

การจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของสารหล่อลื่นโดยการอัดขึ้นรูปเย็นแบบไปหลตาม
ของอลูมิเนียม

FINITE ELEMENT SIMULATION OF LUBRICANTS OF
ALUMINUM BY COLD FORWARD EXTRUTION

สันติ เขียววิจิตร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของสารหล่อลื่นโดยการอัปเดตขึ้นรูปเป็นแบบไหล
ตามของออสุมิเนียม



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2558
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของสารหล่อลื่น โดยการอัดขึ้นรูปเย็น
แบบไหลตามของอลูมิเนียม
Finite Element Simulation of Lubrications of Aluminum by
Cold Forward Extrusion
ชื่อ - นามสกุล นายสันติ เขียววิจิตร
สาขาวิชา วิศวกรรมการผลิต
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิริชัย ต่อสกุล, Dr-Ing.
ปีการศึกษา 2558

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชัชยะ ปราณิตพลกรัง, D.Eng.)



กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิฑูร อุทัยแสงสุข, Dr-Ing.)



กรรมการ

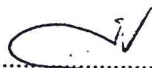
(อาจารย์กุลชาติ กุลเพ็ญ, D.Eng.)



กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิริชัย ต่อสกุล, Dr-Ing.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท



คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวกร อ่างทอง, Ph.D.)

วันที่ 12 เดือน กรกฎาคม พ.ศ. 2559

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของสารหล่อลื่น โดยการอัดขึ้นรูปเย็นแบบไหลตามของอลูมิเนียม
ชื่อ – นามสกุล	นายสันติ เขียววิจิตร
สาขาวิชา	วิศวกรรมการผลิต
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิริชัย ต่อสกุล, Dr.-Ing.
ปีการศึกษา	2558

บทคัดย่อ

กระบวนการอัดขึ้นรูปเย็นแบบไหลตาม เป็นเทคนิคการขึ้นรูปที่นิยมใช้กับวัสดุหลายชนิด เช่น อลูมิเนียม, ตะกั่ว, ทองแดง และเหล็ก เป็นต้น การออกแบบแม่พิมพ์ สารหล่อลื่น ความเร็วในการขึ้นรูป และวัสดุ คือตัวแปรที่สำคัญที่มีผลต่อชิ้นงานที่ได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสารหล่อลื่นซึ่งถือเป็นตัวแปรที่มีอิทธิพลอย่างมากต่อคุณภาพของชิ้นงาน การนำวิธีการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ มาช่วยในการวิเคราะห์ในกระบวนการขึ้นรูปโลหะสามารถช่วยในการออกแบบแม่พิมพ์ได้อย่างถูกต้อง

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์อิทธิพลของสารหล่อลื่นที่มีต่อชิ้นงานอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูปแบบไหลตามโดยการ จำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ อลูมิเนียมเกรดที่ใช้ศึกษาได้แก่ เกรด 1100, 2011 และ 6063 โดยเบื้องต้นได้ทำการทดลองแหวนอัด เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของการขึ้นรูปภายใต้สภาวะสารหล่อลื่น 3 ชนิด คือ น้ำมันแร่, น้ำมันมะพร้าว และ น้ำมันถั่วเหลือง รวมทั้งสภาวะไม่ใช้สารหล่อลื่น ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่หาได้ถูกนำไปใช้ในการ จำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของการอัดขึ้นรูปแบบไหลตาม และวิเคราะห์ผลของ แรงอัดขึ้นรูป ลักษณะการไหลตัวของวัสดุ และการกระจายตัวของความเค้น โดยนำผลการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์มาเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง

จากผลการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าชนิดของสารหล่อลื่นและมุมตาย (Die angle) มีผลอย่างมากต่อแรงที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปเย็น สารหล่อลื่นที่ส่งผลให้ใช้แรงอัดขึ้นรูปน้อยที่สุดเรียงตามลำดับ คือ น้ำมันแร่ น้ำมันมะพร้าว และ น้ำมันถั่วเหลือง ส่วนมุมตายที่ทำให้เกิดแรงอัดขึ้นรูปน้อยที่สุดเรียงตามลำดับ คือ มุมตายที่ 20 องศา 25 องศา และ 30 องศา ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับผลทดลองชิ้นงาน นอกจากนี้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของสารหล่อลื่นยังมีอิทธิพลต่อค่าความหยาบผิว ของชิ้นงาน

คำสำคัญ: การจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน สารหล่อลื่น การอัดขึ้นรูปเย็นแบบไหลตาม

Thesis Title	Finite Element Simulation of Lubrications of Aluminum by Cold Forward Extrusion
Name - Surname	Mr. Santi Khiewwijit
Program	Manufacturing Engineering
Thesis Advisor	Assistant Professor Sirichai Torsakul, Dr.-Ing.
Academic Year	2015

ABSTRACT

A direct cold extrusion process is a favorable method of extrusion technic used by different kind of materials such as aluminum, lead, copper, and iron. Die design, lubricant, forming speed, and materials are the main variables affecting finished work, especially the lubricant which has the most influence on the quality of finished work. The Finite Element simulation used in analyzing metal extrusion can correctly aid in the design of the die.

The purpose of this research is to study the influence of lubricants on finished work done by direct cold extrusion of aluminum based on Finite Element simulation. The grades of aluminum used in the analysis are 1100, 2011, and 6063. Initially, the test was done by the compression ring test in order to find friction coefficient of the extrusion process by 3 kinds of lubricants: coconut oil, soybean oil, and mineral oil as well as non-lubricant extrusion process. The friction coefficient found during the test will be used in the Finite Element simulation for the direct cold extrusion process. The simulation will also analyze extrusion force, material flow behavior, and stress distribution. The result of Finite Element simulation will be compared with the real experiment.

The Finite Element simulation found that types of lubricants and die angles have the most influential effect on the direct cold extrusion. Lubricants showing the least extrusion force are mineral oil, coconut oil, and soybean oil accordingly. The die angles giving the least extrusion force are 20°, 25°, and 30° accordingly which conform to the experimental result. Additionally, the friction coefficient of lubricant effects surface roughness of finished work.

Keywords: Finite Element simulation, friction coefficient, lubricant, direct cold extrusion

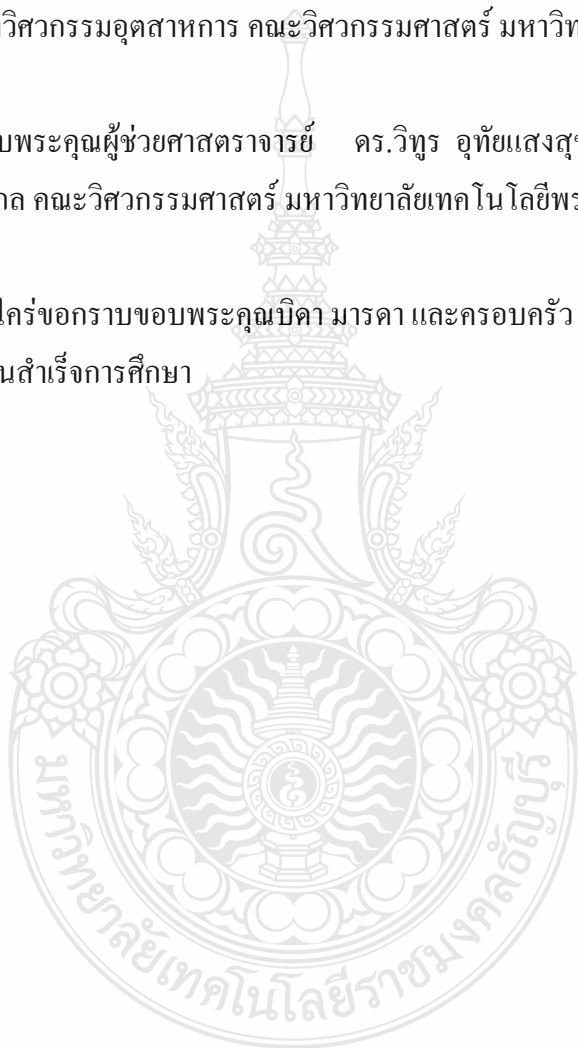
กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำวิทยานิพนธ์เรื่อง การจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของสารหล่อลื่น โดยการอัปเดตขึ้นรูปแบบไหลตามของอูมิเนียน สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีจาก คณาจารย์ทั้งหลายที่คอยประสิทธิ์ประสาทวิชา และชี้แนะแนวทาง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริชัย ต่อสกุล อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์หลัก ตลอดจน ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัยยะ ประณีตพลกรัง และ ดร. กุลชาติ จุลเพ็ญ กรรมการอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

กระผมขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิฑูร อุทัยแสงสุข อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ให้คำแนะนำด้านงานวิจัย

ทำยนี้กระผมใคร่ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ซึ่งสนับสนุนและเป็นกำลังใจให้กระผมมาจนสำเร็จการศึกษา

สันติ เขียววิจิตร



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ	(5)
สารบัญ	(6)
สารบัญตาราง	(8)
สารบัญรูป	(9)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	13
บทที่ 1 บทนำ	14
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	14
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	15
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	15
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	16
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	18
2.1 กระบวนการอัดขึ้นรูปโลหะ	18
2.2 แรงอัดขึ้นรูปโลหะ (Extrusion Force).....	19
2.3 การไหลตัวของโลหะในการอัดขึ้นรูปโลหะ.....	21
2.4 อลูมิเนียมและโลหะผสมของอลูมิเนียม.....	22
2.5 สารหล่อลื่น	25
2.6 วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	28
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	33
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย	37
3.1 แผนการดำเนินงาน	38
3.2 วิธีดำเนินงานและวางแผน	38
3.3 วัสดุที่นำมาใช้ขึ้นรูปทดสอบกระบวนการแหวนอัด.....	39
3.4 เครื่องมือและวัสดุอุปกรณ์	40

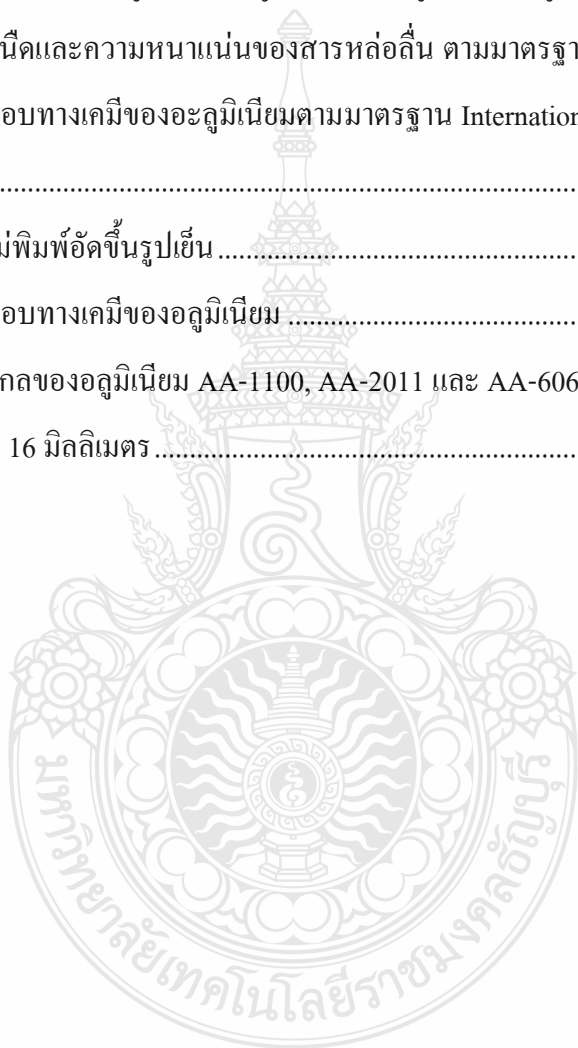
สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.5	ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	47
3.6	ขั้นตอนก่อนการประมวลผล (Pre – processing)	60
บทที่ 4	ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผล	65
4.1	การเปรียบเทียบแรงในการอัดขึ้นรูป	66
4.2	ความสัมพันธ์ของตัวแปรความเสียดทาน	73
4.3	ลักษณะการกระจายตัวของความเค้น.....	75
4.4	การกระจายตัวของความเค้นแบบ Stress Effective	78
บทที่ 5	สรุปผลและข้อเสนอแนะ	81
5.1	สรุปผลการทดลอง	82
5.2	ข้อเสนอแนะ.....	82
บรรณานุกรม	83
ภาคผนวก	85
ภาคผนวก ก	ผลค่าแรงสูงสุดที่ใช้ในการขึ้นรูป	86
ภาคผนวก ข	ลักษณะการกระจายตัวของความเค้น	94
ภาคผนวก ค	ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่.....	110
ประวัติผู้เขียน	123

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 สัญลักษณ์ที่ใช้แทนอลูมิเนียมขึ้นรูปเย็น และ อลูมิเนียมขึ้นรูปเย็นผสม	23
ตารางที่ 2.2 ค่าความเหน็ดและความหนาแน่นของสารหล่อลื่น ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ (มอก.) ...	27
ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมีของอะลูมิเนียมตามมาตรฐาน International Standard Organization (ISO).....	39
ตารางที่ 3.2 ชิ้นส่วนแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปเย็น	49
ตารางที่ 3.3 องค์ประกอบทางเคมีของอลูมิเนียม	58
ตารางที่ 3.4 สมบัติเชิงกลของอลูมิเนียม AA-1100, AA-2011 และ AA-6063 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร	59



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 กรรมวิธีการอัดแบบไหลตาม	18
รูปที่ 2.2 การอัดขึ้นรูป	19
รูปที่ 2.3 ข้อบกพร่องในการอัดขึ้นรูป (Extrusion Defects)	21
รูปที่ 2.4 การแบ่งย่อยหน้าตัดของ hemispherical ออกเป็นเอลิเมนต์ผนังบาง (Shell Elements).....	29
รูปที่ 2.5 Mesh สำหรับออกแบบเครื่องบินเพื่อใช้ทดสอบไดนามิก	29
รูปที่ 2.6 ไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับ 1 มิติ.....	29
รูปที่ 2.7 แสดงลักษณะของการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ 1 มิติ	30
รูปที่ 2.8 แสดงลักษณะของการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ 2 มิติ	30
รูปที่ 2.9 แสดงลักษณะ ของการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติ	31
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวางแผน และเตรียมการ	38
รูปที่ 3.2 เครื่องปั๊มโลหะขนาด 80 ตัน ของภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ	40
รูปที่ 3.3 แม่พิมพ์อัดขึ้นรูปอลูมิเนียม	41
รูปที่ 3.4 แม่พิมพ์แหวนอัดขณะติดตั้งบนเครื่อง ปั๊ม โลหะ	41
รูปที่ 3.5 รูปแสดงส่วนประกอบของแม่พิมพ์แหวนอัด	42
รูปที่ 3.6 แบบขนาดชิ้นงาน ที่ใช้ในการทดสอบ Ring compression test	42
รูปที่ 3.7 รูปแสดงชิ้นงานหลังทดสอบ Ring compression test	43
รูปที่ 3.8 รูปแสดงกราฟ Friction factor calibration curve	45
รูปที่ 3.9 สารหล่อลื่นที่ใช้ในการทดสอบ	46
รูปที่ 3.10 อะลูมิเนียมที่ใช้ในการผลิต	47
รูปที่ 3.11 ชิ้นงานหลังจากการอัดขึ้นรูป	47

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.12 ชิ้นงานที่เลื่อยเสร็จแล้ว	48
รูปที่ 3.13 ชิ้นงานทดสอบ	48
รูปที่ 3.14 ส่วนประกอบของแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปเย็นอลูมิเนียม	50
รูปที่ 3.15 ดายของแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปเย็น	50
รูปที่ 3.16 Ejector	51
รูปที่ 3.17 แม่พิมพ์ชุดแม่พิมพ์ล่าง	51
รูปที่ 3.18 แม่พิมพ์ชุดแม่พิมพ์บน	52
รูปที่ 3.19 การติดตั้งแม่พิมพ์บนเครื่องปั๊ม	52
รูปที่ 3.20 การปรับตั้ง (Limit switch) เครื่องปั๊ม	53
รูปที่ 3.21 แม่พิมพ์พร้อมใช้งาน	53
รูปที่ 3.22 อุปกรณ์วัดแรงดันน้ำมัน และอุปกรณ์จับเก็บสัญญาณ	55
รูปที่ 3.23 เครื่องวัดค่าความแข็ง ยี่ห้อ MATSUZAWA รุ่น MXT70	56
รูปที่ 3.24 จุดในการวัดความแข็ง	56
รูปที่ 3.25 ชิ้นงานที่ทำการทดสอบหาส่วนผสมทางเคมี	57
รูปที่ 3.26 ชิ้นงานที่เตรียมเพื่อทำการทดสอบแรงดึง	57
รูปที่ 3.27 แผนรูป ความเค้น-ความเครียดทางวิศวกรรม ของอลูมิเนียม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง กลาง 16 มิลลิเมตร	59
รูปที่ 3.28 รูปแสดงการแบ่งเป็นอิลิเมนต์ขนาด 1.0 มม.	60
รูปที่ 3.29 เครื่องมือขึ้น (Top die)	61
รูปที่ 3.30 เครื่องมือคาย (Bottom die)	62
รูปที่ 3.31 รูปแสดงการเครื่องมือก่อนการเริ่มวิเคราะห์	62
รูปที่ 3.32 รูปแสดงการใส่ค่าพารามิเตอร์ก่อนการวิเคราะห์	63
รูปที่ 3.33 รูปแสดงการเริ่มกระบวนการวิเคราะห์	64

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.34	รูปแสดงผลการผลการวิเคราะห์.....	64
รูปที่ 4.1	รูปแสดงกราฟตำแหน่งของแรงอัดสูงสุด ที่ใช้ในการอัดขึ้นรูป.....	65
รูปที่ 4.2	เปรียบเทียบแรงขึ้นรูปจริงกับการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ในการใช้สารหล่อลื่นแต่ละชนิด ที่มุมตาย 20°, 25° และ 30° ของอะลูมิเนียม AL 1100.....	66
รูปที่ 4.3	เปรียบเทียบแรงขึ้นรูปจริงกับการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ในการใช้สารหล่อลื่นแต่ละชนิด ที่มุมตาย 20°, 25° และ 30° ของอะลูมิเนียม AL 2011.....	68
รูปที่ 4.4	เปรียบเทียบแรงขึ้นรูปจริงกับการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ในการใช้สารหล่อลื่นแต่ละชนิด ที่มุมตาย 20°, 25° และ 30° ของอะลูมิเนียม AL 6063.....	70
รูปที่ 4.5	เปรียบเทียบแรงขึ้นรูปจริงกับการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ในการใช้สารหล่อลื่นแต่ละชนิด ที่มุมตาย 20°, 25° และ 30° ของอะลูมิเนียม AL 1100, AL2011, AL6063 ...	72
รูปที่ 4.6	กราฟแสดงค่าความสัมพันธ์ของค่าตัวแปรความเสียดทานและสารหล่อลื่น น้ำมันแร่ น้ำมันมะพร้าว น้ำมันถั่วเหลือง และไม่ใช้สารหล่อลื่น ของอะลูมิเนียม AL 1100, AL2011, AL6063.....	73
รูปที่ 4.7	กราฟแสดงค่าความสัมพันธ์ของค่าความหยาบ (RZ) และสารหล่อลื่น น้ำมันแร่ น้ำมันมะพร้าว น้ำมันถั่วเหลือง และไม่ใช้สารหล่อลื่น ในวัสดุ อะลูมิเนียม AL 1100, AL2011, AL6063.....	74
รูปที่ 4.9	รูปแสดง ตำแหน่งของค่า ความเค้นที่เกิดขึ้น โดยทำการระบุตำแหน่ง 20 จุด ซึ่งระบุความแตกต่างของความเค้นโดยสี	75
รูปที่ 4.10	ลักษณะการกระจายตัวของความเค้นจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ในการใช้สารหล่อลื่นน้ำมันแร่ ที่มุมตาย 20 องศา ของอะลูมิเนียม AL 1100.....	76
รูปที่ 4.11	ลักษณะการกระจายตัวของความเค้นจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ในการใช้สารหล่อลื่นน้ำมันแร่ , น้ำมันมะพร้าว, น้ำมันถั่วเหลือง และไม่ใช้สารหล่อลื่น ของอะลูมิเนียม AL 1100	77
รูปที่ 4.12	แสดงการกระจายความเค้นแบบ Stress effective ในการอัดขึ้นรูปอะลูมิเนียมที่มุมตาย....	78

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.13 แสดงการกระจายความเค้นแบบ Stress effective ในการอัดขึ้นรูปอลูมิเนียมที่มุมตาย 20°, 25°, 30°	79
รูปที่ 4.14 แสดงการกระจายความเค้นแบบ Stress effective ในการอัดขึ้นรูปอลูมิเนียมของวัสดุ AL1100, AL 2011, AL6063	80



คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

AISI	มาตรฐานเหล็กอเมริกัน AISI (The American Iron and Steel Institute)
ASTM	สมาคมวิชาชีพทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (American Society For Testing and Material)
Rz	ความหยาบผิวขนาดโดยเฉลี่ย (Roughness Ten-Point mean: Rz)
MPa	แรงกด
mm	มิลลิเมตร
HV	หน่วยความแข็ง (Micro Hardness Viker)
N	แรง (นิวตัน)



บทที่ 1

บทนำ

การขึ้นรูปโลหะทางวิศวกรรมแบ่งกลุ่มใหญ่ได้ 2 กลุ่มใหญ่คือ การขึ้นรูปร้อน (Hot working) และ การขึ้นรูปเย็น (Cold working) โดยมีกระบวนการขึ้นรูปย่อยได้หลายกระบวนการ เช่น การตีขึ้นรูป, การรีดร้อนและเย็น, การดึง การกดขึ้นรูป, การหมุนขึ้นรูป, การอัดขึ้นรูป, การแทงขึ้นรูป, การตัดงอ เป็นต้น ซึ่งกระบวนการดังกล่าว สามารถนำไปใช้ผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้ซึ่งการขึ้นรูป ทั้งสองแบบ มี ข้อดี และ ข้อเสีย ต่างกัน ดังนั้นผู้ผลิตจึงมีความจำเป็น ต้องศึกษา กระบวนการ ให้เหมาะสม กับผลิตภัณฑ์ที่จะผลิตขึ้น

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ

กระบวนการการอัดขึ้นรูปเย็นแบบไหลตาม (Cold forward extrusion) เป็นกระบวนการที่สามารถขึ้นรูปวัสดุได้หลายชนิด เช่น อลูมิเนียม, ตะกั่ว, ทองแดง, ไทเทเนียม, เบริลเลียม, วานาเดียม, ไนโอเบียม และเหล็ก เป็นต้น มาทำผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น ชิ้นส่วนยานยนต์ อากาศยาน เครื่องใช้ในครัวเรือน เครื่องใช้ในชีวิตประจำวัน และอื่นๆอีกมากมาย ในส่วนของแม่พิมพ์ ที่ใช้ในกระบวนการอัดขึ้นรูปเย็นแบบไหลตาม เพื่อนำไปผลิตเป็น ผลิตภัณฑ์ต่างๆ นั้น แม่พิมพ์ต้องถูกออกแบบ ให้มีความถูกต้องและแม่นยำในเชิงวิศวกรรม และการจัดการต้นทุนการผลิตที่ไม่สูงมาก มีจุดคุ้มทุนที่เร็ว ในส่วนของผลิตภัณฑ์ต้องมีคุณภาพ ทั้งความสวยงาม และ มีความเที่ยงตรงสูง เป็นตามข้อกำหนดของลูกค้าทุกประการ

ในส่วนของ การออกแบบและสร้างแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปเย็นแบบไหลตาม นั้นผู้ผลิต ต้องการ ชีงงานที่ผิวสวย เรียบ มีความเงางาม ขนาดเป็นไปตามข้อกำหนดของลูกค้า นั้นต้องอาศัยการลอง ผิด ลองถูก (Trial and Error) จากประสบการณ์จากผู้ปฏิบัติงาน ต้องใช้ระยะเวลาในการผลิต แม่พิมพ์ต้นแบบ เพื่อนำค่า พารามิเตอร์ที่ดีที่สุด สำหรับไปทำการผลิตแม่พิมพ์ในระดับอุตสาหกรรม ซึ่งทำให้สิ้นเปลือง ต้นทุนด้านแรงงานและวัตถุดิบเป็นจำนวนมาก ซึ่งในปัจจุบันด้วย เทคโนโลยีการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ นั้นเข้ามามีความสำคัญสำหรับอุตสาหกรรมการผลิต ในปัจจุบันมาก เนื่องจากสามารถเพิ่มประสิทธิภาพ ของกระบวนการผลิต พยากรณ์จุดบกพร่องต่างๆ ของชิ้นงาน และแม่พิมพ์ก่อนนำไปผลิตจริง ซึ่งสามารถแก้ไข จุดบกพร่องต่างให้น้อยที่สุด ก่อนนำไปใช้ในกระบวนการผลิต คราวละมาก ๆ เพื่อลดต้นทุนต่างๆ ลดการใช้ทรัพยากร ที่ไม่จำเป็น ส่งผลช่วยองค์กรแข่งขันได้ ในสภาวะปัจจุบันที่การแข่งขัน เรื่องราคา และ คุณภาพของสินค้า ซึ่ง คอมพิวเตอร์จะมาช่วยในการคำนวณหาผลเฉลยของชิ้นงาน ทั้งสามารถปรับแต่ง พารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ความเร็วในการขึ้นรูป, วัสดุชนิดต่างๆ, แรงที่ใช้ในการขึ้นรูป, ตัวแปรความเสียดทาน, และตัว

แปรอื่นๆ เพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมใกล้เคียงที่สุดก่อนนำไปผลิตจริง ซึ่งช่วยลดต้นทุน และเพิ่มมูลค่าของผลิตภัณฑ์ได้เป็นอย่างดี

ในการวิจัยนี้เป็นการศึกษากระบวนการจำลองปัญหา โดยวิธีการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในกระบวนการอัดขึ้นรูปเย็นแบบไหลตาม มีจุดประสงค์เพื่อเปรียบเทียบผลเฉลยกับผลการทดลองจริง ว่ามีความสอดคล้องกันอย่างไร ศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อพฤติกรรมการไหลตัวของวัสดุ ศึกษาตัวแปรความเสียดทานในสารหล่อลื่นของ น้ำมันแร่, น้ำมันมะพร้าว, น้ำมันถั่วเหลือง และไม่ใช่สารหล่อลื่น ซึ่งจะเป็นแนวทางในการเลือกสารหล่อลื่นให้เหมาะสมกับกระบวนการอัดขึ้นรูปแบบไหลตามของ วัสดุอะลูมิเนียมแต่ละชนิด

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1.2.1 เพื่อศึกษาแบบจำลองวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ ในกระบวนการอัดขึ้นรูปเย็นแบบไหลตาม

1.2.2 เพื่อศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลการไหลตัวของอะลูมิเนียม, อิทธิพลของแรงที่ใช้กดขึ้นรูป

1.2.3 เพื่อศึกษาอิทธิพลตัวแปรความเสียดทานของสารหล่อลื่น, ไม่ใช่สารหล่อลื่น, น้ำมันแร่, น้ำมันมะพร้าว, น้ำมันถั่วเหลือง โดยกระบวนการ Ring compression test.

1.2.4 วิเคราะห์ผลการแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ เปรียบเทียบกับการทดลองจริง ว่ามีความสอดคล้องกันอย่างไร

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1.3.1 ออกแบบแม่พิมพ์แหวนอัด (Ring compression test.)

1.3.2 ออกแบบแหวนอัด อัตรา 6:3:2 ของวัสดุ A11100, A12011 และ A16360 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางนอก 15 มม. ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 7.5 มม. ความหนา 5 มม.

1.3.2 ทดสอบสารหล่อลื่นโดยวิธีแหวนอัด (Ring compression test.) ในน้ำมันมะพร้าว, น้ำมันแร่, น้ำมันถั่วเหลือง และไม่ใช่สารหล่อลื่น นำไปคำนวณค่าแล้วนำไปพล็อต ใน Friction factor Calibration curves เพื่อหาตัวแปรความเสียดทาน (μ)

1.3.3 สร้างแบบจำลองแม่พิมพ์อัดแบบไหลตาม ในโปรแกรม Solidworks2007.

1.3.4 ใช้การจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์แบบสามมิติโดยโปรแกรม Deform 3D V10.0.

1.3.5 สร้างแบบจำลองอัดขึ้นรูปแบบไหลตาม แท่งอะลูมิเนียมกลม ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 16 มม. ความยาว 47 มม.

1.3.6 ทำการศึกษาตัวแปรดังต่อไปนี้

- 1) สารหล่อลื่น
 - น้ำมันแร่
 - น้ำมันมะพร้าว
 - น้ำมันถั่วเหลือง

- ไม่ใช้สารหล่อลื่น

2) ออกแบบมุดคาย 3 มุด [1]

- มุดคายขนาด $2\alpha = 20$ องศา

- มุดคายขนาด $2\alpha = 25$ องศา

- มุดคายขนาด $2\alpha = 30$ องศา

3). ชนิดของอลูมิเนียม

- อลูมิเนียม AI 1100

- อลูมิเนียม AI 2011

- อลูมิเนียม AI 6063

1.3.6 การแสดงผลการจำลองไฟในอิลิเมนต์เปรียบเทียบกับชิ้นงานจริง

1) แรงที่ใช้ในการขึ้นรูป

2) ศึกษากระบวนการทดสอบ Ring compression test เพื่อค่าตัวแปรความเสียหาย

3) ศึกษาความเค้น ที่เกิดขึ้นในเนื้อวัสดุ

1.4 สมมุติฐานของการศึกษา

อิทธิพลตัวแปรที่มีผลต่อการอัดขึ้นรูป

1.4.1 สารหล่อลื่นที่ใช้

1.4.2 ขนาดของมุดคาย

1.4.3 ชนิดของอลูมิเนียม

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 เข้าใจการสร้างแบบจำลองไฟในอิลิเมนต์ กระบวนการอัดขึ้นรูปอะลูมิเนียมแบบไหลตาม

1.5.2 เข้าใจอิทธิพลของสารหล่อลื่น น้ำมันแร่, น้ำมันมะพร้าว, น้ำมันถั่วเหลือง และไม่ใช้สารหล่อลื่น มีผลต่อกระบวนการอัดขึ้นรูป อะลูมิเนียม เพื่อเลือกสารหล่อลื่นได้อย่างเหมาะสม

1.5.3 สามารถนำแนวทางการจำลองการไฟในอิลิเมนต์ ไปลดต้นทุนการผลิต โดยการสร้างแบบจำลองไฟในอิลิเมนต์ ก่อนนำไปผลิตจริง.

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

แม่พิมพ์อัดขึ้นรูปแบบไหลตามมีส่วนประกอบหลักของแม่พิมพ์ 3 ส่วนดังนี้ เบ้ารองรับงาน (Container) แกนอัด (Ram) และ และชิ้นงาน (Billet) โดยชิ้นงานจะถูกอัดโดยแกนอัดไหลผ่าน เบ้ารองรับงาน ซึ่งกระบวนการวิเคราะห์งานการอัดขึ้นรูปเย็น เพื่อใช้ชิ้นงานมี คุณภาพดี จึงมีการใช้สารหล่อลื่นช่วยในการขึ้นรูป ซึ่งกระบวนการทั้งหมดนี้ มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องนำเอาความรู้เกี่ยวกับทฤษฎีการออกแบบแม่พิมพ์ การศึกษาคุณสมบัติการลดความเสียดทาน ของสารหล่อลื่น ในระหว่างการขึ้นรูป การเข้าใจกระบวนการระบายการไฟไนต์เอลิเมนต์ การเข้าใจวิธีการใช้ซอฟต์แวร์ช่วยการในการวิเคราะห์ผล และการวิเคราะห์สมบัติของวัสดุเพื่อใช้ประกอบการคำนวณค่าต่าง ๆ ในการอัดขึ้นรูปเย็น ก่อนที่จะนำค่าที่ได้ไปทำการวิเคราะห์ใน โปรแกรม Deform 3D V10.0 เพื่อหาผลลัพธ์ต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อการขึ้นรูป และนำไปพัฒนากระบวนการให้มีผลลัพธ์ใกล้เคียงกับความเหมาะสมทางความต้องการมากยิ่งขึ้น

นิยามศัพท์ที่สำคัญ

- 1) การอัดขึ้นรูป คือ การทำให้พื้นที่หน้าตัดของแท่งวัสดุลดลงหรือถูกเปลี่ยน โดยใช้แรงกดให้ แท่งโลหะ [1]
- 2) การขึ้นรูปเย็น คือ ขบวนการรีดขึ้นรูปเพื่อให้วัสดุหรือโลหะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างชนิดถาวรในที่ ๆ อุณหภูมิต่ำ ๆ ทั้งนี้โดยไม่ทำให้เกิดผลึกใหม่ขึ้น [2]
- 3) สารหล่อลื่น คือ สารที่ทำหน้าที่เคลือบผิวโลหะ หรือชิ้นงานที่มีการเคลื่อนที่ เพื่อไม่ให้เกิดการเสียดสีกันโดยตรง หรือเพื่อเป็นการลดการสึกหรอของชิ้นงาน
- 4) วิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method: FEM) คือ วิธีการทางคณิตศาสตร์ ซึ่งถูกนำมาประยุกต์เขียนเป็น โปรแกรมสำเร็จรูป เพื่อใช้คำนวณแก้ปัญหาทางวิศวกรรม [2]
- 5) อลูมิเนียม คือ ธาตุเคมีในตารางธาตุที่มีสัญลักษณ์ AI และมีเลขอะตอม 13 เป็นโลหะทรานซิชันที่มันวาวและอ่อนดัดง่าย ในธรรมชาติอลูมิเนียมพบในรูปแร่บอกไซต์เป็นหลัก และมีสมบัติเด่น คือ แข็งแรง และน้ำหนักเบา [3]

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

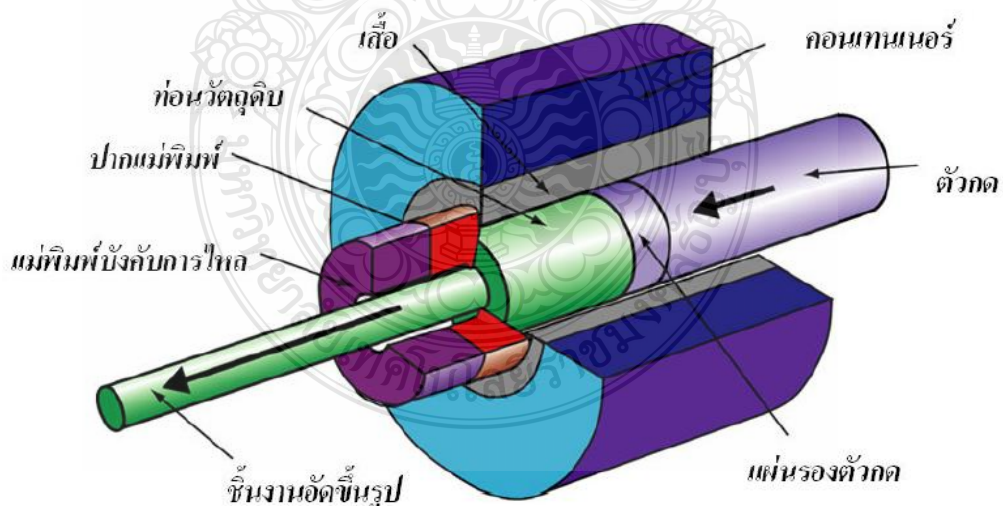
2.1 กระบวนการอัดขึ้นรูปโลหะ

1) การอัดขึ้นรูปโลหะ (Extrusion of metals)

กรรมวิธีการอัดขึ้นรูปโลหะ โดยทั่วไปเป็นการอัดขึ้นรูปชิ้นงานทรงกระบอกโดยการให้แรงอัดขึ้นงานผ่านปากแม่พิมพ์ ทำให้ได้พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานคงที่ตลอดการอัดขึ้นรูป สามารถขึ้นรูปเย็นและขึ้นรูปร้อน ขึ้นอยู่กับความเหนียวของวัสดุ การอัดขึ้นรูปโลหะ เป็นกรรมวิธีที่ผลิตที่ผสมผสานกับการตีขึ้นรูป (Forging) เรียกว่าการอัดขึ้นรูปเย็น (Cold extrusion) สำหรับชิ้นงานที่ผ่านการอัดขึ้นรูป เช่น รางประตูดัด ท่อพื้นที่หน้าตัดขนาดใหญ่ โครงสร้างด้าน สถาปัตยกรรม, ประตูดัด และ โครงหน้าต่าง สำหรับวัสดุที่นิยมมาขึ้นรูป เช่น อะลูมิเนียม ทองแดง เหล็ก แมกนีเซียม และไนตะกั่ว [2]

2) กรรมวิธีการอัดขึ้นรูปโลหะ (The Extrusion Process)

กรรมวิธีการอัดขึ้นรูปสามารถแบ่งออกได้หลายลักษณะกับลักษณะการไหลของเนื้อวัสดุ แสดงดังภาพที่ 2.1 เป็นการอัดขึ้นรูปแบบไหลตาม (Direct Extrusion) ซึ่งชิ้นงานถูกบรรจุไว้ภายในคอนเทนเนอร์ (Container) ชิ้นงานถูกอัดไหลผ่านปากแม่พิมพ์ด้วยแรงจากปากกระบอกอัด ไฮดรอลิกส์

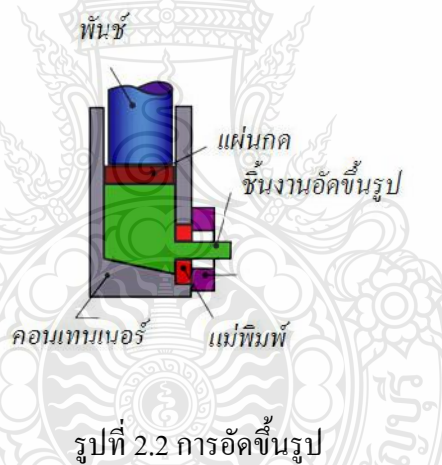
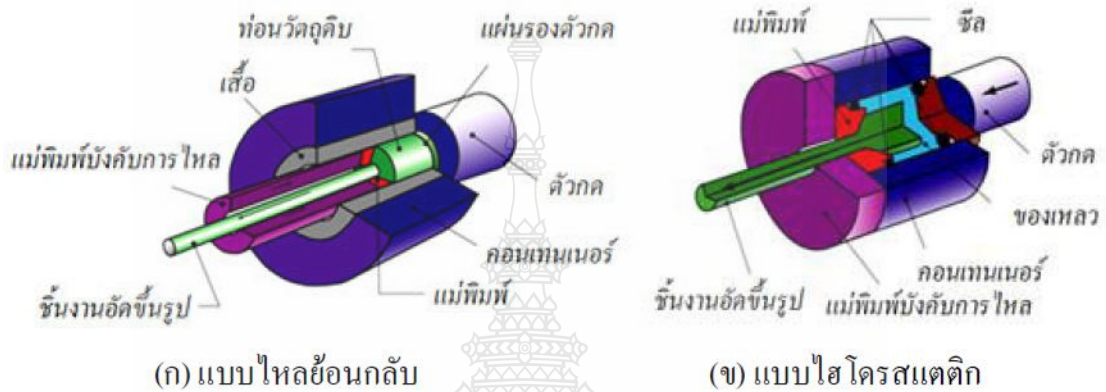


รูปที่

2.1 กรรมวิธีการอัดแบบไหลตาม [2]

การอัดขึ้นรูปแบบไหลย้อนกลับ (Indirect Extrusion) ชิ้นงานถูกอัดไหลสวนทางกับแรงอัด จากกระบอกไฮดรอลิกส์แสดงดังรูปที่ 2.2 (ก) ส่วนการอัดขึ้นรูปแบบไฮดรอสแตติก (Hydrostatic Extrusion) แสดงดังรูปที่ 2.2 (ข) ชิ้นงานมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่ากล่องบรรจุ

(Chamber) ซึ่งบรรจุของเหลวแล้ว เติมชุดต้นกำลังอัดของเหลวขึ้นรูปขึ้นงาน ทำให้การขึ้นรูปแบบนี้ ไม่เกิดความเสียดทานระหว่างชิ้นงานและกล่องบรรจุ นอกจากนี้ยังมีการอัดขึ้นรูปอีกชนิดหนึ่ง เรียกว่า การอัดขึ้นรูปแบบข้าง (Lateral Extrusion) แสดงดังรูปที่ 2.2 (ค) ชิ้นงานถูกอัดไหลออกทางด้านข้างแม่พิมพ์[2]



รูปที่ 2.2 การอัดขึ้นรูป

2.2 แรงอัดขึ้นรูปโลหะ (Extrusion Force)

แรงที่ต้องการสำหรับการอัดขึ้นรูปขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของชิ้นงาน อัตราการอัดขึ้นรูป ความเสียดทานระหว่างผิวชิ้นงานกับผิวแม่พิมพ์ อุณหภูมิในการอัดขึ้นรูป และความเร็วในการอัดขึ้นรูป สามารถคำนวณหาแรงอัดขึ้นรูปได้จากสูตรต่างๆ ดังต่อไปนี้

เกรดการฟอร์มตัว (ϕ_h) หาได้จากสมการที่ 2.1 และสมการที่ 2.2 [3]

$$\phi_h = \ln \frac{A_0}{A} \quad (2.1)$$

$$\lambda = \frac{A_0}{A_i} \quad (2.2)$$

φ_h คือ เกรดการขึ้นรูปหลัก

A_0 คือ หน้าตัดก่อนการขึ้นรูปหน่วยเป็นตารางมิลลิเมตร (mm^2)

A_i คือ หน้าตัดหลังการขึ้นรูปหน่วยเป็นตารางมิลลิเมตร (mm^2)

λ คือ อัตราการลดของหน้าตัด

แรงที่ใช้ในการฟอร์มตัว F หาได้ดังสมการที่ 2.3 และ 2.4

$$F = F_{pr} + F_r \quad (2.3)$$

$$F_u = \frac{A_0 \times k_f \times \varphi_h}{\eta_F} + (D_0 \times \pi \times l \times \mu_w \times k_f) \quad (2.4)$$

F คือ แรงอัดที่ใช้ทั้งหมด หน่วยเป็นนิวตัน (N)

F_{pr} คือ แรงที่ใช้สำหรับการขึ้นรูป หน่วยเป็นนิวตัน (N)

F_u คือ แรงความฝืดในเบ้ารองรับ หน่วยเป็นนิวตัน (N)

A_0 คือ พื้นที่หน้าตัดแท่งวัสดุดิบ หน่วยเป็นตารางมิลลิเมตร (mm^2)

D_0 คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางวัสดุดิบ หน่วยเป็นมิลลิเมตร (mm)

k_f คือ ความเค้นในการฟอร์มตัวเฉลี่ย หน่วยเป็นนิวตัน/ตารางมิลลิเมตร (N/mm^2)

η_F คือ ประสิทธิภาพในการฟอร์มตัว (0.4-0.6)

μ_w คือ สัมประสิทธิ์ความฝืดภายในผนังเบ้ารองรับ (0.15-0.20)

l คือ ความยาววัสดุดิบ (mm)

