

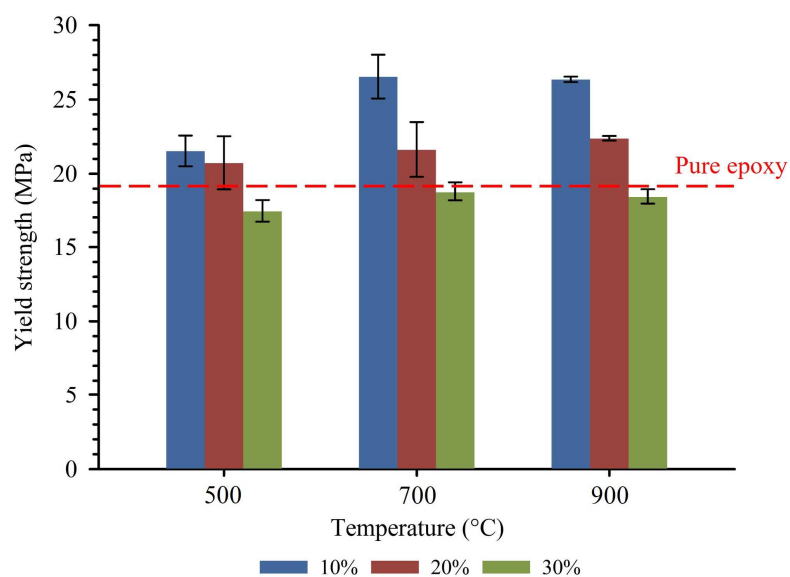
บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

4.1 สมบัติทางกลของวัสดุ

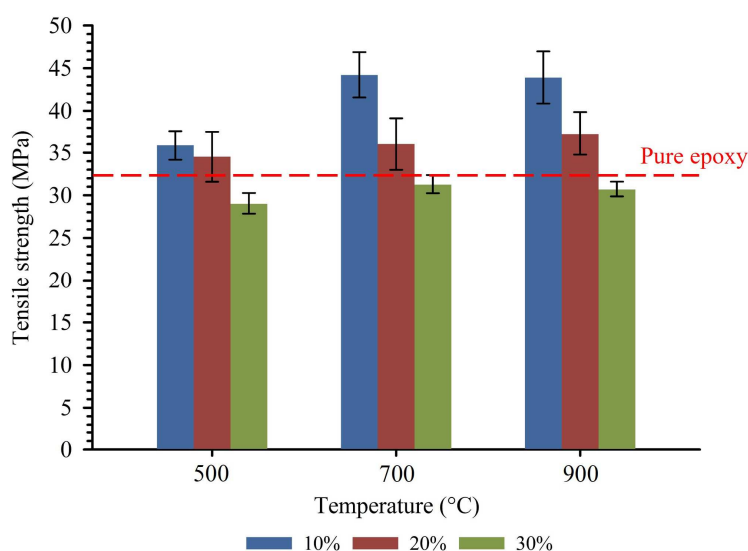
4.1.1 ผลการทดสอบแรงดึง

ผลการทดสอบแรงดึงของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเปลือกหอยแมลงภู่ที่อุณหภูมิการเผา (องศาเซลเซียส) และสัดส่วนการผสม (ร้อยละโดยน้ำหนัก) ที่ต่างกันจะแสดงในรูปแบบของความเค้นคราก (Yield strength), ความเค้นแรงดึง (Tensile strength) และค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of elasticity) โดยความเค้นครากแสดงถึงค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุสามารถรับได้ก่อนเกิดการเสียรูปอย่างถาวร ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นครากและอุณหภูมิการเผาที่สัดส่วนการผสมต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 4.1 ที่สัดส่วนการผสมร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ความเค้นครากมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการเผาเปลือกหอยที่ใช้เป็นวัสดุเสริมแรงเพิ่มขึ้น และเริ่มคงที่เมื่ออุณหภูมิการเผาอยู่ที่ 700 และ 900 องศาเซลเซียส เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์พบว่าความเค้นครากของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเปลือกหอยที่สัดส่วนการผสมร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนัก มีค่าสูงขึ้นเมื่อเทียบกับอีพอกซีเรซินบริสุทธิ์ (Pure epoxy) และความเค้นครากจะลดลงอย่างชัดเจนเมื่อสัดส่วนการผสมเพิ่มขึ้น โดยความเค้นครากจะมีค่าสูงสุดที่สัดส่วนการผสมเท่ากับร้อยละ 10 โดยน้ำหนักซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวแสดงให้เห็นที่ทุกอุณหภูมิการเผา



