

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ



208877



การศึกษากระบวนการดึงเป็นรูปสี่เหลี่ยมของแผ่นไทเทเนียม โดยระบุเป็นวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

และการทดลอง

A STUDY OF DEEP DRAWING PROCESS OF TITANIUM SHEET BY
FINITE ELEMENT METHOD AND EXPERIMENTAL METHOD

นายอมรัตน์ วงศ์ภาสสินธุ์

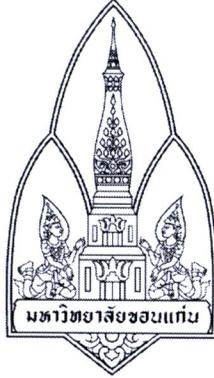
วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

มหาวิทยาลัยขอนแก่น

พ.ศ. 2553

600257351

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ



การศึกษากระบวนการดึงขึ้นรูปลึกของแผ่นไททาเนียม โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
และการทดลอง

A STUDY OF DEEP DRAWING PROCESS OF TITANIUM SHEET BY
FINITE ELEMENT METHOD AND EXPERIMENTAL METHOD



นายคมสันต์ วงศ์กาฬสินธุ์

วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

มหาวิทยาลัยขอนแก่น

พ.ศ. 2553

การศึกษากระบวนการดั่งขึ้นรูปลึทของแผ่นไททาเนียม โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
และการทดลอง

นายคมสันต์ วงศ์กาฬสินธุ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น

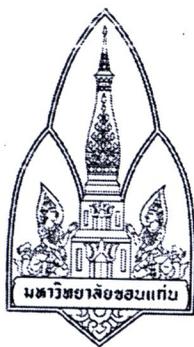
พ.ศ. 2553

**A STUDY OF DEEP DRAWING PROCESS OF TITANIUM SHEET BY
FINITE ELEMENT METHOD AND EXPERIMENTAL METHOD**

MR. KHOMSAN WONGKALASIN

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS
FOR THE DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING
IN MECHANICAL ENGINEERING
GRADUATE SCHOOL KHON KAEN UNIVERSITY**

2010



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

มหาวิทยาลัยขอนแก่น

หลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

ชื่อวิทยานิพนธ์: การศึกษากระบวนการดึงขึ้นรูปลึกของแผ่นไททานเนียมโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และการทดลอง

ชื่อผู้ทำวิทยานิพนธ์: นายคมสันต์ วงศ์ภาพสินธุ์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

รศ.ดร. จำลอง ถิ่นตระกูล

ประธานกรรมการ

ดร. สมศักดิ์ หอมดี

กรรมการ

รศ.ดร. สุรสิทธิ์ ปิยะศิลป์

กรรมการ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์:

อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ ดร. สุรสิทธิ์ ปิยะศิลป์)

(รองศาสตราจารย์ ดร. ลำปาง แมนมาตย์)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร. สมนึก ชีระกุลพิศุทธิ์)

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยขอนแก่น

คมสันต์ วงศ์กาฬสินธุ์. 2553. การศึกษากระบวนการดัดขึ้นรูปลิกของแผ่นไททาเนียม โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และการทดลอง. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์: รศ.ดร. สุระสิทธิ์ ปิยะศิลป์

