำเสมอของความเร็วหลังจากอลูมิเนียมออกจากแม่พิมพ์

ในการวิเคราะห์นี้ใช้ค่าของมุมพอกเกิดกับค่า b ของแม่พิมพ์เป็นหลักจึงได้นำค่าทั้ง 2 ตัวมาเปรียบเทียบกับที่ชิ้นงานที่ได้ว่าเกิดการเสียหายหรือไม่ โดยใช้ค่าความเร็วของชิ้นงานหลังจากออกจากแม่พิมพ์ พิจารณาความเร็วที่ระยะต่างๆ คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของระยะทางจากทางออกแม่พิมพ์ 3 จุด ว่าค่าอัตราส่วนความเบี่ยงเบนของความเร็ว (deviation), d โดยให้ค่า d มากกว่าหรือเท่ากับ 0.01 เป็นค่ากลางที่ชิ้นงานเริ่มเสียหาย ถ้า d น้อยกว่า 0.01 จะไม่เกิดความเสียหายกับชิ้นงานดังแสดงในรูปที่ 8(a), 8(b) และ 8(c)



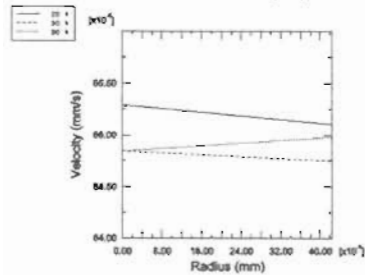
$d = 0$ ($b = 3$ cm, $\theta = 45^\circ$)

(a)



$d = 0.01$ ($b = 2.5$ cm, $\theta = 60^\circ$)

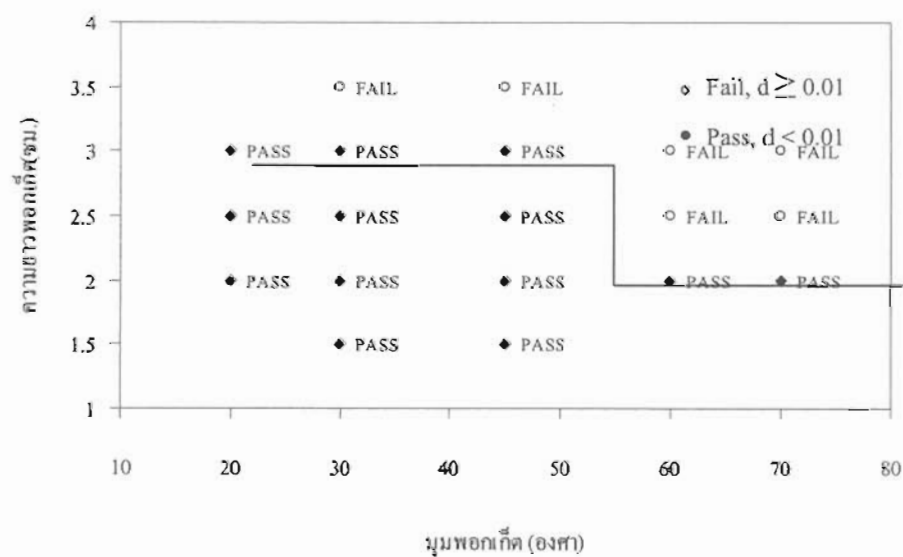
(b)



$d = 0.02$ ($b = 3.5$ cm, $\theta = 30^\circ$)

(c)

รูปที่ 8: แสดงลักษณะของอลูมิเนียมที่ออกจากแม่พิมพ์



รูปที่ 9 : แสดงผลของมุมพอกเกิดและค่า b ที่มีผลต่อชิ้นงานที่ได้จากการอัดรีด

ผลจากรูปที่ 9 ที่มุมพอกเกิดที่ 60° และ 70° และที่ความยาวแม่พิมพ์ 2.5 ซม. ขึ้นไปจะเกิดการเสียหายของชิ้นงานขึ้นมากกว่าลักษณะอื่น ส่วนที่มุมพอกเกิดที่ 30° และ 45° ที่ความยาวแม่พิมพ์ 3.5 ซม. ชิ้นงานเสียหายเช่นกัน ซึ่งสัมพันธ์กับรูปที่ 8(b), $d = 0.01$ และรูปที่ 8(c), $d > 0.01$ ซึ่งชิ้นงานเกิดการเสียรูปทรงบริเวณที่ออกจากแม่พิมพ์ แต่ถ้าค่า $d < 0.01$ ดังรูปที่ 8(a) ชิ้นงานที่ออกจะไม่เกิดการเสียรูป

4. สรุปผลการวิจัย

จากผลการวิจัยทำให้พบความสัมพันธ์ของมุมพอกเกิดแม่พิมพ์กับความเร็วของการอัดรีด และคุณภาพของชิ้นงานดังนี้

1. เมื่อนำผลการอัดรีดในส่วนของแรงที่อัดรีดและความเร็วที่ได้ดังแสดงในรูปที่ 4 และ 5 พบว่าเป็นไปตามหลักการของการอัดรีดคือแรงอูมิเนียมที่ทดลองสามารถที่จะอัดรีดเป็นชิ้นงานที่ต้องการได้
2. ในค่าความยาวแม่พิมพ์หนึ่งนั้นจะให้ความเร็วสูงสุดได้ในช่วงหนึ่ง ซึ่งมักจะอยู่ที่มุมพอกเกิดที่ไม่สูงมากคือไม่เกิน 65° แต่ถ้าให้มุมที่มากกว่านั้นความเร็วที่ได้จะลดลงอันเกิดมาจากความไม่สมดุลกันของมุมพอกเกิดกับความยาวแม่พิมพ์ โดยค่า $b = 3, 3.5$ ซม. จะให้ความเร็วที่สูงกว่าความยาวอื่น
3. ในมุมพอกเกิดที่มากเกินไปหรือความยาวแม่พิมพ์ที่มากเกินไป มีโอกาสที่จะเกิดการเสียหายของชิ้นงานสูงกว่าแบบอื่น