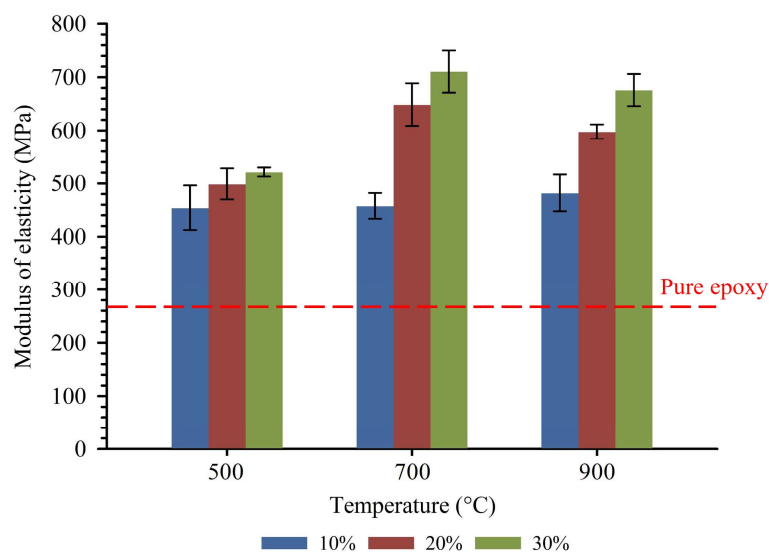
รูปที่ 4.1 ผลความเค้นครากของอีพอกซีเรซินเสริมแรงเปลือกหอยแมลงภู่ที่สัดส่วนต่าง ๆ

สำหรับความเค้นแรงดึงที่แสดงถึงความสามารถของวัสดุในการรับแรงดึงก่อนเกิดการแตกหัก ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นแรงดึงและอุณหภูมิการเผาที่สัดส่วนการผสมต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 4.2 พบว่าจะแสดงพฤติกรรมไปในทิศทางเดียวกับความเค้นคราก คือที่สัดส่วนการผสมร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ความเค้นแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการเผาเปลือกหอยที่ใช้เป็นวัสดุเสริมแรงเพิ่มขึ้น และเริ่มคงที่เมื่ออุณหภูมิการเผาอยู่ที่ 700 และ 900 องศาเซลเซียส เมื่อพิจารณาความเค้นแรงดึงของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเปลือกหอยที่สัดส่วนการผสมร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนัก มีค่าสูงค่าสูงขึ้นเมื่อเทียบกับอีพอกซีเรซินบริสุทธิ์และจะลดลงอย่างชัดเจนเมื่อสัดส่วนการผสมเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับความเค้นคราก



รูปที่ 4.2 ผลความเค้นแรงดึงของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเปลือกหอยแมลงภู่ที่สัดส่วนต่าง ๆ

สำหรับค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น ที่แสดงให้เห็นถึงระดับความแข็งแกร่ง (Stiffness) ของวัสดุในช่วงที่ยังมีพฤติกรรมการเสียรูปแบบยืดหยุ่นที่คำนวณได้ด้วยความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุในช่วงที่มีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่น ซึ่งค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นนั้น สามารถบอกได้ว่าวัสดุนั้นมีพฤติกรรมการแตกหักแบบเหนียวหรือแบบเปราะ กรณีที่วัสดุมีพฤติกรรมการแตกหักแบบเหนียวค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นจะต่ำกว่าวัสดุที่มีพฤติกรรมการแตกหักแบบเปราะ จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นและอุณหภูมิการเผาที่สัดส่วนการผสมต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 4.3 พบว่าค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเปลือกหอยแมลงภู่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อสัดส่วนการผสมเปลือกหอยมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบระหว่างวัสดุผสมและอีพอกซีเรซินบริสุทธิ์จะเห็นได้ว่า วัสดุผสมมีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นที่เพิ่มสูงขึ้นกว่าอีพอกซีเรซินบริสุทธิ์แสดงถึงการเปลี่ยนไปของพฤติกรรมการแตกหักแบบเหนียวไปเป็นพฤติกรรมการแตกหักแบบเปราะเมื่อนำวัสดุอีพอกซีเรซินไปเสริมแรงด้วยเปลือกหอย



