

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ฐ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหาการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
2 ปรัชญารวบรวมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 ปรัชญารวบรวมหรืองานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.1.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวัสดุคอมโพสิตและการทดสอบคุณสมบัติวัสดุ.....	6
2.1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์.....	8
2.1.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการหาค่าเหมาะสมที่สุด.....	9
2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	11
2.2.1 วัสดุคอมโพสิต (Composite materials)	11
2.2.1.1 วัสดุเมทริกซ์ (Matrix)	11
2.2.1.2 วัสดุเสริมแรง (Reinforcement).....	12
2.2.2 การพิมพ์วัสดุคอมโพสิตด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ.....	13
2.2.2.1 การตั้งค่าการพิมพ์ในส่วนที่เกี่ยวข้องกับวัสดุเมทริกซ์	13
2.2.2.2 การตั้งค่าการพิมพ์ในส่วนที่เกี่ยวข้องกับวัสดุเสริมแรง	15
2.2.3 คุณสมบัติความเค้นและความเครียดของวัสดุ (Stress and Strain)	16

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.2.4	วัสดุไอโซทรอปิกและวัสดุแอนไอโซทรอปิก	22
2.2.4.1	วัสดุไอโซทรอปิก (Isotropic material).....	22
2.2.4.2	วัสดุแอนไอโซทรอปิก (Anisotropic material).....	22
2.2.5	การออกแบบการทดลองด้วยวิธีแฟกทอเรียลเต็มรูป.....	23
2.2.6	แท่นทดสอบแรงขับ (Thrust stand)	23
2.2.7	การทดสอบแรงดึงของโพลิเมอร์และคอมโพสิตด้วยมาตรฐาน ASTM D3039	24
2.2.7.1	รูปแบบชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบความแข็งแรงดึง.....	24
2.2.7.2	เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบความแข็งแรงดึง	25
2.2.7.3	ขั้นตอนการทดสอบความแข็งแรงดึง	25
2.2.8	การทดลองด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ และซอฟต์แวร์แอนซิส	26
2.2.8.1	การทดลองด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์.....	26
2.2.8.2	ซอฟต์แวร์แอนซิส และโมดูลแอนซิสเอซีพี	26
2.2.9	การสร้างฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในการออกแบบ.....	27
2.2.9.1	การสร้างแบบจำลองทดแทนด้วยวิธีคริกกิง	27
2.2.10	วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุด	29
2.2.10.1	ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับไม่ครอบงำ	29
3	วิธีดำเนินการวิจัย ส่วนที่ 1	32
3.1	กรอบแนวคิดของการดำเนินการวิจัย.....	32
3.2	การกำหนดตัวแปรออกแบบ เงื่อนไข และฟังก์ชันวัตถุประสงค์.....	33
3.2.1	การกำหนดตัวแปรออกแบบ.	33
3.2.2	เงื่อนไขสำหรับการออกแบบชิ้นงานทดสอบ	34
3.2.3	ฟังก์ชันวัตถุประสงค์.....	35
3.3	การออกแบบตัวแปรการทดลองการทดสอบความแข็งแรงดึง.....	36
3.4	การทดสอบความแข็งแรงดึงของวัสดุคอมโพสิต	36
3.4.1	รูปร่างและขนาดของการสร้างชิ้นงานทดสอบ	36
3.4.2	การตั้งค่าการพิมพ์ของวัสดุคอมโพสิต	37