บทคัดย่อ

208877

ไททาเนียมเป็นวัสดุที่ใช้ประโยชน์ทั้งด้านอุตสาหกรรม และด้านวัสดุการแพทย์ กระบวนการดัดขึ้นรูป ลิกนั้นเป็นกระบวนการที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในการแปรรูปโลหะแผ่น ในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ เพื่อจะศึกษาถึงกระบวนการดัดขึ้นรูปลิกของโลหะแผ่นไททาเนียม โดยจะพิจารณาการขึ้นรูปของแผ่นไททาเนียม ใน 2 ลักษณะ คือ แผ่นไททาเนียมที่เป็นแบบแผ่นเรียบ (Titanium sheet) และ แผ่นไททาเนียมที่เป็นแบบตาข่าย (Titanium mesh) และเป็นการศึกษาการขึ้นรูปของชิ้นงานที่มีรูปร่างที่ไม่สมมาตร ซึ่งเป็นชิ้นส่วนของกะโหลกศีรษะมนุษย์ตรงบริเวณขมับ (Temporal) โดยการ ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาช่วยในการวิเคราะห์และ การจำลองกระบวนการขึ้นรูป และนำข้อมูลที่ได้ไปเข้าสู่กระบวนการออกแบบแม่พิมพ์เพื่อทำการทดสอบขึ้นรูป ชิ้นงานจริง ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการใช้ทางระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถแสดงถึงบริเวณที่มีการบิด ขาดและรอยย่นที่จะเกิดขึ้นของแผ่นไททาเนียมที่เป็นแบบแผ่นเรียบ และแผ่นไททาเนียมที่เป็นแบบตาข่าย ในกระบวนการดัดขึ้นรูปได้ นำไปสู่การหาขนาดของความดันในการจับยึดชิ้นงานที่เหมาะสมที่สุดของ กระบวนการดัดขึ้นรูปลิกของแผ่นไททาเนียม โดยแผ่นไททาเนียมที่เป็นแบบแผ่นเรียบความดันในการจับยึด ที่เหมาะสมอยู่ที่ 12 บาร์ ที่ความเร็วในการขึ้นรูป 50 มิลลิเมตรต่อวินาที และแผ่นไททาเนียมที่เป็นแบบแผ่นตา ข่ายความดันในการจับยึดที่เหมาะสมอยู่ที่ 3 บาร์ ที่ความเร็วในการขึ้นรูป 50 มิลลิเมตรต่อวินาที และจากผลการ ทดสอบขึ้นรูปชิ้นงานจริงโดยแผ่นไททาเนียมที่เป็นแบบแผ่นเรียบความดันในการจับยึดที่เหมาะสมอยู่ที่ 7 บาร์ ที่ความเร็วในการขึ้นรูป 7 มิลลิเมตรต่อวินาที ในส่วนแผ่นไททาเนียมที่เป็นแบบแผ่นตาข่ายไม่สามารถวัดผลได้ เนื่องจากคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานมีการเปลี่ยนแปลงในขั้นตอนการสร้างรูตาข่ายทำให้ไม่สามารถขึ้นรูปได้ ส่วน ผลของการขึ้นรูปแผ่นเหล็กที่เป็นแบบแผ่นตาข่ายแสดงให้เห็นว่าการใช้แผ่นตาข่ายสำหรับกระบวนการดัดขึ้นรูป ลิกสามารถลดการเกิดรอยย่นของชิ้นงานได้แต่ลักษณะรูปร่างของตาข่ายจะเปลี่ยนไปตรงบริเวณตำแหน่งที่เกิด รอยย่นของชิ้นงานที่เป็นแผ่นเรียบ จากผลการจำลองการขึ้นรูปและการทำสอบขึ้นรูปจริงเมื่อพิจารณาลักษณะ รูปร่างของชิ้นงาน ลักษณะรูปร่างของชิ้นงานที่ได้มีลักษณะเหมือนกัน และเมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของระห่าง ทั้งหมดของชิ้นงาน ผลที่ได้คือ ชิ้นงานที่ได้จากการจำลองการขึ้นรูปและการทดสอบขึ้นรูปจริงมีระยะห่างเฉลี่ย ต่างกัน 0.081 มิลลิเมตร โดยชิ้นงานที่ได้จากการทดสอบขึ้นรูปจริงจะอยู่ในระดับที่ต่ำกว่าชิ้นงานที่ได้จากการ จำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์

Khomsan Wongkalasin. 2010. **A Study of Deep Draw Process of Titanium Sheet by Finite Element Method and Experimental Method.** Master of Engineering Thesis in Mechanical Engineering, Graduate School, Khon Kaen University.

Thesis Advisor: Assos. Prof. Dr. Surasith Piyasin

ABSTRACT

208877

Titanium is widely used not only for industrial application but also for medical purpose. The process of manufacturing of titanium is also important. The Deep drawing process is one of important process in metal forming. In this study, the deep drawing process of titanium have been studied. The study of titanium is divided into two types of form such as titanium sheet and titanium mesh. The study of un-symmetry shape of human skull shape is also established to be the mold of this study. The finite element method (F.E.M) of titanium deep drawing processing has been applied and the results of this process will considerably the design of hard mold using for experimental deep drawing process. The study of F.E.M can predict of tearing and wrinkle of titanium sheet and titanium mesh, and it is also to calculate the optimize Blank Pressure Holder during deep drawing process. For the suitable Blank Pressure Holder would be 12 bar at the velocity of 50 mm/sec. for titanium sheet and would be 3 bar at the velocity of 50 mm/sec. for titanium mesh. However, from the experimental study, the suitable Blank Pressure Holder would be 7 bar at the velocity of 7 mm/sec. for titanium sheet. Anyway, this process can not be calculated Blank Pressure Holder for the titanium mesh due to its mechanical properties changed during hand drilling process. It is also showed that the location of tearing and wrinkle occurreing would be same from both F.E.M and experimental study. The advantage of using titanium mesh would be that there will be no wrinkle but the shape of drilling hole had been changed. The comparision results from the F.E.M and experimental method will be the same shape of deformation. There is some different value of average distance of 0.081 mm. which the results from experimental is average lower that the results from F.E.M.