รูปที่ 4.3 ผลโมดูลัสความยืดหยุ่นของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเปลือกหอยแมลงภูที่สัดส่วนต่าง ๆ

ในการเตรียมชิ้นทดสอบแรงดึง เพื่อยืนยันว่าไม่ว่าจะตัดขึ้นทดสอบจากตำแหน่ง (Position) ไตของแม่พิมพ์จะไม่ส่งผลกระทบต่อสมบัติการรับแรงดึงของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเปลือกหอยแมลงภู จึงทำการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance, ANOVA) ผลของการทดสอบแรงดึง ได้แก่ ความเค้นคราก ความเค้นแรงดึงและค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น โดยใช้ระดับนัยสำคัญ (Significance level) เท่ากับ 0.05 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของความเค้นคราก (ตารางที่ 4.1) เมื่อพิจารณาค่า P-value แสดงให้เห็นว่าปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความเค้นคราก ได้แก่ อุณหภูมิการเผาและสัดส่วนการผสมเปลือกหอย และตำแหน่งที่ตัดขึ้นทดสอบไม่ส่งผลกระทบต่อความเค้นครากอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนของผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของความเค้นแรงดึง (ตารางที่ 4.2) และค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น (ตารางที่ 4.3) พบว่าให้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับผลความแปรปรวนของความเค้นครากคือตำแหน่งที่ตัดขึ้นทดสอบไม่ส่งผลต่อค่าทั้งสองอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนความเค้นครากของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเปลือกหอยแมลงภู

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Temperature (°C)	2	60.125	30.062	11.88	0.000
Mixing ratio (%wt.)	2	325.590	162.795	64.32	0.000
Position	4	7.721	1.930	0.76	0.556
Error	36	91.111	2.531		
Total	44	484.547			

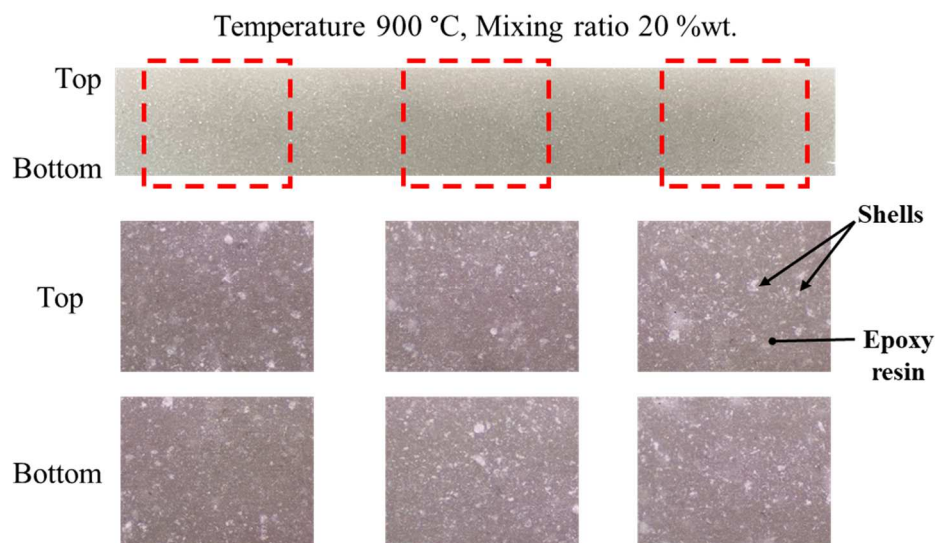
ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนความเค้นแรงดึงของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเปลือก
หอยแมลงภู่