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.4.2.1 รายละเอียดการปรับตั้งค่าการพิมพ์	38
3.4.3 ขั้นตอนการทดสอบความแข็งแรงดึงวัสดุคอมโพสิต	40
3.5 ผลของค่าความเค้นและความเครียดโดยสรุปจากการทดลอง	42
3.6 การสร้างสมการจำลองข้อมูลการทดสอบ	43
3.7 การหาค่าเหมาะสมสุดของฟังก์ชันหลายวัตถุประสงค์จากสมการจำลอง	43
4 ผลการดำเนินการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัยส่วนที่ 1	44
4.1 ผลการทดสอบความแข็งแรงดึงของวัสดุคอมโพสิต	44
4.2 ความน่าเชื่อถือของการสร้างสมการจำลองทดแทน	47
4.3 การรู้เข้าของคำตอบจากการหาค่าเหมาะสมที่สุด	50
4.4 ผลของการหาค่าเหมาะสมที่สุดในการพิมพ์ชิ้นงานคอมโพสิตแบบสามมิติ	51
5 การดำเนินการวิจัยส่วนที่ 2	53
5.1 กรอบแนวคิดของการดำเนินการวิจัย	53
5.2 การเปรียบเทียบการทดลองด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์	54
5.2.1 การตั้งค่าคุณสมบัติวัสดุในซอฟต์แวร์แอนซิส	55
5.2.2 การทดสอบเทียบค่าการทดลองด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์	56
5.2.3 การกำหนดค่าการวางตัวของวัสดุคอมโพสิต	57
5.3 การทดสอบกล่องต้านแรงบิดด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์	59
5.3.1 การออกแบบชิ้นงานกล่องต้านแรงบิด	59
5.3.2 การขึ้นรูปชิ้นส่วนกล่องต้านแรงบิดเพื่อทดสอบด้วยซอฟต์แวร์แอนซิส	61
5.4 การกำหนดตัวแปรออกแบบ เงื่อนไข และฟังก์ชันวัตถุประสงค์	62
5.4.1 การกำหนดตัวแปรออกแบบ	62
5.4.2 เงื่อนไขสำหรับการออกแบบการตั้งค่าวัสดุคอมโพสิต	62
5.4.3 การกำหนดค่าการทดสอบแทนทดสอบแรงขับด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์	64
5.4.4 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของชิ้นงานทดสอบ	66
5.5 การออกแบบตัวแปรการทดลองในการทดสอบด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์	66
5.6 การทดสอบความเป็นอิสระของเมช	68
5.7 การสร้างสมการจำลองทดแทนข้อมูลการทดลอง	70

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.8 การหาค่าเหมาะสมที่สุดของการทดลอง	70
6 ผลการดำเนินการวิจัย ส่วนที่ 2	71
6.1 การยืนยันผลวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ จากการเทียบค่าผลการทดลอง	71
6.2 ผลการทดสอบแผ่นต้านแรงบิดด้วยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์	72
6.2.1 ผลการทดสอบด้วยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์.....	72
6.3 การหาค่าเหมาะสมที่สุดของการทดสอบ	75
6.3.1 การหาค่าเหมาะสมที่สุดจากการทดสอบด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม.....	75
6.3.2 การวิเคราะห์ค่าเหมาะสมที่สุดโดยตรงจากผลการทดสอบ	80
7 สรุปและข้อเสนอแนะ	82
7.1 สรุปผลการวิจัย.....	82
รายการอ้างอิง	84
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก	87
ภาคผนวก ข	93
ประวัติผู้เขียน	105