ความเร็วขึ้นรูป ได้ดังสมการที่ 2.5 และ 2.6

$$\varphi \cong \frac{2 \times V_{st}}{D_1} \quad (2.5)$$

$$V_{st} \equiv \frac{V_{str} \times A_1}{A_0} \quad (2.6)$$

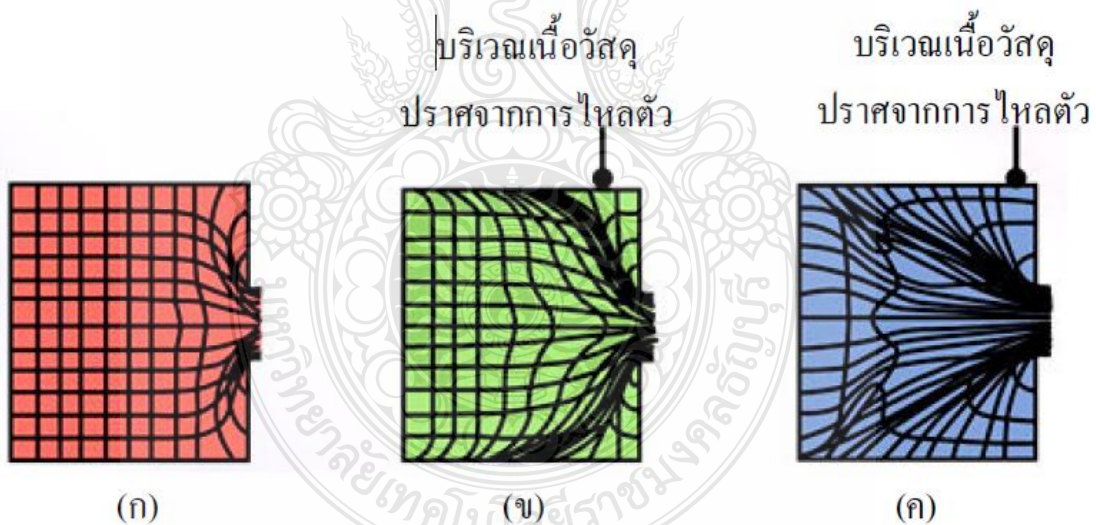
V_{st} = ความเร็วตัวกด หน่วยเป็นมิลลิเมตรต่อวินาที (mm/s)

$\dot{\phi}$ = ความเร็วขึ้นรูป หน่วยเป็นต่อวินาที (s^{-1})

V_{str} = ความเร็วความเร็วตกกระทบ หน่วยเป็นมิลลิเมตรต่อวินาที (mm/s)

2.3 การไหลตัวของโลหะในการอัดขึ้นรูปโลหะ (Metal Flow in Extrusion)

การไหลตัวของเนื้อโลหะภายในการอัดขึ้นรูปมีอิทธิพลต่อคุณภาพชิ้นงานและคุณสมบัติทางกลของชิ้นงาน เชื่อว่าลักษณะของเกรนชิ้นงานมีลักษณะยึดตายตัวตามยาวของทิศทางการรีด การศึกษาการไหลตัวของโลหะในการอัดขึ้นรูป โดยการผ่าครึ่งดูการไหลตัวของเนื้อโลหะดังแสดงรูปที่ 2.3 เป็นการอัดขึ้นรูปชิ้นงานด้วยแม่พิมพ์สี่เหลี่ยม ลักษณะที่เกิดขึ้นคือ บริเวณที่ชิ้นงานไม่เกิดการไหลตัว เรียกว่า Dead-Metal Zone แสดงดังรูปที่ 2.3 (ข) และ (ค) [2]



รูปที่ 2.3 ข้อบกพร่องในการอัดขึ้นรูป (Extrusion Defects)

การเกิดข้อบกพร่องในการอัดขึ้นรูปขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายอย่าง เช่น วัสดุและตัวแปรในการผลิต สำหรับจุดบกพร่องในการอัดขึ้นรูปแยกเป็นส่วนใหญ่ๆ ได้ 3 ประการคือ ผิวเกิดการแตก (Surface Cracking) เกิดเป็นตะเข็บ (Pipe) และเกิดรอยแตกภายใน (Internal Cracking)

- ผิวเกิดการแตก (surface Cracking)

เกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิการอัดขึ้นสูงเกินไป ความเสียดทานสูง และความเร็วในการขึ้น

รูปสูง ทำให้อุณหภูมิที่ขึ้นงานเพิ่มขึ้น เกิดการแตกของผิวขึ้นงาน และอาจเกิดการร้าวของผิวได้ในบางกรณี สำหรับวัสดุส่วนใหญ่ที่เกิดข้อบกพร่องในลักษณะนี้ ได้แก่ อะลูมิเนียม แมกนีเซียม และสังกะสี เป็นต้น การแตกของผิวขึ้นงานสามารถเกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิต่ำ หากกระหน่ำการอัดขึ้นรูป เกิดการติดขัดบริเวณปากแม่พิมพ์ เพื่อเกิดการติดขัดจะทำให้ความดันเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดการไหลย้อนของขึ้นงาน ซึ่งเกิดลักษณะเช่นนี้ไปเรื่อยๆ เรียกว่า Bamboo Defect

- เกิดเป็นรอยตะเข็บ (Pipe)

ลักษณะเช่นนี้เกิดจากการไหลของขึ้นงาน เกิดขึ้นบริเวณความยาว ตลอดแนวศูนย์กลางของขึ้นงาน เป็นแนวตะเข็บ ลักษณะเช่นนี้เรียกว่า Pipe Defect สามารถลดการเกิดรอยตะเข็บได้โดยการปรับปรุงการไหลของขึ้นงาน เช่น การควบคุมความเสียดทาน อุณหภูมิ และความไม่บริสุทธิ์ของขึ้นงาน

- เกิดรอยแตกภายใน (Internal Cracking)

เกิดการไหลตัวของขึ้นงานภายในบริเวณศูนย์กลาง ลักษณะการเกิดรอยแตกภายในสามารถศึกษาได้โดยการทดสอบแรงดึงซึ่งมีลักษณะคล้ายคลึงกัน สำหรับแนวโน้มที่ทำให้เกิดรอยแตกภายใน มีดังนี้

- 1) การเพิ่มของมุมคายแม่พิมพ์ (Die Angle)
- 2) การเพิ่มจำนวนสิ่งเจือปนภายในขึ้นงาน (Impurities)
- 3) การลดอัตราส่วนของการอัดขึ้นรูป (Extrusion Ratio) ความเสียดทาน (Friction)

2.4 อลูมิเนียมและโลหะผสมของอลูมิเนียม

อลูมิเนียมและโลหะผสมของอลูมิเนียมมีความหนาแน่นต่ำ (2.7 g/cm^3) นำความร้อนและนำไฟฟ้าได้ดี ทนการกัดกร่อนดีในสภาวะแวดล้อมบางสภาวะรวมทั้งในบรรยากาศ

โลหะอลูมิเนียมง่ายต่อการขึ้นรูปเนื่องจากมีความเหนียวสูง เช่นอลูมิเนียมพอยล์ที่ได้จากการรีดอลูมิเนียมบริสุทธิ์ เนื่องจากอลูมิเนียมมีโครงสร้างผลึกแบบ FCC จึงมีสมบัติเหนียวแม้ที่อุณหภูมิต่ำ อลูมิเนียมมีจุดหลอมเหลวต่ำ (660°C , 1220°F) ทำให้ไม่สามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงกว่านี้ได้

สมบัติทางกลของอลูมิเนียมอาจเพิ่มขึ้นได้โดยการขึ้นรูปเย็นและการเติมธาตุผสม แต่วิธีการดังกล่าวทำให้ สมบัติต้านทานการกัดกร่อนลดลง ธาตุที่นิยมใช้ผสมเป็นหลักคือ ทองแดง แมกนีเซียม ซิลิกอน แมงกานีส และ สังกะสี โลหะผสมที่ไม่สามารถอบชุบได้จะประกอบด้วยเฟสเดียวทำให้การเพิ่มความแข็งแรงได้โดยการทำให้เป็นสารละลายของแข็งเท่านั้น สำหรับอลูมิเนียมผสมอื่นๆ สามารถอบชุบได้ (ชุบแข็งแบบตกตะกอน) เพราะธาตุผสมที่เติมลงไปทำให้เกิดการตกตะกอนของเฟสที่สอง ซึ่งอาจไม่ใช่สารประกอบอลูมิเนียมก็ได้ เช่น MgZn_2

5.1 อลูมิเนียมขึ้นรูปเย็น และ อลูมิเนียมขึ้นรูปเย็นผสม

อลูมิเนียมขึ้นรูปเย็น และ อลูมิเนียมขึ้นรูปเย็นผสม (Wrought Aluminum and Wrought Aluminum Alloys) สามารถจำแนกออกโดยใช้ตัวเลข 4 หลัก โดยตัวเลขหลักที่หนึ่งเป็นการแบ่งกลุ่มของอลูมิเนียมซึ่งสามารถแบ่งได้ 9 กลุ่มดังที่แสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.1 สัญลักษณ์ที่ใช้แทนอลูมิเนียมขึ้นรูปเย็น และ อลูมิเนียมขึ้นรูปเย็นผสม [4]

สัญลักษณ์	ธาตุที่เป็นส่วนผสมหลักในอลูมิเนียม
1XXX	อลูมิเนียมที่มีความบริสุทธิ์ไม่น้อยกว่า 99 เปอร์เซ็นต์
2XXX	ทองแดง (Copper, Cu)
3XXX	แมงกานีส (Manganese, Mn)
4XXX	ซิลิกอน (Silicon, Si)
5XXX	แมกนีเซียม (Magnesium, Mg)
6XXX	แมกนีเซียมกับซิลิกอน (Magnesium, Mg and Silicon, Si)
7XXX	สังกะสี (Zinc, Zn)
8XXX	ธาตุอื่นๆ (Other Element)
9XXX	ยังไม่มีใช้ (Unused Series)

อลูมิเนียมบริสุทธิ์ (1XXX) ที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมจะมีความบริสุทธิ์ของอลูมิเนียมที่ 99.0 เปอร์เซ็นต์ ถึง 99.9 เปอร์เซ็นต์ อลูมิเนียมในกลุ่มนี้มีความต้านทาน การกัดกร่อนได้ดี สามารถนำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี และยังสามารถสะท้อนแสงได้ดีจึงนิยมใช้ในการผลิตแผงสะท้อนแสงในไฟหน้ารถยนต์ นอกจากนี้ยังสามารถนำไปขึ้นรูปได้ง่ายทั้งการตัด เชื่อมและขึ้นรูปเย็นด้วยกระบวนการต่างๆ ความสามารถในการเชื่อมอยู่ในเกณฑ์ที่น่าพอใจ แต่อลูมิเนียมบริสุทธิ์จะมีข้อเสียคือในด้านของความแข็งแรง และสมบัติทางกลที่ต่ำกว่าวัสดุชนิดอื่น แต่ก็สามารถปรับปรุงได้โดยการเติมธาตุเจืออื่นเพื่อให้สมบัติเปลี่ยนแปลงไป หรือการขึ้นรูปเย็นคือการทำให้แข็งได้ด้วยความเค้น (Strain Hardening)

อลูมิเนียมผสมทองแดง (2XXX) เป็นอลูมิเนียมที่มีความแข็งแรงสูง สมบัติทางกลใกล้เคียงกับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ โดยสามารถที่ทำการปรับปรุงสมบัติทางกลให้ดีขึ้นได้ด้วยกรรมวิธีทางความร้อนได้โดยทำการอบละลาย (Solution Treatment) และ ชุบ (Quenching) จากนั้น

ปล่อยให้ตกตะกอน (Precipitation) ซึ่งเรียกกระบวนการนี้ว่าการอบบ่ม (Ageing Hardening) ซึ่งภายหลังการอบบ่มความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนจะลดลง และความสามารถในการเชื่อมของอลูมิเนียมชนิดนี้ต่ำกว่าชนิดอื่นๆ ก็จะเชื่อมได้ยากโดยจะเกิดการอ่อนตัวที่แนวเชื่อม ดังนั้นจึงมักทำการเชื่อมต่อด้วยวิธีทางกลคือการย้ำหมุด

อลูมิเนียมเจือแมงกานีส (3XXX) เป็นอลูมิเนียมที่มีสมบัติ เหมือนกับอลูมิเนียมบริสุทธิ์แต่มีความแข็งแรงและสมบัติทางกลที่ดีกว่า จัดว่าเป็นกลุ่มที่ไม่สามารถปรับปรุงสมบัติด้วยกรรมวิธีทางความร้อนได้

อลูมิเนียมเจือซิลิกอน (4XXX) อลูมิเนียมชนิดนี้จัดว่าเป็นกลุ่มที่ไม่สามารถปรับปรุงสมบัติด้วยกรรมวิธีทางความร้อนได้ แต่เมื่ออยู่ในสภาพของเหลวจะไหลตัวได้ดีและ ขณะแข็งตัวจะไม่เกิดการแตกร้าวทั้งในสภาพร้อนและเย็น ดังนั้นอลูมิเนียมจึงนิยมใช้ในการเป็นลวดเติมสำหรับเชื่อมอลูมิเนียมเจือและอลูมิเนียมหล่อ

อลูมิเนียมเจือแมกนีเซียม (5XXX) บางครั้งมีการเติมแมงกานีสลงไปด้วย อลูมิเนียมเจือชนิดนี้จัดว่าเป็นกลุ่มที่ไม่สามารถปรับปรุงสมบัติด้วยกรรมวิธีทางความร้อนได้ นิยมนำไปทำลวดเติมสำหรับเชื่อมเหมือนกับ 4XXX นอกจากนั้นยังนิยมนำไปทำเป็นถังหรือขวดบรรจุแก๊ส (Storage Vessels)

อลูมิเนียมเจือแมกนีเซียม - ซิลิกอน (6XXX) อลูมิเนียมชนิดนี้จัดว่าเป็นกลุ่มที่สามารถปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกรรมวิธีทางความร้อนได้ มีความแข็งแรงและสมบัติทางกลที่ดีพอสมควร ความต้านทานการกัดกร่อนและความสามารถในการแปรรูปและความสามารถในการเชื่อมอยู่ในเกณฑ์ที่พอใช้ แต่มีข้อเสียคือเมื่อนำอลูมิเนียมเจือชนิดนี้ไปทำการเชื่อมด้วยกรรมวิธีการให้ความร้อนแบบต่างๆ จะทำให้บริเวณแนวเชื่อมอ่อน

อลูมิเนียมเจือสังกะสี - แมกนีเซียม (อนุกรม 7XXX) อลูมิเนียมชนิดมีการเจือธาตุสังกะสีเป็นธาตุหลักและแมงกานีสเป็นธาตุรองนอกจากนั้นยังมีทองแดงและโครเมียมอีกเล็กน้อย อลูมิเนียมเจือกลุ่มนี้มีความแข็งแรงและสมบัติทางกลที่ดีมากและมีน้ำหนักเบา ความต้านทานการกัดกร่อนและความสามารถในการเชื่อมอยู่ในเกณฑ์ที่ค่อนข้างต่ำเพราะจะเกิดการอ่อนตัวบริเวณแนวเชื่อม อลูมิเนียมชนิดนี้จัดว่าเป็นกลุ่มที่สามารถปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกรรมวิธีทางความร้อนได้ แต่ในปัจจุบันได้มีการผลิตและพัฒนาอลูมิเนียมชนิดนี้โดยการผสมแมกนีเซียมลงไปและกำจัดทองแดงออกไปทำให้ความสามารถในการเชื่อมของอลูมิเนียมชนิดสูงขึ้นไป โดยจะไม่เกิดการอ่อนตัวบริเวณแนวเชื่อมเพราะบริเวณดังกล่าวได้เกิดการแข็งตัวจากตกตะกอนตามธรรมชาติ

2.5 สารหล่อลื่น

สารหล่อลื่นโดยหลักใหญ่แล้วใช้เพื่อทำการหล่อลื่นเครื่องจักร โดย องค์ประกอบและคุณสมบัติของสารหล่อลื่น

สารหล่อลื่นเป็นได้ทั้งสถานะของก๊าซ , ของเหลว, กึ่งของเหลวหรือแม่กระทั่งของแข็ง การหล่อลื่นด้วยก๊าซ เช่น ใช้อากาศเป็นสารหล่อลื่นในระบบที่มีความเร็วรอบสูงๆ ที่ภาระใช้งานต่างๆ เช่น การเหวี่ยงด้วยความเร็วสูง, ปั่นอัดอากาศในโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์, เจ็มทิสแบบไอโร และอื่นๆ

สารหล่อลื่นแบบของเหลว (น้ำมันหล่อลื่น) ครอบคลุมกว้างขวางมากตั้งแต่ก๊าซเหลวไปจนถึงน้ำมันหล่อลื่นที่กลั่นได้จากน้ำมันปิโตรเลียม นอกจากนั้นในน้ำมันที่ได้จากไขสัตว์หรือน้ำมันพืชที่ถูกจัดให้รวมอยู่ในกลุ่มของสารหล่อลื่นของเหลวเช่นเดียวกัน

สารหล่อลื่นของเหลว แนวความคิดเบื้องต้นของการหล่อลื่น คือ การทำให้ชิ้นส่วนที่รับภาระเช่น เพลา, ฟันเฟือง, ตลับลูกปืน ฯลฯ มีการลื่นไถลไปบนชั้นฟิล์มของสารหล่อลื่น โดยทำให้เกิดการเสียดทานและการสึกหรอให้ต่ำที่สุด วัตถุประสงค์ที่เป็นองค์ประกอบของสารหล่อลื่นนั้นอาจเป็นไปได้ทั้งสารหล่อลื่นประเภทของแข็ง, กึ่งของแข็งกึ่งของเหลว, ของเหลว หรือแม่กระทั่งสถานะก๊าซ วัตถุประสงค์หลักของสิ่งต่างๆ เหล่านี้ คือ ต้องทำหน้าที่เพื่อการหล่อลื่น

ปัจจุบันนี้การหล่อลื่นไม่ได้ถูกจำกัดอยู่เพียงเพื่อหล่อลื่นตลับลูกปืน , ลูกสูบ เครื่องยนต์, รางเลื่อนเครื่องจักรกล, ระบบเฟืองทด และเครื่องต้นกำลังต่างๆ เท่านั้น การหล่อลื่นยังถูกนำไปใช้ใน กระบวนการตัดเฉือนทางกล และการขึ้นรูปโลหะอีกด้วย ซึ่งหากสามารถเลือกใช้สารหล่อลื่นที่ถูกต้อง และเหมาะสมแล้วจะสามารถทำให้เราใช้เพียงชิ้นส่วนขนาดเล็ก ในการรับภาระหรือรองรับชิ้นงาน ที่มีน้ำหนักมากๆ ให้เคลื่อนที่ได้ ตัวอย่าง เช่น การทอผ้าจากใยที่ละเส้นในอุตสาหกรรมทอผ้า จนกระทั่งการทำการปล่อยเรือขนาดใหญ่ที่มีระวางขับน้ำหลายพันตันลงน้ำ เป็นต้น

การหล่อลื่นที่มีประสิทธิภาพเพื่อการประหยัดพลังงานสามารถสรุป ได้จากการใช้สารหล่อลื่น ที่เหมาะสม ตามระยะเวลาในการใช้งานของสารหล่อลื่นนั้นๆ ซึ่งสามารถช่วยลดการสูญเสียที่เกิดจากแรงเสียดทาน ลดการสึกหรอ และเพิ่มประสิทธิภาพการส่งถ่าย ความร้อน ดังนั้นสารหล่อลื่นเป็นสารหรือวัสดุที่ใช้ในการหล่อลื่นชิ้นส่วนของเครื่องจักรกลซึ่งอาจจะอยู่ในรูปของของแข็งที่บดเป็นผง ของเหลว และก๊าซ แต่ละสารหล่อลื่นที่นิยมใช้อย่างกว้างขวางจะอยู่ในลักษณะของเหลว เช่น น้ำมันหล่อลื่น หรือ สารที่มีลักษณะเหลว เช่น น้ำมันหล่อลื่น หรือสารลักษณะเหนียว เช่น จารบี เป็นต้น [5]

6.1 น้ำมันหล่อลื่น (Lubricant Oil) เป็นผลิตภัณฑ์หนึ่งที่ได้จากการกลั่นปิโตรเลียม การผลิต น้ำมันหล่อลื่น เพื่อให้ได้น้ำมันหล่อลื่นสำเร็จรูปที่มีคุณภาพดี และเหมาะสมกับการนำไปใช้งาน สำหรับเครื่องยนต์และเครื่องจักรกลแต่ละชนิดนั้น ขั้นตอนในการผลิตน้ำมันหล่อลื่นแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือขั้นตอนการผลิตน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน และขั้นตอนการผลิตน้ำมันหล่อลื่นสำเร็จรูป โดยการเติมสารคุณภาพต่างๆ ลงไปในน้ำมันหล่อลื่น

น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่มีใช้อยู่แบ่งออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ น้ำมันพืช หรือ สัตว์น้ำมันแร่ และ น้ำมันสังเคราะห์ โดยส่วนใหญ่แล้วมักจะใช้น้ำมันแร่มาผลิต เป็นน้ำมันหล่อลื่นสำเร็จรูป เพราะมีคุณภาพดีพอ และราคาถูก ส่วนน้ำมันพืชและสัตว์ และน้ำมันสังเคราะห์ นั้นจะนำไปใช้งาน ที่ต้องการคุณสมบัติพิเศษบางอย่างเท่านั้น ที่มาของน้ำมันพื้นฐานมีดังนี้คือ

1) น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากพืชหรือสัตว์ (Vegetable or Animal Base Oil) สมัยก่อนนิยมนำมาใช้งานหลายอย่าง ปัจจุบันมีการใช้งานน้อยมาก เนื่องจากน้ำมันพืชหรือสัตว์มีความคงตัวทางเคมีต่ำ เสื่อมสภาพได้ง่าย ในขณะที่ใช้งาน เมื่อนำมาใช้จะต้องผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพ ทำให้ราคาแพงมากความนิยมจึงหมดไป แต่จะใช้หล่อลื่นที่ต้องการคุณสมบัติพิเศษบางอย่างเท่านั้น ส่วนใหญ่มักใช้เป็นตัวเติม สำหรับเพิ่มคุณภาพ ให้น้ำมันหล่อลื่นที่ผลิตจากน้ำมันปิโตรเลียม เพื่อเพิ่มความหล่อลื่นและความสามารถในการผสมเข้ากับน้ำได้ เป็นต้น ตัวอย่างของน้ำมันพืชที่ถูกนำมาใช้ ได้แก่ น้ำมันละหุ่งและน้ำมันปาล์ม ส่วนน้ำมันจากสัตว์ ได้แก่ น้ำมันหมูและน้ำมันปลา เป็นต้น

2) น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากปิโตรเลียม หรือ น้ำมันแร่ (Mineral Base Oil) เป็นน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่นิยมใช้มากที่สุด เนื่องจากมีคุณภาพดีและมีราคาถูก น้ำมันหล่อลื่น พื้นฐานที่นิยมใช้มากที่สุด เนื่องจากมีคุณภาพดีและราคาถูก น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานชนิดนี้ เป็นผลผลิตอันหนึ่งที่ได้จากการกลั่น น้ำมันดิบในหอกกลั่น ส่วนเบาที่มีจุดเดือดต่ำ ได้แก่ ก๊าซ แก๊ส โซลีน น้ำมันก๊าด น้ำมันดีเซล จะระเหย ไอแยกออกมา ส่วนหนัก หนักที่มี จุดเดือดสูงจะไม่ระเหยเป็นไอ และเหลืออยู่เป็นพวกน้ำมันเตาใจและยางมะตอย ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นวัสดุเติม ในการผลิตน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานได้ น้ำมันแร่ที่ได้จากการเอาส่วนที่อยู่ก้นหอกกลั่นบรรยากาศมาผ่านกระบวนการกลั่นภายใต้สูญญากาศ แยกเอาน้ำมันหล่อลื่นชนิดใสและชนิดข้นออกมา ที่เหลือเป็นกากก็สามารถ นำไปใช้ผลิตยางมะตอยได้ ชนิดและปริมาณของน้ำมันแร่ที่แยกออกมาได้ นั้นขึ้นอยู่กับชนิด ของน้ำมันดิบที่นำมาผลิต น้ำมันดิบบางอย่างก็ไม่เหมาะที่นำมาผลิตน้ำมันแร่ เนื่องจากน้ำมันแร่ที่ได้ ก้น้ำมันดิบพวกฟีนิก มักจะมีไขสูงจะต้องผ่านกระบวนการ เอาไขออก น้ำมันแร่ที่ได้จากการกลั่น ภายใต้ สูญญากาศ นี้ปกติคุณภาพจะไม่ดีพอ ที่จะนำมาใช้ในการผลิตน้ำมันหล่อลื่น

ต้องผ่านกระบวนการต่างๆ เพื่อกำจัดสารที่ไม่ต้องการออกไป และเพื่อให้ความอยู่ตัวเชิงเคมีและความร้อนที่ดีพอ

3) น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากน้ำมันสังเคราะห์ (Synthetic Base Oil) เป็นน้ำมันที่สังเคราะห์ ขึ้นด้วยกระบวนการเคมี วัสดุที่นำมาสังเคราะห์มักนำมาจากปิโตรเลียม ส่วนใหญ่ใช้เป็นน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานในงานพิเศษเฉพาะที่ต้องการ คุณสมบัติในด้านดัชนีความหนืดสูง จุดไหลเทต่ำและมีการระเหยต่ำ เป็นต้น น้ำมันสังเคราะห์ ที่ใช้กันอยู่มีหลากหลาย ชนิด และมีราคาค่อนข้างแพง มาก [6]

ตารางที่ 2.2 ค่าความหนืดและความหนาแน่น ของสารหล่อลื่นตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ (มอก.)

สารหล่อลื่น	ความหนืด (cSt)	ความหนาแน่น (g/cm ³)
น้ำมันแร่ (มอก.977)	32.00	0.865
น้ำมันถั่วเหลือง (มอก.176)	31.19	0.918
น้ำมันมะพร้าว (มอก.203)	28.26	0.915

6.2 หน้าที่สารหล่อลื่น

1) ช่วยหล่อลื่นฟิล์มหรือเยื่อบางๆ ของน้ำมันหล่อลื่นจะทำหน้าที่เคลือบผิวโลหะ หรือชิ้นงานที่มีการเคลื่อนที่ เพื่อไม่ให้เกิดการเสียดสีกัน โดยตรงหรือเพื่อเป็นการลดการสึกหรอ ของชิ้นงาน น้ำมันหล่อลื่นที่ดีจะต้องมีคุณสมบัติในการคงความหนาของฟิล์มน้ำมันให้เกือบคงที่ตลอดเวลาแม้เมื่อ อุณหภูมิเปลี่ยนแปลง ไปนั้นจะต้องไม่บางเกินไปเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และไม่หนาเกินไป เมื่ออุณหภูมิลดต่ำลง

2) ช่วยระบายความร้อนคุณสมบัตินี้เป็นสิ่งสำคัญข้อหนึ่งของการหล่อลื่น สำหรับเครื่องยนต์ ซึ่งจะต้องลดอุณหภูมิหรือระบายความร้อน จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงในกระบอกสูบ และระบายความร้อนอันเนื่องมาจากการเสียดสีของชิ้นส่วนต่างๆ ในเครื่องยนต์เช่น ระบบเกียร์ หรือเฟืองท้าย เป็นต้น

3) ช่วยรักษาความสะอาดขณะทำงานที่หล่อลื่นจะต้องเป็นตัวทำความสะอาดชิ้นงานนั้นไปด้วย คือจะต้องสามารถชะล้างหรือขจัดคราบสิ่งสกปรกต่างๆ จากผิวชิ้นงานได้เป็นอย่างดี

4) ช่วยป้องกันการเกิดสนิมและการกัดกร่อนน้ำมันหล่อลื่นที่ดีจะต้องไม่มีสารที่เป็นอันตรายในการกัดกร่อนเสียเอง นอกจากนี้เมื่อมีสารภายนอก ที่อาจทำให้เกิดกรด ได้เช่น ก๊าซไอ

เสีย ละอองน้ำหรือไอน้ำ น้ำมันหล่อลื่นที่ดีจะต้องมีคุณสมบัติ ในการทำให้ครกนั้นเงาจนลงและ ไม่สามารถที่จะไปกัดกร่อนโลหะของชิ้นงานได้

5) ช่วยกระจายความสกปรกน้ำมันหล่อลื่นที่ดีจะต้องมีคุณสมบัติ ในการกระจายความ สกปรกต่างๆ ที่มีปนในน้ำมันหล่อลื่น อันเนื่องจากการกำจัดสิ่งสกปรกออกจากชิ้นงาน เพื่อไม่ให้ สิ่งสกปรกต่างๆ เหล่านั้นรวมตัวกันได้ง่าย เพราะหากสิ่งสกปรกออกจากในน้ำมันหล่อลื่นเกิดการ รวมตัวกันมากขึ้น จะทำให้เกิดยางเหนียว

6) มีสารป้องกันการเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนสารนี้จะช่วย ให้ปฏิกิริยาระหว่าง น้ำมันเครื่อง กับออกซิเจน ในอากาศเกิดได้ช้าลง ถ้าไม่มีสารนี้ น้ำมันเครื่องจะทำปฏิกิริยาดังกล่าว ได้ง่าย และทำให้เกิดยางเหนียว เป็นผลให้น้ำมันเครื่องมีความหนืดเพิ่มขึ้นได้ ซึ่งไม่เป็นผลดีต่อ เครื่องยนต์

7) มีสารป้องกันการสึกหรอสารนี้จะช่วยให้ฟิล์มของน้ำมันทนต่อแรงเฉือนได้ดี

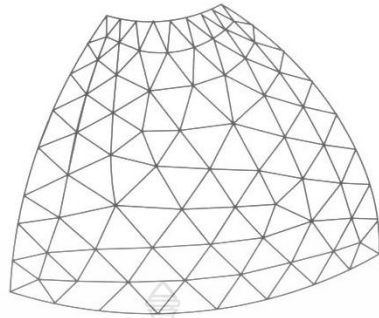
8) มีสารป้องกันการเกิดฟอง กรเกิดฟองในน้ำมันหล่อลื่นจะทำให้ประสิทธิภาพการ หล่อลื่นลดลง สารป้องกันการเกิดฟองจะช่วยทำให้ฟองอากาศละลายตัวได้ง่าย

9) มีการระเหยตัวต่ำน้ำมันหล่อลื่นที่ดี จะต้องมีความดันไอสูง ทำให้เกิดการระเหยต่ำ และทนต่อความร้อนสูงๆ ได้ ไม่เกิดการเผาไหม้ได้ง่าย ซึ่งจะไม่ทำให้เกิดความสิ้นเปลือง น้ำมันหล่อลื่น ขณะใช้งาน

10) มีจุดไหลเทต่ำเพื่อนำน้ำมันหล่อลื่นไปใช้ในงานอุณหภูมิต่ำๆ ได้ [6]

2.6 วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

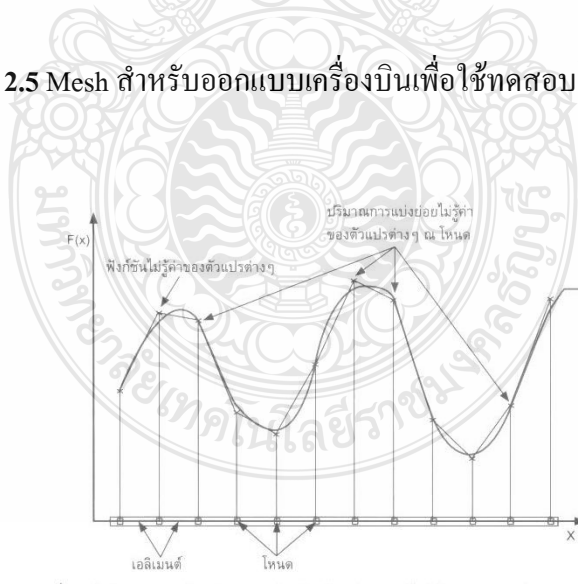
วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เริ่มแรกถูกนำมาใช้แก้ไขปัญหาการวิเคราะห์ความเค้น จนถูกนำมาใช้กัน อย่างแพร่หลายในงานอื่น ๆ เช่น การวิเคราะห์ของไหล การวิเคราะห์ความร้อน และการวิเคราะห์ การเก็บประจุไฟฟ้า เป็นต้น วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นวิธีการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ด้วยการประมาณ ผลเฉลย เนื่องจากการกระจายพื้นที่ที่เปลี่ยนแปลงในปัญหาโดเมน (Problem Domain) หรือชิ้นส่วน ของปัญหา ซึ่งไม่สามารถหาผลเฉลยได้จากการอนุพันธ์สามัญ ดังนั้นจึงต้องแบ่งชิ้นส่วนของปัญหา ออกเป็นส่วนย่อยๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.8 และ 2.9 จากกฎทางฟิสิกส์ถูกประยุกต์ต่อส่วนย่อยๆ แต่ ละส่วน ซึ่งแต่ละส่วนต้องมีรูปร่างไม่ซับซ้อน ในรูปที่ 2.10 แดงไฟไนต์เอลิเมนต์ 1 มิติ ฟังก์ชันที่ ต่อเนื่องของพื้นที่ที่ไม่ทราบค่าเปลี่ยนแปลงไปมีความใกล้เคียงโดยการใช้ฟังก์ชันเส้นตรงขึ้นเล็กน้อย ในแต่ละชิ้นส่วนของปัญหาย่อย ซึ่งเรียกว่า โหนด (Nodes) และการเชื่อมต่อของโหนดทำให้ได้เอลิ เมนต์ (Elements) [2]



รูปที่ 2.4 การแบ่งย่อยหน้าตัดของ hemispherical ออกเป็นเอลิเมนต์ผืนบาง (Shell Elements) [2]



รูปที่ 2.5 Mesh สำหรับออกแบบเครื่องบินเพื่อใช้ทดสอบไดนามิก [2]



รูปที่ 2.6 ไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับ 1 มิติ ฟังก์ชันที่ต่อเนื่องของพื้นที่ที่ไม่ทราบค่าเปลี่ยนแปลงไปมีความใกล้เคียงโดยการใช้ฟังก์ชันเส้นตรงขึ้นเล็กในแต่ละชั้นส่วนของปัญหาย่อย [2]

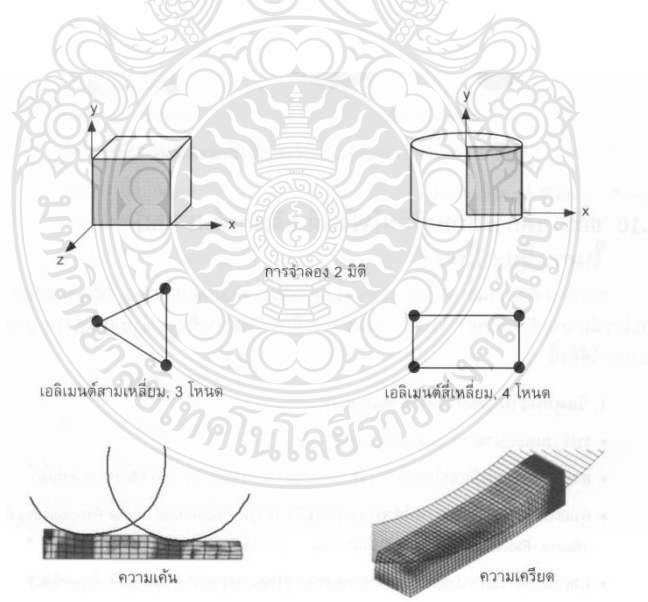
1) ปัญหาทางวิศวกรรม คือ โมเดลคณิตศาสตร์ของสถานการณ์ทางกายภาพ ซึ่ง โมเดลเชิงคณิตศาสตร์คือ สมการเชิงอนุพันธ์ ซึ่งมีรูปแบบสอดคล้องกับเงื่อนไขขอบและสภาวะ เริ่มต้นสมการเชิงอนุพันธ์ถูกเขียนโดยการประยุกต์กฎและหลักการพื้นฐานของธรรมชาติกับระบบ และการควบคุมปริมาตร ซึ่งสมการเหล่านี้เรียกว่า Governing Equations โดยอธิบายการสมดุลของ มวล แรง หรือพลังงาน ซึ่งหากมีการกำหนดเงื่อนไขก็สามารถทราบพฤติกรรมของระบบสมการได้ การวิเคราะห์หาคำตอบประกอบด้วย 2 อย่างคือ ชั้นส่วนที่ลักษณะเหมือนกัน และชั้นส่วนที่มี ลักษณะเฉพาะ แต่มีตัวแปรที่สำคัญอยู่ 2 ตัวสำหรับปัญหาทางวิศวกรรมซึ่งมีอิทธิพลต่อพฤติกรรม ของระบบ คือ พฤติกรรมทางธรรมชาติ และสิ่งรบกวน โดยมีชนิดของปัญหาของ FEM แบ่งออกได้ 3 ชนิดดังนี้ [2]

- 1 มิติ เอลิเมนต์ของเส้น เช่น สปริง โครงถัก คาน และท่อ เป็นต้น



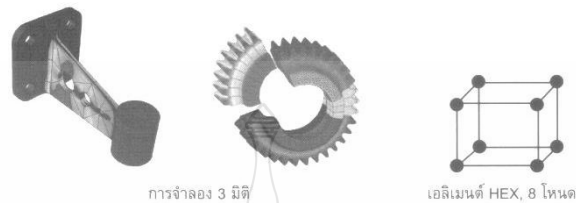
รูปที่ 2.7 แสดงลักษณะของการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ 1 มิติ [2]

- 2 มิติ เอลิเมนต์ของ plane เช่น Membrane, Plate และ Shell เป็นต้น



รูปที่ 2.8 แสดงลักษณะของการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ 2 มิติ [2]

- 3 มิติ เอลิเมนต์ข้อแข็ง เช่น 3 มิติ อุณหภูมิ การเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ความเค้น และการไหลของความเร็ว เป็นต้น



รูปที่ 2.9 แสดงลักษณะของการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติ [2]

2) หลักการของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ การวิเคราะห์วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) ต้องมีความรู้ความเข้าใจด้านทฤษฎีกลศาสตร์ของแข็งหรือกลศาสตร์วัสดุ เพื่อนำมาวิเคราะห์ปัญหาได้อย่างถูกต้องแม่นยำ ขั้นตอนของวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถแบ่งได้ 3 ส่วนใหญ่ ๆ ดังนี้

2.3.8 ขั้นตอนการจำลองวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ [2]

1) การสร้างโมเดลเพื่อการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พฤติกรรมที่ปรากฏในระบบขึ้นอยู่กับรูปร่างหรือโดเมนของระบบ สมบัติของวัสดุ การกำหนดเงื่อนไขของขอบเขต และการกำหนดเงื่อนไขของแรง สำหรับระบบวิศวกรรมนั้น รูปร่างหรือโดเมนอาจมีความซับซ้อน หรือเงื่อนไขและแรงมีความยุ่งยากในการกำหนด ดังนั้นโดยทั่วไปปัญหามีความยากในการหาผลเฉลยสมการเชิงอนุพันธ์ (Governing Differential Equation) ผ่านการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ย ในทางปฏิบัติส่วนใหญ่ถูกหาผลเฉลยโดยใช้วิธีเชิงตัวเลข โดยการแบ่งชิ้นส่วนของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์ย่อย ซึ่งวิธีการของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่นิยมใช้กันมากที่สุด เนื่องจากปฏิบัติได้ง่ายและมีความสามารถรอบตัว การดำเนินการสร้างโมเดลเพื่อคำนวณโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ประกอบด้วย 4 ขั้นตอนดังนี้

- การสร้างโมเดลของรูปร่าง (Modeling of The Geometry) สำหรับโครงสร้างจริง ๆ นั้น ชิ้นส่วนหรือโมเดลมีความซับซ้อนมาก โดยส่วนโค้งของรูปร่างและขอบเขตสามารถสร้างโดยใช้เส้นโค้งและผิวโค้ง แต่ต้องพึงระวังในส่วนของเส้นโค้งและผิวโค้งที่กำหนดแบบเส้นตรงหรือผิวเรียบ โดยเส้นโค้งขอบเขตแสดงด้วยเส้นตรงของขอบเอลิเมนต์สามเหลี่ยม โดยความถูกต้องส่วนของเส้นโค้งถูกควบคุมโดยจำนวนของเอลิเมนต์ที่ใช้ หากมีจำนวนของเอลิเมนต์มากจะ

ทำให้เส้นโค้งมีความเรียบผิวสูง ทำให้ผลเฉลยออกมามีความถูกต้องสูง อย่างไรก็ตาม หากมีเอลิเมนต์มากจะทำให้ต้องการใช้เวลาในการคำนวณมาก ดังนั้นจำเป็นต้องหาความเหมาะสมในการสร้างโมเดลรูปร่าง การสร้างโมเดลรูปร่างที่ละเอียดนั้น ในกรณีที่ต้องการความถูกต้องมากในบริเวณนั้น ๆ ในปัจจุบันการสร้างโมเดลของรูปร่างขึ้นอยู่กับซอฟต์แวร์ไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้ ซึ่งสามารถสร้างรูปร่างจากจุดพิกัดเชื่อมต่อเส้นและเส้นโค้งเข้าด้วยกันเรียกว่า โหนด (Nodes) ในรูปแบบ 1 มิติ 2 มิติ และ 3 มิติ และจากการช่วยเหลือของฟังก์ชันการทำงานในซอฟต์แวร์ (Graphic Interface) ทำให้สามารถสร้างรูปร่างและปรับปรุงแก้ไขโมเดลได้อย่างสะดวกและรวดเร็ว นอกจากนี้ซอฟต์แวร์ Computer Aided Design (CAD) ใช้สำหรับช่วยในการออกแบบเชิงวิศวกรรม และสามารถนำมาใช้ในซอฟต์แวร์ไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ โดยการแปลงไฟล์ให้ตรงกับไฟล์ที่นำเข้า (Import) ซอฟต์แวร์ไฟไนต์เอลิเมนต์ ตัวอย่างเช่น ไฟล์ IGES (Initial Graphics Exchange Specification)