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Temperature (°C)	2	167.01	83.506	11.88	0.000
Mixing ratio (%wt.)	2	904.42	452.208	64.32	0.000
Position	4	21.45	5.362	0.76	0.556
Error	36	253.09	7.030		
Total	44	1345.95			

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนโมดูลัสความยืดหยุ่นของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วย
เปลือกหอยแมลงภู่

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Temperature (°C)	2	111304	55652	24.42	0.000
Mixing ratio (%wt.)	2	229683	114841	50.40	0.000
Position	4	3489	872	0.38	0.819
Error	36	82027	2279		
Total	44	426503			

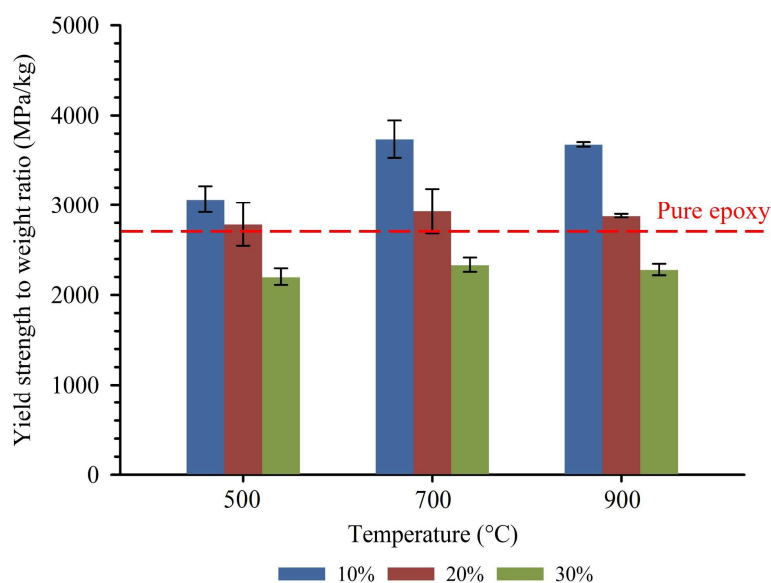
ขั้นตอนการเตรียมชิ้นทดสอบอีกหนึ่งปัจจัยที่ต้องคำนึงถึงคือการกระจายตัวของเปลือกหอยแมลงภู่ในการผสมกับอีพอกซีเรซินเพื่อเสริมแรง ซึ่งหากวัสดุเสริมแรงกระจายตัวไม่สม่ำเสมออาจส่งผลให้สมบัติของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเปลือกหอยแมลงภู่ไม่เท่ากันในแต่ละตำแหน่งในแม่พิมพ์ ดังนั้นเพื่อตรวจสอบการกระจายตัวของผงเปลือกหอยว่ามีการกระจายตัวสม่ำเสมอและทั่วทั้งแม่พิมพ์ ชิ้นทดสอบจะถูกนำไปถ่ายภาพตัดขวางในแนวความหนาของแม่พิมพ์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอแสดงดังรูปที่ 4.4



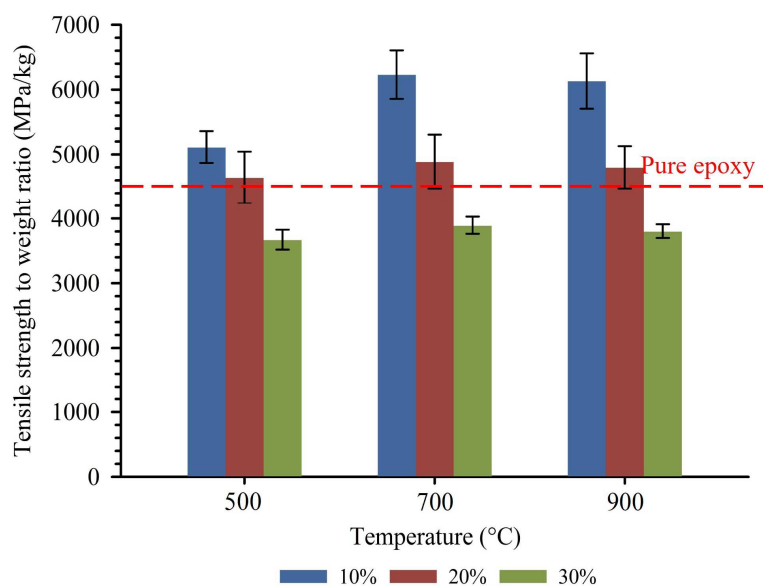
รูปที่ 4.4 ภาพถ่ายการกระจายตัวของเปลือกหอยในอีพอกซีเรซินด้วยกล้องจุลทรรศน์สเตอริโอ