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ความหมายของตัวแปรในการออกแบบการพิมพ์วัสดุคอมโพสิต	33
3.2 การปรับตั้งค่าในการพิมพ์วัสดุคอมโพสิต	34
3.3 การปรับตั้งค่าในการพิมพ์ในส่วนวัสดุเสริมแรง.....	34
3.4 ชื่อชิ้นงานทดสอบ และการปรับตั้งค่าตัวแปรออกแบบของชิ้นงานทดสอบ.....	36
3.5 ตารางแสดงข้อมูลของตัวแปรต้นและตัวแปรตามซึ่งได้จากการทดลอง.....	42
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นและตัวแปรตาม	46
4.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด	47
4.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าโมดูลัสการยืดของวัสดุ	47
4.4 ค่าจากการเกณฑ์การประเมินประสิทธิภาพความแม่นยำต่าง ๆ ของสมการจำลอง ส่วนที่ 1.....	50
4.5 ข้อมูลขาเข้าและขาออกของกลุ่มตัวอย่างจากขอบหน้าพาเรโต ในการวิจัยส่วนที่ 1.....	51
5.1 ค่าคุณสมบัติของวัสดุโณนิคซ์	55
5.2 ค่าคุณสมบัติวัสดุเส้นใยคาร์บอนคุณสมบัติการยืดหยุ่นเป็นแบบออร์โธทรอปิก.....	55
5.3 ความหมายของตัวแปรในการออกแบบการตั้งค่าวัสดุคอมโพสิต	62
5.4 การปรับตั้งค่าวัสดุในซอฟต์แวร์ ANSYS ACP	63
5.5 การกำหนดค่าเงื่อนไขขอบเขตในการทดลองด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์	64
5.6 ชื่อชิ้นงานแผ่นต้านแรงบิด และการปรับค่าวัสดุคอมโพสิตในซอฟต์แวร์.....	67
5.7 ผลการทดสอบความเป็นอิสระของเมช.....	69
6.1 การเทียบค่ายืนยันผลการทดสอบจากวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์.....	71
6.2 ผลการทดลองแผ่นต้านแรงบิดด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์	74
6.3 ค่าจากการเกณฑ์การประเมินประสิทธิภาพความแม่นยำต่าง ๆ ของสมการจำลอง ส่วนที่ 2.....	78
6.4 ข้อมูลขาเข้าและขาออกของกลุ่มตัวอย่างจากขอบหน้าพาเรโต ในการวิจัยส่วนที่ 1	80

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ตัวอย่างการรวมกันของวัสดุเมทริกซ์และวัสดุเสริมแรงในวัสดุคอมโพสิต	11
2.2 ภาพตัวอย่างวัสดุคอมโพสิตเมื่อรับแรง	12
2.3 รูปแบบการพิมพ์ของวัสดุคอมโพสิตแบบต่าง ๆ.....	14
2.4 ภาพแสดงชั้นของรูปและฟลอร์ของวัสดุคอมโพสิต	14
2.5 ภาพแสดงจำนวนชั้นของผนังของวัสดุ 2 ชั้น และแสดงการนับจำนวนวงแหวนไฟเบอร์	15
2.6 ภาพแสดงการตั้งค่าองค์การพิมพ์เส้นใย และตัวอย่างของการเรียงตัวเส้นใยที่ องศาต่าง ๆ.....	16
2.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุเหนียวเมื่อทำการ ทดสอบ แรงดึง	18
2.8 อิลิเมนต์ของความเค้นในทิศทางต่าง ๆ และการเกิดความเค้นหลักในสองมิติ.....	19
2.9 อิลิเมนต์ของความเค้นต่าง ๆ ในสามมิติ.....	20
2.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุเปราะเมื่อรับภาระแรง จากการทดสอบแรงดึง	22
2.11 ชุดแท่นทดสอบแรงขับซึ่งพัฒนาโดยหน่วยวิจัยจากทางโรงเรียนนายเรืออากาศ นวมินทกษัตริยาธิราช.....	24
2.12 ภาพแสดงชิ้นงานทดสอบความแข็งแรงดึง.....	25
2.13 การทำงานของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม	30
2.14 การคำนวณระยะห่างจากกลุ่มคำตอบอื่น.....	31
2.15 การทำงานของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับไม่ครอบงำ 2	31
3.1 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัยในส่วนที่ 1	32
3.2 ภาพแสดงเนื้อวัสดุส่วนกลางของชิ้นงานทดสอบที่ลดลงตามจำนวนวงแหวนไฟเบอร์	33
3.3 ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบแรงดึงและขนาดของชิ้นงาน.....	37
3.4 ภาพแสดงหน้าต่างซอฟต์แวร์ Eiger	37
3.5 ภาพแสดงหน้าต่างของแท็บย่อยต่าง ๆ ของแท็บ PART	39
3.6 ภาพแสดงหน้าต่างเมื่อเลือกการปรับตั้งค่าในแท็บ XRAY	39