- การสร้างตาข่าย (Mesh) การสร้างตาข่ายเพื่อต้องการแบ่งย่อยรูปร่างชิ้นงานออกเป็นเอลิเมนต์เล็ก ๆ สาเหตุที่ต้องแบ่งเป็นเอลิเมนต์เล็กก็เพื่อให้สามารถหาผลเฉลยสำหรับปัญหาทางวิศวกรรมที่มีความซับซ้อนได้ หากปัญหาโดเมนสามารถแบ่งเป็นเอลิเมนต์เล็ก ๆ ซึ่งเชื่อมต่อกันด้วยโหนด การประมาณผลเฉลยภายใต้เอลิเมนต์ก็สามารถคำนวณได้โดยการใช้ฟังก์ชันอย่างง่าย การสร้างตาข่าย (Mesh) มีหน้าที่สำคัญมากในขั้นตอน Pre - Process เพื่อแบ่งปัญหาโดเมนออกเป็นเอลิเมนต์ย่อย สำหรับรูปร่างของเอลิเมนต์สามารถระบุได้ เช่น เอลิเมนต์สามเหลี่ยม (Triangle) หรือเอลิเมนต์สี่เหลี่ยม (Quadrilaterals) เอลิเมนต์แบบ Triangle มีความยืดหยุ่นและสร้างชิ้นได้ง่าย ซึ่งตาข่ายออกมาเป็นเอลิเมนต์รูปสามเหลี่ยม และสามารถสร้างได้อัตโนมัติสำหรับ 2 มิติ หรือ 3 มิติก็ตาม โดยมีข้อดีเรื่องการยืดหยุ่นสำหรับโครงสร้างโมเดลที่มีรูปร่างและมีขอบเขตที่ซับซ้อน แต่มีข้อเสียด้านความถูกต้องของผลเฉลยต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับเอลิเมนต์แบบ Quadrilateral ส่วนข้อเสียของเอลิเมนต์แบบ Quadrilateral คือการสร้างตาข่ายแบบอัตโนมัติมีความยากที่จะสร้างได้ โดยเฉพาะปัญหาโดเมนที่มีรูปร่างซับซ้อน

- สมบัติของวัสดุ (Property of Material) การระบุสมบัติของวัสดุสามารถกระทำได้เป็นกลุ่มเอลิเมนต์ หรือการแยกระบุแต่ละเอลิเมนต์ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะปัญหาโดเมนที่ต้องการวิเคราะห์ ตัวอย่างเช่น โมดูลัสสภาพความยืดหยุ่น (Young's Modulus) และโมดูลัสแรงเฉือน (Shear Modulus) ต้องการสำหรับการวิเคราะห์ความเค้นของวัตถุเกรงหรือโครงสร้าง ในขณะที่สัมประสิทธิ์การนำความร้อนต้องการสำหรับการวิเคราะห์ทางความร้อน เป็นต้น การระบุสมบัติของวัสดุกระทำในขั้นตอน Pre - Process

- เงื่อนไขขอบและแรง (Boundary and Loading Condition) เงื่อนไขของขอบและแรงมีบทบาทสูงต่อการประมวลผลของการจำลองโมเดล การกำหนดกระทำได้โดยง่ายในขั้นตอน Pre – Process โดยการใช้ UGI (User Graphics Interface) ผู้ใช้สามารถระบุขอบเขตและแรงที่รูปร่างต้องการกำหนด (จุด เส้น หรือ โค้ง ผิวด หรือวัตถุแรง) หรือการระบุที่เอลิเมนต์หรือโหนด

2) การจำลองโมเดล (Simulation)

- ระบบแบ่งแยกสมการ (Discrete System Equation) บนพื้นฐานการสร้างตาข่าย (Mesh) สามารถสร้างระบบสมการไปพร้อม ๆ กัน การเข้าใกล้สำหรับการจัดตั้งสมการ การเข้าถึงแรกบนพื้นฐานของหลักการพลังงาน (Energy Principles) เช่น หลักการ Hamilton หรือ หลักการพลังงานเป็นไปได้อย่างดี

- การหาคำตอบของสมการ (Equation Solvers) หลังจากโมเดลได้คำนวณถูกต้องแล้ว จากนั้นหาคำตอบของระบบที่ถูกแบ่งย่อยเอลิเมนต์ด้วยโหนดของ Mesh สำหรับการประมวลผลขึ้นอยู่กับซอฟต์แวร์วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ เนื่องจากแต่ละซอฟต์แวร์วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์มีวิธีการขั้นตอน (Algorithms) ของการหาคำตอบที่แตกต่างกัน

3) การแสดงผล (Visualization) ผลลัพธ์แสดงออกมาหลังจากการแก้ปัญหาของระบบสมการ ซึ่งปกติมีปริมาณขนาดใหญ่ของข้อมูลดิจิทัล ผลลัพธ์ต้องแสดงผลที่ง่ายต่อการสอดแทรกวิเคราะห์ และนำเสนอ การแสดงผลมีในขั้นตอนของ Post – Processor ซึ่งสามารถแสดงผลเป็น 3 มิติ ในรูปแบบที่สะดวกสบายและมีสีสัน วัสดุสามารถแสดงผลรูปโครงสร้างตาข่าย กลุ่มของเอลิเมนต์ และกลุ่มของโหนด ส่วนการวิเคราะห์ก็สามารถวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ความเค้น ความเครียด และความร้อน เป็นต้น ทั้งขึ้นอยู่กับข้อกำหนดการวิเคราะห์ Pre – Processor

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.7.1 S.Syahrullai [7] และ คณะ ได้ทำการศึกษาลักษณะการไหลตัวของแท่งบิลเล็ทกับสารหล่อลื่นประเภทน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ โดยทำการอัดขึ้นรูปวัสดุแท่งบิลเล็ทอะลูมิเนียมผสม AA 5083 โดยทำการศึกษาสารหล่อลื่นน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ เทียบกับน้ำมันแร่พาราฟิน VG460 ซึ่งเป็นสารหล่อลื่นกึ่งของเหลว ศึกษาถึงความเครียด ที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานหลังจากการอัดขึ้นรูป พบว่าน้ำมันแร่พาราฟิน VG460 ซึ่งเป็นสารหล่อลื่นที่มีความหนืดสูง มีความสามารถในการลดความเสียหายในกระบวนการซึ่งความเสียหายดังกล่าว นั้น เป็นข้อจำกัดของการอัดขึ้นรูป แต่เมื่อพิจารณาถึงคุณภาพชิ้นงานที่ได้รับ โดยพิจารณาจากความหยาบผิวที่เกิดขึ้น พบว่าสารหล่อลื่นทั้ง 2 ชนิดไม่มีความแตกต่างกันมากนัก

2.4.2 Dyi-Cheng Chen [8] และคณะ ได้ใช้ซอฟต์แวร์ Deform 3D วิเคราะห์กระบวนการเปลี่ยนรูปถาวร (Plastic deformation) ของ ชิ้นงานอะลูมิเนียมผสม A6062 ในกระบวนการอัดขึ้นรูปเย็น แบบไหลตาม โดยสมมุติให้ ดาย และ คอนเทนเนอร์ เป็นของแข็ง เพื่อวิเคราะห์การกระจายตัวของ ความเค้น, ความเครียด, การไหลตัวของชิ้นงาน, และการกระจายตัวของความเสียหาย สังเกตความสัมพันธ์ระหว่างมุมของดาย 10° - 35° และ ความเสียหาย (m) ผลของการจำลองไฟไนติเมนต์ พบว่า แรงอัดจะเพิ่มขึ้นเมื่อมุมของดาย องศาเพิ่มขึ้น ความเครียดเพิ่มขึ้นจากอัตราของแรงอัดเพิ่มขึ้น ความเค้นในชิ้นงานเพิ่มขึ้น และการไหลตัวของชิ้นงานลดลง จากมุมของดายที่ลดลง

2.4.3 Celio Caminaga [9] และคณะ ได้ศึกษาสารหล่อลื่นทางเลือก คือ น้ำมันแร่ และ น้ำมันสังเคราะห์ 3 ชนิด ใช้ในกระบวนการอัดขึ้นรูป ชิ้นงานเหล็ก

- 1) ตัวแปรทั้งหมดที่ศึกษา ชนิดสารหล่อลื่น การอบชุบผิวชิ้นงาน การเก็บผิวละเอียดวิธีการหล่อลื่น มีอิทธิพล ต่อแรงอัดขึ้นรูป
- 2) น้ำมันที่เหมาะสมที่สุด ที่จะนำมาแทน สารหล่อลื่นสังเคราะห์ที่มี สังกะสี ฟอสเฟส เนื่องจาก ค่าเฉลี่ยของแรงอัดที่ใช้ 82.3 KN จากการทดสอบหลายครั้ง
- 3) แรงที่ใช้อัดต่ำได้มาจากการทดลองกับเหล็กอบอ่อน และ คุณสมบัติทางกายภาพของสารหล่อลื่น แสดงให้เห็นว่า สภาพาทดลอง ชั้นฟิล์มของสารหล่อลื่น อยู่ระหว่าง สองส่วน คือ ชิ้นงาน และ ดาย

2.4.4 Rajesh M และคณะ [10] ได้ศึกษาการ friction factor (m) โดยใช้กระบวนการแหวนอัด Ring compression test ของวัสดุ Al-5Zn-1Mg ใช้สารหล่อลื่นเป็น แกรไฟต์ และ ผงโมลิบดีนัมไดซัลไฟ ซึ่ง ความเสียหายนั้นมี 2 ชนิด 1.แรงเสียหายเลื่อน 2.แรงเสียหายแบบติด ซึ่งทั้งสองแบบสามารถแสดงปริมาณความเสียหายได้ 2 คือ แบบสัมประสิทธิ์ความเสียหาย friction coefficient (μ) และ ตัวแปรความเสียหาย friction factor (m) แต่สำหรับ friction factor (m) มีประโยชน์กว่า friction coefficient (μ) สามารถการแปลผลกลับได้ง่ายความเสียหาย ในด้านอื่น friction factor (m) เป็นอิสระจากความเค้นปกติ นอกจากนี้ ยังง่ายในการวัดค่า และวิเคราะห์แรงจากการคำนวณทางคณิตศาสตร์ สำหรับกระบวนการขึ้นรูปโลหะ ซึ่งในปัจจุบันการศึกษาพยายามศึกษา friction factor, m, ของวัสดุ Al-5Zn-1Mg โดยใช้กระบวนการแหวนอัด โดยเครื่องเพลส 40 Ton Universal testing machine กับสารหล่อลื่น แกรไฟต์ และ ผงโมลิบดีนัมไดซัลไฟด์ ที่อุณหภูมิ 303-673 เคลวิน ผลการทดลอง ในสภาพแวดล้อมที่ ความร้อนสูงนั้น สารหล่อลื่นที่เป็นน้ำมัน ไม่สามารถใช้ได้ สรุปจากการทดลองหลายความร้อน แกรไฟต์ให้คุณสมบัติที่ดีกว่า ผงโมลิบดีนัมได

ซัลไฟ โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่อุณหภูมิสูง ให้แรงเสียดทานที่ต่ำ การสึกหลอของชิ้นส่วนน้อย เพิ่มระยะเวลาการให้ พันคาย และ อุปกรณ์ได้มากขึ้น

2.4.5 Vesna MANDIC และ คณะ [11] ได้ศึกษาความเสียดทานและประยุกต์ใช้กระบวนการ Ring compression โดยงานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อ หาความเสียดทานที่เชื่อถือได้ของการทดลองกับวัสดุและ กระบวนการขึ้นรูปโลหะ โดยใช้ประโยชน์ แบบจำลองทางโลหะ โดยชุดของการทดลอง ใช้การกดด้วยแรงใดๆ กระทำต่อ ชิ้นงานแหวนอัด โดย เปลี่ยนไปตามชนิดของวัสดุคืบ และชนิดของสารหล่อลื่น ตามแผนการทดลอง สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน จะหาโดยการเทียบ กับ friction factor calibration curve ซึ่งแสดงในงานวิจัยนี้ ซึ่งวัสดุ ลักษณะ ทาง static และ dynamic เหมือนกันกับ โลหะ และ โลหะผสม เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงใช้ในการจำลอง จะทำในกระบวนการขึ้นรูปร้อนเท่านั้น โดยได้ผลมาจากการทดลอง ผลของสารหล่อลื่นทั้งสองชนิด ถูกแยก การทดลองมีพอเพียง ทางกายภาพ ของการขึ้นรูปเหล่านี้ ซึ่งมีความเที่ยงตรงในการเลือกสารหล่อลื่น ให้เหมาะสมกับ กระบวนการขึ้นรูปร้อนสำหรับ สำผัสพื้นผิวของชิ้นงานแหวนอัด และ พื้นกด สรุปได้ว่าวาสลิไนใช้เป็นสารหล่อลื่น สามารถลดความเสียดทานได้น้อยที่สุด เทียบ กับสารหล่อลื่น Talc และ Glycerin ความเสียดทาน อ้างอิงจากการจำลอง ซึ่งมีการบันทึก ส่วนของเครื่องมือที่ใช้เป็นแก้ว โปร่งใส ซึ่ง วาสลิไน ให้สัมประสิทธิ์ของความเสียดทานน้อยที่สุด

2.4.6 B.P.A. Gouveia และ คณะ [12] ได้ศึกษาจำลองแบบไฟไนเอลิเมนต์ โดยกระบวนการอัดขึ้นรูปเย็น โดยสรุปได้ว่า การจำลองไฟไนเอลิเมนต์ การขึ้นรูปโลหะ ล่าสุด ใช้สูตรไฟไนเอลิเมนต์ Lagrangian ไม่เหมาะสม เมื่อสภาวะการไหลสม่ำเสมอ ในครั้งแรก การคำนวณซ้ำเชิงเส้น ของไฟไนเอลิเมนต์ ต้องการความต่อเนื่องของตาข่าย (mesh) และมีการสร้างตาข่ายใหม่ ที่ละเอียดขึ้นจำเป็นต้องเข้าใจ กระบวนการสร้างตาข่ายซ้ำ และ หลีกเลี่ยงการสร้างตาข่ายผิดรูป ที่มากเกินไป ในการศึกษา Eulerian-Lagrangian ซึ่งครอบคลุมพื้นที่เหล่านี้ ทำให้ยาก อาจมีการเพิ่มตาข่ายชั่วคราว และคำนวณความเค้น และ ความเครียด คู่กับการคำนวณทางคณิตศาสตร์ คำนวณในแต่ละส่วนที่เกี่ยวข้อง และแก้ไขซ่อมตาข่าย ซึ่งในงานวิจัยนี้ ได้วิเคราะห์กระบวนการอัดขึ้นรูป ชิ้นงานทรงกระบอก โดยทำข้อมูลสูตรให้ทันสมัย ทั้ง Lagrangian และรวม Eulerian-Lagrangian ไฟไนเอลิเมนต์ โดยมีภูมิหลังเป็น ทฤษฎี สำหรับการทบทวนสูตร และค่าผลที่ได้ จากทั้งสองสูตร เปรียบเทียบกับข้อมูลของการทดลองชิ้นงานจริง ข้อมูลที่ดีที่สุด คือ ข้อมูลลักษณะการไหล และการกระจายของ ความเครียด และ พื้นที่การเปลี่ยนรูปถาวร และส่วนที่

เกี่ยวข้องกับ กราฟของแรงอัดขึ้นรูป ผลแสดงให้เห็น ส่วนของครึ่งหลังสามารถพยากรณ์ การสะสม
ตัวของความเครียด โดยใช้สูตรรวม Eulerian-Lagrangian ไฟไนต์เอลิเมนต์

พื้นฐาน ของข้อมูลใหม่ Lagrangian และ การรวมของสูตร Eulerian-Lagrangian ได้คำนวณหา ปัญหาการขึ้นรูป
โดยการทดสอบครอบคลุม ทั้งสองสูตร แสดงทั้ง ผลการคำนวณ และ การวิเคราะห์การทดลอง ของการอัดขึ้น
รูปเย็น ของโลหะทรงกระบอก แรงอัดขึ้นรูป และ วัสดุในพื้นที่การเปลี่ยนรูปถาวร ด้วยการจำลอง โดยใช้ทั้ง
สองสูตร เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลอง ซึ่ง แรงเสียดทานประมาณ มีความแม่นยำดี ใช้กับสูตร Eulerian-
Lagrangian ไฟไนต์เอลิเมนต์ ข้อมูลของสูตร Lagrangian นำไปสู่ สิ่งที่ไม่ต้องการ การส่ายของข้อมูล langragian
การคำนวณแรงอัดขึ้นรูป เพราะฉะนั้น การเพิ่มขึ้นของสูตร ไม่สามารถนำไปตัดสินใจ ในการวิเคราะห์ ความ
เสียดทาน ผิวในของแม่พิมพ์ได้

2.4.7 Celio Caminaga และคณะ [13] ได้ศึกษาสารหล่อลื่นทางเลือก การอัดขึ้นรูปเย็น เหล็กกล้าเพื่อ
เสนอ สารหล่อลื่นทางเลือก ช่วยในกระบวนการอัดขึ้นรูปเย็น โดยทดลองกับสารหล่อลื่น 4 ชนิด น้ำมันแร่
น้ำมันกึ่งสังเคราะห์ ผงสบู่ และ แป้งสาลี โดย การใช้การจุ่มเพื่อการหล่อลื่น

จุดประสงค์ ของงานวิจัยนี้เพื่อปรับปรุงสารหล่อลื่นทางเลือก ของกระบวนการอัดขึ้นรูปเย็น
โดยใช้สารหล่อลื่นช่วย ซึ่งมีพิษต่อสภาพแวดล้อมน้อย ซึ่งให้ผลเหมือนกันกับชิ้นงานในอุตสาหกรรมที่ใช้
สารหล่อลื่นปกติ ซึ่งยังคงไว้ใน แรงอัดขึ้นรูป และ คุณภาพของผลิตภัณฑ์ หลังจากวิเคราะห์สารหล่อลื่น 4
ชนิด มี น้ำมันแร่ น้ำมันกึ่งสังเคราะห์ ผงสบู่ และ แป้งสาลี ใช้สองวิธีการที่ใช้หล่อลื่น สถิติที่เกิดขึ้นใน
การหล่อลื่น ได้มาจากผลการทดลอง ในบางกระบวนการ สามารถ ใช้สารหล่อลื่นธรรมดาที่ใช้ใน
อุตสาหกรรม แทนได้ มีการเสนอ ผลของแรงอัดขึ้นรูป และคุณสมบัติ ที่เหมือนกันกับที่ได้มาจาก
อุตสาหกรรม ตามธรรมชาติของ สารหล่อลื่นนั้น พบว่าในการเปลี่ยนรูป ในสถานีแรกนั้นสารหล่อลื่นที่ดีที่สุดที่
คือแป้งสาลี ส่วน สถานี ที่ สอง นั้นสารหล่อลื่นที่ดีที่สุดคือ น้ำมันแร่

บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย

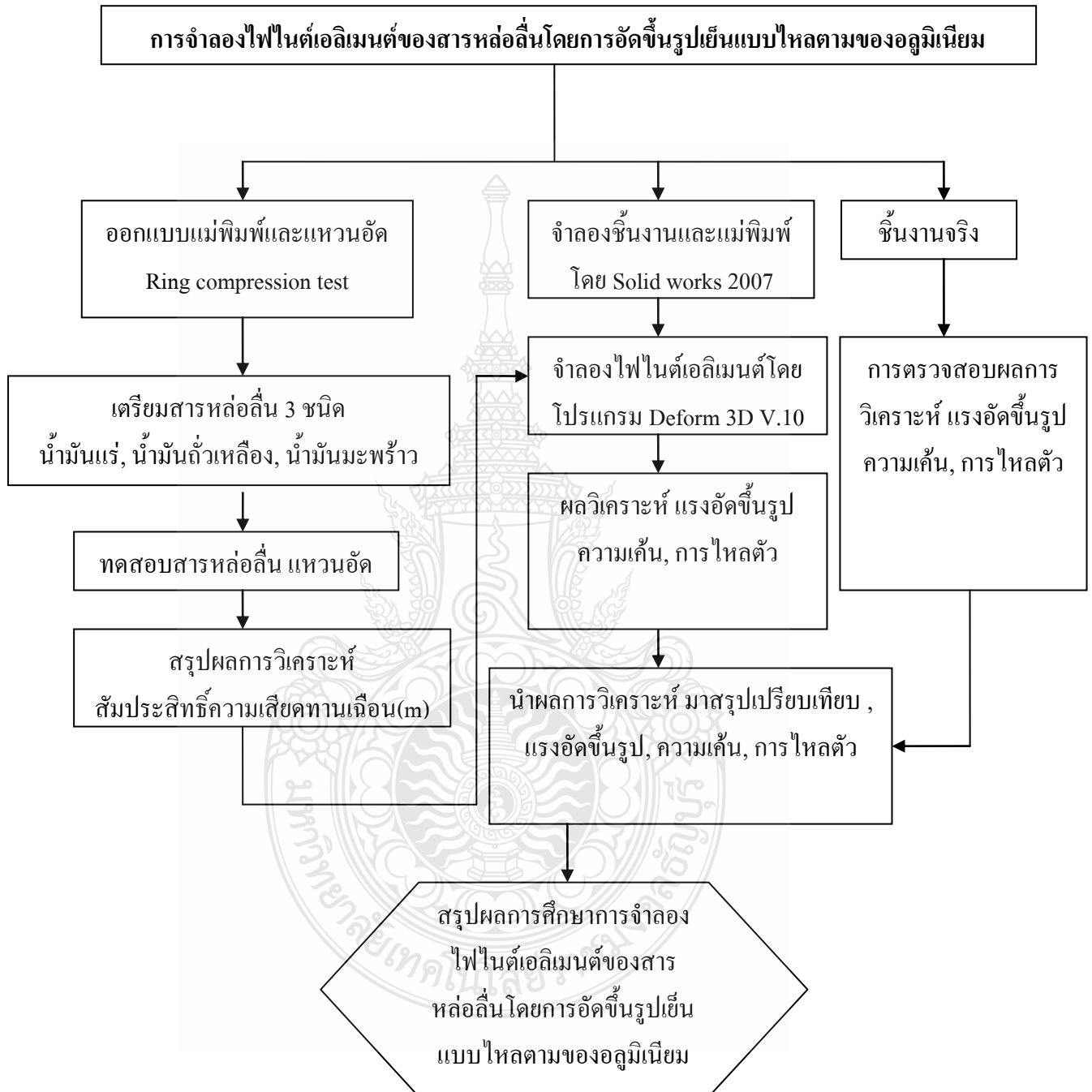
ในการทำวิทยานิพนธ์ทางผู้จัดทำได้ศึกษาค้นคว้าหาข้อมูลต่างๆ และศึกษาจากงานวิจัยที่ผ่านมาในอดีตและได้จัดทำวิทยานิพนธ์เรื่อง “การจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของสารหล่อลื่นโดยการอัดขึ้นรูปเย็นแบบไหลตามของอะลูมิเนียม” ซึ่งเป็นการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ การอัดขึ้นรูปเย็นแบบไหลตาม นั้น คายมีขนาดองศา ตั้งแต่ 20° , 25° , 30° ตามลำดับ และใช้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเหมือนหลังจากการ ทำการทดลองแหวนอัดในสารหล่อลื่นแต่ละชนิด เป็นพารามิเตอร์สำคัญ ในการวิเคราะห์เพื่อความถูกต้อง ผู้จัดทำวิทยานิพนธ์จึงได้วางแผนการดำเนินงานของโครงการเพื่อให้สามารถวางแผนระยะเวลาในการทำวิทยานิพนธ์ดังต่อไปนี้

3.1 แผนการดำเนินงาน

ในการจัดทำโครงการการวิเคราะห์การไหลตัวของแท่งอะลูมิเนียมในกระบวนการอัดขึ้นรูปเย็นแบบไหลตามโดยการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ได้เริ่มจากการศึกษาข้อมูลและหารายละเอียดต่างๆเกี่ยวกับการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ และนำค่าที่ได้จากการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์มาเปรียบเทียบกับ การศึกษาและพัฒนากระบวนการอัดขึ้นรูปเย็นแบบไหลตามของวัสดุอะลูมิเนียมในประเทศไทย จากงานวิจัยของ วิสุทธิ์ ยี่โถ [14]

การดำเนินงานจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกดำเนินการอัดขึ้นรูปชิ้นงานจริง โดยอ้างอิงข้อมูลจากวิทยานิพนธ์ การศึกษาและพัฒนากระบวนการอัดขึ้นรูปเย็นแบบไหลตามของวัสดุอะลูมิเนียมในประเทศไทย โดยนำข้อมูลของแรงในการอัดขึ้นรูป การไหลตัว และความแข็งที่ได้จากการขึ้นรูปโดยใช้สารหล่อลื่นเป็นน้ำมันแร่ น้ำมันมะพร้าว น้ำมันถั่วเหลือง และไม่ใช้สารหล่อลื่น มาทำการเปรียบเทียบ ส่วนที่สองเป็นการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กระบวนการอัดขึ้นรูปเย็นแบบไหลตาม ของวัสดุ A11100, A12011, A16063 และนำผลการวิเคราะห์ ที่ได้มาทำการเปรียบเทียบกัน ซึ่งในที่นี้จะต้องคำนึงถึงค่าต่างๆที่นำมาเปรียบเทียบ เพื่อเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของโครงการ และทำการหาข้อมูลต่างๆเกี่ยวกับการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยมีการวางแผนและการเตรียมการไว้ในตารางรายละเอียดและขั้นตอนต่างๆ ดังรูปที่ 3.1

3.2 วิธีดำเนินงานและวางแผน



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวางแผนและเตรียมการ

3.3 วัสดุที่นำมาใช้ขึ้นรูปทดสอบกระบวนการแหวนอัด

วัสดุที่จะนำมาใช้ในกระบวนการแหวนอัด เพื่อทดสอบสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเฉือนนั้น มีความจำเป็นต้อง มีคุณสมบัติเดียวกับวัสดุที่ใช้ในการ อัดขึ้นรูปชิ้นงานจริง เพื่อให้ผลการทดสอบ กระบวนการอัดขึ้นรูป ได้ผลที่ได้ถูกต้องที่สุด โดยมีรายละเอียดของคุณสมบัติวัสดุดังนี้

3.3.1 อะลูมิเนียม (Al 1100) ตาม International Organization Standard (ISO)

อะลูมิเนียมชนิดนี้เป็นอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ ซึ่งสามารถนำไปใช้ในงานปรับปรุง คุณสมบัติการกัดกร่อนและง่ายต่อการขึ้นรูปตามความต้องการซึ่งคุณสมบัติของความแข็งแรงจะ ลดลง เช่น ภาชนะบรรจุอาหารและสารเคมี สามารถนำไปขึ้นรูป ในลักษณะของหลอดเพื่อใช้งาน ต่างๆ

3.3.2 อะลูมิเนียม (Al 2011) ตาม International Organization Standard (ISO)

อะลูมิเนียมชนิดนี้เป็นอะลูมิเนียมผสมทองแดง ซึ่งสามารถนำไปใช้งานทำพวกสกรู ใช้เพิ่มคุณสมบัติในการกระทำด้วยเครื่องจักรและเพิ่มความแข็งแรงเป็นต้น

3.3.3 อะลูมิเนียม (Al 6063) ตาม International Organization Standard (ISO)

อะลูมิเนียมชนิดนี้เป็นอะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียมและซิลิกอน ซึ่งสามารถนำไปใช้ งานในการทำราวรั้ว อานม้า ประตู หน้าต่าง กระบะรถบรรทุก รถกระบะ และท่อน้ำเป็นต้น [4]

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมีของอะลูมิเนียมตามมาตรฐาน International Standard Organization (ISO)

ธาตุ	ปริมาณองค์ประกอบทางเคมี		
	อะลูมิเนียม เกรด 1100	อะลูมิเนียม เกรด 2011	อะลูมิเนียม เกรด 6063
Al	99.00	91.2-94.6	97.5
Si	1.00	0.40	0.20-0.60
Fe	1.00	0.70	0.35
Mn	0.05	-	0.10
Zn	0.1	0.30	0.10
Cu	0.05-0.20	5.00-6.00	0.10
Pb	-	0.20-0.60	-
Ti	-	-	0.10

ธาตุ	ปริมาณองค์ประกอบทางเคมี		
	อะลูมิเนียม เกรด 1100	อะลูมิเนียม เกรด 2011	อะลูมิเนียม เกรด 6063
Mg	-	-	0.45-0.90
Cr	-	-	0.10
Other	0.05	0.05	0.05

3.4 เครื่องมือและวัสดุอุปกรณ์

เครื่องมือที่ใช้ในทดสอบ โดยใช้เครื่องปั๊มโลหะของภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ที่มีขนาด 80 ตัน และแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปเย็นอลูมิเนียม

3.2.1 เครื่องปั๊มโลหะขนาด 80 ตัน

เครื่องปั๊มโลหะเป็นเครื่องจักรที่รวมแม่พิมพ์เข้าไว้ 2 แม่พิมพ์ หรือมากกว่านั้น ถูกออกแบบเพื่อมุ่งหมายขึ้นรูปวัสดุที่วางอยู่ระหว่างแม่พิมพ์ โดยที่แม่พิมพ์เคลื่อนที่เข้าหากันด้วยการใช้กำลังที่แรงไปยังวัสดุซึ่งเป็นผลให้เกิด แรงปฏิกิริยาโต้ตอบจากแรงที่ใช้ไปยังวัสดุที่อยู่ระหว่างแม่พิมพ์ ซึ่งรองรับด้วยแท่นของเครื่อง ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 เครื่องปั๊มโลหะขนาด 80 ตัน ของภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

3.2.2 แม่พิมพ์อัดขึ้นรูปเยื่อลูมิเนียม ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แม่พิมพ์อัดขึ้นรูปอลูมิเนียม

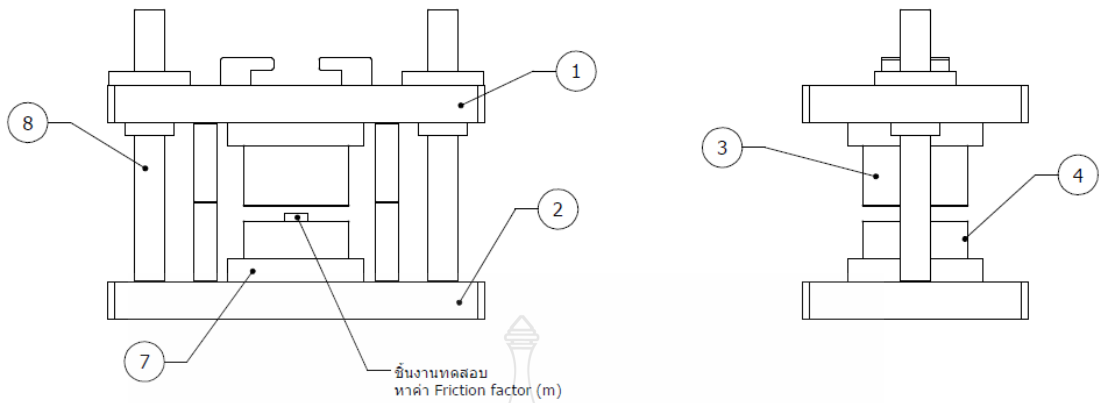
3.4.3 แม่พิมพ์สำหรับทดสอบ สัมประสิทธิ์ความเสียดทานเฉือน

การทดสอบแหวนอัดนั้น มีจุดประสงค์เพื่อทดสอบสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเฉือน (m) [15] เพื่อใช้เป็นพารามิเตอร์ส่วนหนึ่งของกระบวนการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์การอัดขึ้นรูปแบบไหลตาม อะลูมิเนียม โดยการทดสอบสารหล่อลื่น น้ำมันแร่ น้ำมันมะพร้าว น้ำมันถั่วเหลือง และไม่ใช้สารหล่อลื่นตามลำดับ

3.4.1 แม่พิมพ์ทดสอบแหวนอัด

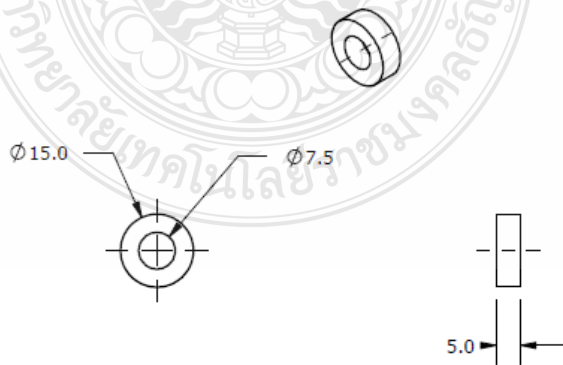


รูปที่ 3.4 แม่พิมพ์แหวนอัดขณะติดตั้งบนเครื่อง ปั้นโลหะ



ITEM NO.	PART NUMBER	DESCRIPTION	QTY.
1	UPPER PLATE	S45C	1
2	LOWER PLATE	S45C	1
3	PUNCH	SUS304	1
4	DIE	SUS304	1
5	shank holder	S45C	2
6	Ring	AL1100 ,AL2011 ,AL6063	9
7	PUNCH DIE HOLDER	S45C	2
8	VFAA20-180-F20-P15-M6-N6	Standard	2
9	LHFRF20	LM GUIDE	2
10	STOPPER	SUS304	4

รูปที่ 3.5 รูปแสดงส่วนประกอบของแม่พิมพ์แหวนอัด



อลูมิเนียมเกรด
 1. AL 1100
 2. AL 2011
 3. AL 6063

รูปที่ 3.6 แบบขนาดชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบ Ring compression test.

20%

30%

40%

50%



รูปที่ 3.7 รูปแสดงชิ้นงานหลังทดสอบ Ring compression test.

3.4.2 ขั้นตอนการในการทดลอง

เป็นวิธีในการดำเนินงาน เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเฉือน ให้มีความถูกต้องนั้นมีความจำเป็นต้องเตรียม ขั้นตอนการปฏิบัติชัดเจน เพื่อที่จะได้ดำเนินการทดลองโดยไม่มีข้อผิดพลาด ลดการสูญเสียเวลาและวัสดุ โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 1) นำชิ้นงานแหวนอัด ที่ผ่านการกลึงตามแบบมาแล้วมาแบ่งเป็น 4 กลุ่ม 1.ไม่ใช้สารหล่อลื่น, 2.น้ำมันแร่, 3.น้ำมันมะพร้าว, 4.น้ำมันถั่วเหลือง
- 2) กลุ่มที่ 1 ไม่ใช้สารหล่อลื่น วัสดุ AI 1100 วางบนคาน กดด้วยเครื่องไฮดรอลิกเพรส จนถึงตำแหน่งความสูงลดลง 20% กดอัดจนชิ้นงานในกลุ่มที่ 1 ครบทุกชิ้น
- 3) กลุ่มที่ 1 ไม่ใช้สารหล่อลื่น วัสดุ AI 2011 วางบนคาน กดด้วยเครื่องไฮดรอลิกเพรส จนถึงตำแหน่งความสูงลดลง 20% กดอัดจนชิ้นงานในกลุ่มที่ 1 ครบทุกชิ้น
- 4) กลุ่มที่ 1 ไม่ใช้สารหล่อลื่น วัสดุ AI 6063 วางบนคาน กดด้วยเครื่องไฮดรอลิกเพรส จนถึงตำแหน่งความสูงลดลง 20% กดอัดจนชิ้นงานในกลุ่มที่ 1 ครบทุกชิ้น
- 5) กลุ่มที่ 2 ใช้ น้ำมันแร่เคลือบผิวแหวนอัดก่อนการทดสอบ วัสดุ AI 1100 วางบนคาน กดด้วยเครื่องไฮดรอลิกเพรส จนถึงตำแหน่งความสูงลดลง 20% กดอัดจนชิ้นงานในกลุ่มที่ 1 ครบทุกชิ้น
- 6) กลุ่มที่ 2 ใช้ น้ำมันแร่เคลือบผิวแหวนอัดก่อนการทดสอบ วัสดุ AI 2011 วางบนคาน กดด้วยเครื่องไฮดรอลิกเพรส จนถึงตำแหน่งความสูงลดลง 20% กดอัดจนชิ้นงานในกลุ่มที่ 1 ครบทุกชิ้น
- 7) กลุ่มที่ 2 ใช้ น้ำมันแร่เคลือบผิวแหวนอัดก่อนการทดสอบ วัสดุ AI 6063 วางบนคาน

กดด้วยเครื่องไฮดรอลิกเพรส จนถึงตำแหน่งความสูงลดลง 20% กดอัดจนชิ้นงานในกลุ่มที่ 1 ครบทุกชิ้น

8. ก่อนการเปลี่ยนสารหล่อลื่นให้ทำการล้างแม่พิมพ์ด้วย IPA เพื่อป้องกันสารหล่อลื่นปนเปื้อนกันระหว่างกลุ่ม เพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้อง

9) การทดสอบจะทำซ้ำกัน ทุกชิ้นงานแหวนอัด ทุกสารหล่อลื่น และ ระดับเปอร์เซ็นต์ของการลดความสูง 30%, 40%, 50% ตามลำดับจนครบ

10) หลังจากทดสอบครบ ทั้งสารหล่อลื่น และ ชนิดของวัสดุให้นำชิ้นงานแหวนอัดทำการล้างทำความสะอาดด้วย IPA แล้วปล่อยให้แห้ง

11) นำชิ้นงานแหวนอัดแต่ละกลุ่มไปวัดความสูงที่ลดลงโดยไมโครมิเตอร์ แล้วบันทึกค่าลงในตารางที่เตรียมไว้ จนครบทุกกลุ่ม

11) นำชิ้นงานแหวนอัดแต่ละกลุ่มไปวัดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในที่ลดลงโดยสไมดโคบ แล้วบันทึกค่าลงในตารางที่เตรียมไว้ จนครบทุกกลุ่ม

12) นำผลการวัดชิ้นงานแหวนอัดของทุกกลุ่มมาคำนวณ หาเปอร์เซ็นต์ของความสูงที่ลดลง และเปอร์เซ็นต์ของเส้นผ่าศูนย์กลางภายในที่ลดลง

14) นำผลเปอร์เซ็นต์ความสูงที่ลดลง และ เปอร์เซ็นต์เส้นผ่าศูนย์กลางที่ลดลง นำไปพล็อตลงใน Friction Factor calibration curve.