ภาพถ่ายการกระจายตัวของเปลือกหอยแสดงให้เห็นการกระจายตัวที่ค่อนข้างสม่ำเสมอ เมื่อพิจารณาในแต่ละส่วนของแม่พิมพ์พบว่าปริมาณของเปลือกหอยที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งจากการที่บริเวณส่วนบนและส่วนล่างของแม่พิมพ์มีปริมาณของเปลือกหอยที่ใกล้เคียงกันแสดงให้เห็นว่าในขั้นตอนการเตรียมขึ้นทดสอบไม่ได้เกิดการตกตะกอนของเปลือกหอยในวัสดุผสม จึงสามารถสรุปได้ว่าการเตรียมอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเปลือกหอยแมลงภู่ที่มีสมบัติของวัสดุที่ใกล้เคียงกันทั่วทั้งชิ้น ผลการทดสอบแรงดึงของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเปลือกหอยแมลงภู่ที่สัดส่วนการผสมต่าง ๆ แสดงให้เห็นถึงผลกระทบเมื่อเสริมแรงด้วยเปลือกหอย ความเค้นครากและความเค้นแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นที่สัดส่วนผสมร้อยละ 10 โดยน้ำหนักเมื่อเทียบกับอีพอกซีเรซินบริสุทธิ์ เมื่อสัดส่วนการผสมสูงขึ้นความเค้นครากและความเค้นแรงดึงมีแนวโน้มลดลง และที่สัดส่วนการผสมร้อยละ 30 โดยน้ำหนักมีค่าลดลงอย่างชัดเจนเทียบกับอีพอกซีเรซินบริสุทธิ์ ในส่วนผลโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุผสมที่เงื่อนไขการผสมต่าง ๆ นั้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับอีพอกซีเรซินบริสุทธิ์ อย่างไรก็ตาม การเสริมแรงด้วยเปลือกหอยในอีพอกซีเรซินส่งผลให้ความหนาแน่นของวัสดุเปลี่ยนไป โดยอีพอกซีเรซินหลังการเสริมแรงด้วยเปลือกหอยที่สัดส่วนการผสมร้อยละ 10, 20, และ 30 โดยน้ำหนักจะมีความหนาแน่นเท่ากับ 1.165, 1.237 และ 1.316 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรตามลำดับ ซึ่งความหนาแน่นทั้งหมดนั้นมากกว่าความหนาแน่นอีพอกซีเรซินบริสุทธิ์ที่มีความหนาแน่นเท่ากับ 1.152 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร เนื่องจากความหนาแน่นของวัสดุที่แตกต่างกันอาจไม่สามารถอธิบายพฤติกรรมของวัสดุได้อย่างชัดเจน ดังนั้นเพื่ออธิบายพฤติกรรมของวัสดุได้อย่างชัดเจนยิ่งขึ้น สมบัติของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเปลือกหอยแมลงภู่ภายใต้การรับแรงดึงจะถูกพิจารณาในรูปแบบมาตราส่วนความเค้นต่อน้ำหนัก (Strength to weight ratio) แสดงดังรูปที่ 4.5 ถึงรูปที่ 4.7 ความ