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สุรสิทธิ์ ปิยะศิลป์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำและช่วยเหลือในการแก้ปัญหาต่าง ๆ ระหว่างการทำวิจัย รวมทั้งตรวจและแก้ไขข้อบกพร่องในวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. จำลอง ลีมตระกูล และ ดร.สมศักดิ์ หอมดี ที่ให้คำแนะนำในการปรับปรุงข้อบกพร่องต่างๆ และที่กรุณาร่วมเป็นคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ สรรวจ อินทร์แบน ที่คำแนะนำแก้ไขปัญหามหาวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรมที่เอื้อเฟื้ออุปกรณ์เครื่องมือในการทำวิจัย

ขอกราบขอบพระคุณบิดา-มารดา และพี่สาวที่ให้ความห่วงใย เป็นกำลังใจ ให้ความช่วยเหลือและสนับสนุนในทุกด้านจนการศึกษาสำเร็จด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ พระครูพิริยกิจโสภณ เจ้าอาวาสวัดป่าบ้านหนองหอย จ.สกลนคร ที่ให้คำปรึกษาในด้านต่าง ๆ

ขอขอบคุณ อาจารย์เข็มจิต เสนา ที่ได้ให้ข้อมูลในการศึกษา

ขอขอบคุณ ดร.สุภกิจ รูปจันทร์ และ คุณธวัชชัย คุณะโคตร ที่ให้คำแนะนำการใช้โปรแกรมในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ คุณธีรพล อุซซาบาล คุณสันฐิติ บุญศรี และ พี่ๆ น้องๆ นักศึกษา ป.เอก ป.โท ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่ให้ความช่วยเหลือ แนะนำในการทำวิทยานิพนธ์

และที่สำคัญ ขอขอบพระคุณ โครงการทุนวิจัยมหบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่ให้การสนับสนุนทุนในการทำวิจัยในครั้งนี้

คมสันต์ วงศ์ภาพสินธุ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย	2
1.5 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย	3
1.6 ประโยชน์ของงานวิจัย	3
1.7 ภาพรวมของวิทยานิพนธ์	3
บทที่ 2 วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 กระบวนการดัดขึ้นรูปลิก	4
2.2 ข้อบกพร่องในงานดัดขึ้นรูปลิก	11
2.3 ทฤษฎีการเปลี่ยนรูปของวัสดุที่ใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์	15
2.4 แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป	22
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการดัดขึ้นรูปลิกด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	24
2.6 สรุป	25
บทที่ 3 การออกแบบแม่พิมพ์สำหรับกระบวนการดัดขึ้นรูปลิก	26
3.1 การกำหนดสมมติฐานเบื้องต้น	26
3.2 รูปแบบของแม่พิมพ์	26
3.3 หลักการออกแบบแม่พิมพ์	29
3.4 การออกแบบแม่พิมพ์โดยการสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์	31
3.5 การกำหนดเอลิเมนต์ของแบบจำลอง	32
3.6 การกำหนดคุณสมบัติและพฤติกรรมของวัสดุ	34
3.7 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition)	35
3.8 การประมวลผล (Processing) และการแสดงผลลัพธ์ (Post-processing)	36
3.9 การหาผลเฉลยการเกิดรอยร้าวและการฉีกขาด	36
3.10 การกำหนดขนาดรูปร่างของแผ่นขึ้นงานเปล่า	37