จากผลที่ได้นี้สามารถช่วยในการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดได้คือ การกำหนดค่ามุมพอกเกิดควรกำหนดให้อยู่ในช่วงมุมที่มากกว่า 45° แต่ไม่มากเกินไป 65° และความยาวของแม่พิมพ์นั้นต้องไม่ยาวเกินไป โดยแม่พิมพ์อัดรีดที่เหมาะสมนั้นจะทำให้การอัดรีดกระทำได้เร็วขึ้นพร้อมทั้งชิ้นงานไม่เกิดการเสียหายด้วย

เอกสารอ้างอิง

- J. Gasioreczyk and J. Richert, "Application of FEM Modeling to Simulate Metal Flow Through Porthole Dies", ET 2000, pp.195-201, 2000.
- J.Lof, J. Huetink, K.E. Neilsen and Boal B.V., "FEM Simulations of the Material Flow in the Bearing Area of the Aluminium Extrusion Process", ET 2000, pp.211-222, 2000.
- O.O. Onawola and M.B. Adeyemi, "Warm compression and extrusion test of aluminium", Material Processing Technology, Vol.136, pp.7-11, 2003.
- P.K. Saha, "Factors affecting speed and pressure in 6063 aluminium extrusion", Aluminium Extrusion Technology, pp.39-43, 1998.
- P.K. Saha, "Thermodynamics and tribology in aluminium extrusion", Wear, Vol.218, pp.179-190, 1998.
- Q. Li, C.J. Smith, C. Harris and M.R. Jolly, "Finite element investigations upon the influence of pocket die designs on metal flow in aluminium extrusion Part I. Effect of pocket angle and volume on metal flow", Material Processing Technology, Vol.135, pp.189-196, 2003.

- Q. Li, C.J. Smith, C. Harris and M.R. Jolly, "Finite element investigations upon the influence of pocket die designs on metal flow in aluminium extrusion Part II. Effect of pocket geometry configurations on metal flow", *Material Processing Technology*, Vol.135, pp.197-203, 2003.
- T. Bjork, R. Westergard, S. Hogmark, "Wear of surface treated dies for aluminium extrusion – case study", *WEAR*, Vol. 249, pp.316-323, 2001.
- T. Sheppard, "EXTRUSION OF ALUMINIUM ALLOYS", Kluwer academic publishers, 1999.
- Y.T. Kim, K. Ikeda and T. Murakami, "Metal flow in porthole die extrusion of aluminium", *Material Processing Technology*, Vol.121, pp. 107-115, 2002.

ภาคผนวก ข

ผลงานวิจัย เรื่อง

“การศึกษาอิทธิพลของลักษณะพอกเกิดแม่พิมพ์ต่อความเร็วในกระบวนการอัดรีดลูมิเนียม 6063”

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 19

วันที่ 19-21 ตุลาคม พ.ศ. 2548

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

จังหวัดภูเก็ต

การศึกษาอิทธิพลของลักษณะพอกเกิดแม่พิมพ์ต่อความเร็วในกระบวนการอัดรีด อลูมิเนียม 6063

Study of Effects of Pocket Die Dimension on Velocity in Extrusion of Aluminum 6063

อนุพงศ์ พรหมสวรรค์* สุรังสี เดชเจริญ ศศิธร พิทักษ์ฐานพงษ์
ภาควิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800
*E-mail: kangmpe@yahoo.com

Anupong Promsawan Surangsee Dechjarern Sasithon Pitakthapanaphong
Department of Production Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok,
Bangsue, Bangkok 10800
*E-mail: kangmpe@yahoo.com

บทคัดย่อ

ในกระบวนการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดในอุตสาหกรรมนั้น ส่วนใหญ่ใช้ประสบการณ์ของผู้ออกแบบและการลองผิดลองถูกเป็นหลัก ซึ่งวิธีการนี้มีค่าใช้จ่ายสูงและใช้เวลานานในการผลิตแม่พิมพ์อัดรีดงานวิจัยนี้มุ่งศึกษาอิทธิพลของลักษณะแม่พิมพ์ที่มีต่อการไหลของอลูมิเนียมในการอัดรีด โดยศึกษาจากการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อนำผลการศึกษา ไปปรับใช้เพื่อช่วยแก้ปัญหาและเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตในอุตสาหกรรมได้ ในการศึกษานี้ได้ใช้คุณสมบัติอลูมิเนียม 6063 ในการจำลองการอัดรีด ตัวแปรที่ศึกษาคือ มุมพอกเกิด อัตราส่วนการอัดรีด ความเร็วอัดรีดเข้า และปริมาตรของพอกเกิด โดยศึกษาแม่พิมพ์อัดรีด 2 แบบ ผลที่ได้แสดงว่าอัตราส่วนการอัดรีด และมุมพอกเกิดมีผลต่อความเร็วอัดรีดออก ส่วนความเร็วอัดรีดเข้า และปริมาตรพอกเกิดนั้นจะมีผลต่อความเสียหายที่เกิดขึ้นกับอลูมิเนียมที่ถูกอัดรีด

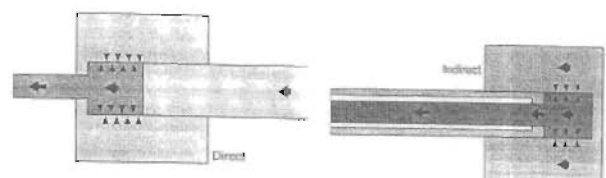
คำหลัก : การอัดรีด พอกเกิด อลูมิเนียม แม่พิมพ์

are pocket angle, extrusion ratio, input velocity and pocket volume. Two different profiles are investigated. It is found that the extrusion ratio and pocket angle has strong influence on metal flow velocity. On the other hand, initial velocity and pocket volume has greater effect on damage of the extrudates.