3.4.3 ขั้นตอนในการคำนวณค่าก่อนพอดลงใน Friction factor calibration curve

1) จากอัตราส่วนชิ้นงาน 6:3:2 ขนาดของชิ้นงานได้ดังนี้

- เส้นผ่าศูนย์กลางนอก 15 มิลลิเมตร
- เส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 7.5 มิลลิเมตร
- ความหนา 5 มิลลิเมตร

2) การหาเปอร์เซ็นต์การลดตัวของเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน และเปอร์เซ็นต์การลดลงของความสูงชิ้นงานเมื่อผ่านการกดทดสอบ การไหลตัวของวัสดุทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของเส้นผ่าศูนย์กลางในของชิ้นงานทดสอบ อาจมีขนาดใหญ่ขึ้นหรือ ขนาดเล็กลง นั้นเกิดขึ้นจากการไหลตัวของวัสดุ ส่วนความสูงของวัสดุแน่นอนว่า ต้องต่ำลงหลังการกด ซึ่งก่อนที่จะนำค่าไปพล็อตลงใน Friction factor calibration curve นั้นต้อง คำนวณหาได้จากสูตรต่างๆ ดังต่อไปนี้

$$\text{Reduction inner diameter} = (\sqrt{D_i}/D_i) \times 100 \quad (3.1)$$

∇D_i คือ ผลรวมของความแตกต่างระหว่างเส้นผ่าศูนย์กลางในเฉลี่ย

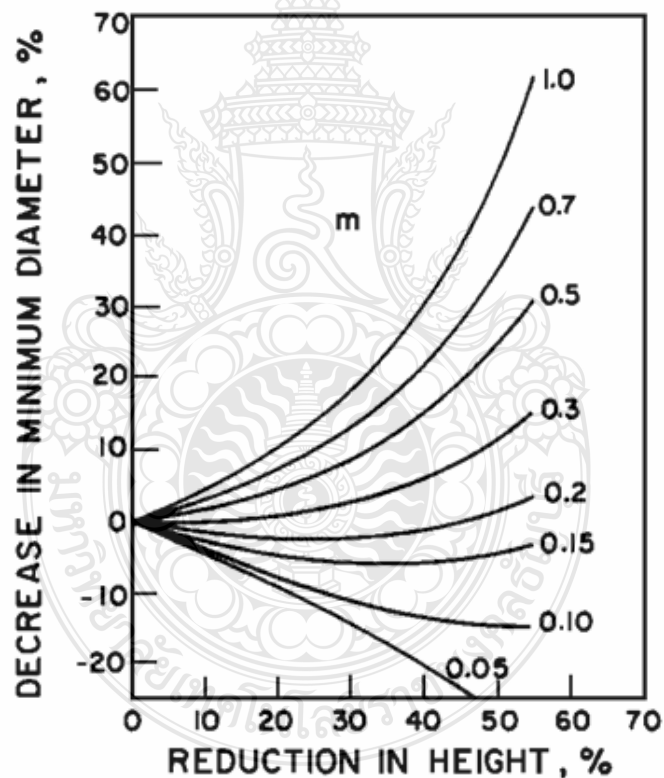
D_i คือ ผลรวมของเส้นผ่าศูนย์กลางในเฉลี่ย

$$\text{Reduction Height} = (\nabla H/H) \times 100 \quad (3.2)$$

∇H คือ ผลรวมของความแตกต่างระหว่างความสูงเฉลี่ย

H คือ ผลรวมของความสูงเฉลี่ย

3) เมื่อได้ค่าจากการคำนวณจึงนำไปพล็อตในตาราง Friction factor calibration curve ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.8 รูปแสดงกราฟ Friction factor calibration curve [10]

3.4.4 สารหล่อลื่นที่ใช้ในการทดสอบ

การเลือกสารหล่อลื่นที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการขึ้นรูป สารหล่อลื่นที่ใช้กันทั่วไปกับงานอัดขึ้นรูปมีหลายชนิด แต่ที่นำมาใช้ในการทดลอง คือ น้ำมันแร่ น้ำมันถั่วเหลือง และน้ำมันมะพร้าว ซึ่ง

จะนำผลจากการทดสอบมาเปรียบเทียบกันว่าสารหล่อลื่นชนิดไหนที่เหมาะสมการใช้งานอัดขึ้นรูป แสดงดังรูปที่ 3.8 [14]



(ก) น้ำมันแร่ (Sun's oil)



(ข) น้ำมันถั่วเหลือง



(ค) น้ำมันมะพร้าว

รูปที่ 3.9 สารหล่อลื่นที่ใช้ในการทดสอบ

3.5.2 วัสดุที่จะนำมาใช้ทำการผลิต

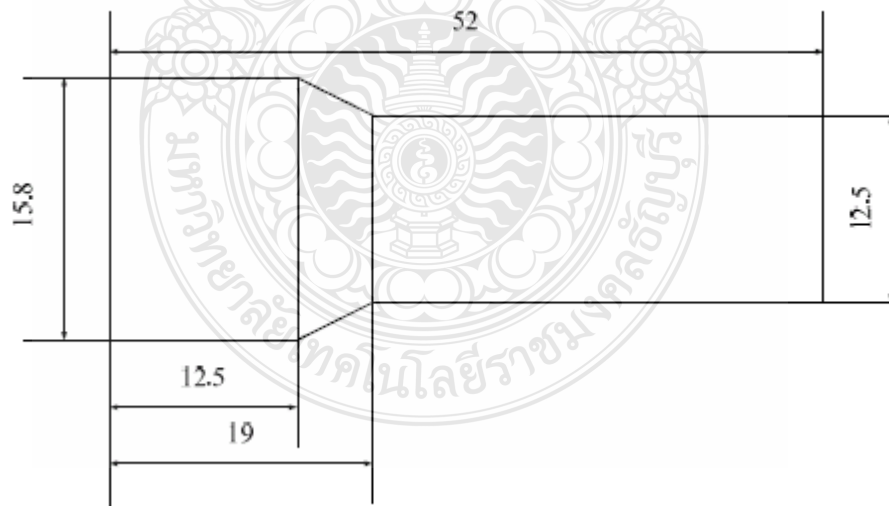
วัสดุที่ใช้ในการทดสอบครั้งนี้ใช้อะลูมิเนียมซึ่งอะลูมิเนียมมีคุณสมบัติพิเศษอย่างหนึ่งคือ มีน้ำหนักเบา มีความแข็งแรงอยู่ในเกณฑ์สูง มีคุณสมบัติทนต่อการกัดกร่อน ได้ดีในบรรยากาศทั่วไป ซึ่งอะลูมิเนียมที่นำมาใช้มี 3 ชนิด ดังนี้ A1 1100, A1 2011, A1 6063 โดยมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 15.8 มิลลิเมตร ในการทดลองดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.10 อะลูมิเนียมที่ใช้ในการผลิต

3.5.3 ขนาดชิ้นงานหลังขึ้นรูป

หลังจากผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูปแล้วชิ้นงานที่มีขนาด แสดงดังรูปที่ 3.10 [14]



รูปที่ 3.11 ชิ้นงานหลังจากการอัดขึ้นรูป

3.6 ขั้นตอนการดำเนินงาน

3.3.1 การดำเนินงานขึ้นรูปจริง

1) การเตรียมชิ้นงานทดสอบ

- ตัดชิ้นงานทดสอบขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 16 มม. ให้มีความยาวไม่น้อยกว่า 37 มม. ด้วยการเลื่อยมือ ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.12 ชิ้นงานที่เลื่อยเสร็จแล้ว

- ทำการกลึงปาดหน้าชิ้นงานให้เรียบโดยให้มีความยาวอยู่ที่ 37 มม. ชิ้นงานหลังการกลึงเสร็จมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 16 มม. โดยมีความยาวอยู่ที่ 37 มม. ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.13 ชิ้นงานทดสอบ

2) การประกอบและติดตั้งแม่พิมพ์

- แม่พิมพ์อัดขึ้นรูปเส้นอลูมิเนียม ดังรูปที่ 3.6

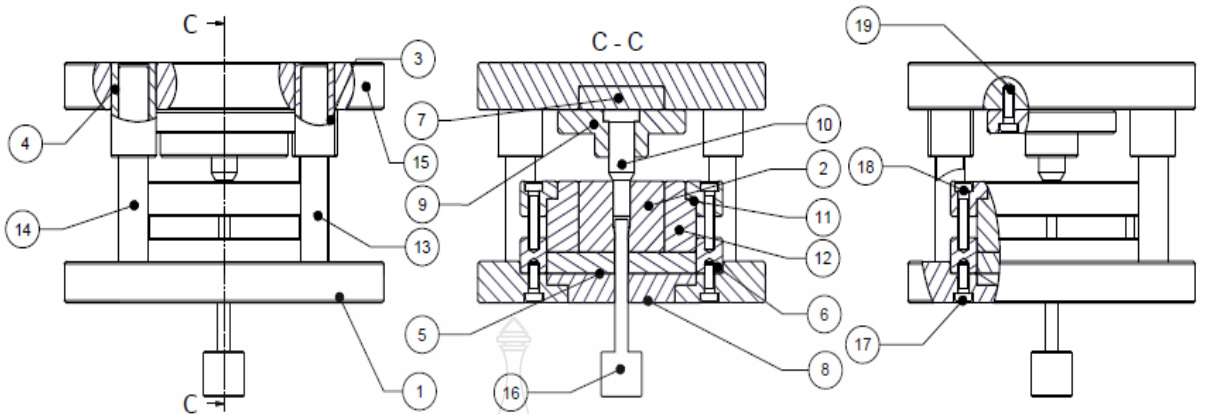
3.6.2 การประกอบแม่พิมพ์และคายของแม่พิมพ์

แม่พิมพ์อัดขึ้นรูปเย็นนั้นสร้างขึ้นให้ใช้งานในการอัดขึ้นรูปเย็นแบบไหลตาม โดยที่แม่พิมพ์ทำจากเหล็ก SKD11 และ S45C เป็นส่วนใหญ่ สำหรับส่วนประกอบที่สำคัญของแม่พิมพ์ประกอบไปด้วย คายตัวล่าง (Lower Die) คายที่มุม 20 องศา มุม 25 องศา และมุม 30 องศา (Die insert, Guide Bush 25, Guide Bush 28, Intermediate Plate, Intermediate Plate out, Pressure Plate Punch, Pressure plate, Punch plate, Punch, Shrink Ring Out, Shrink Ring, Guide Post 25, Guide Post 28, Upper Die และ Ejector แสดงดังรูปที่ 3.17

ตารางที่ 3.2 ชิ้นส่วนแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปเย็น

ชิ้นที่	รายการ	วัสดุ	ขนาด	จำนวน/ชิ้น
9	Punch Plate	S45C	120x190x40	1
10	Punch	SKD11	Ø34x90	1
11	Shink Ring Out	St37	Ø190x30	1
12	Shing Ring	S45C	Ø140x60	1
13	Guide Post 25	S45C	Ø25x200	2
14	Guide Post 28	S45C	Ø28x200	2
15	Upper Die	S45C	270x300x40	1
16	Ejector	S45C	Ø38x150	1
17	Socket Head Screw		M10x1.5x25	4
18	Socket Head Screw		M10x1.5x50	4
19	Socket Head Screw		M10x1.5x30	4

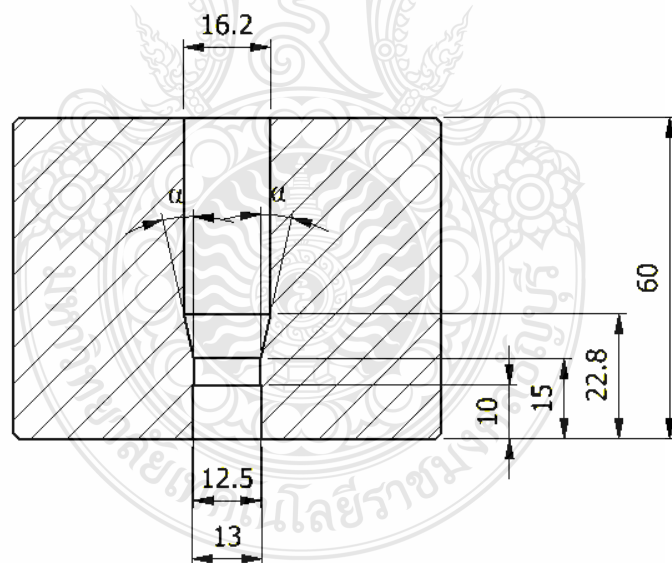
ส่วนประกอบของแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปเย็นอลูมิเนียม ดังตารางที่ 3.2



รูปที่ 3.14 ส่วนประกอบของแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปเย็นอลูมิเนียม

ขนาดของมุมคายที่ใช้ในการทดสอบการอัดขึ้นรูปเย็นแบบไหลตาม
 $2\alpha = 20$ องศา, $2\alpha = 25$ องศา และ $2\alpha = 30$ องศา ดังรูปที่ 3.14

3 มุม คือ



รูปที่ 3.15 คายของแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปเย็น

ชิ้นส่วนต่างๆของแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปเย็นอลูมิเนียม ดังตารางที่

3.7

ตารางที่ 3.2 ตารางแสดงชิ้นส่วนแม่พิมพ์

- ทำความสะอาดแม่พิมพ์ทั้งหมด
- นำ Ejector ไปใส่ใน Cushion ของเครื่อง ดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.16 Ejector

- นำแม่พิมพ์ชุดแม่พิมพ์ตัวล่างประกอบลงบนเครื่อง และนำ clamp มาล็อกแม่พิมพ์ให้แน่น ดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.17 แม่พิมพ์ชุดแม่พิมพ์ล่าง

- นำชุดแม่พิมพ์ตัวบน ไปสวมกับชุดแม่พิมพ์ตัวล่าง และยึดสกรูของชุดแม่พิมพ์ตัวบนให้แน่น ดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.18 แม่พิมพ์ชุดแม่พิมพ์บน

- นำแม่พิมพ์ที่ประกอบเสร็จแล้ว ไปติดตั้งบนเครื่องปั๊ม ยึดแม่พิมพ์ตัวบนและตัวล่างให้แน่น แล้วยกชุดบนขึ้น ดังรูปที่ 3.18



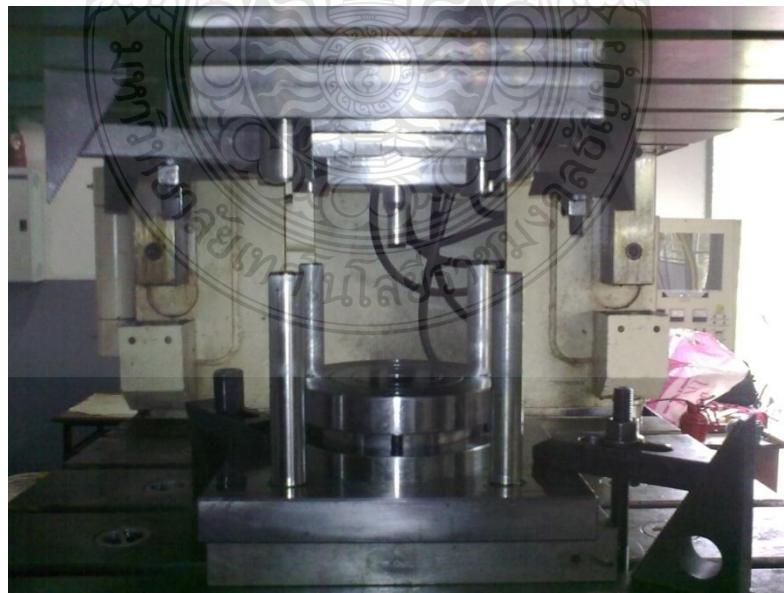
รูปที่ 3.19 การติดตั้งแม่พิมพ์บนเครื่องปั๊ม

- ปรับตั้ง (Limit switch) ตามความลึกของชิ้นงานในการขึ้นรูป ดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.20 การปรับตั้ง (Limit switch) เครื่องปั๊ม

- แม่พิมพ์พร้อมใช้งาน ดังรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.21 แม่พิมพ์พร้อมใช้งาน

3.6.3 ขั้นตอนการทดลอง [14]

เป็นวิธีในการดำเนินงาน เพื่อให้สามารถทำให้สามารถทำการอัดขึ้นรูปจนเป็นชิ้นงานสำเร็จได้ ซึ่งขึ้นอยู่กับความสามารถในการทำงานของแม่พิมพ์ว่ามีประสิทธิภาพในการผลิตชิ้นงานให้มีคุณภาพได้ดี เพียงใดการทำงานของแม่พิมพ์ว่ามีประสิทธิภาพในการผลิตชิ้นงานให้มีคุณภาพได้ดีเพียงใด หลังจากนั้นแก้ไขข้อบกพร่องและปรับปรุงคุณภาพได้ดีเพียงใด หลังจากแก้ไขข้อบกพร่องและปรับปรุงคุณภาพแม่พิมพ์ เพื่อให้ได้งานที่มากคุณภาพดี ตามต้องการ แสดงดังรูปที่ 3.20

- 1) นำเอาชิ้นงานที่เตรียมสำหรับทำการทดสอบใส่ลงปากตายในแม่พิมพ์
- 2) ทำการป้อนชิ้นงาน (ของแต่ละตัวแปร)
- 3) ทำการบันทึกผลนำชิ้นงานออกและตรวจสอบ
- 4) ทำตามขั้นตอนที่ 1-3 ซ้ำ จนครบทุกค่าตัวแปรตามที่กำหนดไว้
- 5) นำชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูปทุกชิ้น มาทำการวัดค่าความหยابของผิว แสดงดังรูปที่ 3.7 และนำมาเตรียมชิ้นงานสำหรับการทดสอบคูโครงสร้าง

- 6) ทำการผ่าครึ่งชิ้นงานทุกชิ้นของแต่ละตัวแปร
- 7) เมื่อผ่าครึ่งชิ้นงานแล้วนำมาหล่อเรซินเพื่อสามารถให้จับชิ้นงาน ได้สะดวกเวลาขัดกระดาษทราย แสดงดังรูปที่ 3.9 และ 3.10

- 8) ทำการขัดด้วยกระดาษทรายไล่เบอร์ตั้งแต่หยาบไปจนถึงละเอียดจากนั้นนำไปขัดมันด้วย

ผ้าสักหลาดโดยใช้ผงเพชรเป็นสารขัด

- 9) เมื่อขัดมันจนขึ้นเงาแล้วนำชิ้นงานทดสอบมาทดสอบที่ผสมไว้ (แล้วแต่ชนิดของอะลูมิเนียม)
- 10) ล้างออกด้วยแอลกอฮอล์และน้ำสะอาดแล้วเป่าชิ้นงานให้แห้งด้วยไดร์
- 11) นำไปส่องโครงสร้างด้วยกล้องไมโครสโคปแล้วบันทึกผล (ทำทุกๆ ชิ้นเหมือนกัน)
- 12) เมื่อส่องคูโครงสร้างครบทุกชิ้นแล้วนำชิ้นงานนั้น ไปทำการทดสอบความแข็งและบันทึกผล

- 13) นำค่าที่ได้ไปวิเคราะห์ผล

- 14) สรุปการทดลอง

3.6.4 วิธีการวัดผล

- แรงที่ใช้ในการอัดขึ้นรูป

บันทึกข้อมูลด้วยอุปกรณ์จัดเก็บสัญญาณ (Mini data logger) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการ
 จัดเก็บข้อมูล พื้นฐานของระบบ (Data logger) ประกอบไปด้วย scanner หรือ multiplexer digital-
 voltmeter และตัวบันทึกข้อมูล ซึ่งรับ Input ที่เป็นระบบ Analog จาก sensor แล้วทำการเปลี่ยนข้อมูลเป็น
 ระบบ digital และเก็บข้อมูลไว้ในหน่วยความจำเพื่อนำไปใช้ต่อไป ดังรูปที่ 3.21 และบันทึกค่า



(ก) อุปกรณ์วัดแรงดันน้ำมัน (ข) อุปกรณ์จัดเก็บสัญญาณ

รูปที่ 3.22 อุปกรณ์วัดแรงดันน้ำมัน และอุปกรณ์จัดเก็บสัญญาณ

- การวัดค่าความแข็ง
 การวัดค่าความแข็งของชิ้นงาน โดยใช้หน่วยวัดความแข็ง HV (Vickers Hardness)
 ของแต่ละจุดบนชิ้นงานทั้งหมด 7 จุด ใช้เครื่องวัดความแข็ง ยี่ห้อ MATSUZAWA รุ่น MXT70
 โดยระยะของแต่ละจุดห่างกันประมาณ 2-3 มิลลิเมตร โดยมีขั้นตอนในการวัดค่าความแข็งดังนี้คือ
 นำชิ้นงานที่ผ่าครึ่งแล้วมาขัดผิวของชิ้นงานให้เรียบ แล้วนำชิ้นงานไปจับยึดด้วยปากกาจับชิ้นงาน
 จากนั้นทำการวัดค่าความแข็งบนชิ้นงานในแต่ละจุด บันทึกค่าในแต่ละ และวิธีการวัดค่าความแข็ง
 ดังรูปที่ 3.22 และรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 เครื่องวัดค่าความแข็ง ยี่ห้อ MATSUZAWA รุ่น MXT70



รูปที่ 3.24 จุดในการวัดความแข็ง

3.6.5 การดำเนินการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

การจำลองการขึ้นรูปด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นการวิเคราะห์กระบวนการขึ้นรูปโดยใช้โปรแกรม Deform 3D V10.0 จำลองการขึ้นรูปแท่งอลูมิเนียม AA-1100, AA-2011 และ AA-6063 โดยใช้สารหล่อลื่นน้ำมันแร่ น้ำมันมะพร้าว น้ำมันถั่วเหลือง และไม่ใช้สารหล่อลื่น เป็นตัวช่วยในการขึ้นรูป มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 1) เตรียมชิ้นงานเพื่อทำการทดสอบหาสมบัติทางเคมี และทดสอบแรงดึง ทดสอบสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเลื่อน ดังรูปที่ 3.26



รูปที่ 3.25 ชิ้นงานที่ทำการทดสอบหาส่วนผสมทางเคมี



รูปที่ 3.26 ชิ้นงานที่เตรียมเพื่อทำการทดสอบแรงดึง

- 2) ทดสอบหาสมบัติทางเคมีของอลูมิเนียม 1100, 2011 และ 6063 ตามมาตรฐาน ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 องค์ประกอบทางเคมีของอลูมิเนียม

ธาตุ	ปริมาณองค์ประกอบทางเคมี (% wt)		
	อลูมิเนียม เกรด 1100	อลูมิเนียม เกรด 2011	อลูมิเนียม เกรด 6063
Al	98.300	98.600	98.300
Si	0.510	0.622	0.499
Fe	0.361	0.196	0.286
Mn	0.040	0.050	0.041
Zn	0.145	0.002	0.332
Cu	0.068	0.003	0.041
Pb	0.004	0.003	0.003
Ti	0.012	0.019	0.008
Mg	0.489	0.455	0.472
Other	0.071	0.023	0.019

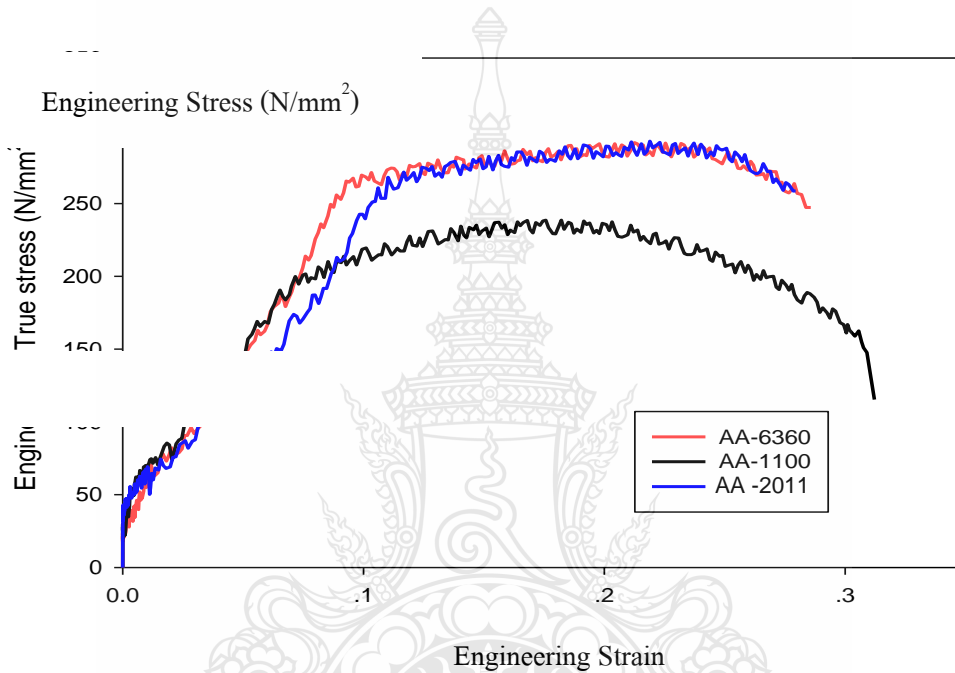
3) ทดสอบหาสมบัติเลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียด (Strain-Hardening Exponent, n -values) และสัมประสิทธิ์ความต้านแรง (Strength Coefficient, K) ของอลูมิเนียม ตามวิธีทดสอบ ASTM E646-2009

- วัดขนาดของชิ้นทดสอบช่วงระยะยึด (Gage Length)
- จับชิ้นงานทดสอบแรงดึงบันทึกค่าแรงที่กระทำและระยะที่เปลี่ยนช่วงที่หนึ่ง
- คำนวณหาความเค้นทางวิศวกรรม (Engineering Stress, S) เท่ากับแรงกระทำช่วงที่หนึ่งต่อขนาดพื้นที่หน้าตัด

- คำนวณหาความเครียดวิศวกรรม (Engineering Strain, ϵ)
- คำนวณหาความเค้นจริง (True Stress) = $S \times (1 + \epsilon)$
- คำนวณหาความเครียดจริง (True Strain) = $\ln(1 + \epsilon)$
- คำนวณหา y หรือ Log Stress
- คำนวณหา x หรือ Log Strain

- คำนวณหา y^2
- คำนวณหา x^2
- คำนวณหา xy

เมื่อได้ข้อมูลที่ต้องการ หลังจากนั้นทำการคำนวณข้อมูลที่ได้มาผ่าน โปรแกรม Microsoft Excel จะได้กราฟดังรูปที่ 3.21 และข้อมูลดังตารางที่ 3.4



รูปที่ 3.27 แผนรูป ความเค้น-ความเครียดทางวิศวกรรม ของอลูมิเนียม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร

ตารางที่ 3.4 สมบัติเชิงกลของอลูมิเนียม AA-1100, AA-2011 และ AA-6063 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร

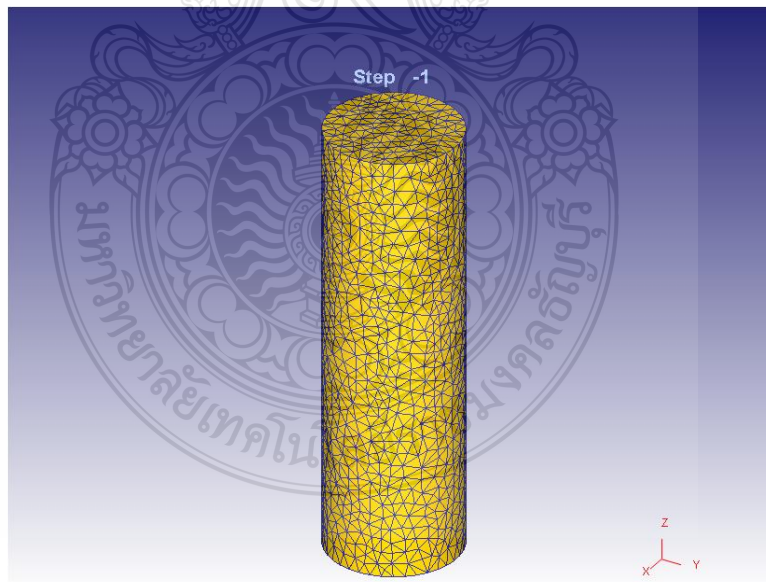
ชนิดของวัสดุ	เลขชี้กำลังการทำ ให้แข็งด้วย ความเครียด (n)	สัมประสิทธิ์ ความต้านแรง (K)
AA-1100	0.301	477.66
AA-2011	0.216	493.23
AA-6063	0.227	504.32

3.7 ขั้นตอนก่อนการประมวลผล (Pre – processing) เป็นการออกแบบและกำหนดค่าต่างๆที่ใช้ในการวิเคราะห์ มีขั้นตอนดังนี้

3.7.1 สำหรับกำหนดเงื่อนไขก่อนการวิเคราะห์ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ของกระบวนการอัดขึ้นรูปเย็นแบบไหลตาม เริ่มโดยเขียนแบบจำลองชิ้นส่วนแม่พิมพ์ และ ชิ้นงาน จากโปรแกรม Solid works 2007 แล้ว แปลงชิ้นส่วนที่จำลองขึ้นเป็น File STL จากนั้น Import จาก File STL เข้าสู่โปรแกรม Deform3D V10.0 เพื่อที่จะเตรียมเครื่องมือต่างๆ ก่อนการวิเคราะห์

1) เปิดโปรแกรม Deform 3D pre จากนั้น Import file Workpiece.stl เข้าสู่

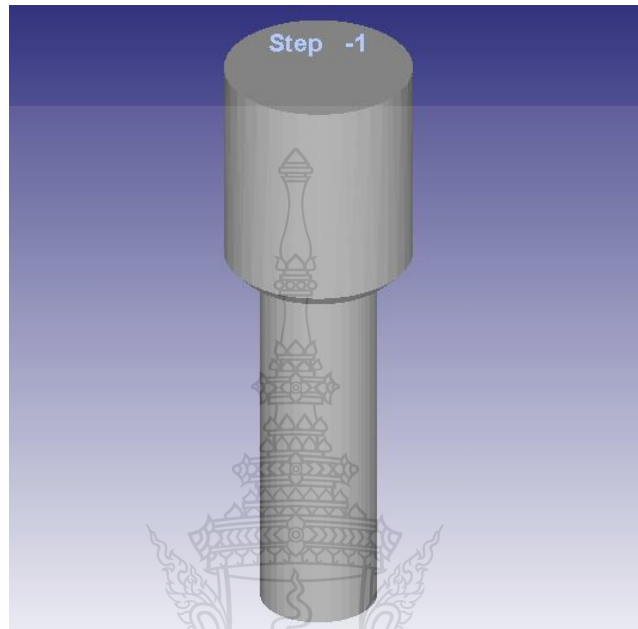
โปรแกรมกำหนดชิ้นงานเป็นแบบ Rigid แล้วสร้างตาข่ายขนาด 1X1 มม เพื่อแบ่งย่อยให้เป็นอีลิเมนต์เล็กๆ เหตุผลเพื่อใช้ในการหาผลเฉลยที่ถูกต้องมีความละเอียดจากนั้นเลือกชนิดของวัสดุเป็น Al 1100, Al 2011, Al 6360 ตามลำดับ ซึ่งค่าคุณสมบัติของวัสดุนี้ สามารถระบุและแก้ไขได้ เนื่องจากโปรแกรมได้ให้ค่ามาตรฐานมาเพิ่มความสะดวกดังแสดงดังรูปที่ 3.27



รูปที่ 3.28 รูปแสดงการแบ่งเป็นอีลิเมนต์ขนาด 1.0 มม.

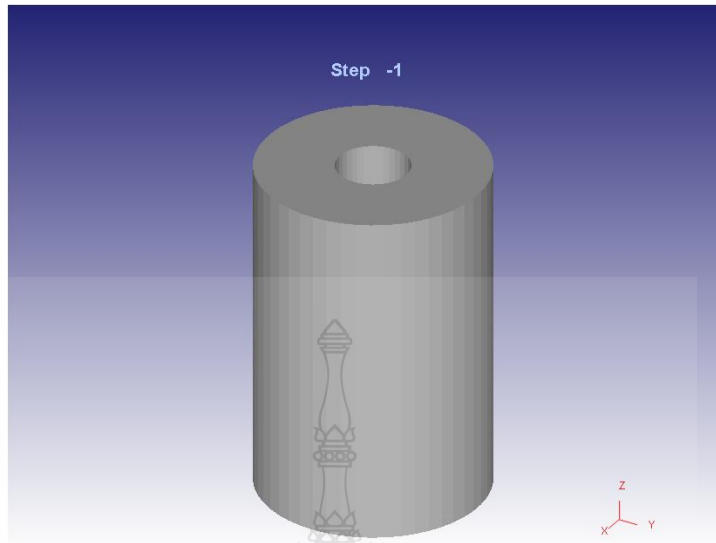
2) ทำการ Import Top die.stl เข้าสู่โปรแกรม ในส่วนของ Top die นั้นจะทำหน้าที่กดชิ้นงานเข้าสู่ดาย สามารถใช้ได้กับทุกการวิเคราะห์ในวิชานีพจนันท์ ในวิชานีพจนันท์

จะไม่หาผลเฉลยของพื่นดั่งนั้น จึงไม่จำเป็นต้องแบ่งเป็นอิลิเมนต์ย่อยๆ ซึ่งใช้พารามิเตอร์แบบ rigid ได้ทันที ดังแสดงในรูปที่ 3.28



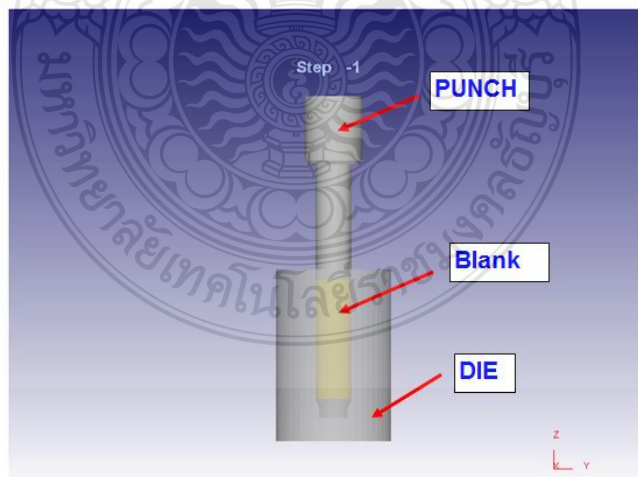
รูปที่ 3.29 เครื่องมือพื่น (Top die)

2) ทำการ Import Bottom die.stl เข้าสู่โปรแกรม ในส่วนของ Bottom die จะมีองศาที่แตกต่างกันตั้งแต่ 20° , 25° , 30° ตามลำดับดั่งนั้นในแต่ละการวิเคราะห์ต้องมีการเปลี่ยน bottom die ทุกครั้งแต่วิธีการนั้นเหมือนกัน ในวิทยานิพนธ์นี้ จึงไม่จำเป็นต้องแบ่งเป็นอิลิเมนต์ย่อยๆ เพราะไม่ได้มีจุดประสงค์ในการเฉลยปัญหาของคาย ดั่งนั้นจึงใช้พารามิเตอร์แบบ rigid ได้ทันที ดังแสดงในรูปที่ 3.28



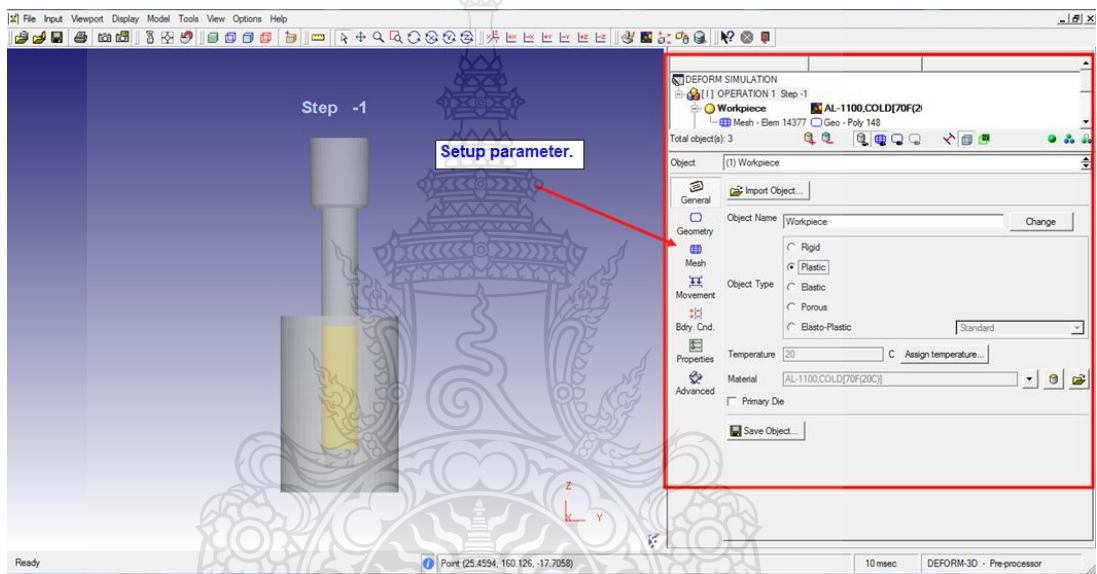
รูปที่ 3.30 เครื่องมือคาย (Bottom die)

3) หลังจากการแบ่งเอลิเมนต์และกำหนดชนิดของวัสดุแล้วในขั้นตอนถัดจะเป็นการกำหนดตำแหน่งเครื่องมือเสมือนการขึ้นรูปชิ้นงานจริงทุกประการ โดยเริ่มกำหนดชิ้นงานอยู่ในคายในตำแหน่งก่อนการอัดขึ้นรูป จากนั้นกำหนดให้พื้นอยู่ในตำแหน่งผิวของชิ้นงานก่อนเริ่มอัด ดังแสดงในรูปที่ 3.30



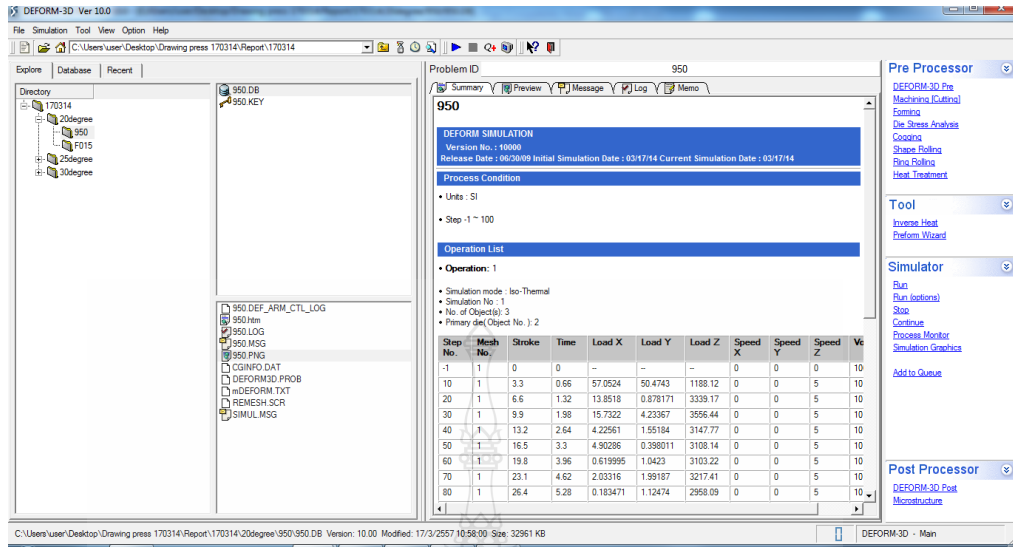
รูปที่ 3.31 รูปแสดงการเครื่องมือก่อนการเริ่มวิเคราะห์

4) เมื่อเครื่องมือ ชิ้นงาน พื้น และคาย ถูกกำหนดให้อยู่ในตำแหน่งที่ถูกต้องแล้ว ขั้นตอนต่อไปซึ่งมีความสำคัญมาก นั่นคือการกำหนดพารามิเตอร์ที่ถูกต้องให้โปรแกรม ซึ่งผลเฉลยจะมีความถูกต้องแม่นยำเพียงใด นั้นขึ้นอยู่กับกรกำหนดค่าต่างๆ ในขั้นตอนนี้โดยเริ่มจากการกำหนดพารามิเตอร์ของวัสดุชิ้นงานก่อนจากนั้นก็กำหนดพารามิเตอร์ของ พื้น ความเร็ว และระยะกดลึก ถัดมากำหนดพารามิเตอร์ความเสียดทานระหว่างชิ้นงานและแม่พิมพ์ ขั้นตอนสุดท้ายทำ data base generation เพื่อดูผลต่างๆว่าเกิด error หรือไม่พร้อมจะส่งเข้าสู่โปรแกรม Simulator Run ของโปรแกรม Deform 3D ดังแสดงในรูปที่ 3.31



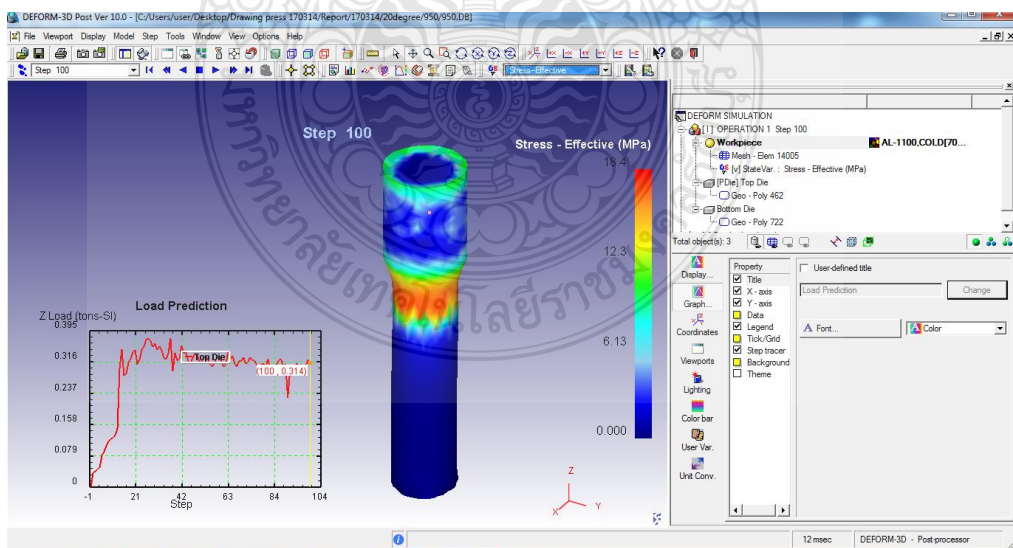
รูปที่ 3.32 รูปแสดงการใส่ค่าพารามิเตอร์ก่อนการวิเคราะห์

5) หลังจากการใส่ค่าพารามิเตอร์ได้อย่างถูกต้องแล้วในขั้นตอนต่อไปนั้นเป็นการคำนวณโดยโปรแกรมในส่วนของ Simulator Run ซึ่งการคำนวณในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้ระยะเวลาประมาณ 2-3 ชั่วโมงต่อการทดลองซึ่งตัวแปรของระยะเวลานั้นขึ้นอยู่กับกรแบ่งตาข่าย (Mash) ว่ามีความละเอียดมากน้อยอย่างไร ดังแสดงในรูปที่ 3.32



รูปที่ 3.33 รูปแสดงการเริ่มกระบวนการวิเคราะห์

6) หลังจาก Simulator Run จน completed 100 เปอร์เซ็นต์แล้ว ในขั้นตอนการแสดงผลนั้นจะเปิดด้วย Deform3D Post โดยโปรแกรมจะแสดงผลการวิเคราะห์ที่ได้มากขึ้นอยู่กับผู้ใช้งานที่ต้องการดูผลอะไร เช่น แรงที่ใช้กด ความเค้น ความเครียด การไหลตัว ส่วนที่ขี้ออก เป็นต้น

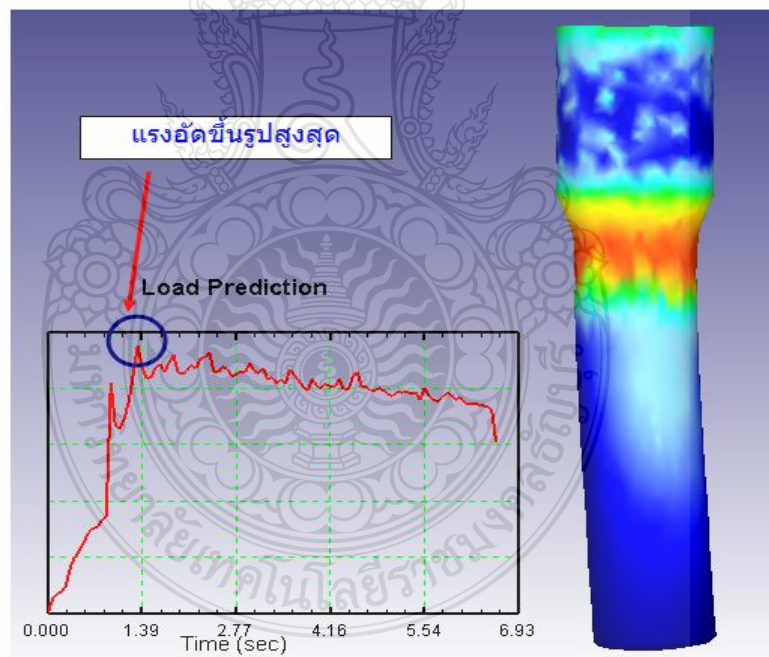


รูปที่ 3.34 รูปแสดงการผลการวิเคราะห์

บทที่ 4

ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผล

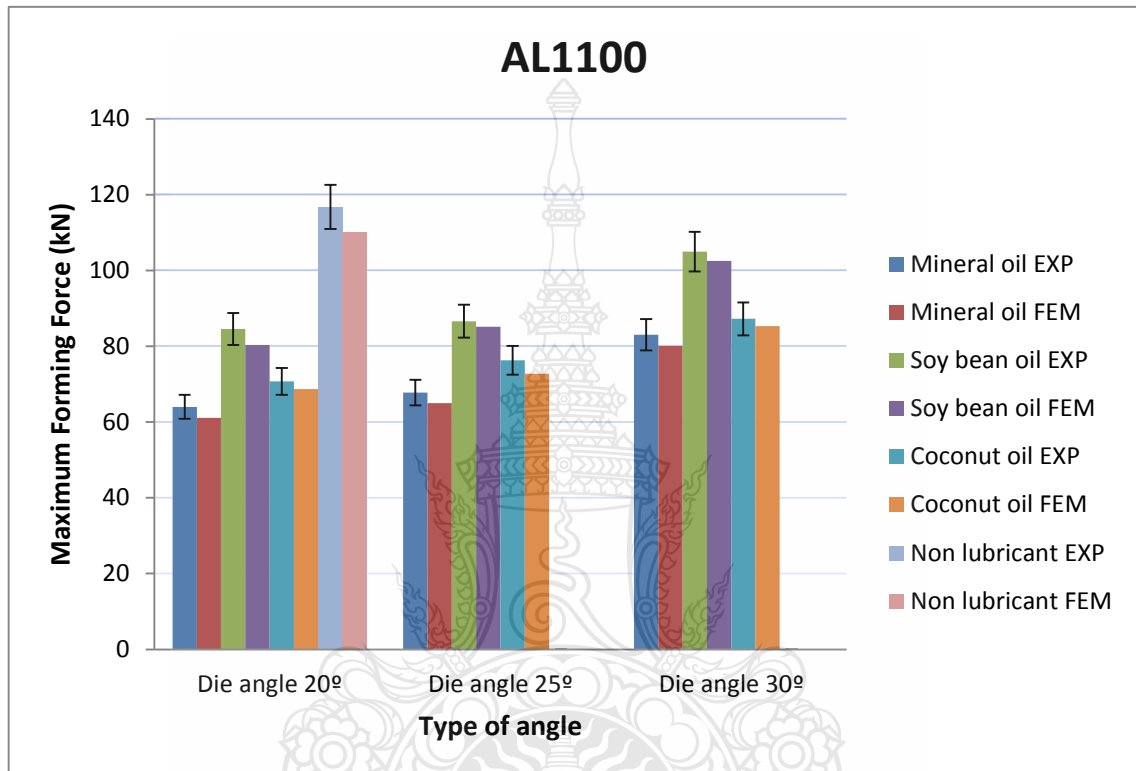
งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของ สารหล่อลื่น ที่มีผลต่อการ อัดขึ้นรูปเย็น อลูมิเนียมแบบไหลตาม โดยการวิเคราะห์ด้วย ไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยมีการจำลองในกรณี มุมคาย 20°, 25° และ 30° ใช้สารหล่อลื่นลิ้น น้ำมันแร่ น้ำมันมะพร้าว น้ำมันถั่วเหลือง และไม่ใช่สารหล่อลื่น วัสดุ อลูมิเนียม AL 1100, AL 2011 และ AL 6063 ตามลำดับ และนำมาเปรียบเทียบกับชิ้นงานจริง โดยผล การเปรียบเทียบค่าแรงอัดสูงสุดที่ใช้ ซึ่ง โปรแกรมจะแสดงผล ดังรูปที่ 4.0 และได้ศึกษาการไหลตัว ของเอลิเมนต์วัสดุ ศึกษาความเค้นที่เกิดขึ้นแต่ละจุดตามแนวการอัดขึ้นรูปชิ้นงาน จากการศึกษาพบว่า ปัจจัยต่างๆมีผลต่อแรงในการขึ้นรูปสูงสุดตามรูปที่ 4.1 การกระจายตัวของความเค้นชิ้นงาน การไหล ตัวของเอลิเมนต์เนื้อวัสดุ ซึ่งมีความสัมพันธ์ กับคุณภาพของชิ้นงาน มีผลการวิจัยดังนี้