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.7	แสดงเครื่องพิมพ์วัสดุคอมพิวเตอร์แบบสามมิติ Markforged รุ่น X7 และขณะเครื่องพิมพ์กำลังพิมพ์ชิ้นงานทดสอบ.....40
3.8	แสดงเครื่องทดสอบแรงอเนกประสงค์ Lloyd รุ่น LD 100 หน้าจอบอกระยะของปากกาจับชิ้นงานของเครื่องทดสอบ และการแตกหักของชิ้นงานทดสอบ.....40
3.9	ภาพแสดงหน้าต่างการตั้งค่าซอฟต์แวร์ NEXYGEN PLUS441
4.1	ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรออกแบบและค่าความแข็งแรงดึงจากการทดสอบ45
4.2	ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรออกแบบและค่าโมดูลัสความยืดจากการทดสอบ45
4.3	ภาพแสดงการตรวจสอบไขว้สมการจำลองคริกกิ้งกับค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดจากผลการทดลอง.....48
4.4	ภาพแสดงการตรวจสอบไขว้สมการจำลองคริกกิ้งกับค่าโมดูลัสความยืดของวัสดุ48
4.5	ภาพแสดงการตรวจสอบไขว้สมการจำลองการถดถอยเชิงเส้นกับค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด..49
4.6	ภาพแสดงการตรวจสอบไขว้สมการจำลองการถดถอยเชิงเส้นกับค่าโมดูลัสความยืดของวัสดุ49
4.7	การดูเข้าของค่าวัดความหลากหลายคำตอบในแต่ละรุ่นประชากรการวิจัยส่วนที่ 151
4.8	ภาพแสดงผลคำตอบจากการหาค่าเหมาะสมที่สุดและขอบหน้าพาเรโต52
4.9	ภาพแสดงผลข้อมูลขาออกของตัวอย่างจากขอบหน้าพาเรโตจากการหาค่าเหมาะสมที่สุด....52
5.1	กรอบแนวคิดของการดำเนินการวิจัยในส่วนที่ 253
5.2	ภาพแสดงโมดูลของซอฟต์แวร์แอนซิสได้แก่ ACP (Pre) และ Static Structural.....54
5.3	การกำหนดค่าของวัสดุโณิกซีในซอฟต์แวร์แอนซิส.....55
5.4	ภาพแสดงการกำหนดค่าคุณสมบัติวัสดุของเส้นใยคาร์บอน.....56
5.5	การตั้งเงื่อนไขขอบเขตการทดลองเทียบค่า.....56
5.6	การตั้งค่าการพิมพ์ของชิ้นงานเทียบค่า.....57
5.7	ภาพแสดงการตั้งค่าในส่วน Fabric โดยตั้งความหนาของทั้งสองวัสดุที่ 0.125 มิลลิเมตร...58
5.8	ภาพแสดงการตั้งค่าในส่วน Stackups และแสดงแผนภาพคุณสมบัติพิกัดเชิงมุม58
5.9	ชิ้นงานต้นแบบของกล่องต้านแรงบิด.....59
5.10	การขึ้นรูปชิ้นงานครั้งที่ 1 และการทดสอบด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์เพื่อตรวจสอบบริเวณการเกิดความเค้นสูงสุดครั้งที่60