Key words: Extrusion, Pocket, Aluminium and Die

1. หลักการและเหตุผล

กระบวนการอัดรีดในปัจจุบันแบ่งได้เป็น 2 ประเภทหลัก คือ การอัดรีดโดยตรง (direct extrusion) และการอัดรีดโดยอ้อม (indirect extrusion) ดังแสดงในรูปที่ 1 แต่ประเภทที่ใช้กันมากได้แก่การอัดรีดโดยตรงที่มีทั้งการอัดรีดร้อนและการอัดรีดเย็น [1-3] วัสดุที่ใช้ในการอัดรีดนั้นต้องมีคุณสมบัติที่สำคัญคือ ต้องไม่แข็งจนเกิดการแตกกระจายหรืออ่อนจนไม่สามารถขึ้นรูปได้ ส่วนประกอบในการอัดรีดที่สำคัญคือแม่พิมพ์ที่ใช้ในการเปลี่ยนรูวัสดุให้เป็นตามที่ต้องการ

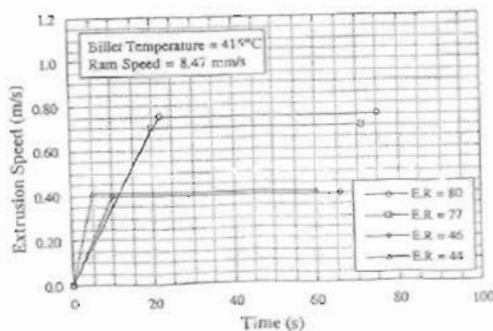


รูปที่ 1 แสดงการอัดรีดแบบโดยตรง และโดยอ้อม [2]

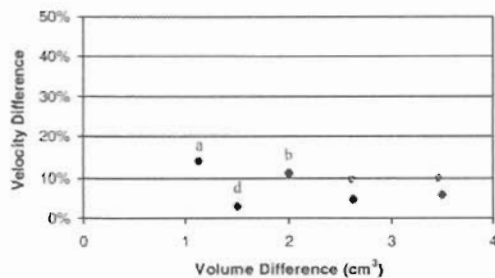
Abstract

The design process of extrusion die in manufacturing is based on designer's experience and using trials and errors. This requires high level of resources including time and expense. This study aims to understand the extrusion process and the effects of pocket design parameters on the extrudate velocity by systematically investigating via finite element analysis. It focuses on the extrusion of aluminium 6063. The parameters examined

ในการผลิตแม่พิมพ์อัดรีดในภาคอุตสาหกรรมโดยส่วนใหญ่ยังคงเป็นการลองผิดลองถูกในการทำแม่พิมพ์ทำให้เสียทั้งเวลาและค่าใช้จ่ายเป็นอันมาก ดังนั้นการศึกษาการออกแบบแม่พิมพ์โดยใช้การคำนวณทางคณิตศาสตร์เข้าช่วยจึงมีความสำคัญ ตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อการเปลี่ยนรูปของวัสดุขณะที่อยู่ในแม่พิมพ์และหลังจากออกจากแม่พิมพ์ได้แก่ อุณหภูมิการขึ้นแท่งวัสดุ แรงที่ใช้อัดรีด รูปทรงของช่องทางออกของแม่พิมพ์ ความเร็วในการอัดรีด และมุมของพอกเกิด (มุมของช่วงที่เกิดการเปลี่ยนรูปวัสดุ) เป็นต้น ตัวแปรต่างๆ เหล่านี้สามารถนำมาวิเคราะห์ผ่านทางแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ โดยวิธีทางไฟไนท์เอลิเมนต์ (Finite element method: FEM) [4-5] ดังรูปที่ 2 และ 3 จะเป็นผลการวิจัยเกี่ยวกับอัตราการอัดรีดกับปริมาตรพอกเกิดที่มีผลต่อความเร็วออก เพื่อใช้เปรียบเทียบกับผลงานวิจัยต่อไป



รูปที่ 2 กราฟผลของความเร็วการอัดรีดที่สัมพันธ์กับความเร็วออก [3]

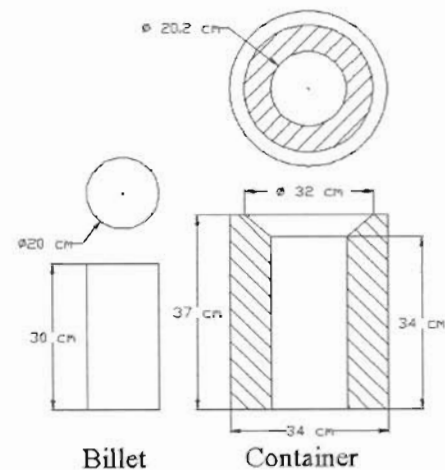


รูปที่ 3 กราฟความสัมพันธ์ของปริมาตรพอกเกิดกับความเร็วที่ออก [5]