รูปที่ 4.1 รูปแสดงกราฟตำแหน่งของแรงอัดสูงสุด ที่ใช้ในการอัดขึ้นรูป

4.1 การเปรียบเทียบแรงในการอัดขึ้นรูป

1 .1 เปรียบเทียบแรงอัดขึ้นรูปจริงกับการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้มุมตาย 20°, 25°, 30° ของอลูมิเนียม AI 1100 ใช้สารหล่อลื่น น้ำมันแร่, น้ำมันมะพร้าว, น้ำมันถั่วเหลือง และไม่ใช้สารหล่อลื่น ตามลำดับ โดยแสดงดังกราฟแท่ง รูปที่ 4.1



รูปที่ 4.2 เปรียบเทียบแรงขึ้นรูปจริงกับการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ในการใช้ สารหล่อลื่นแต่ละชนิด ที่มุมตาย 20°, 25° และ 30° ของอะลูมิเนียม AI 1100

จากรูปที่ 4.2 เป็นกราฟแท่งแสดงแรงในการอัดขึ้นรูปขึ้นงานเย็นแบบไหลตามโดยเปรียบเทียบแรงขึ้นรูปสูงสุดโดยใช้สารหล่อลื่น น้ำมันแร่ น้ำมันมะพร้าว น้ำมันถั่วเหลือง และไม่ใช้สารหล่อลื่น โดยที่ตายเอียง 20°, 25° และ 30° ของอลูมิเนียม AL1100 พบว่า [1]

1. ที่มุมตาย 20 องศา ใช้ น้ำมันแร่ เป็นสารหล่อลื่น ให้แรงกดสูงสุดที่ 61.14 KN เปรียบเทียบกันระหว่างแรงในการขึ้นรูปขึ้นงานจริง กับการจำลองการขึ้นรูปด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าแรงในการขึ้นรูปแตกต่างกันเฉลี่ย 4.5 เปอร์เซ็นต์ ที่มุมตาย 20 องศา ใช้ น้ำมันถั่วเหลือง เป็นสารหล่อลื่น ให้แรงกดสูงสุดที่ 80.32 KN เปรียบเทียบกันระหว่าง แรงในการขึ้นรูปขึ้นงานจริง กับการจำลองการขึ้นรูปด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าแรงในการขึ้นรูปแตกต่างกันเฉลี่ย 5 เปอร์เซ็นต์ และที่มุมตาย 20 องศา ใช้ น้ำมัน

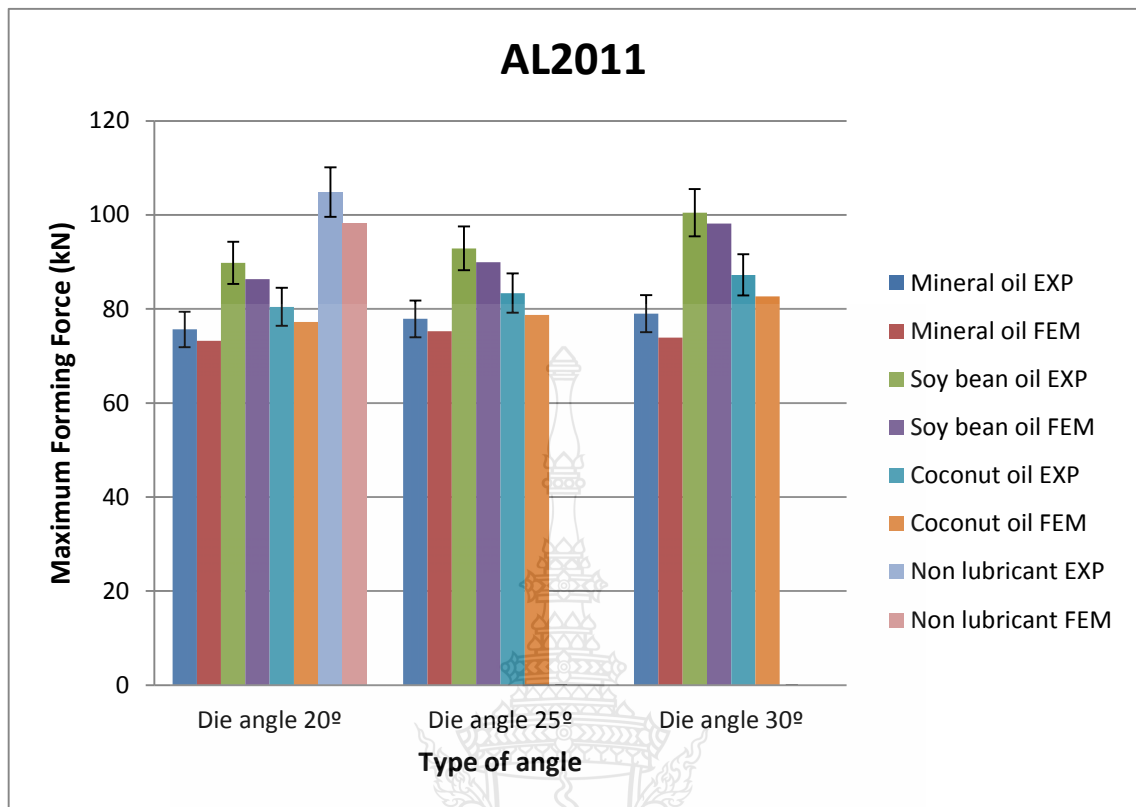
มะพร้าวเป็นสารหล่อลื่น ให้แรงกดสูงสุดที่ 68.52 KN เปรียบเทียบกันระหว่าง แรงในการขึ้นรูปขึ้นงานจริง กับการจำลองการขึ้นรูปด้วยวิธีไฟในเอลิเมนต์ พบว่าแรงในการขึ้นรูปแตกต่างกันเล็กน้อย 2.9 เปอร์เซ็นต์ และที่มุมคาย 20 องศา ไม่ใช้สารหล่อลื่น ให้แรงกดสูงสุดที่ 110.23 KN เปรียบเทียบกันระหว่างแรงในการขึ้นรูปขึ้นงานจริง กับการจำลองการขึ้นรูปด้วยวิธีไฟในเอลิเมนต์ พบว่าแรงในการขึ้นรูปแตกต่างกันเล็กน้อย 5.6 เปอร์เซ็นต์

2) ที่มุมคาย 25 องศา ใช้น้ำมันแร่เป็นสารหล่อลื่น ให้แรงกดสูงสุดที่ 65.02 KN เปรียบเทียบกันระหว่างแรงในการขึ้นรูปขึ้นงานจริง กับการจำลองการขึ้นรูปด้วยวิธีไฟในเอลิเมนต์ พบว่าแรงในการขึ้นรูปแตกต่างกันเล็กน้อย 4.1 เปอร์เซ็นต์ ที่มุมคาย 25 องศา ใช้น้ำมันถั่วเหลืองเป็นสารหล่อลื่น ให้แรงกดสูงสุดที่ 85.13 KN เปรียบเทียบกันระหว่าง แรงในการขึ้นรูปขึ้นงานจริง กับการจำลองการขึ้นรูปด้วยวิธีไฟในเอลิเมนต์ พบว่าแรงในการขึ้นรูปแตกต่างกันเล็กน้อย 1.7 เปอร์เซ็นต์ และที่มุมคาย 25 องศา ใช้น้ำมันมะพร้าวเป็นสารหล่อลื่น ให้แรงกดสูงสุดที่ 72.71 KN เปรียบเทียบกันระหว่าง แรงในการขึ้นรูปขึ้นงานจริง กับการจำลองการขึ้นรูปด้วยวิธีไฟในเอลิเมนต์ พบว่าแรงในการขึ้นรูปแตกต่างกันเล็กน้อย 4.7 เปอร์เซ็นต์ และที่มุมคาย 25 องศา ไม่ใช้สารหล่อลื่น ไม่สามารถกดขึ้นรูปได้

3) 2) ที่มุมคาย 30 องศา ใช้น้ำมันแร่เป็นสารหล่อลื่น ให้แรงกดสูงสุดที่ 80.12 KN เปรียบเทียบกันระหว่างแรงในการขึ้นรูปขึ้นงานจริง กับการจำลองการขึ้นรูปด้วยวิธีไฟในเอลิเมนต์ พบว่าแรงในการขึ้นรูปแตกต่างกันเล็กน้อย 3.5 เปอร์เซ็นต์ ที่มุมคาย 30 องศา ใช้น้ำมันถั่วเหลืองเป็นสารหล่อลื่น ให้แรงกดสูงสุดที่ 102.54 KN เปรียบเทียบกันระหว่าง แรงในการขึ้นรูปขึ้นงานจริง กับการจำลองการขึ้นรูปด้วยวิธีไฟในเอลิเมนต์ พบว่าแรงในการขึ้นรูปแตกต่างกันเล็กน้อย 2.3 เปอร์เซ็นต์ และที่มุมคาย 30 องศา ใช้น้ำมันมะพร้าวเป็นสารหล่อลื่น ให้แรงกดสูงสุดที่ 85.32 KN เปรียบเทียบกันระหว่าง แรงในการขึ้นรูปขึ้นงานจริง กับการจำลองการขึ้นรูปด้วยวิธีไฟในเอลิเมนต์ พบว่าแรงในการขึ้นรูปแตกต่างกันเล็กน้อย 2.2 เปอร์เซ็นต์ และที่มุมคาย 30 องศา ไม่ใช้สารหล่อลื่น ไม่สามารถกดขึ้นรูปได้

ผลการทดลองการอัดขึ้นรูปแบบไหลตามในวัสดุ อะลูมิเนียม AL1100 ที่มุมคาย 20 องศา ใช้สารหล่อลื่นและไม่ใช้สารหล่อลื่น วัสดุมีความเหนียวและอ่อน จึงใช้แรงในการอัดขึ้นรูปน้อย ทำให้ขึ้นรูปได้ง่าย การไหลตัววัสดุ เนื่องจากเนื้อวัสดุอ่อนที่สุดในกลุ่มการทดลอง สามารถนำไปผลิตขึ้นงานได้ดี

1.2 เปรียบเทียบแรง อัดขึ้นรูปจริงกับการจำลองด้วยไฟในเอลิเมนต์ โดยใช้มุมคาย 20°, 25°, 30° ของอลูมิเนียม A1 2011 ใช้สารหล่อลื่น น้ำมันแร่, น้ำมันมะพร้าว, น้ำมันถั่วเหลือง และไม่ใช้สารหล่อลื่น ตามลำดับ โดยแสดงดังกราฟแท่ง รูปที่ 4.2



รูปที่ 4.3 เปรียบเทียบแรงขึ้นรูปจริงกับการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ในการใช้สารหล่อลื่นแต่ละชนิด ที่มุมตาย 20°, 25° และ 30° ของอลูมิเนียม AL 2011

จากรูปที่ 4.3 เป็นกราฟแสดงแรงในการอัดขึ้นรูปชิ้นงานเย็นแบบไหลตาม โดยเปรียบเทียบแรงขึ้นรูปสูงสุดใช้สารหล่อลื่น น้ำมันแร่ น้ำมันมะพร้าว น้ำมันถั่วเหลือง และไม่ใช้สารหล่อลื่น โดยที่ตายเอียง 20°, 25° และ 30° ของอลูมิเนียม AL2011 พบว่า [1]

1. ที่มุมตาย 20 องศาใช้น้ำมันแร่เป็นสารหล่อลื่น ให้แรงกดสูงสุดที่ 73.24 KN เปรียบเทียบกันระหว่างแรงในการขึ้นรูปชิ้นงานจริงกับการจำลองการขึ้นรูปด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าแรงในการขึ้นรูปแตกต่างกันเพียง 3.2 เปอร์เซ็นต์ ที่มุมตาย 20 องศาใช้น้ำมันถั่วเหลืองเป็นสารหล่อลื่น ให้แรงกดสูงสุดที่ 86.37 KN เปรียบเทียบกันระหว่างแรงในการขึ้นรูปชิ้นงานจริงกับการจำลองการขึ้นรูปด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าแรงในการขึ้นรูปแตกต่างกันเพียง 3.8 เปอร์เซ็นต์ และที่มุมตาย 20 องศาใช้น้ำมันมะพร้าวเป็นสารหล่อลื่น ให้แรงกดสูงสุดที่ 77.27 KN เปรียบเทียบกันระหว่างแรงในการขึ้นรูปชิ้นงานจริงกับการจำลองการขึ้นรูปด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าแรงในการขึ้นรูปแตกต่างกันเพียง 4 เปอร์เซ็นต์

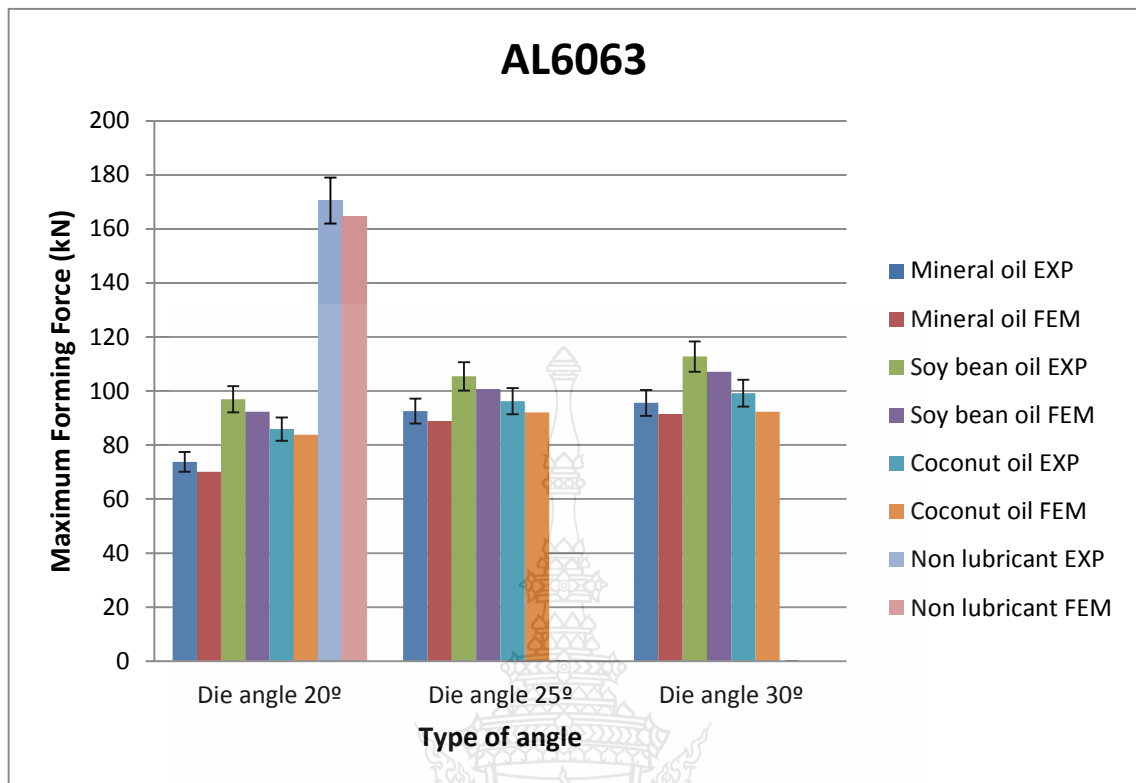
และที่มุมคาย 20 องศา ไม่ใช้สารหล่อลื่น ให้แรงกดสูงสุดที่ 98.32 KN เปรียบเทียบกันระหว่างแรงในการขึ้นรูปขึ้นงานจริง กับการจำลองการขึ้นรูปด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าแรงในการขึ้นรูปแตกต่างกันเล็กน้อย 6.2 เปอร์เซ็นต์

2) ที่มุมคาย 25 องศา ใช้น้ำมันแร่เป็นสารหล่อลื่น ให้แรงกดสูงสุดที่ 75.24 KN เปรียบเทียบกันระหว่างแรงในการขึ้นรูปขึ้นงานจริง กับการจำลองการขึ้นรูปด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าแรงในการขึ้นรูปแตกต่างกันเล็กน้อย 3.4 เปอร์เซ็นต์ ที่มุมคาย 25 องศา ใช้น้ำมันถั่วเหลืองเป็นสารหล่อลื่น ให้แรงกดสูงสุดที่ 89.96 KN เปรียบเทียบกันระหว่างแรงในการขึ้นรูปขึ้นงานจริง กับการจำลองการขึ้นรูปด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าแรงในการขึ้นรูปแตกต่างกันเล็กน้อย 3.2 เปอร์เซ็นต์ และที่มุมคาย 25 องศา ใช้น้ำมันมะพร้าวเป็นสารหล่อลื่น ให้แรงกดสูงสุดที่ 78.71 KN เปรียบเทียบกันระหว่างแรงในการขึ้นรูปขึ้นงานจริง กับการจำลองการขึ้นรูปด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าแรงในการขึ้นรูปแตกต่างกันเล็กน้อย 4.7 เปอร์เซ็นต์ และที่มุมคาย 25 องศา ไม่ใช้สารหล่อลื่น ไม่สามารถกดขึ้นรูปได้

3) ที่มุมคาย 30 องศา ใช้น้ำมันแร่เป็นสารหล่อลื่น ให้แรงกดสูงสุดที่ 73.92 KN เปรียบเทียบกันระหว่างแรงในการขึ้นรูปขึ้นงานจริง กับการจำลองการขึ้นรูปด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าแรงในการขึ้นรูปแตกต่างกันเล็กน้อย 6.4 เปอร์เซ็นต์ ที่มุมคาย 30 องศา ใช้น้ำมันถั่วเหลืองเป็นสารหล่อลื่น ให้แรงกดสูงสุดที่ 98.14 KN เปรียบเทียบกันระหว่างแรงในการขึ้นรูปขึ้นงานจริง กับการจำลองการขึ้นรูปด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าแรงในการขึ้นรูปแตกต่างกันเล็กน้อย 2.3 เปอร์เซ็นต์ และที่มุมคาย 30 องศา ใช้น้ำมันมะพร้าวเป็นสารหล่อลื่น ให้แรงกดสูงสุดที่ 82.65 KN เปรียบเทียบกันระหว่างแรงในการขึ้นรูปขึ้นงานจริง กับการจำลองการขึ้นรูปด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าแรงในการขึ้นรูปแตกต่างกันเล็กน้อย 5.3 เปอร์เซ็นต์ และที่มุมคาย 30 องศา ไม่ใช้สารหล่อลื่น ไม่สามารถกดขึ้นรูปได้

ผลการทดลองการอัดขึ้นรูปแบบไหลตามในวัสดุ อะลูมิเนียม AL2011 ที่มุมคาย 20 องศา ใช้สารหล่อลื่น พบว่าชิ้นงาน มีการไหลตัวดี ใช้แรงน้อย มีความตรงของชิ้นงานค่อนข้างดี ถ้านำไปใช้ต้องผ่านเครื่องจักรเก็บงานก่อนนำไปใช้

1.3 เปรียบเทียบแรง อัดขึ้นรูปจริงกับการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้มุมคาย 20°, 25°, 30° ของอะลูมิเนียม Al 6063 ใช้สารหล่อลื่น น้ำมันแร่, น้ำมันมะพร้าว, น้ำมันถั่วเหลือง และไม่ใช้สารหล่อลื่น ตามลำดับ โดยแสดงดังกราฟแท่ง รูปที่ 4.3



รูปที่ 4.4 เปรียบเทียบแรงขึ้นรูปจริงกับการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ในการใช้สารหล่อลื่นแต่ละชนิด ที่มุมตาย 20°, 25° และ 30° ของอลูมิเนียม AL 6063

จากรูปที่ 4.4 เป็นกราฟแสดงแรงในการอัดขึ้นรูปขึ้นงานเย็นแบบไหลตาม โดยเปรียบเทียบแรงขึ้นรูปสูงสุดใช้สารหล่อลื่น น้ำมันแร่ น้ำมันมะพร้าว น้ำมันถั่วเหลือง และไม่ใช้สารหล่อลื่น โดยที่ตายเอียง 20°, 25° และ 30° ของอลูมิเนียม AL6063 พบว่า

- ที่มุมตาย 20 องศา ใช้ น้ำมันแร่ เป็นสารหล่อลื่น ให้แรงกดสูงสุดที่ 70.16 KN เปรียบเทียบกันระหว่างแรงในการขึ้นรูปขึ้นงานจริง กับการจำลองการขึ้นรูปด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าแรงในการขึ้นรูปแตกต่างกันเล็กน้อย 4.9 เปอร์เซ็นต์ ที่มุมตาย 20 องศา ใช้ น้ำมันถั่วเหลือง เป็นสารหล่อลื่น ให้แรงกดสูงสุดที่ 92.31 KN เปรียบเทียบกันระหว่างแรงในการขึ้นรูปขึ้นงานจริง กับการจำลองการขึ้นรูปด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าแรงในการขึ้นรูปแตกต่างกันเล็กน้อย 4.8 เปอร์เซ็นต์ และที่มุมตาย 20 องศา ใช้ น้ำมันมะพร้าว เป็นสารหล่อลื่น ให้แรงกดสูงสุดที่ 83.82 KN เปรียบเทียบกันระหว่างแรงในการขึ้นรูปขึ้นงานจริง กับการจำลองการขึ้นรูปด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าแรงในการขึ้นรูปแตกต่างกันเล็กน้อย 2.5 เปอร์เซ็นต์ และที่มุมตาย 20 องศา ไม่ใช้สารหล่อลื่น ให้แรงกดสูงสุดที่ 164.67 KN เปรียบเทียบกันระหว่างแรงในการขึ้นรูปขึ้นงานจริง กับการจำลองการขึ้นรูปด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าแรงในการขึ้นรูปแตกต่างกันเล็กน้อย 3.4 เปอร์เซ็นต์

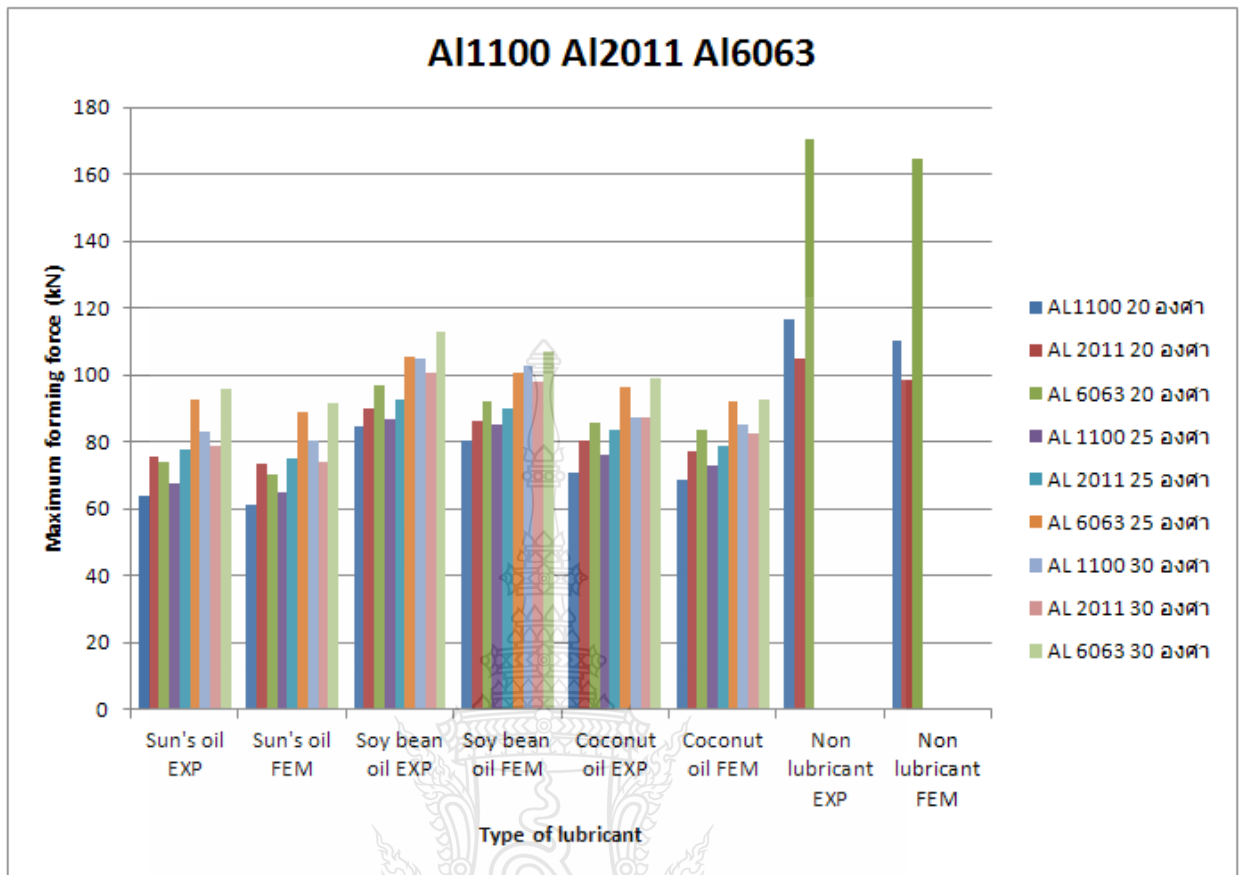
2) ที่มุมคาย 25 องศา ใช้น้ำมันแร่เป็นสารหล่อลื่น ให้แรงกดสูงสุดที่ 88.97 KN เปรียบเทียบกันระหว่างแรงในการขึ้นรูปชิ้นงานจริง กับการจำลองการขึ้นรูปด้วยวิธีไฟในเอลิเมนต์ พบว่าแรงในการขึ้นรูปแตกต่างกันเล็กน้อย 3.9 เปอร์เซ็นต์ ที่มุมคาย 25 องศา ใช้น้ำมันถั่วเหลืองเป็นสารหล่อลื่น ให้แรงกดสูงสุดที่ 100.78 KN เปรียบเทียบกันระหว่างแรงในการขึ้นรูปชิ้นงานจริง กับการจำลองการขึ้นรูปด้วยวิธีไฟในเอลิเมนต์ พบว่าแรงในการขึ้นรูปแตกต่างกันเล็กน้อย 4.4 เปอร์เซ็นต์ และที่มุมคาย 25 องศา ใช้น้ำมันมะพร้าวเป็นสารหล่อลื่น ให้แรงกดสูงสุดที่ 92.07 KN เปรียบเทียบกันระหว่างแรงในการขึ้นรูปชิ้นงานจริง กับการจำลองการขึ้นรูปด้วยวิธีไฟในเอลิเมนต์ พบว่าแรงในการขึ้นรูปแตกต่างกันเล็กน้อย 4.3 เปอร์เซ็นต์ และที่มุมคาย 25 องศา ไม่ใช้สารหล่อลื่น ไม่สามารถกดขึ้นรูปได้

3) ที่มุมคาย 30 องศา ใช้น้ำมันแร่เป็นสารหล่อลื่น ให้แรงกดสูงสุดที่ 91.46 KN เปรียบเทียบกันระหว่างแรงในการขึ้นรูปชิ้นงานจริง กับการจำลองการขึ้นรูปด้วยวิธีไฟในเอลิเมนต์ พบว่าแรงในการขึ้นรูปแตกต่างกันเล็กน้อย 4.3 เปอร์เซ็นต์ ที่มุมคาย 30 องศา ใช้น้ำมันถั่วเหลืองเป็นสารหล่อลื่น ให้แรงกดสูงสุดที่ 107.08 KN เปรียบเทียบกันระหว่างแรงในการขึ้นรูปชิ้นงานจริง กับการจำลองการขึ้นรูปด้วยวิธีไฟในเอลิเมนต์ พบว่าแรงในการขึ้นรูปแตกต่างกันเล็กน้อย 5 เปอร์เซ็นต์ และที่มุมคาย 30 องศา ใช้น้ำมันมะพร้าวเป็นสารหล่อลื่น ให้แรงกดสูงสุดที่ 92.37 KN เปรียบเทียบกันระหว่างแรงในการขึ้นรูปชิ้นงานจริง กับการจำลองการขึ้นรูปด้วยวิธีไฟในเอลิเมนต์ พบว่าแรงในการขึ้นรูปแตกต่างกันเล็กน้อย 6.9 เปอร์เซ็นต์ และที่มุมคาย 30 องศา ไม่ใช้สารหล่อลื่น ไม่สามารถกดขึ้นรูปได้

ผลการทดลองการอัดขึ้นรูปแบบไหลตามในวัสดุ อะลูมิเนียม AL6063 ที่มุมคาย 20 องศา ใช้น้ำมันแร่ เป็นสารหล่อลื่นนั้นให้ ชิ้นงานที่ดี ถูกต้องตามแบบที่กำหนด เนื่องจาก วัสดุมีความแข็งแรงที่สุดในกลุ่มของชิ้นงานทดลอง และสารหล่อลื่นช่วยให้การไหลตัวของวัสดุ

สรุปผลการเปรียบเทียบแรงในการอัดขึ้นรูปเย็นแบบไหลตาม

เปรียบเทียบ แรงขึ้นรูปจริงกับการจำลองด้วยไฟในเอลิเมนต์ในการใช้ มุมคาย 20°, 25° และ 30° ของอลูมิเนียม AL1100, AL2011, AL6063 เพื่อหาสารหล่อลื่นที่เหมาะสมสำหรับการอัดขึ้นรูปเย็นชิ้นงาน อลูมิเนียม ผลการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 4.4

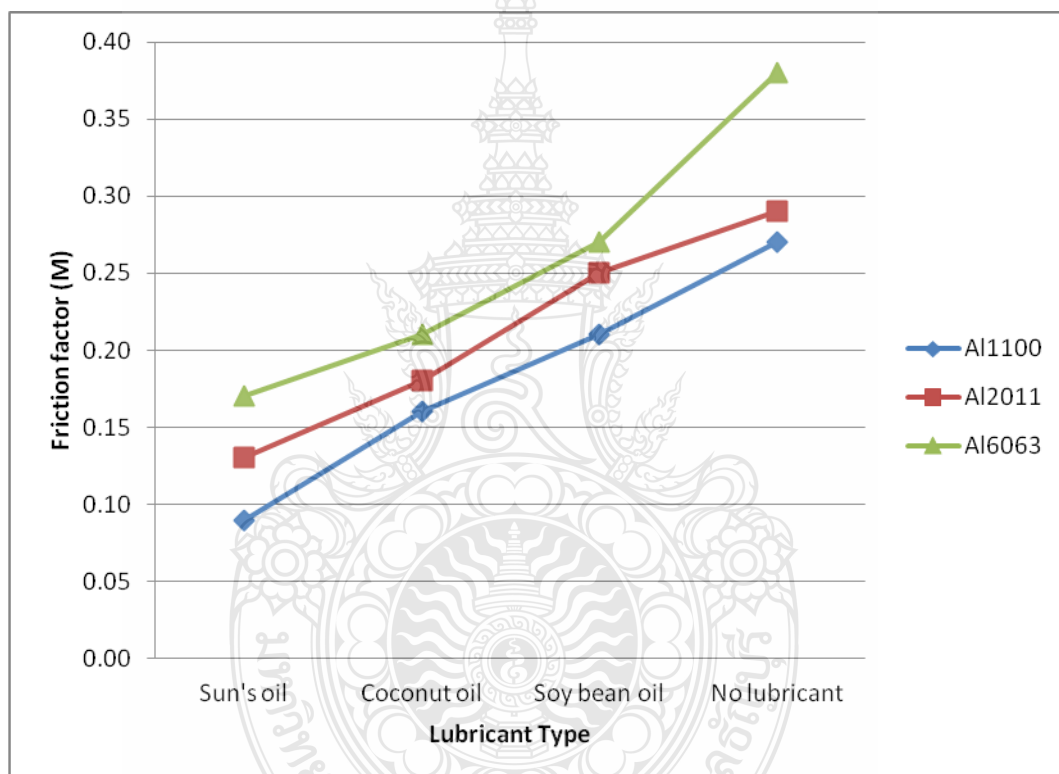


รูปที่ 4.5 เปรียบเทียบแรงขึ้นรูปจริงกับการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ในการใช้สารหล่อลื่นแต่ละชนิด ที่มุมคด 20°, 25° และ 30° ของอะลูมิเนียม AL 1100, AL2011, AL6063

จากรูปที่ 4.5 เป็นกราฟเปรียบเทียบแรงขึ้นรูปจริงกับการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ ความลึกในการขึ้นรูป 34 มม. ของอะลูมิเนียม AL1100 , AL 2011 และ AL6063 ที่องศาของคด 20 องศา ,25 องศา และ 30 องศา ใช้สารหล่อลื่น น้ำมันแร่ , น้ำมันมะพร้าว , น้ำมันถั่วเหลือง และไม่ใช้สารหล่อลื่น พบว่าแรงที่ใช้อัดขึ้นรูปที่ใช้ วัสดุอะลูมิเนียม AL6060 มุมคด 20 องศา ไม่ใช้สารหล่อลื่น มีระดับแรงอัดขึ้นรูปสูงสุด เพราะ องศาความเอียงของคดมีน้อย วัสดุมีความแข็งที่สุดในกลุ่มที่ทดสอบ ส่งผลให้การไหลตัวของวัสดุยาก จึงต้องแรงอัดมากเพื่อที่จะชนะความเสียดทานเนื่องจากไม่มีสารหล่อลื่น ช่วยการไหลผ่านคดที่ 30 องศาได้ แรงที่ใช้อัดขึ้นรูปน้อยที่สุด พบว่า วัสดุอะลูมิเนียม AL1100 มุมคด 20 องศา ใช้สารหล่อลื่นน้ำมันแร่ มีระดับแรงอัดขึ้นรูปน้อยที่สุด เพราะองศาความเอียงของคดมีน้อย วัสดุมีความแข็งต่ำที่สุดในกลุ่มที่ทดสอบ ส่งผลให้การไหลตัวของวัสดุง่าย จึงใช้แรงอัดน้อย และมีการหล่อลื่นน้ำมันแร่ช่วยลดความเสียดทานด้วย สามารถนำไปใช้งานจริงได้ดี

4.2 ความสัมพันธ์ของตัวแปรความเสียดทาน

จากการศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรความเสียดทาน กับสารหล่อลื่น ในการทดสอบ Ring compression test นั้นพบว่าสารหล่อลื่นน้ำมันแร่ น้ำมันมะพร้าว , น้ำมันถั่วเหลือง, และไม่มีสารหล่อลื่น ให้ค่าตัวแปรความเสียดทานที่ต่างกัน โดยวัสดุ AL1100, AL 2011, AL 6063 ตัวแปรความเสียดทาน มีผลต่อแรงสูงสุด ที่ใช้ในการอัดขึ้นรูป โดย ตัวแปร ความเสียด น้อยที่สุด คือ น้ำมันแร่ วัสดุ AL 1100 ดังแสดงในกราฟ ที่ 4.6

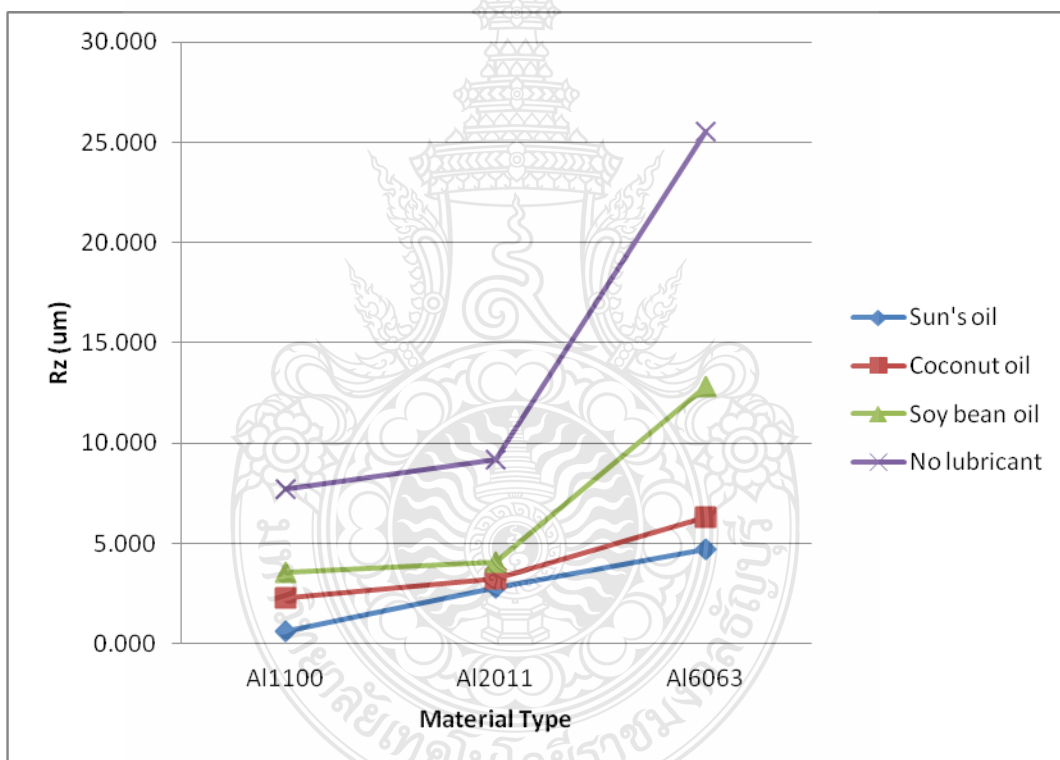


รูปที่ 4.6 กราฟแสดงค่าความสัมพันธ์ของค่าตัวแปรความเสียดทานและสารหล่อลื่น น้ำมันแร่ น้ำมันมะพร้าว น้ำมันถั่วเหลือง และไม่มีสารหล่อลื่น ของอะลูมิเนียม AL 1100, AL2011, AL6063

จากกราฟ รูปที่ 5.0 พบว่า วัสดุ AL 1100 ใช้ น้ำมันแร่ ในการหล่อลื่น หลังการทดสอบ Ring Compression test ได้ค่า ตัวแปรความเสียดทาน 0.09 ใช้ น้ำมันมะพร้าว ในการหล่อลื่น ได้ค่า ตัวแปรความเสียดทาน 0.16 ใช้ น้ำมันถั่วเหลือง ได้ค่า ตัวแปรความเสียดทาน 0.21 และ ไม่มีสารหล่อลื่น ได้ค่า ตัวแปรความเสียดทาน 0.27 ซึ่งจากการทดลอง สรุปได้ว่า จากคุณสมบัติของ

วัสดุ AL1100 ซึ่งเนื้อวัสดุมีความหนาแน่นต่ำที่สุดในกลุ่มการทดลอง 2.71 กรัมต่อตาราง เซ็นติเมตร จึงทำให้เนื้อวัสดุไหลผ่าน คาย ได้ง่าย ในส่วนของวัสดุ AL6063 พบว่าค่าของตัวแปรความเสียดทานนั้นสูง เนื่องจากความหนาแน่นของเนื้อวัสดุ 2.96 กรัมต่อตารางเซ็นติเมตร ซึ่งมากที่สุดในกลุ่มการทดลอง จึงทำให้การไหลตัวผ่านคายนทำได้ยากกว่าวัสดุที่มีความหนาแน่นต่ำ

จากการศึกษาสารหล่อลื่นและความสัมพันธ์ของค่าความหยาบ ซึ่งส่งผลต่อคุณภาพของชิ้นงาน เนื่องจากไม่ต้องการเพิ่มกระบวนการ ทำให้ผิวเรียบ จึงเป็นเหตุผลในการศึกษาค่าความละเอียด โดยแสดงดังกราฟที่ 4.7



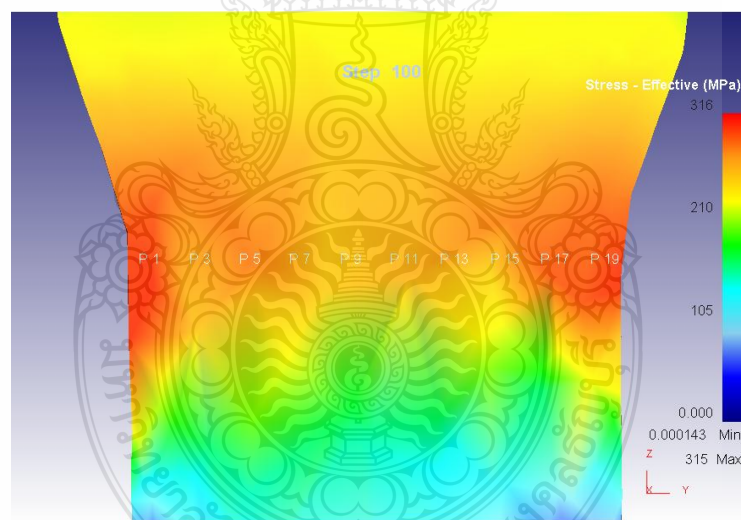
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงค่าความสัมพันธ์ของค่าความหยาบ (RZ) และสารหล่อลื่น น้ำมันแร่ น้ำมันมะพร้าว น้ำมันถั่วเหลือง และไม่ใช้สารหล่อลื่น ในวัสดุ อะลูมิเนียม AL 1100, AL2011, AL6063

จากการศึกษาพบว่าวัสดุ AL1100 ใช้สารหล่อลื่น น้ำมันแร่ ค่าความหยาบ หลังการทดลอง มีค่า 0.605 ไมโครเมตร น้ำมันมะพร้าว ค่าความหยาบ 2.266 ไมโครเมตร น้ำมันถั่วเหลือง 3.544

ไมโครเมตร และ ไม่ใช้สารหล่อลื่น ค่าความหยาบ 7.716 ไมโครเมตร โดยค่าที่แสดง ถ้าค่ามีตัวเลขที่สูงแสดงถึง ความหยาบ ที่มาก ดังกราฟ ที่แสดง จะเห็นได้ว่า กลุ่มของวัสดุ AL6063 ไม่ใช้สารหล่อลื่นในการขึ้นรูปนั้น จะมีค่า ความหยาบที่มาก ส่วนวัสดุ AL1100 ซึ่งใช้สารหล่อลื่นน้ำมันแร่นั้น จะใช้ผิวชิ้นงานที่ ละเอียด ที่สุดเนื่องสารหล่อลื่นช่วยลดความเสียหาย ของชิ้นงานและ คาย ขณะขึ้นรูป ส่งผลต่อผิวชิ้นงาน ให้มีความเรียบมากขึ้น