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.11 ผลการวิเคราะห์เพื่อหาขนาดของแผ่นชิ้นงานเปล่าที่เหมาะสม	38
3.12 ผลการจำลองการขึ้นรูปแผ่นไททานเนียมที่เป็นแผ่นเรียบและแผ่นตาข่าย	43
3.13 สรุป	67
บทที่ 4 การสร้างแม่พิมพ์และการทดลองกระบวนการดิ่งขึ้นรูป	69
4.1 การออกแบบแม่พิมพ์	69
4.2 การติดตั้งชุดแม่พิมพ์	78
4.3 ผลการทดสอบการขึ้นรูปจริง	80
4.4 สรุป	89
บทที่ 5 การเปรียบเทียบชิ้นงานต้นแบบ แม่พิมพ์และผลการขึ้นรูป	91
5.1 การเปรียบเทียบชิ้นงานต้นแบบกับแม่พิมพ์	92
5.2 การเปรียบเทียบแม่พิมพ์กับชิ้นงานที่ได้จากการทดลอง	94
5.3 การเปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์และการทดสอบขึ้นรูปจริง	101
5.4 สรุป	106
บทที่ 6 สรุปผลและการวิเคราะห์	108
6.1 สรุปผลการศึกษา	108
6.2 การวิเคราะห์ผลการศึกษา	121
6.3 ข้อเสนอแนะ	123
เอกสารอ้างอิง	125
ภาคผนวก	127
ภาคผนวก ก การสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์	128
ภาคผนวก ข การออกแบบรายละเอียดแม่พิมพ์ของกระบวนการดิ่งขึ้นรูปลึก	131
ประวัติผู้เขียน	136

สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 3.1	เงื่อนไขของการออกแบบแม่พิมพ์สำหรับกระบวนการดึงขึ้นรูปลึก	31
ตารางที่ 3.2	แสดงคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ CP Titanium Grade 2	35
ตารางที่ 3.3	กำหนดเงื่อนไขของแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของการหาขนาดแผ่นขึ้นงานเปล่าที่เหมาะสม	39
ตารางที่ 3.4	กำหนดเงื่อนไขของแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของการขึ้นรูปแผ่นไททาเนียมที่เป็นแผ่นเรียบและแผ่นค้ำขาย	44
ตารางที่ 4.1	การกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่กระทำต่อชิ้นส่วนต่าง ๆ ของแม่พิมพ์	72
ตารางที่ 4.2	ค่าความเค้นพอนมิสเชสและค่าความปลอดภัยของชิ้นส่วนแม่พิมพ์	74
ตารางที่ 4.3	การกำหนดเงื่อนไขของการขึ้นรูปแผ่นเหล็ก	81
ตารางที่ 4.4	แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ CP Titanium Grade 2 (Joji Satoh, 2003) และ เหล็กอะลูมิเนียม (P.Padmanahan, 2007)	85
ตารางที่ 4.5	การกำหนดเงื่อนไขของการขึ้นรูปแผ่นไททาเนียม	86
ตารางที่ 5.1	ผลของการเปรียบเทียบพื้นผิวของชิ้นงานต้นแบบกับพื้นผิวของแม่พิมพ์	94
ตารางที่ 5.2	ชิ้นงานจากการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่นำมาเปรียบเทียบ	94
ตารางที่ 5.3	ผลการเปรียบเทียบระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์กับผลการจำลองการขึ้นรูปของแผ่นไททาเนียมแบบแผ่นเรียบ	97
ตารางที่ 5.4	ผลการเปรียบเทียบระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์กับผลการจำลองการขึ้นรูปของแผ่นไททาเนียมแบบแผ่นค้ำขาย	97
ตารางที่ 5.5	แสดงค่าของความเร็วในการขึ้นรูปและความดันในการจับยึดชิ้นงานที่จะนำมาเปรียบเทียบ	98
ตารางที่ 5.6	ผลการเปรียบเทียบระยะห่างระหว่างแม่พิมพ์กับผลการขึ้นรูปจริงของแผ่นไททาเนียมแบบแผ่นเรียบ	101
ตารางที่ 5.7	ผลการเปรียบเทียบชิ้นงานจากการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์และการทดสอบขึ้นรูปจริง	102
ตารางที่ 6.1	ค่าเปอร์เซ็นต์ความหนาของไททาเนียมที่ลดลงจากไฟไนต์เอลิเมนต์	110
ตารางที่ 6.2	ค่าความเค้นของไททาเนียมจากไฟไนต์เอลิเมนต์	114
ตารางที่ 6.3	ค่าความเครียดของไททาเนียมจากไฟไนต์เอลิเมนต์	118

