

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ณ
สารบัญรูปภาพ	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ฐ
บทที่	

1	บทนำ.....	1
1.1	ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2	วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3	ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4	วิธีดำเนินงานวิจัย	4
1.5	สถานที่ทำวิจัย.....	4
1.6	เครื่องมือที่ใช้ในการทำวิจัย.....	4
1.7	ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
2	ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.1	หอยแมลงภู่ (Mussel shell).....	6
2.2	อีพอกซีเรซิน (Epoxy resin).....	7
2.3	กลศาสตร์การแตกหัก (Fracture mechanics).....	9
2.4	วิธีการปัญญาประดิษฐ์ (Artificial intelligence method).....	12
2.5	แบบจำลองหลายระดับความเที่ยงตรง (Multi-fidelity model).....	13
2.6	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	14
3	วิธีการดำเนินการวิจัย	21
3.1	วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	22

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.1.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย (Materials).....	22
3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	22
3.2 การเตรียมวัสดุ.....	23
3.2.1 การเตรียมเปลือกหอยแมลงภู.....	23
3.2.2 การเตรียมอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเปลือกหอยแมลงภู.....	25
3.3 การทดสอบความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบผสม 1 และ 3.....	27
3.3.1 การเตรียมชิ้นทดสอบทดสอบความต้านทานการแตกหัก.....	27
3.3.2 การทดสอบความต้านทานการแตกหักและการคำนวณ.....	29
3.4 การทำนายความต้านทานการแตกหัก.....	31
3.4.1 การทำนายด้วยเกณฑ์การแตกหัก.....	31
3.4.2 การทำนายด้วยวิธีปัญญาประดิษฐ์.....	36
4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	46
4.1 สมบัติทางกลของวัสดุ.....	46
4.1.1 ผลการทดสอบแรงดึง.....	46
4.1.2 ผลการทดสอบความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบผสม 1 และ 3	55
4.2 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกเปลือกหอยแมลงภู.....	65
4.3 ผลการทำนายความต้านทานการแตกหัก.....	65
4.3.1 ผลการทำนายด้วยเกณฑ์การแตกหัก.....	69
4.3.2 ผลการทำนายด้วยวิธีปัญญาประดิษฐ์.....	71
5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	84
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	84
5.1.1 สมบัติทางกลของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเปลือกหอยแมลงภู.....	84
5.1.2 ผลการทำนายด้วยวิธีปัญญาประดิษฐ์.....	85
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	85
รายการอ้างอิง	86
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก ผลการทดสอบสมบัติทางกลของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเปลือกหอยแมลงภู.....	92

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก ข ผลการทำนายความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบผสม 1 และ 3	96
ภาคผนวก ค บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา	103
ประวัติผู้เขียน.....	110

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวัสดุผสมเปลือกหอย (วัสดุหลักกลุ่มพอลิเมอร์).....	14
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องอุณหภูมิการเผากับขนาดของเปลือกหอยต่อสมบัติทางกลของวัสดุผสม.....	15
3.1 ตารางแสดงขนาดชิ้นงานทดสอบความต้านทานการแตกหัก	27
3.2 ตารางแสดงปัจจัยการออกแบบการทดสอบความต้านทานการแตกหัก	29
3.3 ตารางแสดงมุมของรอยร้าวเริ่มต้นที่ค่า M^e ต่าง ๆ	31
3.4 ตารางแสดงขนาดของชิ้นงานทดสอบแรงดึง	35
3.5 ตารางแสดงปัจจัยการออกแบบการทดสอบแรงดึง	35
3.6 ค่าไฮเปอร์พารามิเตอร์ที่ทำการทดลอง	40
3.7 การตีความค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ	43
3.8 การตีความค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสอง	44
3.9 การตีความค่าเฉลี่ยของร้อยละความผิดพลาดสัมบูรณ์.....	45
4.1 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนความเค้นครากของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยPEเปลือก หอยแมลงภู่.....	48
4.2 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนความเค้นแรงดึงของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเปลือก หอยแมลงภู่.....	49
4.3 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนโมดูลัสความยืดหยุ่นของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเปลือก หอยแมลงภู่.....	49
4.4 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของความต้านทานการแตกหักรูปแบบที่ 1 ของอีพอกซีเรซิน เสริมแรงด้วยเปลือกหอยแมลงภู่.....	61
4.5 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของความต้านทานการแตกหักรูปแบบที่ 3 ของอีพอกซีเรซิน เสริมแรงด้วยเปลือกหอยแมลงภู่.....	61
4.6 องค์ประกอบทางเคมีของเปลือกหอยแมลงภู่ที่ผ่านการเผาในอุณหภูมิต่าง ๆ	66
4.7 ผลปริมาณเฟสอราโกไนต์และแคลไซต์ในเปลือกหอยแมลงภู่หลังการเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ	68
4.8 ผลการปรับค่าไฮเปอร์พารามิเตอร์ที่ให้ประสิทธิภาพการทำนายดีที่สุด	72