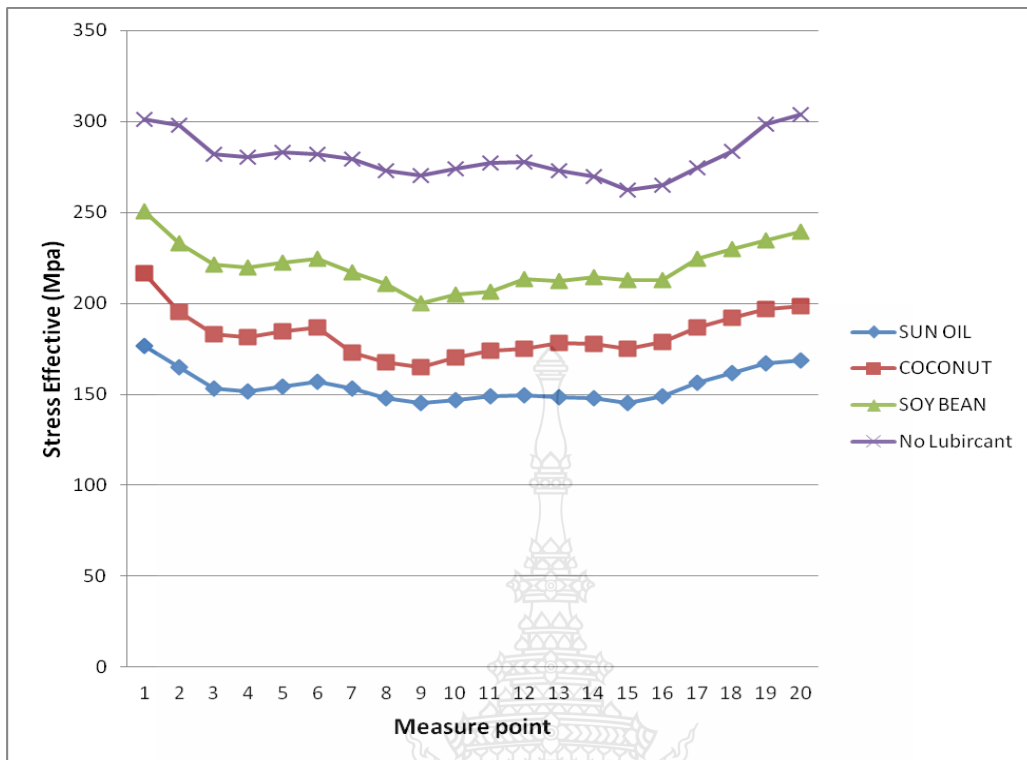
4.3 ลักษณะการกระจายตัวของความเค้น

ลักษณะการกระจายตัวของความเค้นที่เกิดขึ้นกับวัสดุหลังจากการจำลอง การอัดขึ้นรูปแบบ ไหลตาม ด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ สามารถจำแนกลักษณะความเค้นที่เกิดขึ้นตามขนาดของมุมคาย โดย กำหนด ตำแหน่งค่าของความเค้น ที่ทำการจำลองโดยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ จำนวน 20 จุดดังแสดง ในรูปที่ 4.8



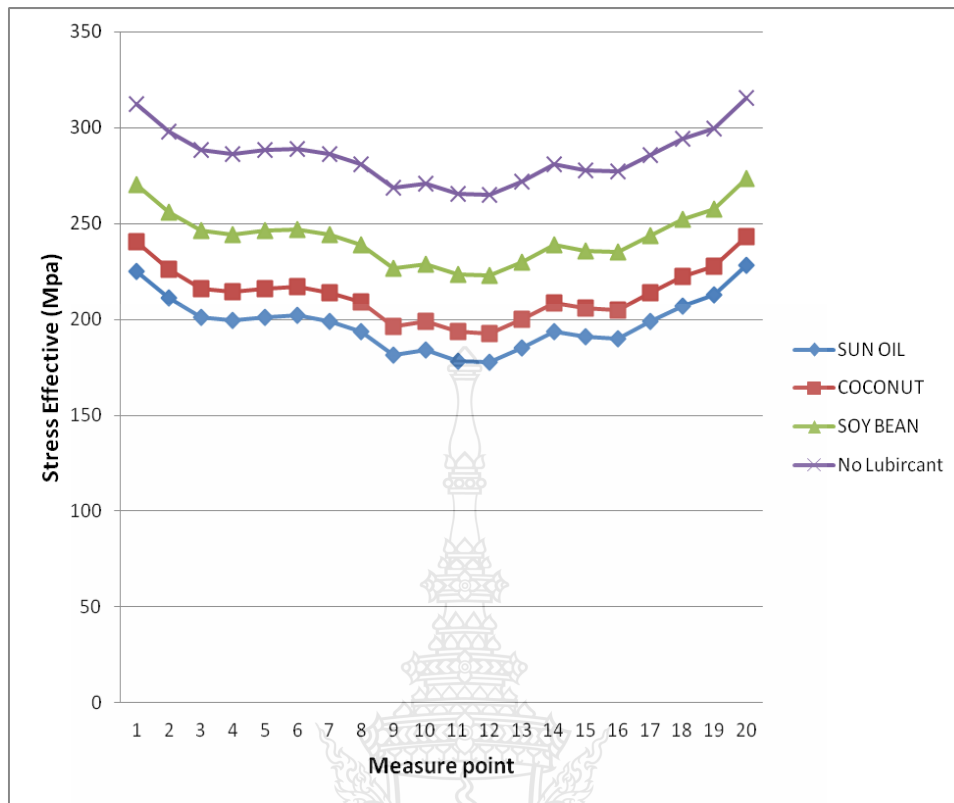
รูปที่ 4.8 รูปแสดง ตำแหน่งของค่า ความเค้นที่เกิดขึ้น โดยทำการระบุตำแหน่ง 20 จุด แสดง ซึ่งระบุความแตกต่างของความเค้นโดยสี

จากการศึกษาพบว่าค่าความเค้นแต่ละมุมคาย แต่ละสารหล่อลื่นมีความแตกต่างกัน เนื่องจากผลของแรงกดขึ้นรูปที่ต่างกัน โดยพบว่าปริมาณแรงกด มีความสัมพันธ์ กับความเค้น ดังแสดงในกราฟ 5.4



รูปที่ 4.10 ลักษณะการกระจายตัวของความเค้นจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ในการใช้สารหล่อลื่นน้ำมันแร่ ที่มุมคาย 20 องศา ของอลูมิเนียม AL 1100

จากรูปที่ 4.10 แสดงความเค้นที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานมุมคาย 20° ในแต่ละช่วงของการอัดขึ้นรูป โดยขนาดของความเค้นที่เกิดขึ้นสามารถสังเกตได้จากจุดวัดความเค้น ซึ่งเริ่มที่จุดที่ 1 ซึ่งเป็นผิวนอกของชิ้นงาน และกระจาย ระยะเข้ามาแกนในของชิ้นงาน จนถึงจุดที่ 20 ซึ่งเป็นผิวของชิ้นงานอีกด้านหนึ่ง ผลการวิเคราะห์สรุปของในกราฟ 5. 3 พบว่า ความเค้นสูงสุดเกิดขึ้นบริเวณผิวนอกของชิ้นงาน ซึ่งภายในแกนกลางจะมีความเค้นต่ำที่สุด เนื่องจาก ผิวของชิ้นงาน สัมผัสโดยตรง กับผิว คายทำให้เกิดความเค้น มากขณะที่ พื้นกดขึ้นรูปขึ้นรูป และ สารหล่อลื่นที่ช่วยลด แรงเสียดทานให้น้อยที่สุด ซึ่ง ความเค้นก็จะต่ำลงด้วย คือ น้ำมันแร่ และ การไม่ใช้สารหล่อลื่นเลย ในขณะที่ขึ้นรูปชิ้นงานนั้นทำให้เกิดความมากที่สุด

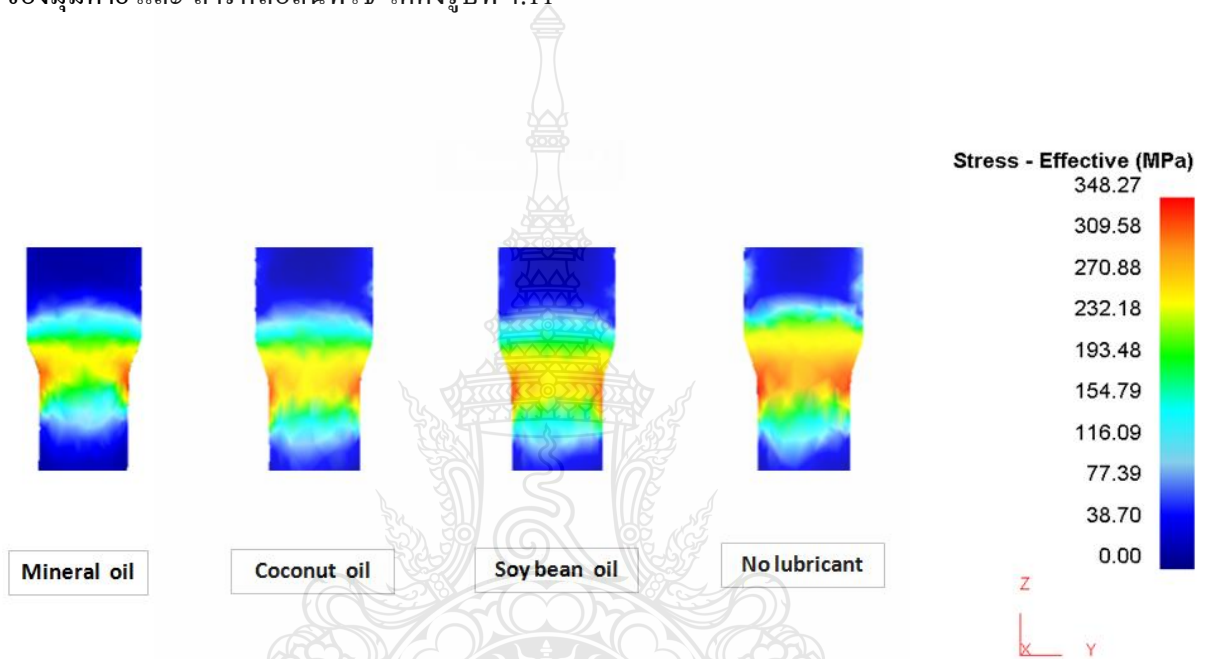


รูปที่ 4.11 ลักษณะการกระจายตัวของความเค้นจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ในการใช้สารหล่อลื่นน้ำมันแร่ , น้ำมันมะพร้าว, น้ำมันถั่วเหลือง และ ไม่ใช้สารหล่อลื่น ของอลูมิเนียม AL 1100

จากรูปที่ 4.11 กราฟแสดงความเค้นที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานมุมตาย ใช้สารหล่อลื่นน้ำมันแร่ , น้ำมันมะพร้าว , น้ำมันถั่วเหลือง และ ไม่ใช้สารหล่อลื่น ในแต่ละช่วงของการอัดขึ้นรูป โดยขนาดของความเค้นที่เกิดขึ้นสามารถสังเกตได้จากจุดวัดความเค้น ซึ่งเริ่มที่จุดที่ 1 ซึ่งเป็นผิวนอกของชิ้นงาน และกระจาย ระยะเข้ามาแกนในของชิ้นงาน จนถึงจุดที่ 20 ซึ่งเป็นผิวของชิ้นงานอีกด้านหนึ่ง ผลการวิเคราะห์สรุปของในกราฟ 5. 4 พบว่า ความเค้นสูงสุดเกิดขึ้นบริเวณผิวนอกของชิ้นงาน ซึ่งภายในแกนกลางจะมีความเค้นต่ำที่สุด เนื่องจาก วัสดุ AL1100 มีความหนาแน่นน้อยที่สุด และ AL2011 AL6063 มีความหนาแน่นมากที่สุดตามลำดับ โดย จะพบว่าถ้าไม่ใช้สารหล่อลื่น และใช้วัสดุ AL6063 ในการขึ้นรูป ผลการวิเคราะห์พบว่า ทำให้มีความเค้นตกค้างมากที่สุด ดังแสดงจากกราฟ 5.4

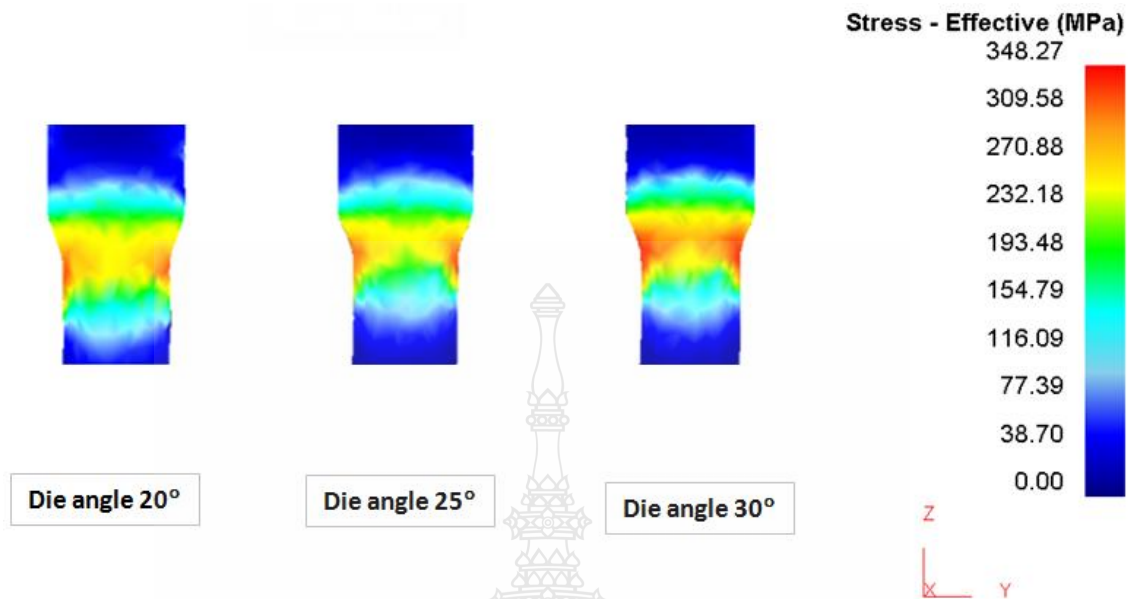
4.4 การกระจายตัวของความเค้นแบบ Stress Effective

ลักษณะการกระจายตัวของความเครียดที่เกิดขึ้นกับวัสดุหลังจากการจำลอง การอัดขึ้นรูปแบบไหลตามด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ สามารถจำแนกลักษณะความเครียดที่เกิดขึ้นตามขนาดของมุมตาย และ สารหล่อลื่นที่ใช้ ได้ดังรูปที่ 4.11



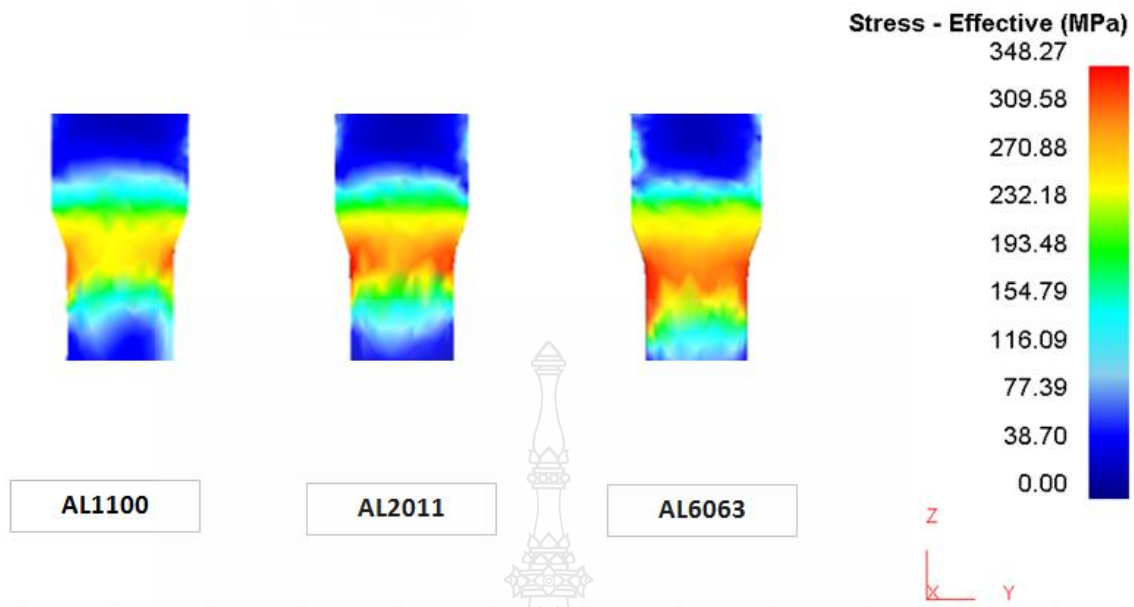
รูปที่ 4.12 แสดงการกระจายความเค้นแบบ Stress effective ในการอัดขึ้นรูปอลูมิเนียมที่มุมตาย 20°

จากรูปที่ 4.12 แสดงความเค้นที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานมุมตาย 20° ในแต่ละช่วงของการอัดขึ้นรูป โดยขนาดของความเค้นที่เกิดขึ้นสามารถสังเกตได้จากสีที่เกิดขึ้นในตัวของชิ้นงาน และอ่านค่าได้จากแถบสีที่ปรากฏ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า ช่วงแรกเป็นช่วงก่อนการอัดขึ้นรูปจะยังไม่มีความเค้นเกิดขึ้น หรืออาจเกิดขึ้นได้น้อยมาก โดยจะปรากฏเป็นสีน้ำเงิน ช่วงที่สองคือช่วงระหว่างการอัดขึ้นรูปจะเป็นช่วงที่ความเค้นกระจายตัวเป็นชั้น ๆ ซึ่งถ้าสังเกตจากแถบสีที่เกิดขึ้นนั้นจะเริ่มจากสีน้ำเงินจนถึงสีส้ม และช่วงที่สามคือช่วงหลังจากการอัดขึ้นรูปนั้น การกระจายตัวของความเค้นจะเริ่มสม่ำเสมอไปจนถึงปลายของชิ้นงานจะมีความเค้นสูงสุดเกิดที่บริเวณขอบนอกของชิ้นงาน โดยความเค้นที่เกิดขึ้นนั้นจะมีลักษณะเป็นวงกลมจากด้านในและกระจายตัวออกมาเป็นแนวรัศมี ซึ่งถ้าเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ ชนิดของสารหล่อลื่น พบว่า น้ำมันแร่ , น้ำมันมะพร้าว และน้ำมันถั่วเหลือง ให้ค่าความเค้นตกค้าง น้อยที่สุด และค่าความเค้นตกค้าง มากที่สุด คือไม่ใช้สารหล่อลื่นในการอัดขึ้นรูป ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ใช้แรงมากที่สุดในการขึ้นรูป



รูปที่ 4.13 แสดงการกระจายความเค้นแบบ Stress effective ในการอัดขึ้นรูปโพลีเอทิลีน ที่มุมตาย 20°, 25°, 30°

จากรูปที่ 4.13 แสดงความเค้นที่เกิดขึ้นเปรียบเทียบกับชิ้นงานมุมตาย 20°, 25°, 30° ในแต่ละช่วงของการอัดขึ้นรูป โดยขนาดของความเค้นที่เกิดขึ้นสามารถสังเกตได้จากสีที่เกิดขึ้นในตัวของชิ้นงาน และอ่านค่าได้จากแถบสีที่ปรากฏ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า ช่วงแรกเป็นช่วงก่อนการอัดขึ้นรูปมุมตายที่ 20°, 25°, 30° จะยังไม่มีมีความเค้นเกิดขึ้นหรืออาจเกิดขึ้นได้น้อยมาก โดยจะปรากฏเป็นสีน้ำเงิน ช่วงที่สองคือช่วงระหว่างการอัดขึ้นรูปจะเป็นช่วงที่ความเค้นกระจายตัวเป็นชั้น ๆ ซึ่งถ้าสังเกตจากแถบสีที่เกิดขึ้นนั้นจะเริ่มจากสีน้ำเงินจนถึงสีส้ม ซึ่งมุมตายที่ 30° การกระจายตัวของความเค้นจะเกิดขึ้นสูงสุด และมุมตาย 20°, 25°, 30° ความเค้นสูงสุดเกิดที่บริเวณขอบนอกของชิ้นงาน โดยความเค้นที่เกิดขึ้นนั้นจะมีลักษณะเป็นวงกลมจากด้านในและกระจายตัวออกมาเป็นแนวรัศมี ซึ่งถ้าเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ พบว่ามุมตาย ถ้ามีความชันมากขึ้นส่งผลให้ค่าความเค้นมากขึ้นตามลำดับโดยเริ่มจาก มุมตายที่ 20°, 25°, 30° ค่าความเค้นตกค้าง มากที่สุด คือมุมตายที่ 30° ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลอง



รูปที่ 4.14 แสดงการกระจายความเค้นแบบ Stress effective ในการอัดขึ้นรูปอลูมิเนียมของ วัสดุ AL1100, AL 2011, AL6063

จากรูปที่ 4.14 แสดงความเค้นที่เกิดขึ้น เปรียบเทียบกับชิ้นงานวัสดุ AL1100, AL2011 และ AL6063 ในแต่ละช่วงของการอัดขึ้นรูป โดยขนาดของความเค้นที่เกิดขึ้นสามารถสังเกตได้จากสีที่เกิดขึ้นในตัวของชิ้นงาน และอ่านค่าได้จากแถบสีที่ปรากฏ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า ช่วงแรกเป็นช่วงก่อนการอัดขึ้นรูปวัสดุ AL1100 ,AL2011 และ AL6063 จะยังไม่มีมีความเค้นเกิดขึ้นหรืออาจเกิดขึ้นได้น้อยมาก โดยจะปรากฏเป็นสีน้ำเงิน ช่วงที่สองคือช่วงระหว่างการอัดขึ้นรูปจะเป็นช่วงที่ความเค้นกระจายตัวเป็นชั้น ๆ ซึ่งถ้าสังเกตจากแถบสีที่เกิดขึ้นนั้นจะเริ่มจากสีน้ำเงินจนถึงสีส้ม ซึ่งวัสดุ AL6063 การกระจายตัวของความเค้นจะเกิดขึ้นสูงสุด และวัสดุทดสอบ AL1100 ,AL 2011 ,AL6063 ความเค้นสูงสุดเกิดที่บริเวณขอบนอกของชิ้นงาน โดยความเค้นที่เกิดขึ้นนั้นจะมีลักษณะเป็นวงกลมจากด้านในและกระจายตัวออกมาเป็นแนวรัศมี ซึ่งถ้าเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ พบว่าวัสดุ ถ้ามีความแข็งแรงมากขึ้นส่งผลให้ค่าความเค้นมากขึ้นตามลำดับ โดยเริ่มจาก AL1100 ,AL 2011 ,AL6063 ตามลำดับ จะเห็นว่าค่าความเค้นตกค้าง มากที่สุด คือ AL6063 ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลอง

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาถึง ปัจจัยและพัฒนากระบวนการอัดขึ้นรูปเย็นแบบไหลตามแท่ง อลูมิเนียมในประเทศไทย โดยนำหลักขั้นตอนการจำลองการอัดขึ้นรูปเย็นแบบไหลตามด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ มาช่วยในการศึกษา เพื่อช่วยในการแก้ปัญหา และทำการศึกษาการอัดขึ้นรูปที่มุมคาย 20, 25 และ 30 องศาตามลำดับ วัสดุอลูมิเนียม เกรด 1100, 2011 และ 6063 โดยใช้น้ำมันแร่เป็นสารหล่อลื่น น้ำมันมะพร้าว น้ำมันถั่วเหลือง และไม่ใช่สารหล่อลื่น ซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองเราจะสังเกตได้ว่าเมื่อทำการจำลองการอัดขึ้นรูปเย็นแบบไหลตามด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ อลูมิเนียม เกรด 1100, 2011 และ เกรด 6063 โดยใช้น้ำมันแร่เป็นสารหล่อลื่น , น้ำมันมะพร้าว, น้ำมันถั่วเหลือง และไม่ใช่สารหล่อลื่น สามารถกล่าวได้ดังนี้

5.1.1 แรงในการอัดขึ้นรูป

จากแรงที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปเย็นจะสังเกตเห็นได้ว่ามุมคายมีผลต่อแรงที่ใช้ในการอัดขึ้นรูป โดยการจำลองการอัดขึ้นรูปเย็นแบบไหลตามด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ซึ่งมุมคายที่ใช้แรงในการอัดขึ้นรูปน้อยที่สุด คือ มุมคาย 20 องศา มีค่าเท่ากับ 64.02 KN และเมื่อนำแรงที่ได้จากการจำลองการอัดขึ้นรูปแบบไหลตามด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์มาเปรียบเทียบกับแรงอัดขึ้นรูปจริง จะพบว่าค่าของแรงที่ได้มีความใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงสรุปว่าการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์และการอัดขึ้นรูปจริงมีผลที่ได้ออกมามีลักษณะข้อมูลในแนวทางเดียวกัน และเห็นเหตุผลที่มุมคาย 20 องศาใช้แรงในการอัดขึ้นรูปน้อยที่สุดก็เพราะถ้ายังมีมุมคายมีค่ามากก็จะยิ่งทำให้วัสดุไหลตัวได้ยากจึงส่งผลให้ใช้แรงในการอัดขึ้นรูปสูงตามไปด้วย

5.1.2 การกระจายตัวของความเค้น

ลักษณะการกระจายตัวของความเค้นที่เกิดขึ้นกับวัสดุหลังจากการจำลองการอัดขึ้นรูปแบบไหลตามด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ แสดงความเค้นที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานในแต่ละช่วงของการอัดขึ้นรูป ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า [16] ช่วงแรกเป็นช่วงก่อนการอัดขึ้นรูปจะยังไม่มีความเค้นเกิดขึ้นหรืออาจเกิดขึ้นได้น้อยมาก โดยจะปรากฏเป็นสีน้ำเงิน ช่วงที่สองคือช่วงระหว่างการอัดขึ้นรูปจะเป็นช่วงที่ความเค้นกระจายตัวเป็นชั้น ๆ เมื่ออลูมิเนียมไหลผ่าน คาย สังเกตว่าแถบสีที่เกิดขึ้นนั้นจะเริ่ม

จากสีน้ำเงินจนถึงสีส้ม และช่วงที่สามคือช่วงหลังจากการอัดขึ้นรูปนั้น การกระจายตัวของความเค้น จะเริ่มสม่ำเสมอไปจนถึงปลายของชิ้นงานจะมีความเค้นสูงสุดเกิดที่บริเวณผิวขอบนอกของชิ้นงาน โดยความเค้นที่เกิดขึ้นนั้นจะมีลักษณะเป็นวงกลมจากด้านในและกระจายตัวออกมาเป็นรัศมี และเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับกรอัดขึ้นรูปจริง ผลของการอัดขึ้นรูปจริงนั้นมีความหนาแน่นที่เกิดบริเวณ แกนกลางเพิ่มขึ้น และเป็นผลให้ความแข็งผิวบริเวณด้านในมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นผลที่ได้คือออกมาที่มีความ เป็นไปได้อยู่ในแนวทางเดียวกัน

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 การจำลองการอัดขึ้นรูปเย็นแบบไหลตามด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ กับวัสดุอลูมิเนียม ต่างขึ้น มุมคายต่างกัน และสารหล่อลื่นอื่นๆ อาจมีค่าที่ได้ออกมาไม่ค่อยแน่นอน ขึ้นอยู่กับ การทดสอบวัสดุอลูมิเนียม และขึ้นอยู่กับเครื่องที่ใช้ทำการทดสอบว่ามีความแม่นยำ เพียงตรงมากเพียงใด เพราะฉะนั้นเราควรทำการศึกษาค้นคว้าหาข้อมูลให้ดีกว่าก่อนลงมือทำ

5.2.2 การจำลองด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของโปรแกรม Deform 3D ก่อนที่จะเริ่มทำเรา ควรศึกษา หาข้อมูล และลองใช้โปรแกรมบ่อยๆ เพราะ Deform 3D มีลักษณะการใช้งานที่ยาก พอสมควร เนื่องจากมีคำสั่งการใช้งานมีมาก ทำให้ผู้ที่ต้องใช้ต้องมีความเชี่ยวชาญหรือชำนาญในการ ใช้โปรแกรม Deform 3D พอสมควรถึงจะทำให้ได้ข้อมูลที่ออกมาที่มีความเที่ยงตรง และแม่นยำ

5.2.3 ควรจัดเตรียม คอมพิวเตอร์ ที่มีหน่วยความจำมากเพื่อที่จะทำให้ระยะเวลาในการคำนวณ ของแต่ละ ข้อมูลใช้เวลาสั้นลง

5.2.4 ทำการศึกษาและพัฒนากระบวนการอัดขึ้นรูปเย็นแบบไหลทวนแท่งอลูมิเนียมใน ประเทศไทย

5.2.5 ทำการจำลองด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยให้ขนาด เอลิเมนต์ ที่มี ความละเอียดสูงขึ้น ซึ่งค่าจะมีความละเอียดแม่นยำสูงขึ้น ลดความผิดพลาด ผลการวิเคราะห์

บรรณานุกรม

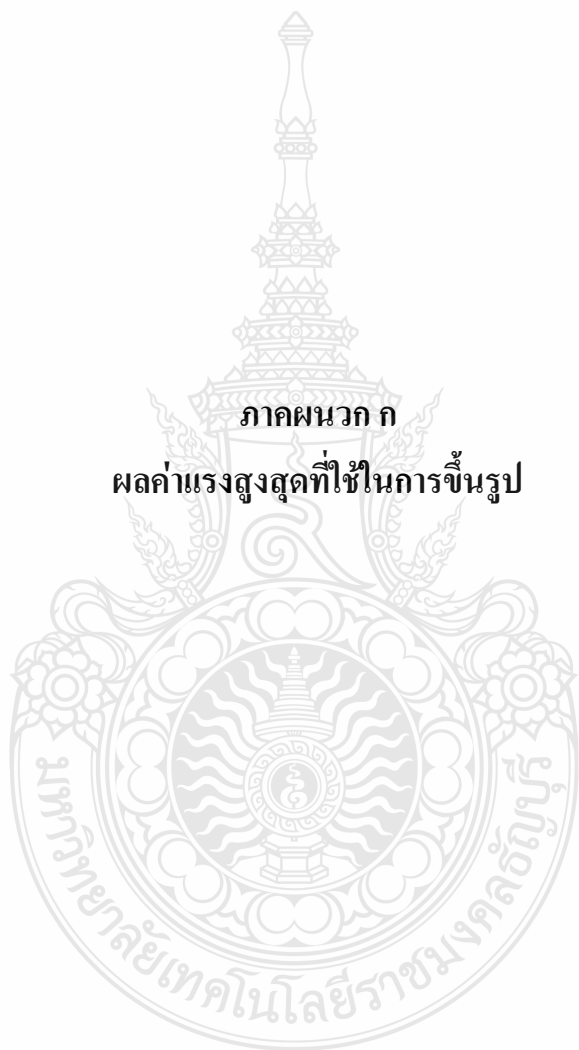
- [1] Kurt Lange, McGraw-Hill. The United States of America, " **Handbook of metal forming**," pp. 13.1-13.27, 1985.
- [2] ศิริชัย ต่อดสกุล และอนุชา วัฒนาภา, "พื้นฐานเทคโนโลยีการขึ้นรูป ". กรุงเทพฯ: บริษัท วี.พริน (1991) จำกัด, 2554.
- [3] ดำรง ไชยธีรานุวัฒน์ศิริ , การขึ้นรูปโลหะ . กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2538.
- [4] ASM International The Materials Information Company. " **Volume 2 Properties and Selection : Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials**," United States of America : United States of America.1990.
- [5] มนัส สติรจินดา , โลหะนอกกลุ่มเหล็ก .พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , 2538.
- [6] เกษม ธรรมโกศล , "อิทธิพลของสารหล่อลื่นของแข็งต่อการหล่อลื่นแบบเทอร์โมอีลาสโตไฮโดรไดนามิกส์," ปรินญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต , สถาบันเทคโนโลยีเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, วิศวกรรมศาสตร์, 2546.
- [7] S.Syahrullail, C.S.N . Azwadi,Tiong Chiong Ing, " **The Metal Flow Evaluation of Billet Extruded with RBD Palm Stearin,u Journal of International Review of Mechanical: Engineering (I.R.E.M.E.)**," Journal of International Review of Mechanical, vol. 1, pp. 21-27, January 2011.
- [8] Dyi-Cheng Chen, Sheng-Kai Syu, Cing-Hong Wu, Sin-Kai Lin, " **Investigation into cold extrusion of aluminum billets using three-dimensional finite element method**," Journal of Materials Processing Technology, pp. 188-193, 2007.
- [9] Celio Caminaga, Rafael Lopis da Silva Issii, S'ergio Tonini Button, " **Alternative lubrication and lubricants for the cold extrusion of steel parts**", Journal of Materials Processing Technology, pp. 87-91,2007.
- [10] E. Rajesh, M. SivaPrakash, " **Analysis of friction factor by employing the ring compression test under different lubricants** ", International Journal of Scientific & Engineering Research, Volume 4, Issue 5, May-2013.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [11] Vesna MANDIC, "**FRICITION STUDIES UTILIZING THE RING**",8th Internation Tribology Conference,Beograd,pp. 8-10,2003.
- [12] B.P.P.A. Gouveia *, J.M.C. Rodrigues, P.A.F. Martins "**Finite element modeling of cold forward extrusion using updated Lagrangian and combined Eulerian–Lagrangian formulations**", Journal of Materials Processing Technology, pp. 647–652, 1998.
- [13] Celio Caminaga , Frederico Ozanan Neves , Fernando C´esar Gentile , S´ergio Tonini Button," **Study of alternative lubricants to the cold extrusion of steel shafts**", Journal of Materials Processing Technology, pp. 432–439,2007.
- [14] วิสุทธิ์ ยี่โถ , "**การศึกษาและพัฒนากระบวนการอัดขึ้นรูปเย็นแบบไหลตามของวัสดุอะลูมิเนียมในประเทศไทย** ," ปรินญานิพนธ์วิศวกรรม ศาสตรมหาบัณฑิต, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2555.
- [15] Rijesh M, James Valder, and A O Surendranathan, "**Determination of friction factor by ring compression test for Al-5Zn-1Mg using graphite and MoS₂ lubricants**", Thammasat International Journal of Science and Technology, *Vol. 17, No. 3, July-September 2012*
- [16] ประสิทธิ์ เขื่อนมี , ยุทธนา พลศักดิ์ , "**การวิเคราะห์การไหลตัวของแท่งอลูมิเนียมในกระบวนการอัดขึ้นรูปเย็นแบบไหลตามโดยการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์** ," ปรินญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี , 2556.

ภาคผนวก





ภาคผนวก ก

ผลค่าแรงสูงสุดที่ใช้ในการขึ้นรูป

ผลการทดลองแรงสูงสุดที่ใช้ขึ้นรูปเปรียบเทียบกับการวิเคราะห์จาก โปรแกรม Deform 3D Ver 10

ตารางที่ 1 ค่าแรงสูงสุดที่ใช้ในการขึ้นรูป อลูมิเนียมAL1100 มุมคาย 20,25,30องศา

แรงที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงาน วัสดุ AL 1100 (kN)								
	ผลการ ทดลอง น้ำมันแร่	ผลการ วิเคราะห์ น้ำมันแร่	ผลการ ทดลอง น้ำมันถั่ว เหลือง	ผลการ วิเคราะห์ น้ำมันถั่ว เหลือง	ผลการ ทดลอง น้ำมัน มะพร้าว	ผลการ วิเคราะห์ น้ำมัน มะพร้าว	ผลการ ทดลอง ไม่ใช่ สารหล่อ ลื่น	ผลการ วิเคราะห์ ไม่ใช่สาร หล่อลื่น
มุมคาย 20°	64.02	61.14	84.56	80.3	70.73	68.7	116.76	110.2
มุมคาย 25°	67.79	65.02	86.62	85.13	76.28	72.71	0	0
มุมคาย 30°	83.06	80.12	104.97	102.54	87.22	85.32	0	0

ตารางที่ 2 ค่าแรงสูงสุดที่ใช้ในการขึ้นรูป อลูมิเนียมAL2011มุมคาย 20,25,30 องศา

แรงที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงาน วัสดุ AL 1100 (kN)								
	ผลการ ทดลอง น้ำมันแร่	ผลการ วิเคราะห์ น้ำมันแร่	ผลการ ทดลอง น้ำมันถั่ว เหลือง	ผลการ วิเคราะห์ น้ำมันถั่ว เหลือง	ผลการ ทดลอง น้ำมัน มะพร้าว	ผลการ วิเคราะห์ น้ำมัน มะพร้าว	ผลการ ทดลอง ไม่ใช่สาร หล่อลื่น	ผลการ วิเคราะห์ ไม่ใช่สาร หล่อลื่น
มุมคาย 20°	75.66	73.24	89.81	86.37	80.46	77.27	104.85	98.32
มุมคาย 25°	77.89	75.24	92.89	89.96	83.37	78.71	0	0
มุมคาย 30°	78.99	73.92	100.47	98.14	87.25	82.65	0	0

ตารางที่ 3 ค่าแรงสูงสุดที่ใช้ในการขึ้นรูป อลูมิเนียม AL2011 มุมคาย 20,25,30 องศา

แรงที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงานวัสดุ AL 6063 (kN)								
	ผลการ ทดลอง น้ำมัน แร่	ผลการ วิเคราะห์ น้ำมันแร่	ผลการ ทดลอง น้ำมันถั่ว เหลือง	ผลการ วิเคราะห์ น้ำมันถั่ว เหลือง	ผลการ ทดลอง น้ำมัน มะพร้าว	ผลการ วิเคราะห์ น้ำมัน มะพร้าว	ผลการ ทดลอง ไม่ใช้ สารหล่อ ลื่น	ผลการ วิเคราะห์ ไม่ใช้สาร หล่อลื่น
มุมคาย 20°	73.74	70.16	96.98	92.31	85.93	83.82	170.49	164.67
มุมคาย 25°	92.55	88.97	105.44	100.78	96.23	92.07	0	0
มุมคาย 30°	95.61	91.46	112.77	107.08	99.2	92.37	0	0



ผลการวิเคราะห์ค่าความเค้น

ตารางที่ 4 ค่าความเค้นของ อลูมิเนียม AL1100 มุมคาย 20 องศา

มุมคาย 20 องศา				
ระยะกด (มม.)	น้ำมันแร่	น้ำมันมะพร้าว	น้ำมันถั่วเหลือง	ไม่ใช่สารหล่อลื่น
0	187.278671	202.278671	232.278671	274.278671
0.631579	173.134628	188.134628	218.134628	260.134628
1.263158	163.1409	178.1409	208.1409	250.1409
1.894737	161.339798	176.339798	206.339798	248.339798
2.526316	163.187363	178.187363	208.187363	250.187363
3.157895	163.982346	178.982346	208.982346	250.982346
3.789474	161.011536	176.011536	206.011536	248.011536
4.421052	155.877335	170.877335	200.877335	242.877335
5.052631	143.453568	158.453568	188.453568	230.453568
5.68421	145.913589	160.913589	190.913589	232.913589
6.31579	140.423553	155.423553	185.423553	227.423553
6.947369	139.689423	154.689423	184.689423	226.689423
7.578948	146.884537	161.884537	191.884537	233.884537
8.210526	155.720993	170.720993	200.720993	242.720993
8.842105	152.78064	167.78064	197.78064	239.78064
9.473684	151.923676	166.923676	196.923676	238.923676
10.105263	160.833191	175.833191	205.833191	247.833191
10.736842	169.118103	184.118103	214.118103	256.118103
11.368421	174.616806	189.616806	219.616806	261.616806
12	190.287201	205.287201	235.287201	277.287201

ตารางที่ 5 ค่าความเค้นของ อลูมิเนียม AL1100 มุมคาย 25 องศา

มุมคาย 25 องศา				
ระยะกด (มม.)	น้ำมันแร่	น้ำมันมะพร้าว	น้ำมันถั่วเหลือง	ไม่ใช่สารหล่อลื่น
0	208.278671	223.278671	253.278671	295.278671
0.631579	194.134628	209.134628	239.134628	281.134628
1.263158	184.1409	199.1409	229.1409	271.1409
1.894737	182.339798	197.339798	227.339798	269.339798
2.526316	184.187363	199.187363	229.187363	271.187363
3.157895	184.982346	199.982346	229.982346	271.982346
3.789474	182.011536	197.011536	227.011536	269.011536
4.421052	176.877335	191.877335	221.877335	263.877335
5.052631	164.453568	179.453568	209.453568	251.453568
5.68421	166.913589	181.913589	211.913589	253.913589
6.31579	161.423553	176.423553	206.423553	248.423553
6.947369	160.689423	175.689423	205.689423	247.689423
7.578948	167.884537	182.884537	212.884537	254.884537
8.210526	176.720993	191.720993	221.720993	263.720993
8.842105	173.78064	188.78064	218.78064	260.78064
9.473684	172.923676	187.923676	217.923676	259.923676
10.105263	181.833191	196.833191	226.833191	268.833191
10.736842	190.118103	205.118103	235.118103	277.118103
11.368421	195.616806	210.616806	240.616806	282.616806
12	211.287201	226.287201	256.287201	298.287201

ตารางที่ 6 ค่าความเค้นของ อลูมิเนียม AL1100 มุมคาย 30 องศา

มุมคาย 30 องศา				
ระยะกด (มม.)	น้ำมันแร่	น้ำมันมะพร้าว	น้ำมันถั่วเหลือง	ไม่ใช่สารหล่อลื่น
0	225.278671	240.278671	270.278671	312.278671
0.631579	211.134628	226.134628	256.134628	298.134628
1.263158	201.1409	216.1409	246.1409	288.1409
1.894737	199.339798	214.339798	244.339798	286.339798
2.526316	201.187363	216.187363	246.187363	288.187363
3.157895	201.982346	216.982346	246.982346	288.982346
3.789474	199.011536	214.011536	244.011536	286.011536
4.421052	193.877335	208.877335	238.877335	280.877335
5.052631	181.453568	196.453568	226.453568	268.453568
5.68421	183.913589	198.913589	228.913589	270.913589
6.31579	178.423553	193.423553	223.423553	265.423553
6.947369	177.689423	192.689423	222.689423	264.689423
7.578948	184.884537	199.884537	229.884537	271.884537
8.210526	193.720993	208.720993	238.720993	280.720993
8.842105	190.78064	205.78064	235.78064	277.78064
9.473684	189.923676	204.923676	234.923676	276.923676
10.105263	198.833191	213.833191	243.833191	285.833191
10.736842	207.118103	222.118103	252.118103	294.118103
11.368421	212.616806	227.616806	257.616806	299.616806
12	228.287201	243.287201	273.287201	315.287201

ตารางที่ 7 ค่าความหยาบผิว RZ

ค่าความความหยาบผิว RZ (um)			
สารหล่อลื่น/วัสดุทดสอบ	A11100	A12011	A16063
น้ำมันแร่	0.605	2.778	4.701
น้ำมันมะพร้าว	2.266	3.214	6.308
น้ำมันถั่วเหลือง	3.544	4.100	12.848
ไม่ใช้สารหล่อลื่น	7.716	9.173	25.561

ตารางที่ 8 ค่าความเสียดทาน (M)