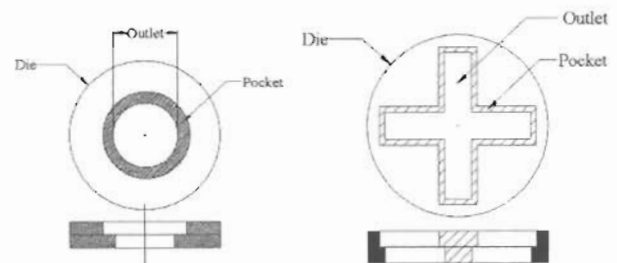
งานวิจัยที่ศึกษาการออกแบบและวิเคราะห์การอัดรีดโดยใช้วิธีทางไฟไนท์เอลิเมนต์ทั้งแบบสองมิติ และแบบสามมิติสามารถดูได้จากผลงานวิจัยที่ [6-9] โดยงานวิจัยเหล่านี้มีจุดประสงค์เพื่อออกแบบแม่พิมพ์ที่มีประสิทธิภาพในการอัดรีดเพิ่มมากขึ้น ในงานวิจัยที่เสนอนานี้ได้ใช้โปรแกรมคำนวณทางคณิตศาสตร์ศึกษาถึงผลของตัวแปร เช่น ขนาดของพอกเกิด ปริมาณการไหลของโลหะ และมุมพอกเกิด ที่มีผลต่อชิ้นงานที่มาจากอัดรีดโลหะ โดยมีเป้าหมายเพื่อพัฒนาการขึ้นรูปชิ้นงานที่ไม่มีความเสียหาย อันจะส่งผลกับต้นทุนการผลิตที่ลดลงได้ และยังสามารถต่อยอดไปสู่การขึ้นรูปชิ้นงานที่มีความซับซ้อนขึ้นได้

2. วิธีการดำเนินการ

การจำลองกระบวนการอัดรีดในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์แบบสามมิติ (ABAQUS version 6.4-1) วัสดุที่ใช้คืออลูมิเนียมชนิด 6063 ที่มีคุณสมบัติตามที่แสดงไว้ในตารางที่ 1 โดยกำหนดให้แท่งอลูมิเนียมทรงกระบอกยาว 30 ซม. เส้นผ่านศูนย์กลาง 20 ซม. ทำการลดขนาดดังรูปที่ 4 การจำลองจะเป็นลักษณะสมมาตรหนึ่งในสี่ของการอัดรีดจริงเพราะแบบจำลองสมมาตรกัน ส่วนของแม่พิมพ์กำหนดให้เป็นวัสดุแข็งเกร็งอยู่นิ่ง มีมุมของพอกเกิดเป็นแบบที่ใช้ทั่วไปในอุตสาหกรรมคือแบบมาตรฐาน (Standard pocket) และใช้ลักษณะของแม่พิมพ์ 2 แบบในการจำลองดังในรูปที่ 5



รูปที่ 4 ลักษณะส่วนประกอบในการอัดรีด



แบบที่ 1
รูปที่ 5 แสดงลักษณะของแม่พิมพ์อัดรีด

ตารางที่ 1 : คุณสมบัติของอลูมิเนียม 6063 [2]

ความหนาแน่น	2700 kg/m ³
โมดูลัสของความยืดหยุ่น	40 GPa
สัดส่วนของปัวซอง	0.35
อัตราการยืดตัว	2.5 X 10 ⁻⁵ / °C
ความร้อนจำเพาะ	900 J/kg °C
การนำความร้อนที่ 0 องศาเซลเซียส	198 W/m °C

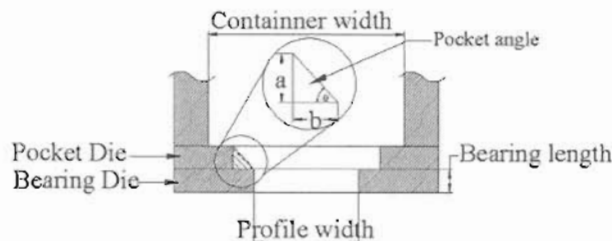
คุณสมบัติของอลูมิเนียมกำหนดให้เป็นแบบ elasto-viscoplastic โดย flow stress (σ_f) มีพฤติกรรมตามสมการที่ 1 โดยมีค่าตัวแปรตามตารางที่ 2 โดยพิจารณาที่ 3 อุณหภูมิคือ 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส ในการจำลองกระบวนการอัดรีดกำหนดให้มีการอุ่นแท่งอลูมิเนียมที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส สัมประสิทธิ์ความเสียหายระหว่างผิวของแม่พิมพ์กับแท่งวัสดุมีค่า 0.15 ระยะการอัดรีดที่ 25 ซม.

ตารางที่ 2 : ค่าตัวแปรที่ใช้ในสมการที่ 1 [8]

parameter	used
elastic properties:	
E (MPa)	40000
$(T = 773 \text{ K})$	
ν	0.35
plastic properties:	
k_0 (1/s)	0.005
s_m (MPa)	25
m	5.4
A (1/s)	$6 \cdot 10^9$
Q (J/mol)	$1.4 \cdot 10^5$
R (J/molK)	8.314

$$\sigma_f(k, T) = s_m \arcsinh \left(\left(\frac{k + k_0(T)}{A} \exp \left(\frac{Q}{RT} \right) \right)^{\frac{1}{m}} \right) \quad (1)$$