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า	
ภาพที่ 3.11	แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ และการกำหนดเอลิเมนต์ของพันธ	33
ภาพที่ 3.12	แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ และการกำหนดเอลิเมนต์ของแผ่นจับยึดชิ้นงาน	34
ภาพที่ 3.13	พฤติกรรมความแข็ง และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียด ของไททานเนียม	35
ภาพที่ 3.14	แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปที่ประกอบด้วยเส้น โคนึงขีดจำกัดการขึ้นรูปและ การแบ่งส่วนต่าง ๆ ของพื้นที่ได้กราฟ	37
ภาพที่ 3.15	ลักษณะการขยายขอบของคานเพื่อกำหนดขนาดแผ่นชิ้นงานเปล่า	38
ภาพที่ 3.16	ขนาดของแผ่นชิ้นงานเปล่าที่ระยะ 30, 20 และ 10 มิลลิเมตรตามลำดับ	38
ภาพที่ 3.17	ผลการจำลองการขึ้นรูปแผ่นชิ้นงานเปล่าในขนาดต่าง ๆ ที่ความดันในการจับยึด 3 บาร์ และ ที่ความเร็ว 50, 100 และ 150 มิลลิเมตรต่อวินาที	40
ภาพที่ 3.18	ผลการจำลองการขึ้นรูปแผ่นชิ้นงานเปล่าในขนาดต่าง ๆ ที่ความดันในการจับยึด 1, 2 และ 3 บาร์ ที่ความเร็ว 150 มิลลิเมตรต่อวินาที	42
ภาพที่ 3.19	ผลการจำลองการขึ้นรูปแผ่นชิ้นงานเปล่าที่ขนาดขนาดเมื่อ 10 มิลลิเมตร ที่ความดัน ในการจับยึด 3 บาร์ ที่ความเร็วในการขึ้นรูป 150 มิลลิเมตรต่อวินาที	43
ภาพที่ 3.20	แสดงแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของคานและการกำหนดขนาดความกว้างยาว	44
ภาพที่ 3.21	แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของแผ่นจับยึดชิ้นงานและการกำหนดขนาด ความกว้างยาว	44
ภาพที่ 3.22	ลักษณะผลการจำลองการขึ้นรูปไททานเนียมแบบแผ่นเรียบ การเกิดการเกิดความเค้นอัด และผลจากแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป	45
ภาพที่ 3.23	ลักษณะผลการจำลองการขึ้นรูปไททานเนียมแบบแผ่นตาข่าย การเกิดการเกิดความเค้นอัด และ ผลจากแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป	45
ภาพที่ 3.24	ผลการจำลองการขึ้นรูปไททานเนียมแบบแผ่นเรียบที่ความเร็วในการขึ้นรูป 50 มิลลิเมตรต่อวินาที ที่ความดันในการจับยึดชิ้นงาน 1, 6, 12 และ 15 บาร์	46
ภาพที่ 3.25	ผลการจำลองการขึ้นรูปไททานเนียมแบบแผ่นเรียบที่ความเร็วในการขึ้นรูป 50 มิลลิเมตรต่อวินาที ที่ความดันในการจับยึดชิ้นงาน 1, 6, 12 และ 15 บาร์ ในมุมมองทางด้านบน	47
ภาพที่ 3.26	แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปไททานเนียมแบบแผ่นเรียบที่ความเร็วในการขึ้นรูป 50 มิลลิเมตร ต่อวินาที ที่ความดันในการจับยึดชิ้นงาน 1, 6, 12 และ 15 บาร์	47
ภาพที่ 3.27	ผลจากการจำลองการขึ้นรูปไททานเนียมแบบแผ่นเรียบที่ความเร็วในการขึ้นรูป 100 มิลลิเมตรต่อวินาที ที่ความดันในการจับยึดชิ้นงาน 1, 6, 13 และ 15 บาร์	48