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	โครงสร้างทั้ง 3 ชั้นของเปลือกหอยแมลงภู่มะนาว..... 7
2.2	โครงสร้างทางเคมีของบิสฟีนอล-เอ (Bisphenol A) 7
2.3	โครงสร้างทางเคมีของอีพิกโลโรไฮดริน (Epichlorohydrin)..... 8
2.4	โครงสร้างทางเคมีของ ไตรเอทิลีนเตตระมีน (Triethylene tetramine)..... 8
2.5	ไดเอทิลีนไตรเอมีน (Diethylene triamine)..... 8
2.6	ปฏิกิริยาการสังเคราะห์อีพอกซีเรซิน (Epoxy resin)..... 9
2.7	รูปแบบการเสียรูปที่ปลายรอยร้าว..... 12
2.8	แสดงการทดสอบความต้านทานการแตกหักจากงานวิจัยของคุณ F Ren et al..... 16
2.9	แสดงการทดสอบความต้านทานการแตกหักจากงานวิจัยของคุณ PJ Haghighatpour et al..... 17
2.10	แสดงการทดสอบความต้านทานการแตกหักจากงานวิจัยของคุณ M.R.Ayatollahi et al..... 18
3.1	แผนผังขั้นตอนการดำเนินงานงานวิจัย 21
3.2	การเผาเปลือกหอยแมลงภู่มะนาวที่อุณหภูมิต่าง ๆ ในเตาเผา 23
3.3	การนำเปลือกหอยแมลงภู่มะนาวแยกขนาดด้วยเครื่องร่อนและตะแกรงร่อน..... 24
3.4	ขนาดของเปลือกหอยแมลงภู่มะนาวหลังผ่านการบดด้วยเครื่องวัดขนาดอนุภาคโดยใช้เลเซอร์..... 24
3.5	ขั้นตอนการผสมอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเปลือกหอยแมลงภู่มะนาว..... 25
3.6	การเตรียมชิ้นงานศึกษาการกระจายตัวของเปลือกหอยด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอ..... 26
3.7	รูปร่างของชิ้นทดสอบความต้านทานการแตกหัก..... 27
3.8	การวัดมุมรอยร้าวเริ่มต้นด้วยกล้องจุลทรรศน์ถ่ายภาพและจำลองพื้นผิวแบบ 3 มิติ..... 28
3.9	การวัดความลึกรอยร้าวเริ่มต้นด้วยกล้องจุลทรรศน์ถ่ายภาพและจำลองพื้นผิวแบบ 3 มิติ 28
3.10	ลักษณะการทดสอบความต้านทานการแตกหักบนเครื่องทดสอบแรงดึง..... 29
3.11	ลักษณะมุมการวางแนวรอยร้าวเมื่อต้องการให้ค่าความเค้นสัมพัทธ์มีค่าสูงสุด (α_f) 32
3.12	รูปร่างและขนาดชิ้นงานทดสอบแรงดึง..... 34
3.13	การเตรียมชิ้นงานทดสอบแรงดึงเพื่อศึกษาผลกระทบของการเตรียมวัสดุ 36
3.14	โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมเชิงลึก 38
3.15	แผนผังการสร้างแบบจำลองความเที่ยงตรงเดียว 41
3.16	แผนผังการสร้างแบบจำลองหลายระดับความเที่ยงตรง 42
4.1	ผลความเค้นครากของอีพอกซีเรซินเสริมแรงเปลือกหอยแมลงภู่มะนาวที่สัดส่วนต่าง ๆ 46