ค่าความเสียดทาน (M)			
สารหล่อลื่น/วัสดุทดสอบ	A11100	A12011	A16063
น้ำมันแร่	0.09	0.13	0.17
น้ำมันมะพร้าว	0.16	0.18	0.21
น้ำมันถั่วเหลือง	0.21	0.25	0.27
ไม่ใช้สารหล่อลื่น	0.27	0.29	0.38



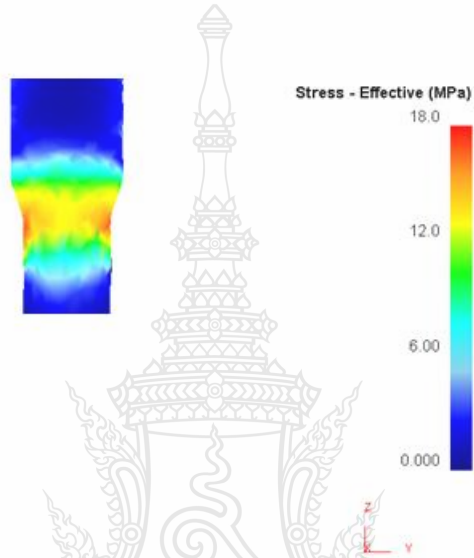
ภาคผนวก ข

ลักษณะการกระจายตัวของความเค้น

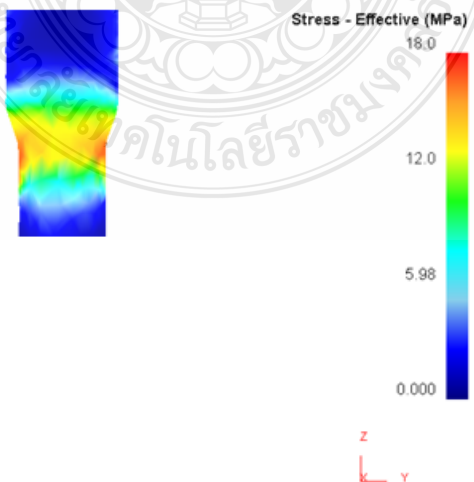
ลักษณะการกระจายตัวของความเค้น

ลักษณะการกระจายตัวของความเค้นที่เกิดขึ้นกับวัสดุหลังจากการจำลอง การอัดขึ้นรูปแบบไหลตามด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ สามารถจำแนกลักษณะความเค้นที่เกิดขึ้นตามขนาดของมุมคายได้ดังรูปที่ 1

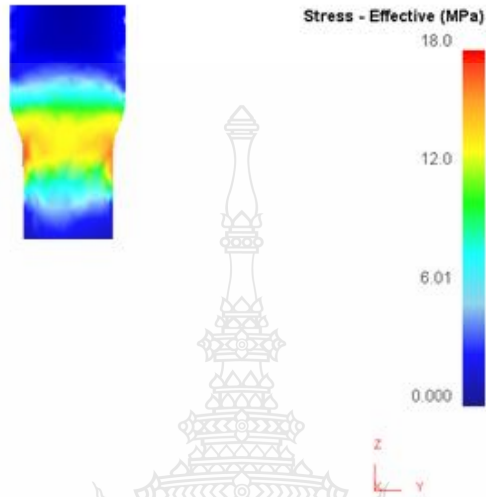
- 1) ลักษณะการกระจายตัวของความเค้น จำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ในการใช้ สารหล่อลื่นน้ำมันแร่ ที่มุมคาย 20 องศา ของอลูมิเนียม AL 1100



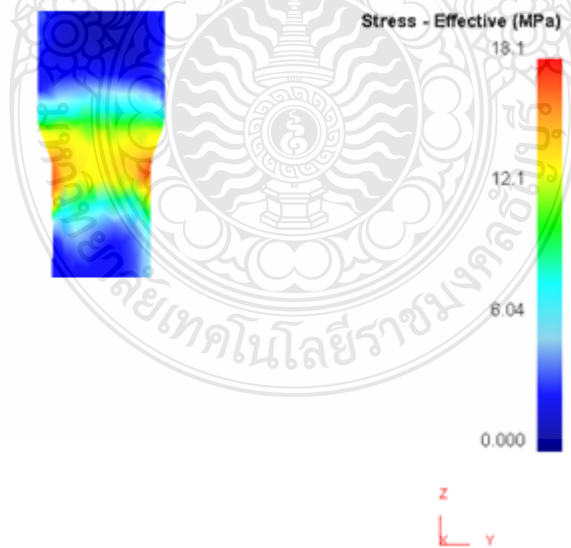
รูปที่ 1 ลักษณะการกระจายตัวของความเค้นจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ในการใช้ สารหล่อลื่นน้ำมันแร่ ที่มุมคาย 20 องศา ของอลูมิเนียม AL 1100



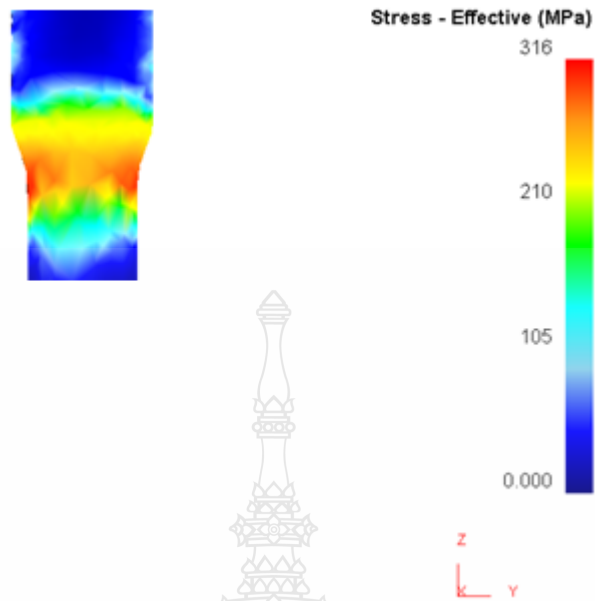
รูปที่ 2 ลักษณะการกระจายตัวของความเค้นจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ในการใช้
สารหล่อลื่นน้ำมันมะพร้าว ที่มุมคาย 20 องศา ของอลูมิเนียม AL 1100



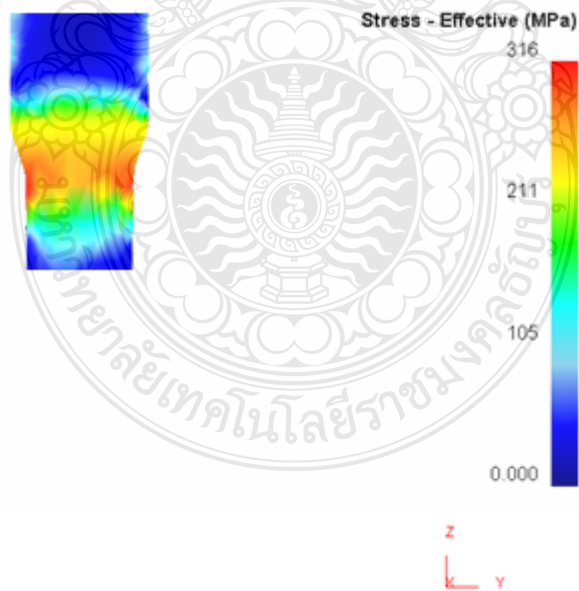
รูปที่ 3 ลักษณะการกระจายตัวของความเค้นจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ในการใช้
สารหล่อลื่นน้ำมันถั่วเหลือง ที่มุมคาย 20 องศา ของอลูมิเนียม AL 1100



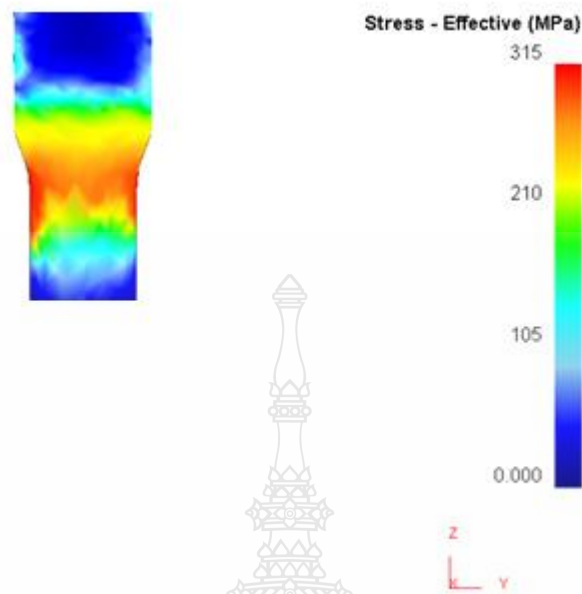
รูปที่ 4 ลักษณะการกระจายตัวของความเค้นจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยไม่ใช้
สารหล่อลื่น ที่มุมคาย 20 องศา ของอลูมิเนียม AL 1100



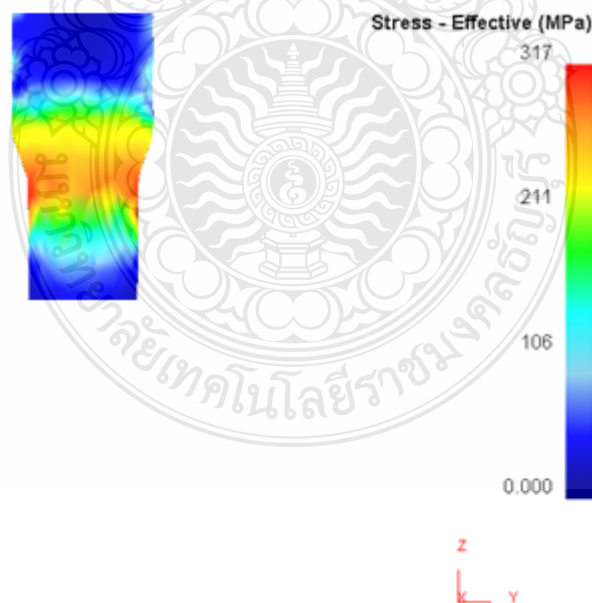
รูปที่ 5 ลักษณะการกระจายตัวของความเค้นจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ในการใช้สารหล่อลื่นน้ำมันแร่ ที่มอดคย 20 องศา ของอลูมิเนียม AL 2011



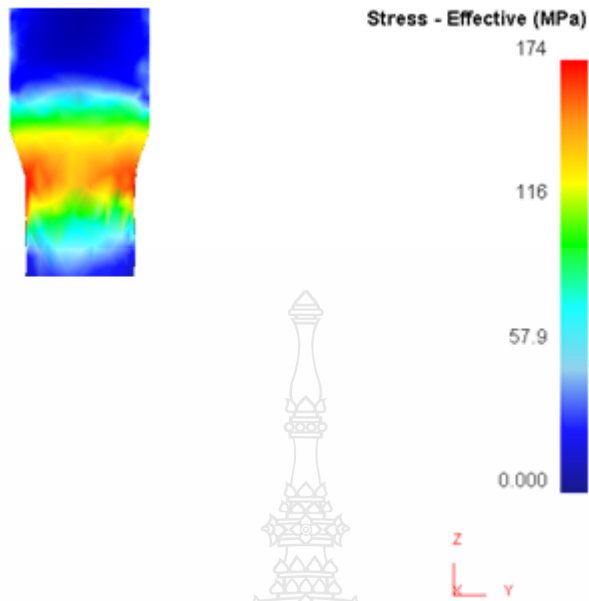
รูปที่ 6 ลักษณะการกระจายตัวของความเค้นจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ในการใช้สารหล่อลื่นน้ำมันมะพร้าว ที่มอดคย 20 องศา ของอลูมิเนียม AL2011



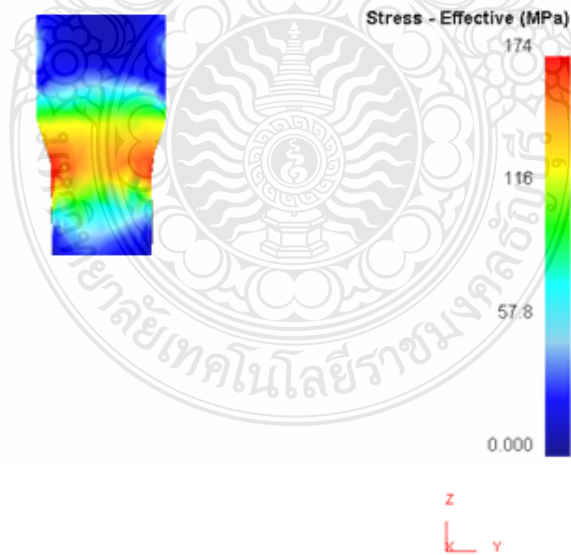
รูปที่ 7 ลักษณะการกระจายตัวของความเค้นจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ในการใช้สารหล่อลื่นน้ำมันถั่วเหลือง ที่มุมคาย 20 องศา ของอลูมิเนียม AL 2011



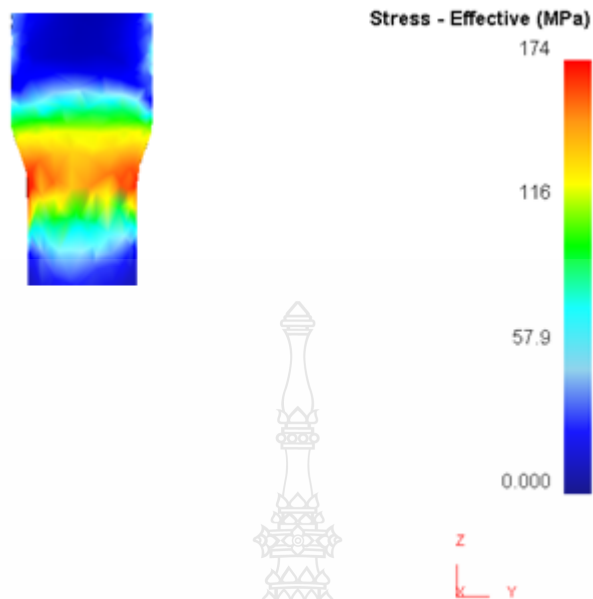
รูปที่ 8 ลักษณะการกระจายตัวของความเค้นจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยไม่ใช้สารหล่อลื่น ที่มุมคาย 20 องศา ของอลูมิเนียม AL 2011



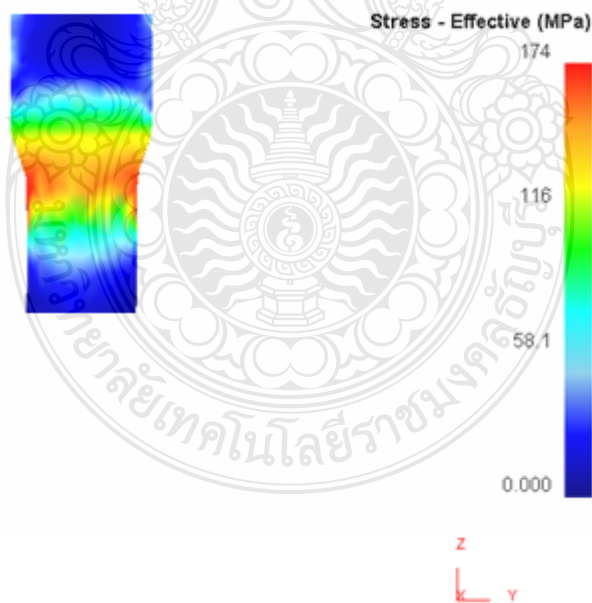
รูปที่ 9 ลักษณะการกระจายตัวของความเค้นจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ในการใช้สารหล่อลื่นน้ำมันแร่ ที่มุมคาย 20 องศา ของอลูมิเนียม AL6063



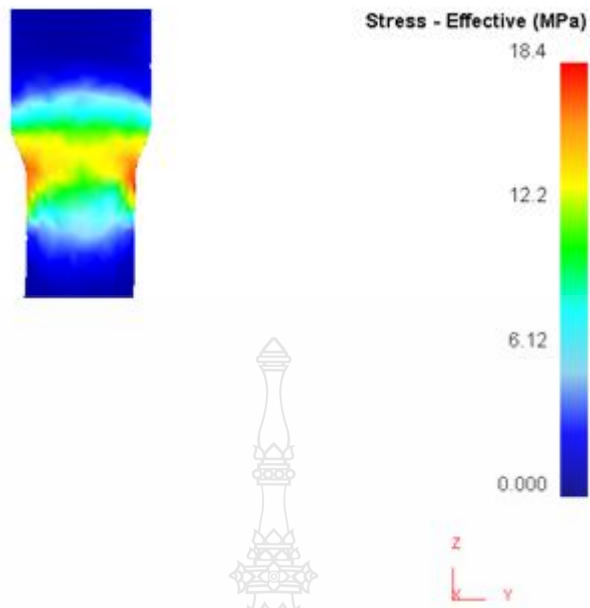
รูปที่ 10 ลักษณะการกระจายตัวของความเค้นจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ในการใช้สารหล่อลื่นน้ำมันมะพร้าว ที่มุมคาย 20 องศา ของอลูมิเนียม AL6063



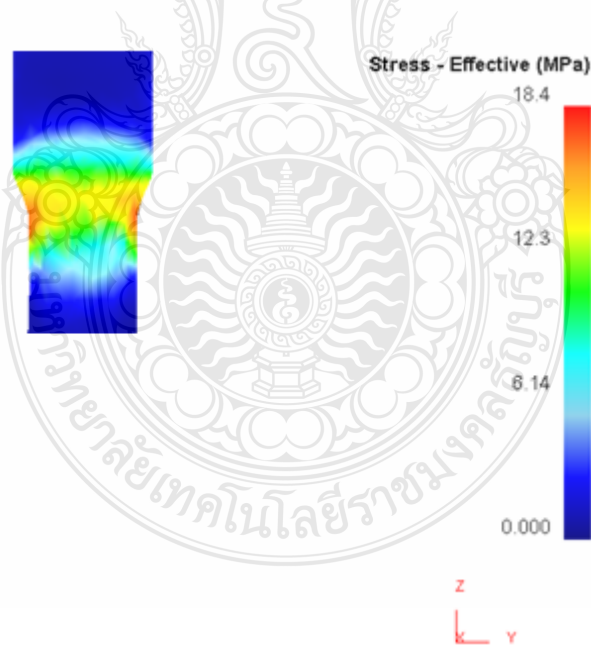
รูปที่ 11 ลักษณะการกระจายตัวของความเค้นจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ในการใช้
 สารหล่อลื่นน้ำมันถั่วเหลือง ที่มุมคาย 20 องศา ของอลูมิเนียม AL6063



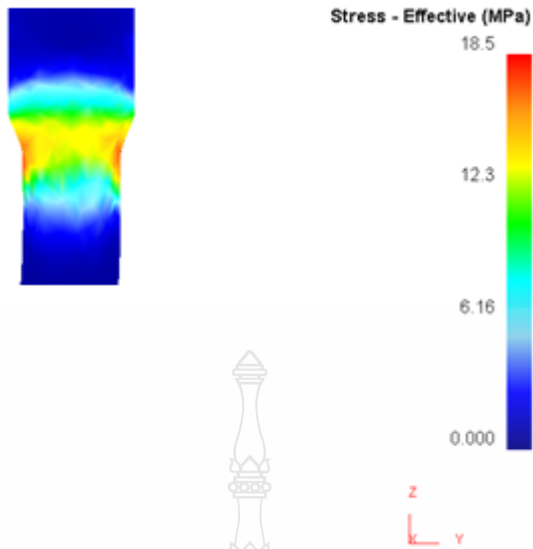
รูปที่ 12 ลักษณะการกระจายตัวของความเค้นจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยไม่ใช้
 สารหล่อลื่น ที่มุมคาย 20 องศา ของอลูมิเนียม AL6063



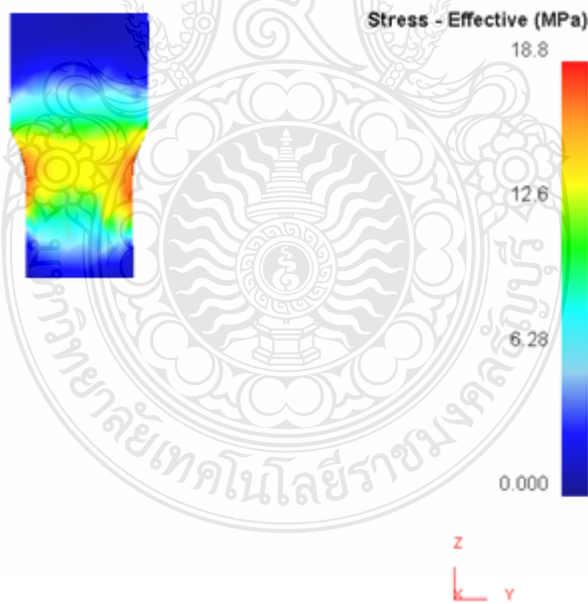
รูปที่ 13 ลักษณะการกระจายตัวของความเค้นจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้สารหล่อลื่นน้ำมันแร่ ที่มุมคาย 25 องศา ของอลูมิเนียม AL 1100



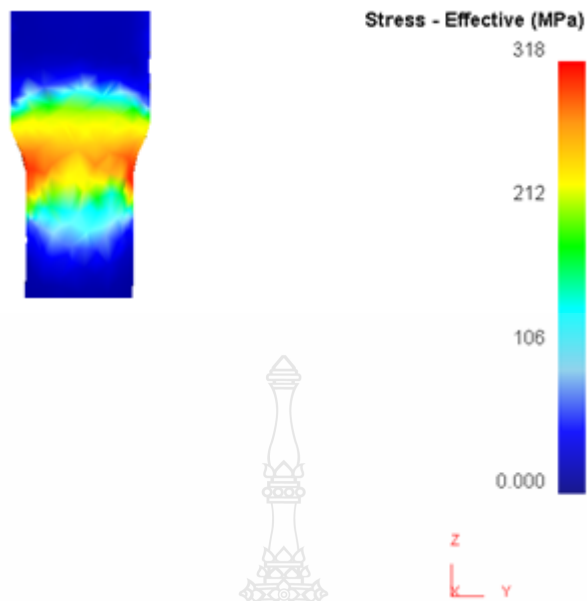
รูปที่ 14 ลักษณะการกระจายตัวของความเค้นจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้สารหล่อลื่นน้ำมันมะพร้าว ที่มุมคาย 25 องศา ของอลูมิเนียม AL 1100



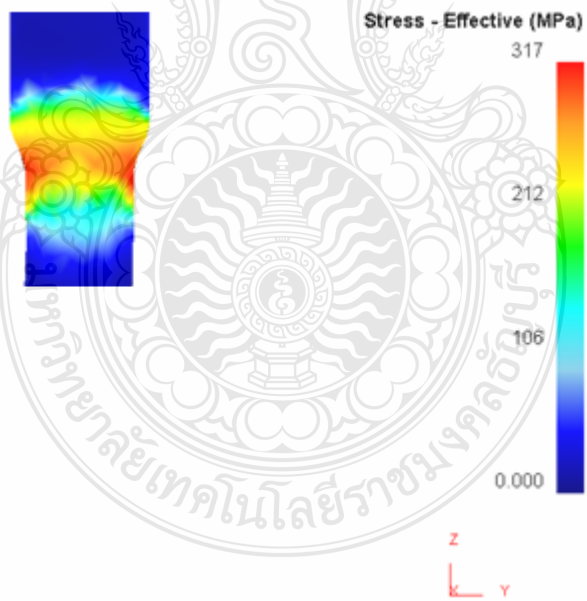
รูปที่ 15 ลักษณะการกระจายตัวของความเค้นจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้สารหล่อลื่นน้ำมันถั่วเหลือง ที่มุมคาย 25 องศา ของอลูมิเนียม AL 1100



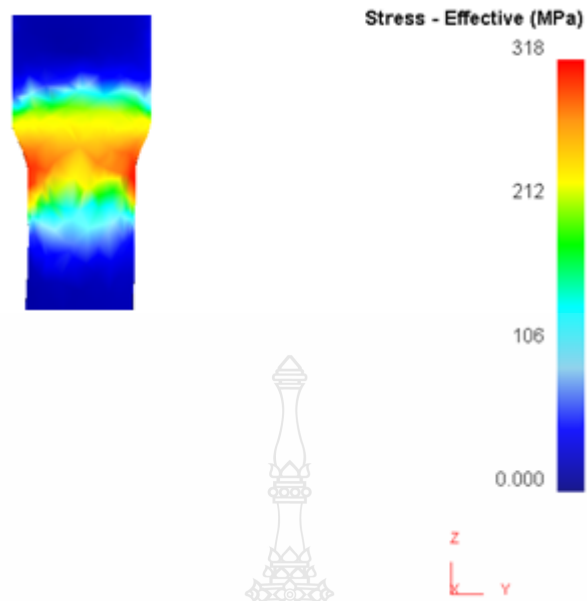
รูปที่ 16 ลักษณะการกระจายตัวของความเค้นจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยไม่ใช้สารหล่อลื่นที่มุมคาย 25 องศา ของอลูมิเนียม AL 1100



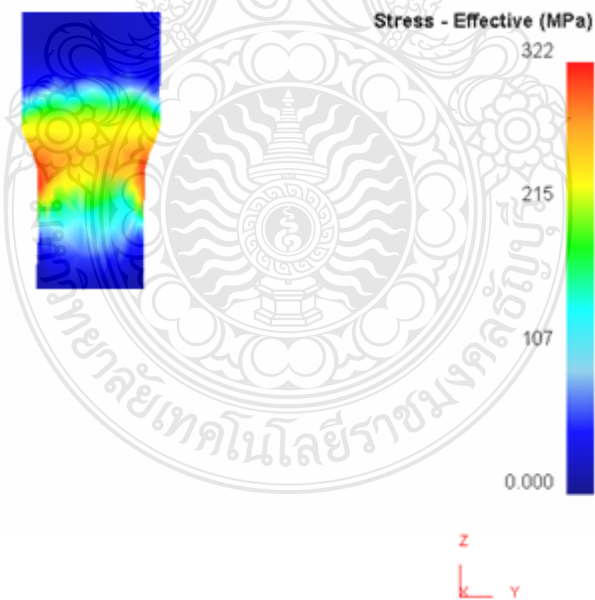
รูปที่ 17 ลักษณะการกระจายตัวของความเค้นจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้สารหล่อลื่นน้ำมันแร่ ที่มุมคาย 25 องศา ของอลูมิเนียม AL 2011



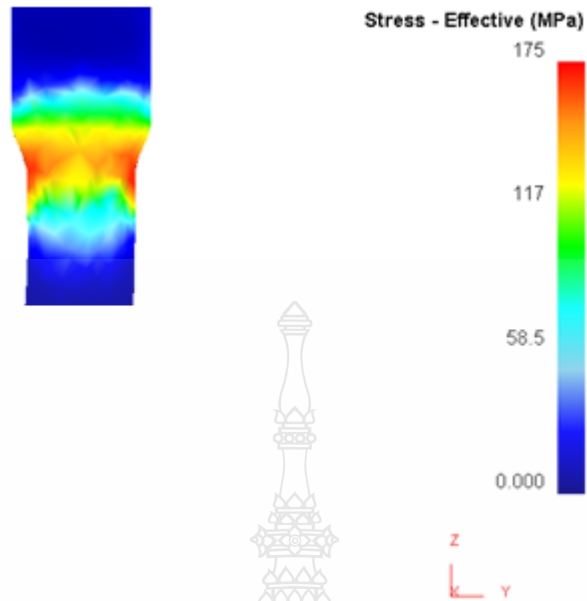
รูปที่ 18 ลักษณะการกระจายตัวของความเค้นจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้สารหล่อลื่นน้ำมันมะพร้าว ที่มุมคาย 25 องศา ของอลูมิเนียม AL 2011



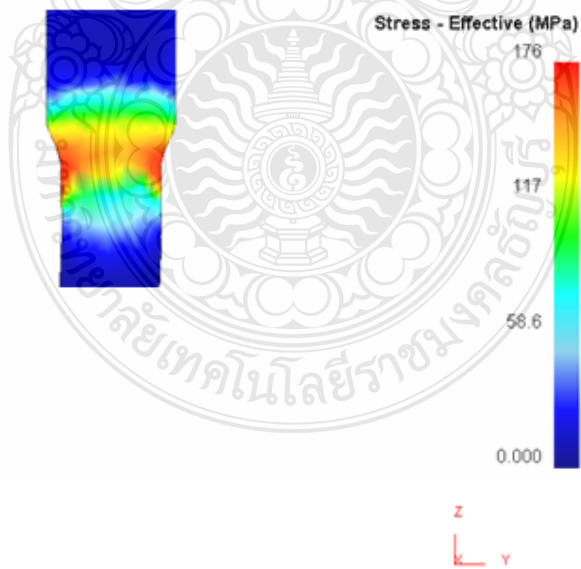
รูปที่ 19 ลักษณะการกระจายตัวของความเค้นจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้สารหล่อลื่นน้ำมันถั่วเหลือง ที่มุมตาย 25 องศา ของอลูมิเนียม AL 2011



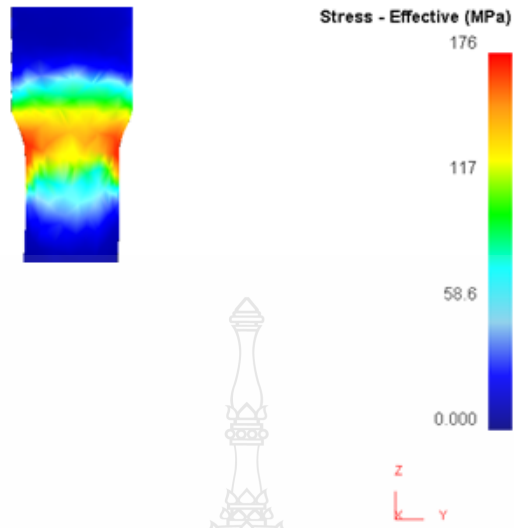
รูปที่ 20 ลักษณะการกระจายตัวของความเค้นจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยไม่ใช้สารหล่อลื่น ที่มุมตาย 25 องศา ของอลูมิเนียม AL 2011



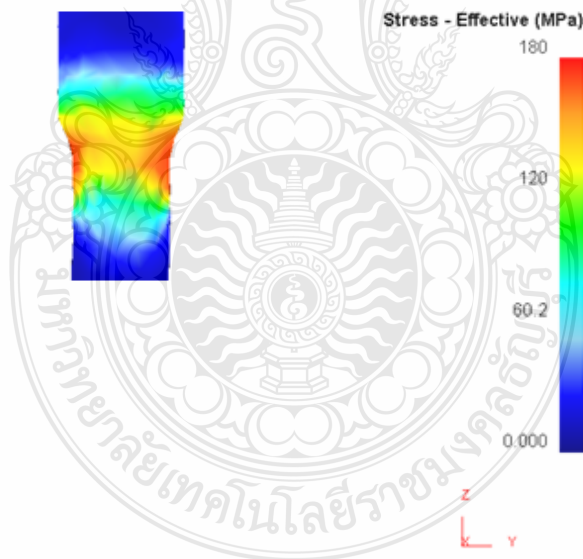
รูปที่ 21 ลักษณะการกระจายตัวของความเค้นจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้สารหล่อลื่น น้ำมันแร่ ที่มุมคาย 25 องศา ของอลูมิเนียม AL 6063



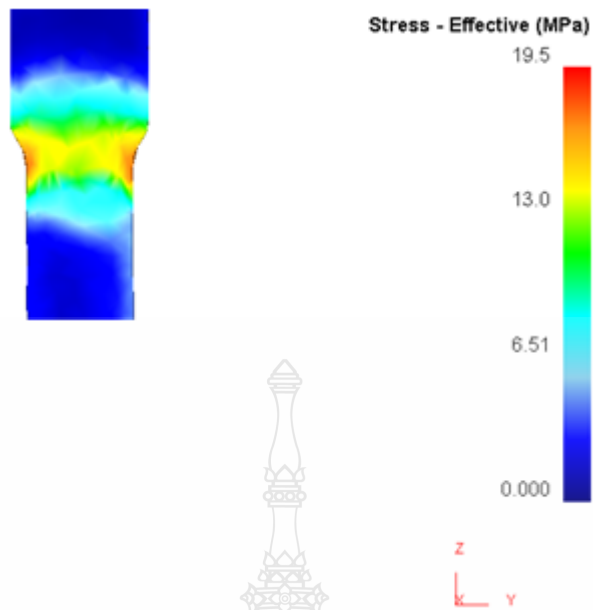
รูปที่ 22 ลักษณะการกระจายตัวของความเค้นจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้สารหล่อลื่น น้ำมันมะพร้าว ที่มุมคาย 25 องศา ของอลูมิเนียม AL 6063



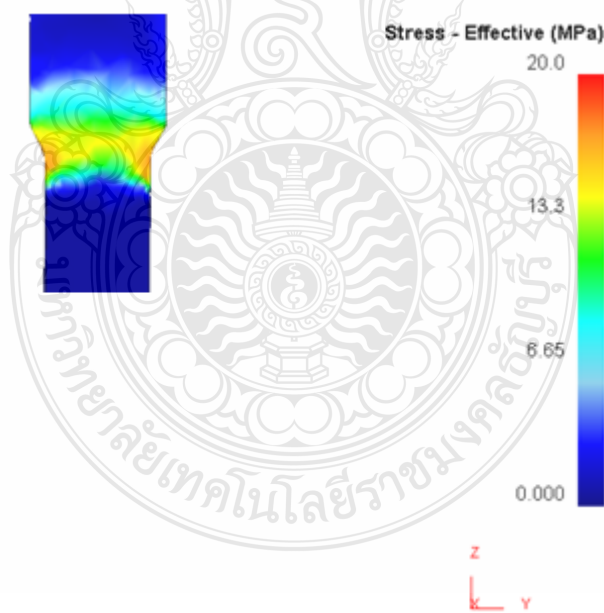
รูปที่ 23 ลักษณะการกระจายตัวของความเค้นจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้สารหล่อลื่นน้ำมันถั่วเหลือง ที่มุมคดาบ 25 องศา ของอลูมิเนียม AL 6063



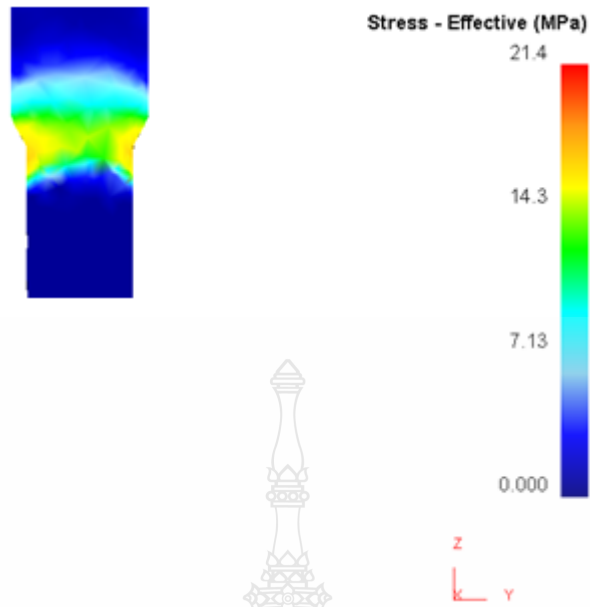
รูปที่ 24 ลักษณะการกระจายตัวของความเค้นจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยไม่ใช้สารหล่อลื่น ที่มุมคดาบ 25 องศา ของอลูมิเนียม AL 6063



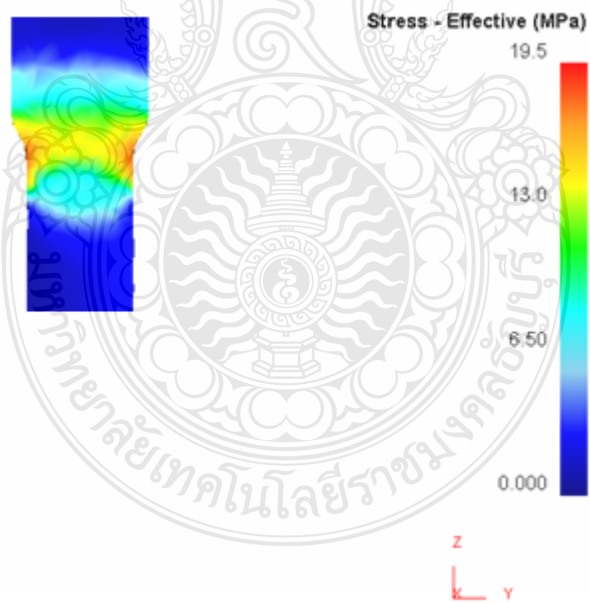
รูปที่ 25 ลักษณะการกระจายตัวของความเค้นจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้สารหล่อลื่นน้ำมันแร่ ที่มุมคาย 30 องศา ของอลูมิเนียม AL 1100



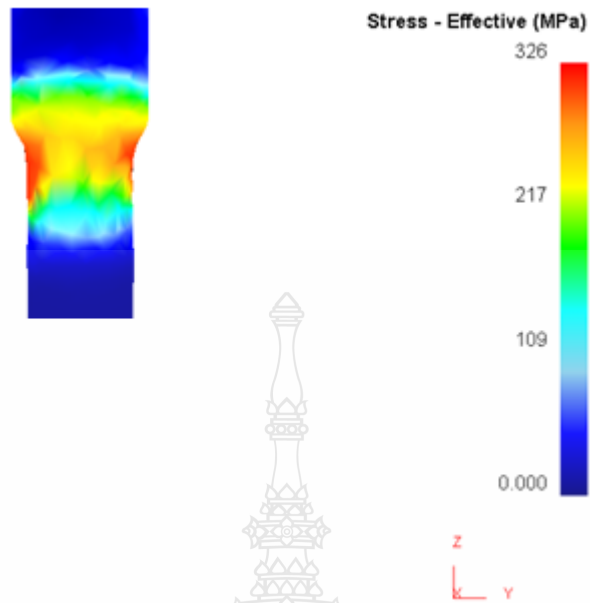
รูปที่ 26 ลักษณะการกระจายตัวของความเค้นจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้สารหล่อลื่นน้ำมันมะพร้าว ที่มุมคาย 30 องศา ของอลูมิเนียม AL 1100



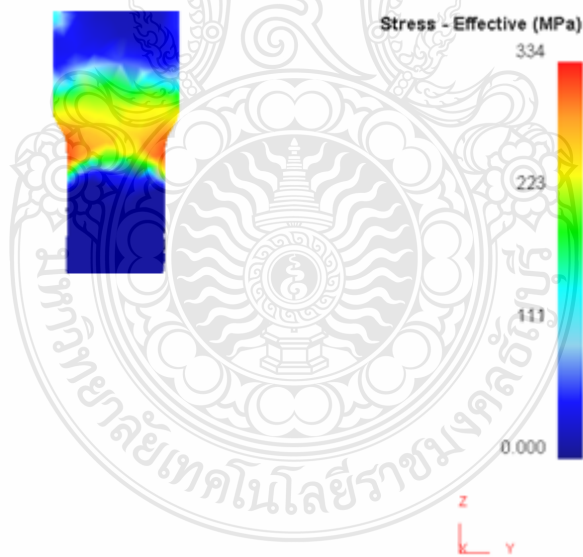
รูปที่ 27 ลักษณะการกระจายตัวของความเค้นจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้สารหล่อลื่น น้ำมันถั่วเหลือง ที่มุมตาย 30 องศา ของอลูมิเนียม AL 1100



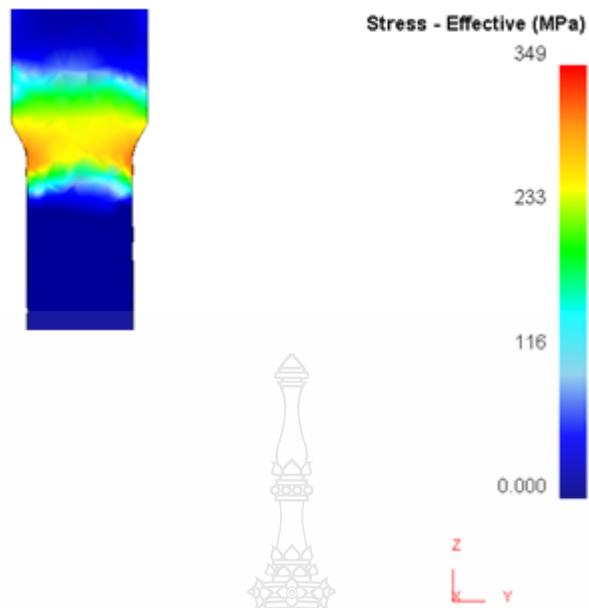
รูปที่ 28 ลักษณะการกระจายตัวของความเค้นจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยไม่ใช้สารหล่อลื่น ที่มุมตาย 30 องศา ของอลูมิเนียม AL 1100



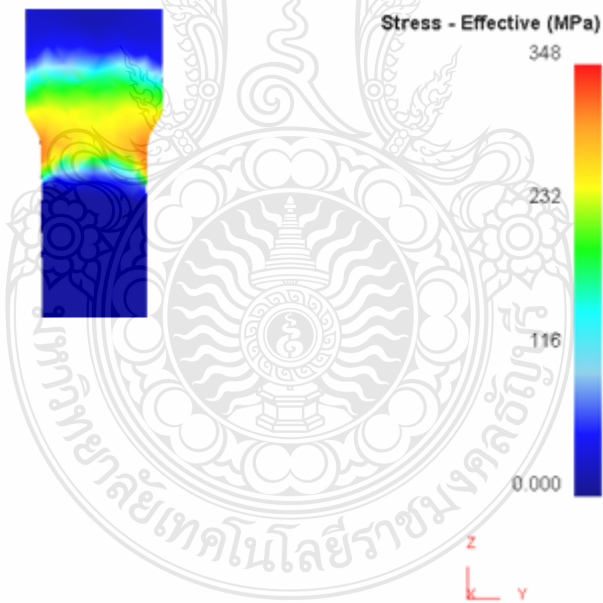
รูปที่ 29 ลักษณะการกระจายตัวของความเค้นจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้สารหล่อลื่น น้ำมันแร่ ที่มุมคาย 30 องศา ของอลูมิเนียม AL 2011



รูปที่ 30 ลักษณะการกระจายตัวของความเค้นจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้สารหล่อลื่น น้ำมันมะพร้าว ที่มุมคาย 30 องศา ของอลูมิเนียม AL 2011



รูปที่ 31 ลักษณะการกระจายตัวของความเค้นจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้สารหล่อลื่น น้ำมันถั่วเหลือง ที่มุมคาย 30 องศา ของอลูมิเนียม AL2011



รูปที่ 32 ลักษณะการกระจายตัวของความเค้นจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยไม่ใช้สารหล่อลื่น ที่มุมคาย 30 องศา ของอลูมิเนียม AL2011

ภาคผนวก ค
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่



Proceedings of IE Network Conference

เอกสารรวมบทความการประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม

IE NETWORK CONFERENCE

2015 6-7 August 2015 The Emerald Hotel Bangkok



Academics-Industrial Research Collaborations in order to be
Excellence in ASEAN

การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี 2558



ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรมและการจัดการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยศิลปากร



Minitab



Industrial Engineering Network Conference 2015



เอกสารรวมบทความคัดย่อจากงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรมและการจัดการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จิตาเขตพระราชวังสนามจันทร์