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า	
ภาพที่ 3.41	แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปไททาเนียมแบบแผ่นเรียบที่ความเร็วในการขึ้นรูป 100 มิลลิเมตรต่อวินาทีที่ความดันในการจับยึดชิ้นงาน 1, 2, 3 และ 4 บาร์	59
ภาพที่ 3.42	ผลจากการจำลองการขึ้นรูปไททาเนียมแบบแผ่นเรียบที่ความเร็วในการขึ้นรูป 150 มิลลิเมตรต่อวินาที ที่ความดันในการจับยึดชิ้นงาน 1, 2, 3 และ 4 บาร์	60
ภาพที่ 3.43	ผลจากการจำลองการขึ้นรูปไททาเนียมแบบแผ่นเรียบที่ความเร็วในการขึ้นรูป 150 มิลลิเมตรต่อวินาที ที่ความดันในการจับยึดชิ้นงาน 1, 2, 3 และ 4 บาร์ ในมุมมองภาพด้านบน	61
ภาพที่ 3.44	แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปไททาเนียมแบบแผ่นเรียบที่ความเร็วในการขึ้นรูป 150 มิลลิเมตรต่อวินาที ที่ความดันในการจับยึดชิ้นงาน 1, 2, 3 และ 4 บาร์	61
ภาพที่ 3.45	การเปรียบเทียบผลการขึ้นรูปของไททาเนียมแบบแผ่นตาข่ายที่ความดันในการจับยึดที่ 3 บาร์ ความเร็วในการขึ้นรูปที่ 50, 100 และ 150 มิลลิเมตรต่อวินาที	63
ภาพที่ 3.46	การเปรียบเทียบผลการขึ้นรูปของไททาเนียมแบบแผ่นตาข่ายที่ความดันในการจับยึดที่ 3 บาร์ ความเร็วในการขึ้นรูปที่ 50, 100 และ 150 มิลลิเมตรต่อวินาที ในมุมมองด้านบน	64
ภาพที่ 3.47	แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปไททาเนียมแบบแผ่นตาข่ายที่ความดันในการจับยึดที่ 3 บาร์ ความเร็วในการขึ้นรูปที่ 50, 100 และ 150 มิลลิเมตรต่อวินาที	65
ภาพที่ 3.48	การเกิดการฉีกขาดที่เอลิเมนต์ของไททาเนียมที่เป็นแบบแผ่นตาข่าย	66
ภาพที่ 3.49	การเปรียบเทียบการเกิดความเค้นอัดจากการจำลองการขึ้นรูปของไททาเนียมที่เป็นแบบแผ่นเรียบและแบบแผ่นตาข่าย	66
ภาพที่ 3.50	การเปรียบเทียบการเกิดการฉีกขาด จากการจำลองการขึ้นรูปของไททาเนียมที่เป็นแบบแผ่นเรียบและแบบแผ่นตาข่าย	67
ภาพที่ 4.1	ขั้นตอนการดำเนิน การออกแบบ การสร้างชิ้นส่วนต่าง ๆ การติดตั้งแม่พิมพ์ และการทดลองขึ้นรูปจริงของการศึกษา	69
ภาพที่ 4.2	เครื่องปั๊มไฮดรอลิกขนาด 100 ตัน และส่วนประกอบของเครื่อง	70
ภาพที่ 4.3	ลักษณะการติดตั้งแม่พิมพ์ และ โครงสร้างแม่พิมพ์ที่เป็นแบบกลับทาง	71
ภาพที่ 4.4	ผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นฟอนมิสเซสของคาย ที่ได้จาก ไฟไนต์เอลิเมนต์	73
ภาพที่ 4.5	ผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นฟอนมิสเซสของแผ่นจับยึดชิ้นงาน ที่ได้จาก ไฟไนต์เอลิเมนต์	73
ภาพที่ 4.6	ผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นฟอนมิสเซสของแกนส่งแรงดัน ที่ได้จาก ไฟไนต์เอลิเมนต์	73
ภาพที่ 4.7	ผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นฟอนมิสเซสของพันธ์ ที่ได้จาก ไฟไนต์เอลิเมนต์	74