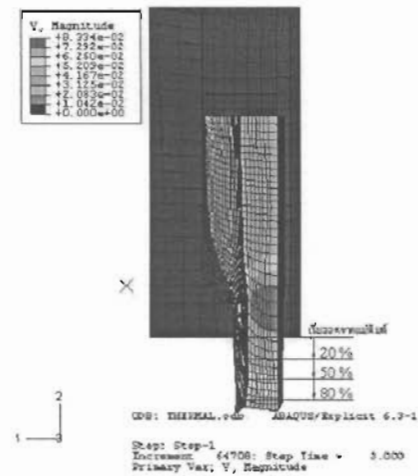
ในการจำลองการอัดรีดได้กำหนดตัวแปรที่ศึกษาดังนี้ แม่พิมพ์แบบที่ 1 ใช้อัตราส่วนการอัดรีด (Extrusion ratio = Billet cross section area / Profile cross section area) ที่ 1.43 1.47 1.49 1.54 และ 1.67 ความเร็วอัดรีดเข้าที่ 0.83 1 และ 2.5 ซม.ต่อวินาที มุมพอกเกิด (Pocket angle(θ) = $\tan^{-1}(a/b)$) ที่ 20 30 40 50 60 และ 70 องศา และปริมาตรพอกเกิดที่ 50 100 150 และ 200 ลบ.ซม. (รูปที่ 6)



รูปที่ 6 ส่วนประกอบของพอกเกิดแม่พิมพ์อัดรีด

หลังจากได้ผลการจำลองในแม่พิมพ์แบบที่ 1 แล้วจึงนำผลที่ได้มาประมวลผลการกำหนดตัวแปรที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ผลความเร็วสูงที่สุดในแม่พิมพ์แบบที่ 2 ได้แก่ อัตราส่วนการอัดรีดที่ 5 และ 6 อัตราส่วนการลดขนาด (Reduction ratio = Pocket cross section area / Profile cross section area) ที่ 1.5 2 และ 3 และมุมพอกเกิดที่ 30 40 50 และ 60 องศา โดยวิธีการวัดผลความเร็วอัดรีดออกจะวัดจากความเร็วที่หน้าตัดของอลูมิเนียม ที่ถูกอัดรีดในระยะหลังออกจากแม่พิมพ์ถึงปลายดังรูปที่ 7 พร้อมทั้งตรวจสอบความเสียหายของชิ้นงานที่อัดรีด จากค่าเบี่ยงเบนของความเร็วอัดรีดออก (Deviation) ดังสมการที่ 2 โดย u คือ ค่าความเร็วแต่ละจุดวัดของอลูมิเนียมที่ถูกอัดรีด และ $\bar{u}$ คือค่าเฉลี่ยของความเร็วอัดรีดทั้งหมด

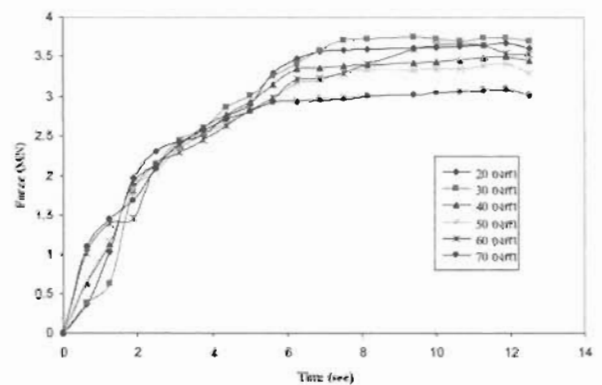
$$d(\text{deviation}) = \sum (u - \bar{u})^2 \quad (2)$$



รูปที่ 7 จุดที่วัดความเร็วอัดรีดออก

3. ผลการศึกษา

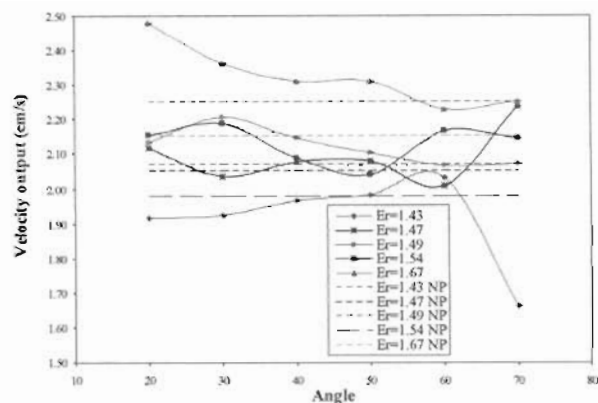
ระยะเวลาในการอัดรีดที่เป็น steady state สามารถดูได้จากกราฟแรงกับระยะเวลาการอัดรีด ดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงในการอัดรีดกับเวลาในการอัดรีดที่มุมพอกเกิดต่างกัน ในแม่พิมพ์แบบที่ 1 (ที่อัตราส่วนการอัดรีดเท่ากับ 1.43 ความเร็วอัดรีดเข้า 1 cm/s ปริมาตรพอกเกิดที่ 100 cm³)

ผลของการจำลองการอัดรีดจะแบ่งตามแบบของแม่พิมพ์เป็น 2 แบบดังต่อไปนี้ แม่พิมพ์แบบที่ 1 แบ่งผลการจำลองตามตัวแปรที่กำหนดดังนี้