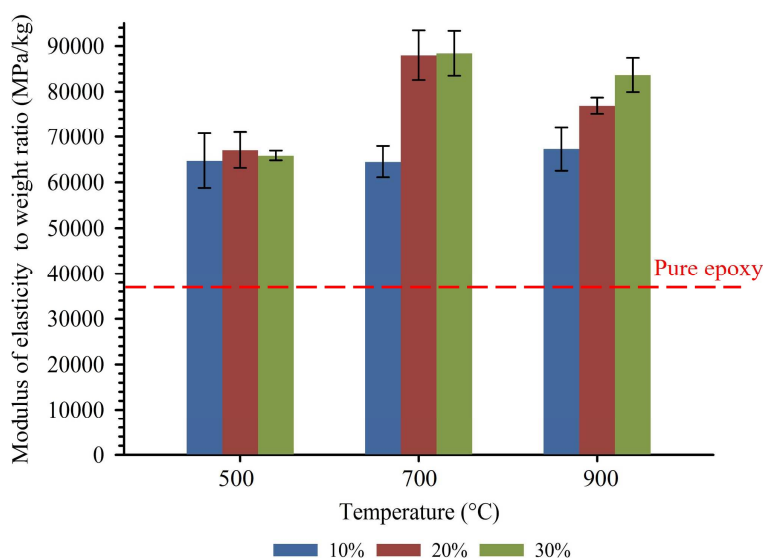
เค้นครากต่อน้ำหนักของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเปลือกหอยแมลงภู่แสดงดังรูปที่ 4.5 โดยความเค้นครากต่อน้ำหนักมีแนวโน้มลดลงเมื่อสัดส่วนการผสมเพิ่มขึ้น ที่สัดส่วนการผสมร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ความเค้นครากต่อน้ำหนักมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการเผาเปลือกหอยที่ใช้เป็นวัสดุเสริมแรงเพิ่มขึ้น และเริ่มคงที่เมื่ออุณหภูมิการเผาอยู่ที่ 700 และ 900 องศาเซลเซียส และความเค้นครากต่อน้ำหนักที่สัดส่วนการผสมร้อยละ 20 และ 30 โดยน้ำหนักในทุกช่วงอุณหภูมิการเผามีค่าใกล้เคียงกัน จะเห็นได้ว่าผลกระทบของสัดส่วนการผสมและอุณหภูมิการเผาต่อความเค้นครากต่อน้ำหนักยังคงพบพฤติกรรมเช่นเดียวกับสมบัติการรับแรงดึงที่คำนึงถึงความสามารถในการรับภาระเพียงอย่างเดียว (รูปที่ 4.1) สำหรับความเค้นแรงดึงต่อน้ำหนักและโมดูลัสความยืดหยุ่นต่อน้ำหนักของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเปลือกหอยแมลงภู่ดังรูปที่ 4.6 และรูปที่ 4.7 ตามลำดับ ยังคงพบพฤติกรรมเช่นเดียวกับสมบัติการรับแรงดึงที่คำนึงถึงความสามารถในการรับภาระเช่นเดียวกับความเค้นคราก



รูปที่ 4.5 ผลความเค้นครากต่อน้ำหนักของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเปลือกหอยแมลงภู่



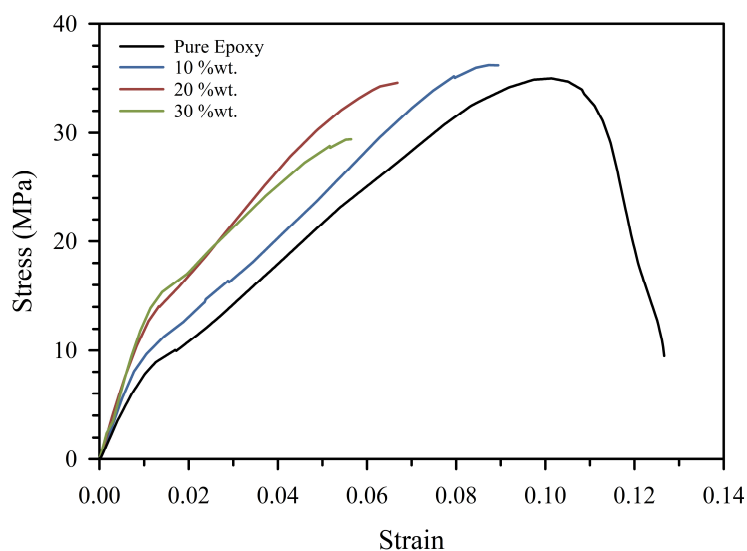
รูปที่ 4.6 ผลความเค้นแรงดึงต่อน้ำหนักของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเปลือกหอยแมลงภู