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า	
ภาพที่ 4.8	เครื่องจักรกลอัตโนมัติ ที่ใช้ในการสร้างชิ้นส่วนต่าง ๆ ของแม่พิมพ์	75
ภาพที่ 4.9	องค์ประกอบทั้งหมดของแม่พิมพ์ที่ได้จากการออกแบบ	75
ภาพที่ 4.10	โครงสร้างการออกแบบและชิ้นงานจริงของพื้นที่ที่ได้จากเครื่องจักรกลอัตโนมัติ	76
ภาพที่ 4.11	โครงสร้างการออกแบบและชิ้นงานจริงของคายที่ได้จากเครื่องจักรกลอัตโนมัติ	76
ภาพที่ 4.12	โครงสร้างการออกแบบและชิ้นงานจริงของแผ่นจับยึดชิ้นงานที่ได้จากเครื่องจักรกลอัตโนมัติ	77
ภาพที่ 4.13	การประกอบชิ้นส่วนแทนจับยึดเข้ากับพื้นที่ และการติดตั้งตัวกำหนดการสิ้นสุดการเคลื่อนที่ของคาย	77
ภาพที่ 4.14	การประกอบชิ้นส่วนแทนจับยึดเข้ากับพื้นที่ และการติดตั้งตัวกำหนดการสิ้นสุดการเคลื่อนที่ของคาย	78
ภาพที่ 4.15	การประกอบแผ่นจับยึดชิ้นงานกับแกนส่งแรงดันก่อนติดตั้งเข้ากับเครื่องปั๊ม	78
ภาพที่ 4.16	การติดตั้งแม่พิมพ์เข้ากับเครื่องปั๊มกำหนดแนวตำแหน่งให้ตรงกันระหว่างพื้นที่และคาย	79
ภาพที่ 4.17	การตรวจสอบสถานะของหน้าสัมผัสของคายและแผ่นจับยึดชิ้นงานด้วยระดับน้ำ	79
ภาพที่ 4.18	ลักษณะและตำแหน่งการวางแผ่นชิ้นงานเปล่าบนแผ่นจับยึดชิ้นงานก่อนการขึ้นรูป	80
ภาพที่ 4.19	วาล์วปรับความดันในการจับยึดชิ้นงานและมาตรวัดความดันของเครื่อง	81
ภาพที่ 4.20	ลักษณะรอยย่นที่เกิดขึ้นบนผิวของชิ้นงานจริง	82
ภาพที่ 4.21	ลักษณะรอยย่นที่เกิดขึ้นบนผิวของชิ้นงานจริง	82
ภาพที่ 4.22	ผลการขึ้นรูปแผ่นเหล็กแบบตาข่าย ลักษณะของรูตาข่ายและทิศทางของรูตาข่ายที่เปลี่ยนไป	83
ภาพที่ 4.23	การฝึกหัดของการขึ้นรูปแผ่นเหล็กแบบตาข่ายที่ความดัน 6 บาร์	83
ภาพที่ 4.24	การเปรียบเทียบผลการขึ้นรูปของแผ่นเหล็กแบบแผ่นเรียบและแบบแผ่นตาข่ายที่ความดันในการจับยึดชิ้นงาน 4 บาร์	84
ภาพที่ 4.25	พฤติกรรมความแข็งของวัสดุ และกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ความเค้นและความเครียดของไททานเนียมและเหล็กอะลูมิเนียม	85
ภาพที่ 4.26	ตำแหน่งและลักษณะการเกิดรอยย่นของการขึ้นรูปแผ่นไททานเนียมแบบแผ่นเรียบที่ความดันในการจับยึด 7 บาร์	86
ภาพที่ 4.27	การเปรียบเทียบขนาดรอยย่นและการฝึกหัดของแผ่นไททานเนียมที่ความดันในการจับยึด 7, 8 และ 9 บาร์	87
ภาพที่ 4.28	ชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูปแผ่นไททานเนียมที่เป็นแบบแผ่นเรียบ	88
ภาพที่ 4.29	การเปรียบเทียบตำแหน่งของการเกิดรอยย่นที่ผิวของชิ้นงานระหว่างแผ่นไททานเนียมและเหล็ก ที่เป็นแบบแผ่นเรียบ	89