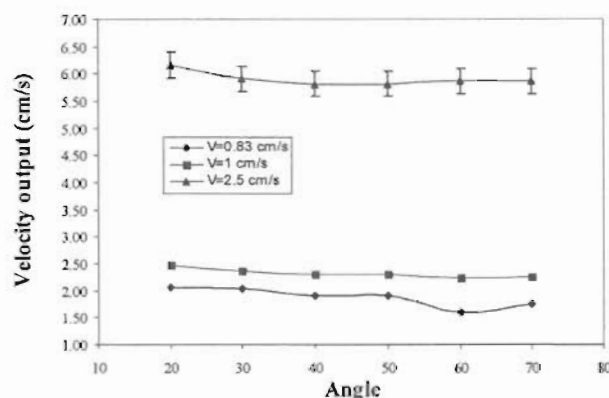
- อัตราส่วนการอัดรีด มีผลต่อความเร็วในแนวทางการแปรผันตรง คือเมื่ออัตราส่วนการอัดรีดเพิ่มขึ้นจะทำให้ความเร็วอัดรีดออกเพิ่มขึ้นตาม ดังรูปที่ 9 ซึ่งผลการวิจัยของ P.K. Saha [3] ในรูปที่ 2 จะให้ผลเหมือนกับผลที่ได้จากแบบจำลองที่ศึกษาอยู่ คือที่อัตราส่วนการอัดรีดมากขึ้นจะได้ความเร็วอัดรีดออกที่เพิ่มขึ้นตาม



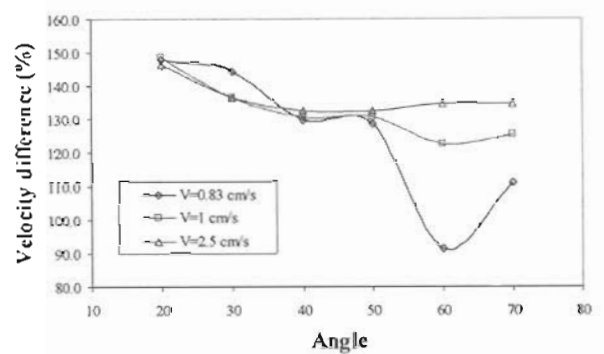
รูปที่ 9 ความเร็วของอลูมิเนียมที่ออกจากแม่พิมพ์อัดรีดกับมุมพอกเกิด ที่อัตราส่วนการอัดรีดต่างกัน (ที่ปริมาตรช่องพอกเกิด 100 cm³ ความเร็วอัดรีดเข้า 1 cm/s)

- มุมพอกเกิด จากรูปที่ 9 มุมพอกเกิดที่ให้ความเร็วอัดรีดออกมากที่สุดคือช่วงมุมพอกเกิดระหว่าง 30-60 องศา และจากผลการวิจัยของ P.K. Saha [3] มุมพอกเกิดที่ใช้เพื่อให้ได้ความเร็วอัดรีดออกที่สูงที่สุดจะอยู่ที่ระหว่าง 60-75 องศา ซึ่งใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการจำลองการอัดรีด

- ความเร็วอัดรีดเข้า มีผลต่อความเร็วออก โดยเมื่อเทียบสัดส่วนแล้วความเร็วอัดรีดเข้าที่ 1 cm/s จะให้ค่าความเร็วอัดรีดออกที่มากที่สุดตามสัดส่วนการเพิ่มตามรูปที่ 10 และ 11 และการเสียหายของชิ้นงานที่ความเร็วอัดรีดเข้าที่ 2.5 cm/s นั้นมีความเสียหายของชิ้นงานมากที่สุดจากเส้นแนวโน้มที่แสดงในรูปที่ 10 ต่างกับอีก 2 ค่าความเร็วที่มีความเสียหายของชิ้นงานน้อยมาก ซึ่งคล้ายกับผลวิจัยของ G. Lee [4] ความเร็วอัดรีดเข้าจะส่งผลต่อความเสียหายชิ้นงาน โดยที่ความเร็วอัดรีดเข้าที่สูงจะทำให้ชิ้นงานเกิดการเสียหายได้ แต่ความเร็วที่เหมาะสมจะไม่ทำให้ชิ้นงานเกิดการเสียหายและยังให้ความเร็วอัดรีดออกที่มากขึ้นด้วย

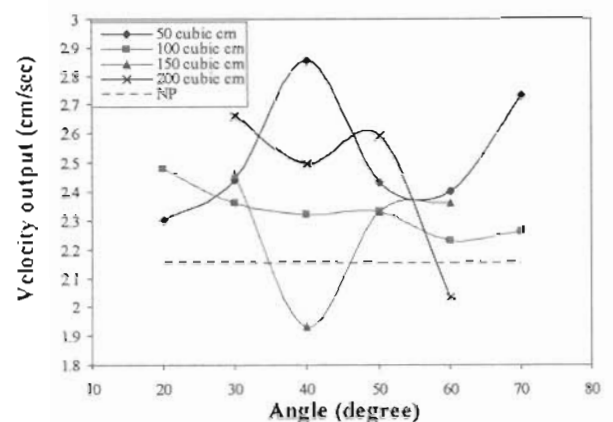


รูปที่ 10 ความเร็วออกกับมุมพอกเกิด ที่ความเร็วการอัดรีดที่ต่างกัน (อัตราส่วนการอัดรีด 1.43 ความเร็วอัดรีดเข้า 1 cm/s ปริมาตรช่องพอกเกิด 100 cm³)