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.11 การขึ้นรูปชิ้นงานครั้งที่ 2 และการทดสอบด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์เพื่อตรวจสอบ บริเวณการเกิดความเค้นสูงสุดครั้งที่ 2	60
5.12 การขึ้นรูปพื้นผิวของชิ้นงานด้วยซอฟต์แวร์ ANSYS SpaceClaim	61
5.13 ภาพแสดงความหนาของชิ้นงานซึ่งได้จากการวางชั้นของวัสดุคอมโพสิตใน ANSYS ACP	61
5.14 แสดงการวางองศาเส้นใยเทียบกับแนวแรงของกล่องต้านแรงบิด	63
5.15 การคำนวณแรงกระทำต่อแผ่นต้านแรงบิดที่เกิดจากการหมุนของมอเตอร์	65
5.16 การตั้งค่าเงื่อนไขขอบเขตการทดสอบด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์	65
5.17 ภาพแสดงการลู่เข้าของค่าความเค้นหลักสูงสุดและความเป็นอิสระของเมช	68
6.1 ภาพแสดงผลความเค้นจากการทดสอบเทียบค่าเพื่อยืนยันผลทั้ง 3 ตัวอย่าง	71
6.2 แสดงผลจากการทดลองวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ของตัวอย่างที่ 18A	72
6.3 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นและค่าความเค้นหลักสูงสุด	73
6.4 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นและค่าความสิ้นเปลืองเส้นใยคาร์บอน	73
6.5 ภาพแสดงการตรวจสอบไขว้สมการจำลองคริกกิ้งกับผลความเค้นหลักสูงสุด	75
6.6 ภาพแสดงการตรวจสอบไขว้สมการจำลองคริกกิ้งกับค่าความสิ้นเปลืองเส้นใยคาร์บอน	76
6.7 ภาพแสดงการตรวจสอบไขว้สมการจำลองการถดถอยเชิงเส้นกับผลความเค้นหลักสูงสุด ...	76
6.8 ภาพแสดงการตรวจสอบไขว้สมการจำลองการถดถอยเชิงเส้นกับค่าความสิ้นเปลือง เส้นใยคาร์บอน	77
6.9 การลู่เข้าของค่าวัดความหลากหลายคำตอบในแต่ละรุ่นประชากรในการวิจัยส่วนที่ 2	78
6.10 ขอบหน้าพาเรโตของคำตอบจากการหาค่าเหมาะสมที่สุดในส่วนที่ 2.	79
6.11 ภาพแสดงผลข้อมูลขาออกของตัวอย่างจากขอบหน้าพาเรโตจากการหาค่า เหมาะสมที่สุด ส่วนที่ 2	80
6.12 กราฟเปรียบเทียบผลความเค้นหลักสูงสุดซึ่งได้จากการทดลอง	82
ก.1 ผลการทดสอบชิ้นงานที่พิมพ์ด้วยความหนาแน่น 50 เปอร์เซ็นต์ และวงแหวน ไฟเบอร์ 2 วง	88
ก.2 ผลการทดสอบชิ้นงานที่พิมพ์ด้วยความหนาแน่น 50 เปอร์เซ็นต์ และวงแหวนไฟเบอร์ 3 วง	89

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ก.3 ผลการทดสอบชิ้นงานที่พิมพ์ด้วยความหนาแน่น 50 เปอร์เซ็นต์ และวงแหวนไฟเบอร์ 4 วง.....	89
ก.4 ผลการทดสอบชิ้นงานที่พิมพ์ด้วยความหนาแน่น 70 เปอร์เซ็นต์ และวงแหวนไฟเบอร์ 2 วง.....	90
ก.5 ผลการทดสอบชิ้นงานที่พิมพ์ด้วยความหนาแน่น 70 เปอร์เซ็นต์ และวงแหวนไฟเบอร์ 3 วง.....	90
ก.6 ผลการทดสอบชิ้นงานที่พิมพ์ด้วยความหนาแน่น 70 เปอร์เซ็นต์ และวงแหวนไฟเบอร์ 4 วง.....	91
ก.7 ผลการทดสอบชิ้นงานที่พิมพ์ด้วยความหนาแน่น 90 เปอร์เซ็นต์ และวงแหวนไฟเบอร์ 2 วง.....	91
ก.8 ผลการทดสอบชิ้นงานที่พิมพ์ด้วยความหนาแน่น 90 เปอร์เซ็นต์ และวงแหวนไฟเบอร์ 3 วง.....	92
ก.9 ผลการทดสอบชิ้นงานที่พิมพ์ด้วยความหนาแน่น 90 เปอร์เซ็นต์ และวงแหวนไฟเบอร์ 4 วง.....	92