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า	
ภาพที่ 6.2	เปอร์เซ็นต์ความหนาที่ลดลงของความหนาของไททานเนียมที่เป็นแบบแผ่นเรียบและแผ่นด้าย ที่ความดันในการจับยึด 4 บาร์	109
ภาพที่ 6.3	เปอร์เซ็นต์ความหนาที่ลดลงของชิ้นงานของแผ่นไททานเนียมที่เป็นแบบแผ่นเรียบ	111
ภาพที่ 6.4	เปอร์เซ็นต์ความหนาที่ลดลงของชิ้นงานของแผ่นไททานเนียมที่เป็นแบบแผ่นด้าย	111
ภาพที่ 6.5	การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความหนาที่ลดลงของชิ้นงานในตำแหน่งต่าง ๆ ของแผ่นไททานเนียมแบบแผ่นเรียบและแบบแผ่นด้ายที่ความดันในการจับยึด 1 บาร์	112
ภาพที่ 6.6	การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความหนาที่ลดลงของชิ้นงานในตำแหน่งต่าง ๆ ของแผ่นไททานเนียมแบบแผ่นเรียบและแบบแผ่นด้ายที่ความดันในการจับยึด 3 บาร์	112
ภาพที่ 6.7	ค่าความเค้นของไททานเนียมที่เป็นแบบแผ่นเรียบและแผ่นด้าย ที่ความดันในการจับยึด 4 บาร์	113
ภาพที่ 6.8	ค่าความเค้นของชิ้นงานในตำแหน่งต่าง ๆ ของแผ่นไททานเนียมที่เป็นแบบแผ่นเรียบ	115
ภาพที่ 6.9	ค่าความเค้นของชิ้นงานในตำแหน่งต่าง ๆ ของแผ่นไททานเนียมที่เป็นแบบแผ่นด้าย	115
ภาพที่ 6.10	การเปรียบเทียบค่าความเค้นของชิ้นงานในตำแหน่งต่าง ๆ ของแผ่นไททานเนียมแบบแผ่นเรียบและแบบแผ่นด้ายที่ความดันในการจับยึด 1 บาร์	116
ภาพที่ 6.11	การเปรียบเทียบค่าความเค้นของชิ้นงานในตำแหน่งต่าง ๆ ของแผ่นไททานเนียมแบบแผ่นเรียบและแบบแผ่นด้ายที่ความดันในการจับยึด 3 บาร์	116
ภาพที่ 6.12	ค่าความเครียดของไททานเนียมที่เป็นแบบแผ่นเรียบและแผ่นด้าย ที่ความดัน 4 บาร์	117
ภาพที่ 6.13	ค่าความเครียดของชิ้นงานในตำแหน่งต่าง ๆ ของแผ่นไททานเนียมที่เป็นแบบแผ่นเรียบ	119
ภาพที่ 6.14	ค่าความเครียดของชิ้นงานในตำแหน่งต่าง ๆ ของแผ่นไททานเนียมที่เป็นแบบแผ่นด้าย	119
ภาพที่ 6.15	การเปรียบเทียบค่าความเครียดของชิ้นงานในตำแหน่งต่าง ๆ ของแผ่นไททานเนียมแบบแผ่นเรียบและแบบแผ่นด้ายที่ความดันในการจับยึด 1 บาร์	120
ภาพที่ 6.16	การเปรียบเทียบค่าความเครียดของชิ้นงานในตำแหน่งต่าง ๆ ของแผ่นไททานเนียมแบบแผ่นเรียบและแบบแผ่นด้ายที่ความดันในการจับยึด 3 บาร์	120
ภาพที่ 6.17	ลักษณะของคายที่ได้เสนอแนะในการปรับปรุงที่ผนังของและรัศมีของคาย	124
ภาพที่ ก.1	การกำหนดเอลิเมนต์ของแบบจำลองและโครงสร้างของแม่พิมพ์ ในการจำลองทางไฟไนต์ เอลิเมนต์ของโปรแกรม HYPERFORM V.9	129
ภาพที่ ก.2	การกำหนดคุณสมบัติของแผ่นชิ้นงานเปล่า ในการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของโปรแกรม HYPERFORM V.9	129
ภาพที่ ก.3	การกำหนดเงื่อนไขการขึ้นรูป ในการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของโปรแกรม HYPERFORM V.9	130

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ ก.4	130
การแสดงผลการขึ้นรูปและแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป ในการจำลองทาง ไฟไนต์เอลิเมนต์ของโปรแกรม HYPERFORM V.9	
ภาพที่ ข.1	132
การออกแบบรายละเอียดของแท่นจับยึดพันธ์	
ภาพที่ ข.2	132
การออกแบบรายละเอียดของแกนพันธ์	
ภาพที่ ข.3	133
การออกแบบรายละเอียดของพันธ์	
ภาพที่ ข.4	133
การออกแบบรายละเอียดของแผ่นจับยึดชิ้นงาน	
ภาพที่ ข.5	134
การออกแบบรายละเอียดของคาย	
ภาพที่ ข.6	134
การออกแบบรายละเอียดของแท่นจับยึดคาย	
ภาพที่ ข.7	135
การออกแบบรายละเอียดของแกนส่งแรงดันและตัวกำหนดการสิ้นสุด การเคลื่อนที่ของคาย	