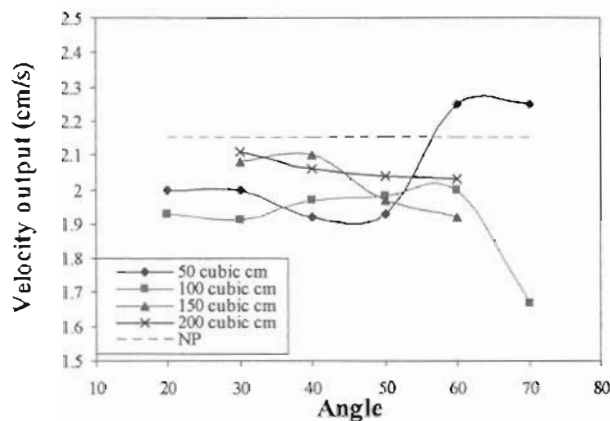


รูปที่ 11 ความเร็วออกกับมุมพอกเกิด ที่ความเร็วการอัดรีดออกที่ต่างกัน (อัตราส่วนการอัดรีด 1.67 ความเร็วอัดรีดเข้า 1 cm/s ปริมาตรช่องพอกเกิด 100 cm³)

- ปริมาตรพอกเกิดของแม่พิมพ์ จากรูปที่ 12 และ 13 แสดงว่าปริมาตรนั้นไม่ได้มีผลต่อความเร็วอัดรีดออก ผลที่ได้คล้ายกับผลการวิจัยของ Q. Li [5] ตามรูปที่ 3 คือปริมาตรพอกเกิดไม่ได้ส่งผลต่อความเร็วอัดรีดออกที่ได้ แต่เมื่อคิดค่าความเบี่ยงเบนความเร็วของปริมาตรพอกเกิดในตัวแปรต่างๆ พบว่าค่าความเบี่ยงเบนมีค่ามากที่สุดที่ปริมาตรพอกเกิด 50 cm³ และจะมีค่าน้อยหรือเกิดการเสียหายของชิ้นงานอัดรีदन้อยที่สุด ที่ปริมาตรส่วนพอกเกิด 100 cm³

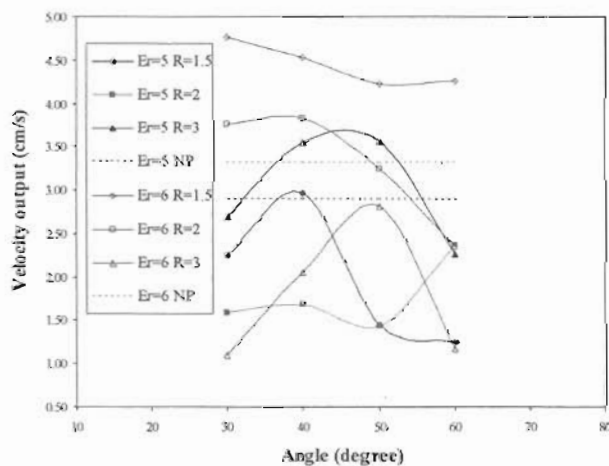


รูปที่ 12 ความเร็วออกของอลูมิเนียมกับมุมพอกเกิด โดยสังเกตปริมาตรช่องพอกเกิดที่ต่างกัน (อัตราส่วนการอัดรีด 1.43 ความเร็วอัดรีดเข้า 1 cm/s)



รูปที่ 13 ความเร็วออกของอลูมิเนียมกับมุมพอกเกิด โดยสังเกต ปริมาตรของพอกเกิดที่ต่างกัน (ที่อัตราส่วนการอัดรีด 1.67 ความเร็วอัดรีดเข้า 1 cm/s)

หลังจากได้ผลของแบบที่ 1 แล้วทำการเปลี่ยนลักษณะแม่พิมพ์ เป็นแบบที่ 2 ได้ผลดังนี้

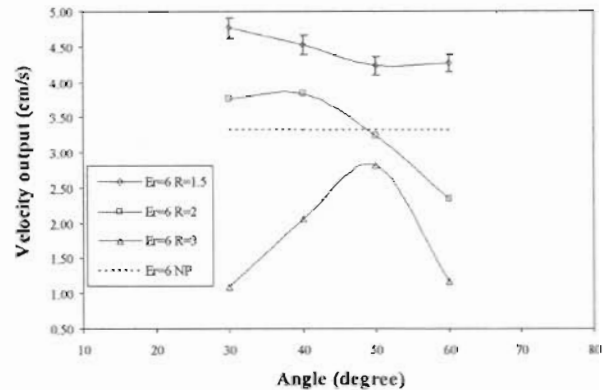


รูปที่ 14 ผลของตัวแปรต่างๆในแม่พิมพ์แบบที่ 2

- มุมพอกเกิด จากความเร็วที่ปรากฏในรูปที่ 14 จุดที่มีความเร็วมากที่สุดในแต่ละตัวแปรจะอยู่ที่ระหว่างมุม 40-50 องศา แสดงว่ามุมพอกเกิดที่ทำให้ความเร็วอัดรีดออกมีค่ามากที่สุด จะอยู่ในช่วงมุมพอกเกิดที่ 40-50 องศา

- อัตราส่วนการอัดรีด ในส่วนผลของตัวแปรนี้จากรูปที่ 14 จะมีลักษณะคล้ายกับของแม่พิมพ์แบบที่ 1 คืออัตราส่วนการอัดรีดจะแปรผันตรงกับความเร็วอัดรีดออก

- อัตราส่วนการลดขนาด จากผลในรูปที่ 15 ของอัตราส่วนการลดขนาดที่น้อยนั้นจะทำให้เกิดค่าความเบี่ยงเบนของความเร็วที่มากคือมีโอกาสนิ่งงานจะเสียหายมากกว่าอัตราส่วนการลดขนาดที่มีค่ามาก



รูปที่ 15 ผลการศึกษาเทียบกับ อัตราส่วนการอัดรีด และอัตราส่วนการลดขนาด ในมุมพอกเกิดที่กำหนด (ความเร็วการอัดรีดเข้าที่ 1 cm/s อัตราการอัดรีดที่ 6)