รูปที่ 4.7 ผลโมดูลัสความยืดหยุ่นต่อน้ำหนักของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเปลือกหอยแมลงภู

การวิเคราะห์พฤติกรรมทางกลของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเปลือกหอยแมลงภู จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด (Stress-strain curve) ของวัสดุอีพอกซีเรซินทั้งในรูปแบบบริสุทธิ์ และในรูปแบบที่เสริมแรงด้วยเปลือกหอยแมลงภูในสัดส่วนร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก โดยนำเสนอที่อุณหภูมิการเผาที่ 500 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 4.8 พบว่าการเสริมแรงมีผลโดยตรงต่อสมบัติทางกลของวัสดุ โดยเฉพาะในด้านความแข็งแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength) และค่าการยืดตัวก่อนการแตกหัก (Elongation at break) วัสดุอีพอก

ซีเรซินบริสุทธิ์แสดงพฤติกรรมแบบเหนียว (Ductile) ซึ่งเป็นลักษณะทั่วไปของเทอร์โมเซตติงพอลิเมอร์ที่สามารถดูดซับพลังงานได้สูงก่อนเกิดการแตกหัก [61] โดยมีค่าความเค้นสูงสุดอยู่ในช่วงประมาณ 33-34 MPa และสามารถยืดตัวได้มากก่อนการแตกหัก (Strain ประมาณ 0.13) อย่างไรก็ตาม เมื่อนำเปลือกหอยแมลงภู่มารเสริมแรงในสัดส่วนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก พบว่าความเค้นเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน (ประมาณ 36-37 MPa) เมื่อเพิ่มสัดส่วนการผสมเปลือกหอยแมลงภู่มารเสริมแรงเป็นร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก พบว่าการทดสอบให้ค่าความเค้นสูงสุดสูงที่สุดในทุกสัดส่วนการผสม (ประมาณ 38 MPa) และยังรักษาค่าการยืดตัวของวัสดุไว้ได้ ซึ่งอาจตีความได้ว่าการกระจายตัวของอนุภาคที่ใช้ในการเสริมแรงอยู่ในระดับที่เหมาะสมต่อการถ่ายเทความเค้นระหว่างเฟส โดยไม่ทำให้โครงสร้างเกิดจุดอ่อนภายใน (Interfacial defects) ซึ่งสนับสนุนทฤษฎีของการเสริมแรงด้วยอนุภาคนาโนขนาดเล็กที่กล่าวว่า การเสริมแรงแบบอนุภาคในวัสดุผสมจะได้ผลดีหากมีการกระจายตัวกับพอลิเมอร์อย่างเหมาะสม โดยกระบวนการที่ตัวเสริมแรงทำหน้าที่เป็นสะพาน (Bridging) ยึดหรือเชื่อมระหว่างกัน ช่วยสร้างโครงสร้างที่แข็งแรงภายในวัสดุ ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการเสริมแรงของวัสดุผสม [62] อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มสัดส่วนของเปลือกหอยแมลงภู่มารเป็นร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก แม้ว่าค่าความเค้นจะอยู่ในระดับที่สูง (ประมาณ 33-34 MPa) แต่ค่าการยืดตัวลดลงอย่างชัดเจน (Strain ประมาณ 0.08-0.09) ซึ่งแสดงถึงพฤติกรรมของวัสดุที่เปราะมากขึ้น สะท้อนถึงข้อจำกัดของการเสริมแรงในปริมาณที่สูงเกินไป ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดการรวมตัวของอนุภาค (Agglomeration) และเกิดจุดอ่อนในระดับจุลภาค ส่งผลให้วัสดุสูญเสียสมบัติในการดูดซับพลังงานก่อนเกิดการแตกหัก [63]



รูปที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเปลือกหอยแมลงภู่มารที่อุณหภูมิการเผา 500 °C