เลขที่ 6 ถ.ราชบรธาไพน์ ต.พระปฐมเจดีย์ อ.เมือง จ.นครปฐม 73000

โทร 0-3421-4062 Fax 0-3421-4062 Email: ienetw@2554@it.su.ac.th

Website: <http://it.su.ac.th/itpalcom.edu/ienetw2015/>, www.ienet-th.org/journal/, www.ienet-th.org

คณะกรรมการดำเนินงานห้องหับและพิธีการ

- | | |
|---------------------------------------|---------------------|
| 1. อาจารย์ กวีเพชร สันเจริญ | ประธานกรรมการ |
| 2. อาจารย์ ดร.กมลศ พงษ์ยศนันท์ | กรรมการ |
| 3. อาจารย์ ดร.วรรณทิพย์ ชูเกียรติ | กรรมการ |
| 4. อาจารย์ ดร.ชูศักดิ์ พรสิงห์ | กรรมการ |
| 5. อาจารย์ นัญญุติ พันธุ์ประสิทธิ์เวช | กรรมการ |
| 6. นางสาวชยานันท์ ตั้งธนาโชติพันธ์ | กรรมการ |
| 7. นายสรวิทย์ เจ็ดพิสุทธิกุล | กรรมการ |
| 8. นางสาวนัฐธิดา นฤมลศิริ | กรรมการและเลขานุการ |

คณะกรรมการดำเนินงานอาคาร อุทยานนิรมล สถานที่ และสิ่งอำนวยความสะดวก

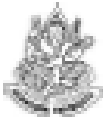
- | | |
|---------------------------------------|---------------------|
| 1. อาจารย์ ดร.วรรณทิพย์ ชูเกียรติ | ประธานกรรมการ |
| 2. อาจารย์ ดร.กัญญา ท่องสงฆ์ | กรรมการ |
| 3. อาจารย์ กวีเพชร สันเจริญ | กรรมการ |
| 4. อาจารย์ นัญญุติ พันธุ์ประสิทธิ์เวช | กรรมการ |
| 5. นางสาวนงนงค์ สาคูโคตร | กรรมการ |
| 6. นางสาวเปรมทิพย์ อิ่มเย็นปฐม | กรรมการ |
| 7. นางสาวนัฐธิดา นฤมลศิริ | กรรมการ |
| 8. นายเจน พันธ์พรสุคนธ์ | กรรมการ |
| 9. นายสรเสชา ศำแพงพลี | กรรมการ |
| 10. นายสรวิทย์ เจ็ดพิสุทธิกุล | กรรมการ |
| 11. นางสาวชยานันท์ ตั้งธนาโชติพันธ์ | กรรมการและเลขานุการ |

9.	ผศ.ดร.นงัดหลวงศักดิ์ ไธสงศิริรัตน์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	กรรมการ
10.	ผศ.ดร.ณัฐธาดา ทวีแสงสกุลไทย	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	กรรมการ
11.	อ.ดร.โศภิตา กิตติศิริพรชัย	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	กรรมการ
12.	อ.ดร.พิศมัย ขารุณณิโรจน์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	กรรมการ
13.	อ.ดร.ไพโรจน์ อลาวัจิตรกุล	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	กรรมการ
14.	รศ.ดร.จิตรา รุธิขการพาณิชย์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	กรรมการ
15.	รศ.ดร.สมเกียรติ ศรีจิตติเจริญ	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	กรรมการ
16.	ผศ.ดร.สมชาย พัวจินดาบุตร	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	กรรมการ
17.	ผศ.ดร.วิสุทธิ สุทธิภัณฑ์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน	กรรมการ
18.	อ.ดร.วรวิมล ทวีวัชรกุล	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน	กรรมการ
19.	ผศ.ดร.ชงะ วัชรศิริ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน	กรรมการ
20.	อ.ปริญญา พลีนวสันต์พร	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน	กรรมการ
21.	อ.รัชมนก สัมเพียรธม	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน	กรรมการ
22.	รศ.ดร.นิวิท เจริญใจ	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	กรรมการ
23.	รศ.ดร.เศรษฐ์ สัมภักตะกุล	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	กรรมการ
24.	อ.ดร.ธนัฐ ไรขารุณณิ	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	กรรมการ
25.	ผศ.ดร.กรกฎ ไบบัวเทศ ทักษณานต์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	กรรมการ
26.	อ.ดร.วราจักร นาคเสียว	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	กรรมการ
27.	อ.ดร.วิภา วิสัทธิพาณิชย์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	กรรมการ
28.	ผศ.ดร.รุ่งฉัตร ชมภูอินท	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	กรรมการ
29.	รศ.ดร.สมกฤษ เอี่ยมกุล	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	กรรมการ
30.	รศ.ดร.อภิชาติ โสภานสง	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	กรรมการ
31.	อ.ดร.ชานันท์จิตร แสงรัตน์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	กรรมการ
32.	ผศ.ดร.วิภาญ ช่างพันธ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ	กรรมการ
33.	อ.ดร.ฤทธิชัย เกาณิณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ	กรรมการ
34.	ผศ.ดร.พิชัย ชันทรินัน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ	กรรมการ
35.	รศ.ดร.ณฐา ศุภพันธ์บุตร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	กรรมการ
36.	อ.ดร.ระพี กาญจนะ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	กรรมการ
37.	ผศ.ดร.สุทัศน์ ศรีบัวพงษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	กรรมการ
38.	อ.ดร.ธนันท์ มีนพันธ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	กรรมการ
39.	ผศ.ดร.ศิริชัย ศอชกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	กรรมการ
40.	ผศ.ดร.ภักดีพงษ์ กิมพงษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	กรรมการ
41.	อ.ดร.ฉันทะ ปราณิศพรกร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	กรรมการ
42.	ผศ.ศุภเอก ประมูณมาก	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	กรรมการ
43.	ผศ.ศิริโร ขารุณณิโรจน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	กรรมการ
44.	ผศ.กฤษณ ทองศรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	กรรมการ
45.	ผศ.ชอุพร ใจสารวงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย	กรรมการ
46.	ผศ.ณงุชพร ศุภกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย	กรรมการ
47.	ผศ.นงษา เหมอินชวา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย	กรรมการ

48.	ผศ.ดร.ปวีณา ปิณฑิลา	มหาวิทยาลัยขอนแก่น	กรรมการ
49.	ผศ.ดร.วีรพัฒน์ เศรษฐ์อนันต์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น	กรรมการ
50.	รศ.ดร.พรเทพ ขอสยามเกียรติ	มหาวิทยาลัยขอนแก่น	กรรมการ
51.	ผศ.ดร.สุขอังกุมา แดงงักดิ์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น	กรรมการ
52.	รศ.ดร.ศันรินทร์ สุรโต	มหาวิทยาลัยขอนแก่น	กรรมการ
53.	รศ.ดร.ชาลุดรงค์ สายแก้ว	มหาวิทยาลัยขอนแก่น	กรรมการ
54.	รศ.ดร.ภาณุชานา เศรษฐ์อนันต์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น	กรรมการ
55.	ผศ.ดร.ปาพจน์ เจริญอภิบาล	มหาวิทยาลัยขอนแก่น	กรรมการ
56.	ผศ.ดร.ธนา ราชฎีก์กิติ	มหาวิทยาลัยขอนแก่น	กรรมการ
57.	ผศ.ดร.คมกฤษ มีศิริกุล	มหาวิทยาลัยขอนแก่น	กรรมการ
58.	ผศ.ดร.จิรพรรณ คล้อยภักดิ์	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์	กรรมการ
59.	รศ.ดร.บุษย์ วงศ์ทัศน์ีกร	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์	กรรมการ
60.	รศ.ดร.บุษมา พฤกษากันธุ์รัตน์	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์	กรรมการ
61.	รศ.ดร.เสณฉัตร ทอมรสสุพันธ์	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์	กรรมการ
62.	ผศ.ดร.ภาณุ บุรณะอรุณ	มหาวิทยาลัยนเรศวร	กรรมการ
63.	อ.ดร.ชวีญณี คำเมือง	มหาวิทยาลัยนเรศวร	กรรมการ
64.	ผศ.ศรีสัจจา วิทนต์กิติ	มหาวิทยาลัยนเรศวร	กรรมการ
65.	ผศ.สิริภา สิมารักษ์	มหาวิทยาลัยนเรศวร	กรรมการ
66.	รศ.ดร.เกษม พิกพัฒน์ปัญญาคุณ	มหาวิทยาลัยบูรพา	กรรมการ
67.	ผศ.ธีรวัฒน์ สมศิริกาญจนคุณ	มหาวิทยาลัยบูรพา	กรรมการ
68.	อ.ดร.ญวณีย์ จันทรา	มหาวิทยาลัยบูรพา	กรรมการ
69.	ผศ.ดร.บรรพชา อธิธา	มหาวิทยาลัยบูรพา	กรรมการ
70.	อ.ดร.จักรวาล คุณะศิลา	มหาวิทยาลัยบูรพา	กรรมการ
71.	ผศ.จันทรีทา นาทวีระศรีคุณ	มหาวิทยาลัยบูรพา	กรรมการ
72.	อ.ดร.ภฤศดา ประดิษฐ์พงษ์	มหาวิทยาลัยบูรพา	กรรมการ
73.	อ.ดร.นัญญา สิริฉัตรมา	มหาวิทยาลัยบูรพา	กรรมการ
74.	อ.ดร.วรัศดา สุพารักษ์	มหาวิทยาลัยบูรพา	กรรมการ
75.	อ.ดร.สุนิสา คำสุข	มหาวิทยาลัยบูรพา	กรรมการ
76.	อ.ดร.พนธ์กิติ เทพสนธิ	มหาวิทยาลัยบูรพา	กรรมการ
77.	อ.ดร.ธัญญา นิมศิริ	มหาวิทยาลัยบูรพา	กรรมการ
78.	อ.ดร.สุขชัย ราชฎีก์ศิริ	มหาวิทยาลัยมหิดล	กรรมการ
79.	อ.ธนา อาศรา	มหาวิทยาลัยมหิดล	กรรมการ
80.	ผศ.ดร.ระพีมา ตีไธวรรณคุณ	มหาวิทยาลัยมหิดล	กรรมการ
81.	อ.ดร.จิรพรรณ เสงี่ยมโรคาพาธ	มหาวิทยาลัยมหิดล	กรรมการ
82.	รศ.ดร.ศวพรรณ ศฤงคารินทร์	มหาวิทยาลัยมหิดล	กรรมการ
83.	ผศ.ดวงมศ สุวีฑิตย์	มหาวิทยาลัยมหิดล	กรรมการ
84.	ผศ.ดร.เพ็ญจันทร์ จีรังจิตร	มหาวิทยาลัยรังสิต	กรรมการ
85.	อ.ดร.พิชญ์ ภาณีพิติ	มหาวิทยาลัยรังสิต	กรรมการ
86.	ผศ.ดร.ธนาพรรณ อังศวใหญ่ชัย	มหาวิทยาลัยรังสิต	กรรมการ

87.	อ.ค่อมศักดิ์ สุทัยไขฟ้า	มหาวิทยาลัยรังสิต	กรรมการ
88.	อ.คิอประวีญ วัฒนเกษ	มหาวิทยาลัยรังสิต	กรรมการ
89.	อ.พรพรกษณ์ แก่นดวงรงค์	มหาวิทยาลัยรังสิต	กรรมการ
90.	อ.สายสุณีย์ พงษ์พัฒน์กษิต	มหาวิทยาลัยรังสิต	กรรมการ
91.	อ.สมพร พรหมคง	มหาวิทยาลัยรังสิต	กรรมการ
92.	อ.ประวิฬร จิวฉวีพรทิพย์	มหาวิทยาลัยรังสิต	กรรมการ
93.	ผศ.บุญชู อุบลมาน	มหาวิทยาลัยรามคำแหง	กรรมการ
94.	ผศ.พิศมัย สุว-ชูโต	มหาวิทยาลัยรามคำแหง	กรรมการ
95.	ผศ.ดร.กฤษณา พิศอบนุสร	มหาวิทยาลัยรามคำแหง	กรรมการ
96.	อ.ดร.เอศเสนา ธานีชัยพันธ์	มหาวิทยาลัยรามคำแหง	กรรมการ
97.	ผศ.ดร.เจวิญ เจตวิจิตร	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	กรรมการ
98.	รศ.ดร.เสกสรร สุวรรณานนท์	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	กรรมการ
99.	รศ.ดร.ธนศ รัตนวิไล	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	กรรมการ
100.	รศ.ดร.สมชาย ชูโสม	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	กรรมการ
101.	รศ.ดร.วนิดา รัตนเมธี	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	กรรมการ
102.	ผศ.ดร.อรุณ สังข์พงศ์	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	กรรมการ
103.	ผศ.ดร.กชกร เต็มธนา โทษนา	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	กรรมการ
104.	ผศ.สงวน ตั้งโพธิธรรม	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	กรรมการ
105.	ผศ.พิเชฐ ศรีฉัตรชัยศิริ	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	กรรมการ
106.	อ.ดร.วณัฐพงษ์ คงแก้ว	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	กรรมการ
107.	ผศ.ดร.ธานี เนื่องภมรสิงห์	มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย	กรรมการ
108.	ผศ.ดร.กาญจนา กาญจนสุนทร	มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย	กรรมการ
109.	อ.ดร.วิวัฒน์ พงษ์กวีพันธ์	มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย	กรรมการ
110.	อ.อรธมา กอธพาน	มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเชีย	กรรมการ
111.	อ.จรงค์รัตน์ พันธุ์สุวรรณ	มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเชีย	กรรมการ
112.	อ.วรศักดิ์ เสถียรรังษัญญ์	มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเชีย	กรรมการ
113.	รศ.ดร.ฉวีพันธ์ ปัทมาไส	มหาวิทยาลัยบูรพา	กรรมการ
114.	ผศ.ดร.นุชชรา เกรัมย์กรกฎ	มหาวิทยาลัยบูรพา	กรรมการ
115.	อ.ดร.จริยาภรณ์ อุ๋นวงษ์	มหาวิทยาลัยบูรพา	กรรมการ
116.	อ.ดร.ธารชญา พันธินุกูล	มหาวิทยาลัยบูรพา	กรรมการ
117.	อ.ดร.ปวีชา เกรัมย์กรกฎ	มหาวิทยาลัยบูรพา	กรรมการ
118.	ผศ.ดร.ธนภัต สันธุ์เขาวน	มหาวิทยาลัยบูรพา	กรรมการ
119.	ผศ.ดร.นลิน เกียรติทอง	มหาวิทยาลัยบูรพา	กรรมการ
120.	ผศ.ดร.วิญ ศรีสืบสาย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	กรรมการ
121.	รศ.ดร.สิทธินพร พิมพ์สกุล	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	กรรมการ
122.	รศ.ดร.ตุติ มาสุขินทร์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	กรรมการ
123.	รศ.ดร.กรรณฉัตร ภัคชาศิริ	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	กรรมการ
124.	รศ.ดร.สกานต์ ศล่องบุญจิด	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	กรรมการ
125.	อ.อรดี พงษ์ศิริวัฒนพันธ์	มหาวิทยาลัยสุโขทัย	กรรมการ

รหัสบทความ	ชื่อบทความ	ชื่อผู้ส่งบทความ	หน้า
MP 044	การป้องกันรังสีคอสมิกจากการเกิดเคโสมโธปอนด์ความขรุขระผิวจำนวนมากโดยการประยุกต์ใช้การแปลงเวฟเลท	ทองพรรณพรหม มณีโชติ สมเกียรติ ศังฆิตติเชริญ	533
MP 060	การศึกษาอิทธิพลการนอนหลับที่มีผลต่อการเชื่อมเหล็กกล้า AISI 1045 ด้วยแรงเสียดทาน	ศิริชัย ค่อสกุล ธีรบุทร กาญจนแสงทอง ชาติศ-ฉิมปัฐโย	543
MP 068	การจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของสารหล่อลื่นโดยการอัดขึ้นรูปเป็นแบบโฮมตามของอูมิเนียม	ธันติ เข็มววิจิตร ศิริชัย ค่อสกุล	549
MP 072	การศึกษาทางเลือกในการผลิตอุปกรณ์ร่วมทำสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์จราจรบนพื้นถนน	ปรีชา ช่างเยี่ยม	556
MP 074	การปรับปรุงประสิทธิภาพในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนหมักเครื่องพิมพ์เลเซอร์	ภาณุพงศ์ ชรุงเกียรติขจร เจริญ สุเมธราชวงษ์ชัย เจริญชัย โยมพัชรภรณ์	562
MP 088	การศึกษาตัวแปรที่มีผลกระทบต่อผลกรททดสอบด้วยการพินิจ	ภูจิน สัทธมไชย ธาดา ประทีปเสน	570
MP 092	การจัดลำดับงานแบบผสมรุ่นเจ้าสายการผลิตกระบวนการทำสี	อัญชสี อินคำป่า เสียนใจ สมบูรณ์วิวัฒน์	578
MP 118	การเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการผลิตที่บดฟไทยชนิดหนึ่งขึ้นผ้ด้วยเทคนิคตัวบีตจับ	เฉลิมเกียรติ ศรีศธา วิจิราภรณ์ นพคุณ	581
MP 120	อิทธิพลของสายที่มีผิวระนาบเอียง ในการตัดเจาะด้วยพินซ์ที่มีผิวระนาบตรงสำหรับเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเกรด JACS90RN	ฉานี ทองมาก พงศกร พลิศรวิบูล กฤษชาติ ขุสเพ็ญ	588
MP 124	ผลกระทบของปัจจัยในกระบวนการกลึงที่มีผลต่อความพยายามผิวและความกลมของชิ้นงานเหล็กเหนียว25400	อติศร กิจพวง สุจินต์ วุฒิชัยวัฒน์	595
MP 130	อิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อความขรุขระผิวของผิวจากการกลึงแปดผิวพ่นเหล็ก AISI 4140 ด้วยเครื่องกลึง CNC	กฤษฎาช บุญแจ้ง ชัยยุทธ มีงาม	601
MP 135	การเชื่อมความต้านทานแบบจุดต้านบนตัวความหนาของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิค AISI 2205 และเหล็กกล้าคาร์บอน S-S400	จิวิภาภรณ์ อุ่แพงษ์ มัลลิกา จิวิภาภรณ์	610



การจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของสารหล่อลื่นโดยการอัปเดตขึ้นรูปเย็นแบบไหลตาม ของอลูมิเนียม

Finite element simulation of lubrications of aluminum by cold forward extrusion

สันติ เข็มวชิจร^{1,2} สิริชัย ต๋อสกุล³

^{1,2} ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อําเภอดุสิตบุรี
จังหวัดปทุมธานี 12110

E-mail: Sant230520@gmail.com

Santi Khiewwajit^{1,2} Sirichai Torsakul³

^{1,2} Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology
Thanyaburi, Pathum Thani 12110

E-mail: Sant230520@gmail.com

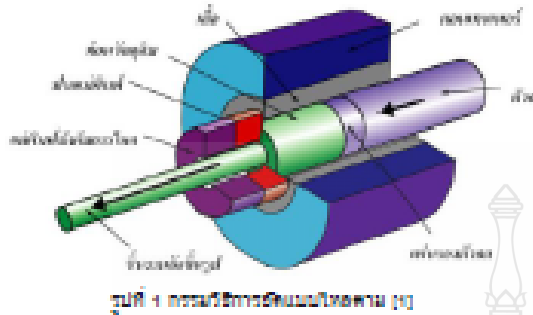
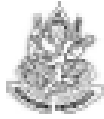
บทคัดย่อ

กระบวนการอัปเดตขึ้นรูปเย็นแบบไหลตาม เป็นกระบวนการที่สามารถขึ้นรูปวัสดุได้หลายชนิด เช่น อลูมิเนียม, สังกะสี, ทองแดงและเหล็ก เป็นต้น นำมาทำเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ในชีวิตประจำวัน ซึ่งแม่พิมพ์ต้องถูกออกแบบ ให้มีความถูกต้องไม่เชิงวิศวกรรม รวมถึงการหล่อลื่นต่างๆในขณะผลิต เพื่อช่วยลดการใช้พลังงาน ลดการสึกหรอของเครื่องมือ เป็นจัดการต้นทุนการผลิตให้ต่ำลง ซึ่งในปัจจุบันการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ช่วยลดต้นทุนการผลิตได้ เนื่องจากไม่จำเป็นต้องผลิตจำนวนมากจริง งานวิจัยนี้เป็นการศึกษากระบวนการจำลองปัญหาโดยวิธีการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์การอัปเดตขึ้นรูปเย็นแบบไหลตาม โดยใช้สารหล่อลื่น กับจำนวน โดยมีจุดประสงค์เพื่อประยุกต์ใช้การจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เทียบกันผลการทดลองจริง เพื่อเป็นแนวทางในการใช้วิธีการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์แทนการทดลองจำนวนจริง และใช้เป็นแนวทางเลือกสารหล่อลื่นที่เหมาะสม ซึ่งในการดำเนินการศึกษาวิจัย ทำการออกแบบทวนอ็อก อีพทา 6:3:2 ของวัสดุ วัสดุ A1100, A2011 และ A6063 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางนอก 15 มม. ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 7.5 มม. ความหนา 5 มม.ทดสอบสารหล่อลื่นโดยวิธีทวนอ็อก ในน้ำมันแร่, น้ำมันฉนวน, น้ำมันถั่วเหลือง และน้ำใช้สารหล่อลื่น นำไปคำนวณค่าตัวแปรความเสียดทาน นำค่าตัวแปรที่ได้ ไปใช้กับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อเปรียบเทียบ ผลการทดลองการอัปเดตขึ้นรูปเย็นจำนวนจริง โดยการวัดผลจากแรงสูงสุดที่ใช้อัปเดตขึ้นรูป และศึกษาลักษณะการไหลตัวของวัสดุ ศึกษาลักษณะการกระจายตัวของความเค้น ผลการวิจัยพบว่า วัสดุที่เหมาะสมสำหรับการอัปเดตขึ้นรูปคือ อลูมิเนียม เกรด 1100 มีค่าความเค้นประมาณ 20 องศา โดยสารหล่อลื่นที่มีความเหมาะสมคือ น้ำมันแร่ จากการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่า แรงสูงสุดที่ใช้ในการรูปมีความใกล้เคียงกับการทดลองจำนวนจริง จึงแสดงให้เห็นว่าสามารถใช้วิธีการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์แทนการทดลองจำนวนจริง.

คำนำถัก: การจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ / ตัวแปรความเสียดทาน / สารหล่อลื่น

Abstract

Cold forward extrusion is manufacture process that be able to use many material such as aluminum alloy, lead, copper and steel for produce product in our life which extrusion die has to correctly design in term of engineering and also correctly lubricate on production in order to reduce lose energy ,reduce wear of tools and reduce production cost. In present, finite element methods (FEM) that can aid reduce excellent manufacturing cost due to there are no trial actual experiment. This paper has studied FEM of



2.2 แรงอัดขึ้นรูปโลหะ (Extrusion Force)

แรงที่ต้องการสำหรับการอัดขึ้นรูปขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของชิ้นงาน อัตราการอัดขึ้นรูป ความเสียดทานระหว่างผิวชิ้นงานกับผิวแม่พิมพ์ อุณหภูมิในการอัดขึ้นรูป และความเร็วในการอัดขึ้นรูป สามารถคำนวณได้จากสูตรต่างๆ ดังต่อไปนี้

แรงกดการไหลในตัว (ϕ_b)

$$\phi_b = \ln \frac{A_0}{A} \quad (1)$$

อัตราการผลิตของหน้าตัด (λ)

$$\lambda = \frac{A_0}{A_1} \quad (2)$$

แรงอัดที่ใช้ทั้งหมด หน่วยเป็นนิวตัน (N)

$$F = F_p + F_f \quad (3)$$

แรงความเสียดในแม่พิมพ์ หน่วยเป็นนิวตัน (N)

$$F_p = \frac{A_0 \times k_f \times \phi_b}{\eta_r} + (D_0 \times s \times \lambda \times \mu_w \times k_f) \quad (4)$$

ความเร็วขึ้นรูป หน่วยเป็นต่อวินาที (s^{-1})

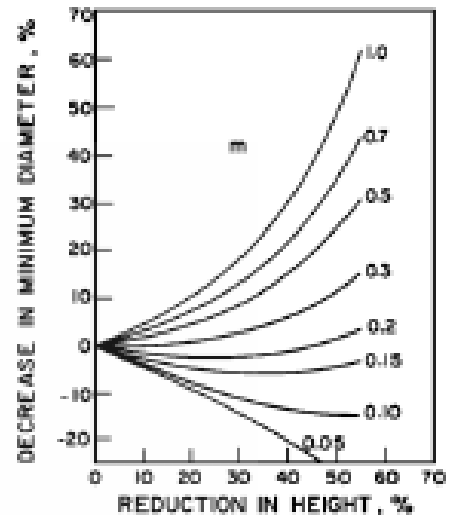
$$\phi = \frac{2 \times V_{ex}}{D_0} \quad (5)$$

การคำนวณค่าที่นำไปพลอตใน Friction factor calibration curve หรือคำนวณค่าได้จากสูตรต่างๆ ดังต่อไปนี้ (3)

$$\text{Reduction inner diameter} = (\sqrt{D_0 D}) \times 100 \quad (6)$$

$$\text{Reduction Height} = (\sqrt{H H_0}) \times 100 \quad (7)$$

2.3 การหาค่าตัวแปรความเสียดทานในการหล่อขึ้น



รูปที่ 2 Friction factor calibration curve(1)

2.4 การไหลตัวของโลหะในการอัดขึ้นรูปโลหะ (Metal Flow in Extrusion)

การไหลตัวของเนื้อโลหะภายในการอัดขึ้นรูปมีอิทธิพลต่อคุณภาพชิ้นงานและคุณสมบัติทางกลของชิ้นงานลักษณะของกระบวนการผลิตของเนื้อโลหะมีผลตามตัวความยาวของทิศทางการไหล การศึกษาการไหลตัวของเนื้อโลหะภายในการอัดขึ้นรูป โดยการนำเครื่องวัดการไหลตัวของเนื้อโลหะด้วยแสงรูปที่ 3 เป็นการอัดขึ้นรูปชิ้นงานด้วยแม่พิมพ์ที่ผลิตขึ้นลักษณะที่ 3 คือ บริเวณที่ชิ้นงานไม่เกิดการไหลตัวเรียกว่า Dead-Metal Zone แสดงดังภาพที่ 3 (ข) และ (ค) (2)

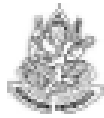


รูปที่ 3 ลักษณะการไหลตัวของเนื้อโลหะ (1)

3. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

3.1 อุปกรณ์การทดลอง

- เครื่องเป่าโลหะขนาด 80 ตัน
- ชิ้นงานทดสอบวัสดุ A1100, A12011, A16063

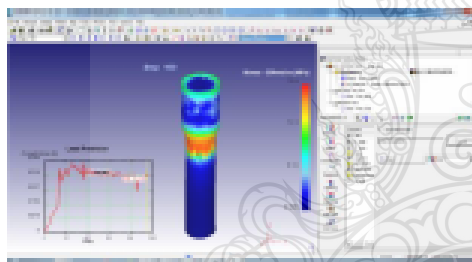


- สารหล่อลื่น น้ำมันแร่ [7], น้ำมันถั่วเหลือง, น้ำมัน
มะพร้าว
- แม่พิมพ์กดขอบแหวนอีต [8]



รูปที่ 4 แม่พิมพ์กดขอบแหวนอีต

- โปรแกรม Deform 3D V10.0

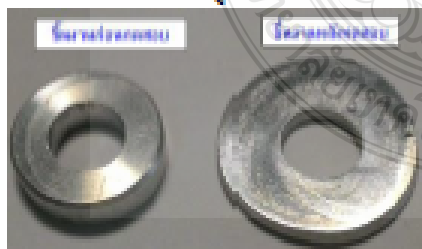


รูปที่ ๕ ผลของการวิเคราะห์โปรแกรม Deform 3D V10.0

3.2 วิธีการทดลอง

ขั้นตอนการทดลองนั้นแบ่งออกเป็น 3 ส่วนดังนี้

1. การดำเนินการ เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเฉือน ด้วยผลของตัวแม่พิมพ์ที่ ๑ มีขั้นตอนดังต่อไปนี้



รูปที่ ๑ ชิ้นงานแหวนอีต

- 1.1) แบ่งชิ้นงานแหวนอีตเป็น 4 กลุ่ม โดย กลุ่มที่ 1 ใช้ชิ้นงานกลุ่มละ 5 ชิ้น โดยไม่ใช้สารหล่อลื่น วัสดุ AI 1100, AI2011, AI6063 วางบนสาย กดด้วยเครื่องไฮดรอลิกเพรส จนถึงตำแหน่งความสูงของช่องที่ 20%, 30%, 40%, 50% กดอีตงานชิ้นงานในกลุ่มที่ 1 ครบทุกชิ้น

- 1.2) กลุ่มที่ 2 ใช้ชิ้นงานกลุ่มละ 5 ชิ้น โดยสารหล่อลื่นน้ำมันแร่ เค็สบนวัสดุ AI 1100, AI2011, AI6063 วางบนสาย กดด้วยเครื่องไฮดรอลิกเพรส จนถึงตำแหน่งความสูงของช่องที่ 20%, 30%, 40%, 50% กดอีตงานชิ้นงานในกลุ่มที่ 2 ครบทุกชิ้น

- 1.3) กลุ่มที่ 3 ใช้ชิ้นงานกลุ่มละ 5 ชิ้น โดยสารหล่อลื่นน้ำมันมะพร้าว เค็สบนวัสดุ AI 1100, AI2011, AI6063 วางบนสาย กดด้วยเครื่องไฮดรอลิกเพรส จนถึงตำแหน่งความสูงของช่องที่ 20%, 30%, 40%, 50% กดอีตงานชิ้นงานในกลุ่มที่ 3 ครบทุกชิ้น

- 1.4) กลุ่มที่ 4 ใช้ชิ้นงานกลุ่มละ 5 ชิ้น โดยสารหล่อลื่นน้ำมันถั่วเหลืองเค็สบนวัสดุ AI 1100, AI2011, AI6063 วางบนสาย กดด้วยเครื่องไฮดรอลิกเพรส จนถึงตำแหน่งความสูงของช่องที่ 20%, 30%, 40%, 50% กดอีตงานชิ้นงานในกลุ่มที่ 4 ครบทุกชิ้น

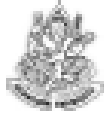
- 1.5) หลังจากทดลองครบนำชิ้นงานแหวนอีตแต่ละกลุ่มไปวัดความสูงที่ช่องโดยไมโครมิเตอร์แล้วบันทึกค่า

- 1.6) นำชิ้นงานแหวนอีตแต่ละกลุ่มไปวัดเส้นผ่าศูนย์กลาง ภายในที่ช่องแล้วบันทึกค่า จากครบทุกกลุ่ม

- 1.7) คำนวณ หาเปอร์เซ็นต์ของความสูงที่ช่อง และเปอร์เซ็นต์ของเส้นผ่าศูนย์กลางภายในที่ช่องนำไปพลอต ลงใน Friction Factor calibration curve.ผลการคำนวณแสดงใน ตารางดังนี้

ตารางที่ ๑ Friction factor ที่ได้จากการทดลองใน friction factor calibration curve.

Material	Lubricant	Friction factor (m)
AI1100	No Lubricant	0.27
	Sun's oil	0.09
	Coconut oil	0.16
	Soy bean oil	0.21
AI2011	No Lubricant	0.29
	Sun's oil	0.13
	Coconut oil	0.18
	Soy bean oil	0.25
AI6063	No Lubricant	0.38
	Sun's oil	0.17
	Coconut oil	0.21
	Soy bean oil	0.27



2. การทำการจำลองวิธีการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ การอัปเดตเป็นแบบโหนดตามมีการออกแบบมุลสาย 3 มุม [2] โดยนำค่าตัวแปรความเค้นสถานะมาใส่ ในส่วน พารามิเตอร์ของโปรแกรม deform 3D V10.0

3. เปรียบเทียบงานวิจัย การศึกษาและการพัฒนา การรับแรงการอัปเดตเป็นแบบโหนดตามของวัสดุ อลูมิเนียมในประเทศไทย [4] กับจำลองวิธีการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์การอัปเดตเป็นแบบโหนดตาม

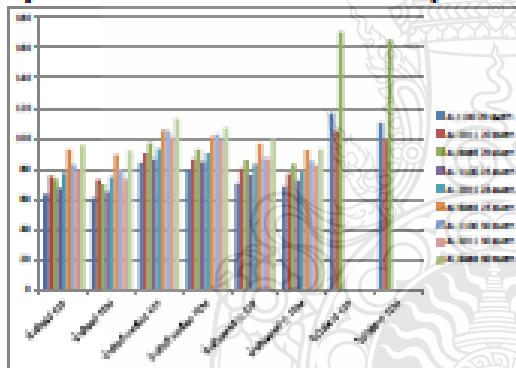
4. ผลการทดลองและการวิจารณ์

4.1 ผลการทดลอง

4.1 การเปรียบเทียบแรงในการอัปเดต

ผลการเปรียบเทียบแรงที่รูปจริงกับการจำลองด้วยไฟ

ไนต์เอลิเมนต์ในการใช้มุมสาย 20°, 25° และ 30° [3] ของ อลูมิเนียม AL1100, AL2011, AL6063 ดังแสดงรูปที่ 7

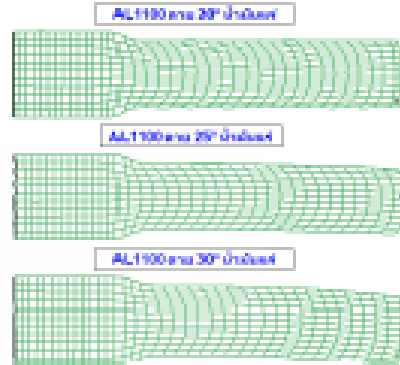


รูปที่ 7 เปรียบเทียบแรงที่รูปจริงกับการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ในการใช้สารหล่อลื่น 3 ชนิด

จากรูปที่ 7 เป็นกราฟเปรียบเทียบแรงที่รูปจริงกับการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ ความลึกในการขึ้นรูป 34 มม. ของอลูมิเนียมใช้สารหล่อลื่น น้ำมันแร่, น้ำมันพืชขาว, น้ำมันถั่วเหลือง และไม่ใช้สารหล่อลื่น พบว่าแรงที่ใช้อัปเดตรูปที่ใช้ วัสดุอลูมิเนียม AL6063 มุลสาย 20 องศา ไม่ใช้สารหล่อลื่น มีระดับแรงอัปเดตรูปสูงสุด 164.67 KN แรงที่ใช้อัปเดตรูปน้อยที่สุด พบว่า วัสดุอลูมิเนียม AL1100 มุลสาย 20 องศาใช้สารหล่อลื่นน้ำมันแร่ ใช้แรงอัปเดตรูป 61.14 KN

การไหลตัวของวัสดุ

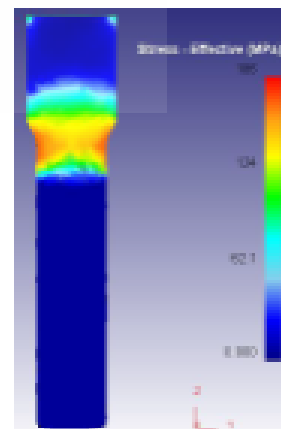
การไหลตัวของเนื้อโลหะภายใต้อิทธิพลของการอัปเดตรูปแบบโหนดตาม มีอิทธิพลต่อคุณภาพและสมบัติทางกลของชิ้นงาน โดยสามารถยกตัวอย่างได้ดังรูปที่ 8

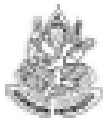


รูปที่ 8 ลักษณะการไหลตัวของเนื้อวัสดุจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ ที่มุมสาย 20°, 25° และ 30° ของอลูมิเนียม

จากภาพที่ 8 แสดงการจำลองการไหลตัวของวัสดุด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ ของอลูมิเนียม AL1100 ใช้สารหล่อลื่น น้ำมันแร่ พบว่า อลูมิเนียมที่ มุลสาย 20 องศา อลูมิเนียม ถูกกัดมีความยาว เพิ่มขึ้นประมาณ 2 เท่า เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าไม่สมมาตรกัน อลูมิเนียมที่ มุลสาย 25 องศา อลูมิเนียม ถูกกัดมีความยาว เพิ่มขึ้นประมาณ 2 เท่า เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าไม่สมมาตรกัน แต่มีจำนวนที่ผ่านการอัปเดตเข้ามาด้านขวา 0.53 มิลลิเมตร อลูมิเนียมที่ มุลสาย 30 องศา อลูมิเนียม ถูกกัดมีความยาว เพิ่มขึ้นประมาณ 2.5 เท่า เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าไม่สมมาตรกัน แต่มีจำนวนที่ผ่านการอัปเดตเข้ามาด้านขวา 0.84 มิลลิเมตร สักผลมีการกระจายตัวของความเค้น

ลักษณะมีการกระจายตัวของความเค้นที่เกิดขึ้นกับวัสดุใน การอัปเดตรูปแบบโหนดตามด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์อีกผลของความเค้นที่เกิดขึ้นตามขนาดของมุลสายได้ดังรูปที่ 9





รูปที่ 8 ลักษณะการกระจายตัวของความเค้นค่าของตัว
โพลีเอธิลีนในการใช้สารหล่อลื่นน้ำมันแร่ ที่อุณหภูมิ 20 องศา
เซลเซียส AL 1100

จากรูปที่ 8 แสดงความเค้นของอลูมิเนียม AL 1100 ใช้
สารหล่อลื่น น้ำมันแร่ จากการศึกษาก่อนว่า การกระจาย
ตัวของความเค้นสูงสุด 186 MPa ที่ผิวหน้าของชิ้นงาน
เนื่องจาก ระหว่างการอัดขึ้นรูปผิวของชิ้นงานสัมผัส
โดยตรงกับแม่พิมพ์ ทำให้บริเวณนี้มีความเค้นมาก ถึง
ความเค้นเกินขีดเหนียวในแกนกลางของชิ้นงาน มีค่า
ระหว่าง 130 MPa ถึง 175 MPa.

6. สรุป

การอัดขึ้นรูปของอลูมิเนียมพบว่า ชนิดของ
อลูมิเนียม ชนิดของสารหล่อลื่นและอุณหภูมิ มีผลต่อแรงอัด
ขึ้นรูป แรงอัดขึ้นรูปน้อยที่สุด คือ อลูมิเนียมเกรด 1100
สารหล่อลื่นที่ลดความเค้นมากที่สุด คือ น้ำมันแร่ และ
อุณหภูมิให้วัสดุไหลตัวที่ต่ำที่สุด คือ อุณหภูมิ 20 องศา จาก
ผลการทดสอบจริงกับการจำลองไฟไนต์เอเลเมนต์ แผลค่า
กัน 4.5% สามารถสรุปได้ว่า การจำลองด้วยไฟไนต์เอเล
เมนต์ ให้ผลที่ใกล้เคียงการทดสอบจริงซึ่งสามารถ
นำมาใช้ได้ และ วิธีที่แนะนำสำหรับการอัดขึ้นรูปชิ้นงาน
ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 12.5 มม. ยาว 52 มม. คือ
อลูมิเนียมเกรด 1100 อุณหภูมิ 20 องศา และสารหล่อลื่น
น้ำมันแร่

การไหลตัวของ อลูมิเนียมเกรด 1100 อุณหภูมิ 20 องศา
หล่อลื่นโดยน้ำมันแร่ พบว่าอีเลเมนต์ถูกจัดวาง
ขึ้น การไหลตัวของเนื้อวัสดุ ผ่านสายที่ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง
เล็ก ชิ้นงานมีความถูกต้องของขนาด เนื่องจากวัสดุมี
ความแข็งค่าที่สุด ส่งผลให้การไหลตัวของวัสดุง่าย

การกระจายตัวของความเค้นในการจำลอง
ด้วยไฟไนต์เอเลเมนต์ พบว่าอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นนั้น ต้อง
ใช้แรงอัดขึ้นรูปมาก เพื่ออัดให้โลหะไหลตัว ผ่านบริเวณที่
เส้นผ่าศูนย์กลางใหญ่มาเล็กทำให้เกิดความเค้นตกค้างใน
บริเวณนี้มาก

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจาก ภาควิชา
วิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
เอกสารอ้างอิง

- [1] ศิริวัจน์ ค่องกุล และวิมลธนา วัฒนากา, พื้นฐาน
เทคโนโลยีการขึ้นรูปโลหะ, กรุงเทพมหานคร:วี.พรินท์ (1991)
จำกัด, 2554
- [2] Kurt Lange, Handbook of metal forming,
McGraw-Hill The United State of America, McGraw-
Hill, 1985. Pp.13.1-13.27
- [3] Vesna MANDI, FRICTION STUDIES UTILIZING
THE RING – COMPRESSION TEST - PART II, 8th
International Tribology Conference, 8. - 10. October
2003, Belgrade, Serbia!
- [4] วิสุทธิ ยี่โต.2555. "การศึกษาและพัฒนาการขึ้นรูปการ
อัดขึ้นรูปเป็นแบบไหลตามของวัสดุอลูมิเนียมในประเทศไทย"
วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
วิศวกรรมโลหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
ธนบุรี
- [5] Dyi-Cheng Chen, Sheng-Kai Syu, Geng-Hong
Wu, Sin-Kai Lin, Investigation into cold extrusion of
aluminum billets using three-dimensional finite
element method, Journal of Materials Processing
Technology 192–193 (2007) 189–193
- [6] S. Syahrudin, B.M.Zubi, G.S.N.Azawi,
M.J.M.Ridwan,
Experimentalevaluationofpalmoilaslubricantincoldforw
ardExtrusion process, International
JournalofMechanicalSciences53 (2011)549–555
- [7] Celso Ceminaga *, Rafael Lopez da Silva Issi,
Sergio Tonini Button, Alternative lubrication and
lubricants for the cold extrusion of steel
parts, Journal of Materials Processing Technology
179 (2006) 87–91
- [8] Rjesh M, James Valder, and A O
Surentranathan, Determination of friction factor by
ringcompression test for AZ31Mg using
Graphite and MoS2 lubricants,TJ&AT
- [9] B.P.P.A. Gouveias, J.M.C. Rodrigues, N. Reyb,
P.A.F. Martins,*, Finite-element modeling of cold
forward extrusion, Journal of Materials Processing
Technology 94 (1999) 85±93

ประวัติผู้เขียน

ประวัติผู้เขียน	นายสันติ เขียววิจิตร
วัน เดือน ปีเกิด	23 พฤษภาคม 2520
ที่อยู่	เลขที่ 111/42 ต.ประชาธิปไตย อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี
ประวัติการศึกษา	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ สาขาเทคโนโลยี ออกแบบแม่พิมพ์ (อสบ.) ปีการศึกษาที่สำเร็จ พ.ศ. 2543
ประวัติการทำงาน	ตำแหน่งผู้จัดการฝ่ายบำรุงรักษาเครื่องกลบริษัท ไทเทคซ์ เอเชีย จำกัด พ.ศ. 2558 ถึงปัจจุบัน
เบอร์โทรศัพท์	084-0069083
อีเมล	santi230520@gmail.com