4. สรุปผลการวิจัย

ในการจำลองการอัดรีดในแม่พิมพ์ทั้งสองแบบที่ได้แสดงพบว่า

1. ในแม่พิมพ์แบบที่ 1 เมื่อสังเกตพบว่าสามารถแยกตัวแปรเป็น 2 ชนิดตามผลที่ได้จากตัวแปรคือตัวแปรที่มีผลต่อความเร็วได้แก่ อัตราส่วนการอัดรีด และ มุมพอกเกิด ส่วนตัวแปรที่มีผลต่อความเสียหายของอลูมิเนียมที่อัดรีดได้แก่ ความเร็วอัดรีดเข้า และ ปริมาตรส่วนพอกเกิดของแม่พิมพ์

2. เมื่อนำผลที่ได้มากำหนดตัวแปรในแม่พิมพ์แบบที่ 2 ทำให้สามารถกำหนดตัวแปรที่มีให้ความเร็วอัดรีดออกมากที่สุด คือมุมพอกเกิดที่ 40-50 องศา และอัตราส่วนการอัดรีดที่ 6 ส่วนตัวแปรที่ทำให้ความเสียหายเกิดขึ้นน้อยหรือไม่เกิดคือความเร็วอัดรีดเข้าที่ 1 cm/s และหลีกเลี่ยงการใช้อัตราส่วนการลดขนาด หรือปริมาตรส่วนของพอกเกิดที่ 1.5

จากการจำลองทั้งสองแบบ ทำให้สามารถกำหนดตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบได้ 3 ตัวแปรได้แก่ ความเร็วอัดรีดเข้าที่ประมาณ 1 cm/s, มุมพอกเกิดประมาณ 40-50 องศา และหลีกเลี่ยงการใช้อัตราส่วนการลดขนาดที่น้อย แต่อัตราส่วนการอัดรีดนั้นจะถูกกำหนดโดยแบบที่จะใช้อัดรีดอลูมิเนียมแล้ว จึงไม่สามารถที่จะออกแบบได้เองแต่ก็ควรที่จะมีค่ามากไว้

ข้อมูลเบื้องต้นที่ได้จากงานวิจัยนี้ สามารถนำไปปรับใช้กับงานอัดรีดจริง หรือนำไปปรับใช้ในแบบที่มีความซับซ้อนมากขึ้นได้ เพื่อก่อให้เกิดประโยชน์กับอุตสาหกรรมอัดรีดต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจาก ทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อทำวิทยานิพนธ์ สำหรับนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

เอกสารอ้างอิง

- [1] O.O. Onawola and M.B. Adeyemi, "Warm compression and extrusion test of aluminium", *Material Processing Technology*, Vol.136, pp.7-11, 2003.
- [2] T. Sheppard, "EXTRUSION OF ALUMINIUM ALLOYS", Kluwer academic publishers, 1999.
- [3] P.K. Saha, "Factors affecting speed and pressure in 6063 aluminium extrusion", *Aluminium Extrusion Technology*, pp.39-43, 1998.
- [4] J. Gasiotczyk and J. Richert, "Application of FEM Modeling to Simulate Metal Flow Through Porthole Dies", *ET* 2000, pp.195-201, 2000.
- [5] Q. Li, C.J. Smith, C. Harris and M.R. Jolly, "Finite element investigations upon the influence of pocket die designs on metal flow in aluminium extrusion Part I. Effect of pocket angle and volume on metal flow", *Material Processing Technology*, Vol.135, pp.189-196, 2003.
- [6] Q. Li, C.J. Smith, C. Harris and M.R. Jolly, "Finite element investigations upon the influence of pocket die designs on metal flow in aluminium extrusion Part II. Effect of pocket geometry configurations on metal flow", *Material Processing Technology*, Vol.135, pp.197-203, 2003.
- [7] G. Lee, D. Kwak, S. Kim and Y.Im, "Analysis and design of flat-die hot extrusion process", *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol.44, pp. 915-934, 2002.
- [8] J.Lof, J. Huetink, K.E. Neilsen and Boal B.V., "FEM Simulations of the Material Flow in the Bearing Area of the Aluminium Extrusion Process", *ET* 2000, pp.211-222, 2000.
- [9] P.K. Saha, "Thermodynamics and tribology in aluminium extrusion", *Wear*, Vol.218, pp.179-190, 1998.

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ : ว่าที่ร้อยตรี อนุพงศ์ พรหมสวรรค์
 ชื่อวิทยานิพนธ์ : การวิเคราะห์กระบวนการอัดรีดอลูมิเนียมโดยใช้วิธีไฟต์ไนต์เอลิเมนต์
 สาขาวิชา : วิศวกรรมการผลิต

ประวัติ

ประวัติส่วนตัว เกิดวันที่ 6 กันยายน พ.ศ. 2524 ปัจจุบันอาศัยอยู่ที่บ้านเลขที่ 74 ถนนราชวิถี แขวงดุสิต เขตดุสิต กรุงเทพมหานคร

ประวัติการศึกษา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปี พ.ศ. 2544

ประวัติการทำงาน ปี พ.ศ. 2546 - 2548 ทำงานที่บริษัท เอสทีพีแอนด์ไอ มหาชน จำกัด ในตำแหน่งวิศวกร แผนกวิศวกรรมและซ่อมบำรุง ต่อมา ในปี พ.ศ. 2549 - ปัจจุบัน ทำงานที่บริษัทเม็กเทค แมนูแฟคเจอร์ริง คอร์ปอเรชั่น (ประเทศไทย) จำกัด ในตำแหน่งวิศวกรการผลิต