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.2	ผลความเค้นแรงดึงของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเปลือกหอยแมลงภู่ที่สัดส่วนต่าง ๆ 47
4.3	ผลโมดูลัสความยืดหยุ่นของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเปลือกหอยแมลงภู่ที่สัดส่วนต่าง ๆ..... 48
4.4	ภาพถ่ายการกระจายตัวของเปลือกหอยในอีพอกซีเรซินด้วยกล้องจุลทรรศน์สแตอริโอ 50
4.5	ผลความเค้นครากต่อน้ำหนักของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเปลือกหอยแมลงภู่..... 51
4.6	ผลความเค้นแรงดึงต่อน้ำหนักของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเปลือกหอยแมลงภู่ 52
4.7	ผลโมดูลัสความยืดหยุ่นต่อน้ำหนักของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเปลือกหอยแมลงภู่..... 52
4.8	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเปลือก หอยแมลงภู่ที่อุณหภูมิการเผา 500 °C.....53
4.9	ขั้นตอนทดสอบความต้านทานการแตกหักของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเปลือกหอยแมลงภู่ที่อุณหภูมิ การเผา 700 °C ที่สัดส่วนการผสม 20 %wt..... 56
4.10	ความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบผสม 1 และ 3 ของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วย เปลือกหอยแมลงภู่ที่อุณหภูมิการเผา 500 องศาเซลเซียส 56
4.11	ความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบผสม 1 และ 3 ของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วย เปลือกหอยแมลงภู่ที่อุณหภูมิการเผา 700 องศาเซลเซียส 57
4.12	ความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบผสม 1 และ 3 ของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วย เปลือกหอยแมลงภู่ที่อุณหภูมิการเผา 900 องศาเซลเซียส 58
4.13	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างภาระและระยะยืดของขั้นตอนทดสอบความต้านทานการแตกหักที่ อุณหภูมิการเผาเปลือกหอยแมลงภู่ 700 องศาเซลเซียสและค่า M^e เท่ากับ 0.50..... 58
4.14	พื้นผิวการแตกหักของอีพอกซีเรซินบริสุทธิ์ที่ $M^e = 0.50$ 59
4.15	พื้นผิวการแตกหักของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเปลือกหอยแมลงภู่ที่ M^e ต่าง ๆ 60
4.16	กราฟพาเรโตของผลกระทบมาตรฐานต่อความต้านทานการแตกหัก 63
4.17	กราฟผลกระทบของปัจจัยหลักต่อความต้านทานการแตกหัก..... 65
4.18	ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของเปลือกหอยแมลงภู่หลังผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ 67
4.19	ผลการทำนายความต้านทานการแตกหักด้วยเกณฑ์การแตกหักที่อุณหภูมิการเผาเปลือก หอยแมลงภู่ 700 องศาเซลเซียส..... 71
4.20	ผลค่าเฉลี่ยของร้อยละความผิดพลาดสัมบูรณ์ของการปรับค่าไฮเปอร์พารามิเตอร์..... 72
4.21	ผลระดับความสำคัญของพารามิเตอร์ในการปรับปรุงประสิทธิภาพของแบบจำลอง..... 73
4.23	ผลการทำนายค่าความต้านทานการแตกหักรูปแบบที่ 3 เปรียบเทียบกับค่าจากการทดสอบจริง75

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.24 ผลการทำนายความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบที่ 1 ด้วยแบบจำลองความเที่ยงตรงเดียว	76
4.25 ผลการทำนายความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบที่ 3 ด้วยแบบจำลองความเที่ยงตรงเดียว	77
4.26 ผลการทำนายความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบที่ 1 ด้วยแบบจำลองหลายระดับความเที่ยงตรง.....	78
4.27 ผลการทำนายความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบที่ 3 ด้วยแบบจำลองหลายระดับความเที่ยงตรง.....	79
4.28 ผลการทำนายของแบบจำลองความเที่ยงตรงเดียวและแบบจำลองหลายระดับความเที่ยงตรงด้วยชุดตรวจสอบแบบจำลอง	80
4.29 ผลการทำนายของแบบจำลองความเที่ยงตรงเดียวและแบบจำลองหลายระดับความเที่ยงตรงด้วยชุดทดสอบแบบจำลอง.....	81
4.30 ค่า SHAP ของความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระรูปแบบที่ 1	82
4.31 ค่า SHAP ของความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระรูปแบบที่ 3	82

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

θ	=	มุมของรอยร้าวเริ่มต้น
$\sigma_{\alpha\alpha}$	=	ความเค้นสัมผัส
α_f	=	มุมการวางแนวรอยร้าวเมื่อต้องการให้ค่าความเค้นสัมผัสมีค่าสูงสุด
DNN	=	โครงข่ายประสาทเทียมเชิงลึก (Deep neural network)
K_A	=	องค์ประกอบความเข้มของความเค้น (Stress intensity factor)
K_I	=	ตัวประกอบความเข้มของความเค้นภายใต้ภาระแบบที่ 1
K_{III}	=	ตัวประกอบความเข้มของความเค้นภายใต้ภาระแบบที่ 3
LEFM	=	กลศาสตร์การแตกหักยืดหยุ่นเชิงเส้น (Linear elastic fracture mechanics)
Local SED	=	เกณฑ์การแตกหักแบบ Local strain energy density
M^e	=	พารามิเตอร์ของการรับภาระแบบผสม (Mode mixing parameters)
MTS	=	เกณฑ์การแตกหักแบบ Maximum tangential stress
SENB	=	ชิ้นทดสอบแบบมีรอยร้าวข้างเดียวรับแรงกดดัด (Single edge notched bend)
SHAP	=	SHapley Additive exPlanations
UTM	=	เครื่องทดสอบแบบอเนกประสงค์ (Universal testing machine)