เมื่อพิจารณาจากลักษณะกราฟความเค้นและความเครียดพบว่า อีพอกซีเรซินบริสุทธิ์ (Pure epoxy) แสดงลักษณะโค้งต่อเนื่องและมีค่าความเครียดที่จุดแตกหัก (Strain at break) ค่อนข้างสูง ซึ่งสะท้อนว่าวัสดุดังกล่าวสามารถยืดตัวได้มากก่อนเกิดการแตกหัก แสดงถึงความสามารถในการดูดซับพลังงานสูงเกิดการแตกหัก ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของวัสดุที่มีพฤติกรรมแบบเหนียว (Ductile behavior) [15] ในทางตรงกันข้าม วัสดุที่เสริมแรงด้วยเปลือกหอยแมลงภู่แสดงพฤติกรรมที่ชัดเจนของวัสดุแบบเปราะ (Brittle behavior) ซึ่งสามารถสังเกตได้จากกราฟที่มีความชันสูงในช่วงต้น (บ่งชี้ถึงค่าโมดูลัสที่สูงขึ้น) และมีจุดแตกหักที่เกิดขึ้นอย่างเฉียบพลันโดยไม่มีช่วงการยืดตัว กล่าวคือ วัสดุรับภาระได้สูงขึ้นแต่เกิดการแตกหักทันทีเมื่อถึงจุดวิกฤตของความเค้น โดยไม่แสดงการยืดตัวหรือเปลี่ยนรูปถาวร ซึ่งเป็นคุณสมบัติโดยทั่วไปของวัสดุเปราะ พฤติกรรมเปราะที่เพิ่มขึ้นนี้สามารถอธิบายได้จากการที่เปลือกหอยทำให้โครงสร้างภายในวัสดุแข็งและต้านทานการเสียรูปได้ดีขึ้น แต่ในขณะเดียวกันก็ลดความสามารถของวัสดุในการดูดซับพลังงานก่อนการแตกหักลง โดยเฉพาะเมื่ออัตราส่วนผสมสูงเกินระดับที่เหมาะสมอาจส่งผลให้เกิดจุดรวมความเค้น (Stress concentration) ซึ่งนำไปสู่การแตกหักก่อนเวลาอันควร [64]

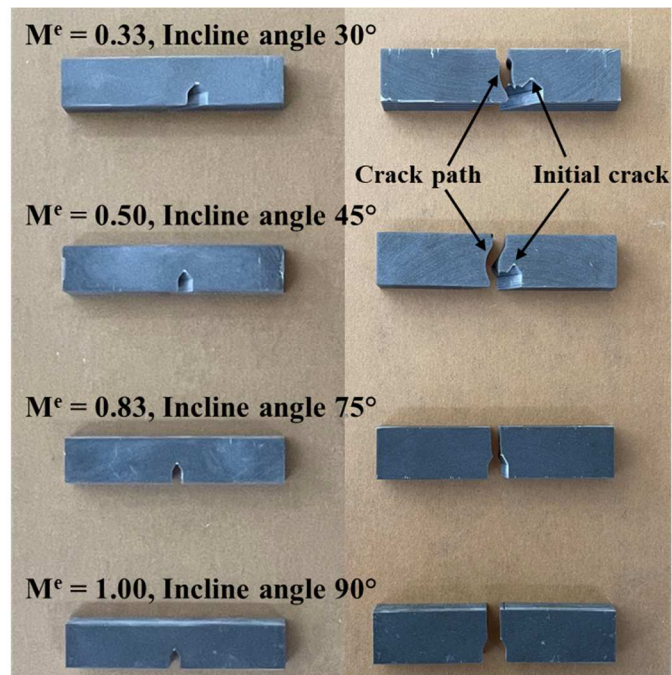
ผลการทดสอบอีพอกซีเรซินที่เสริมแรงด้วยเปลือกหอยในสัดส่วนร้อยละ 10 โดยน้ำหนักแสดงค่าความเค้นสูงสุดและค่าความเครียดก่อนการแตกหักสูงที่สุดในกลุ่มวัสดุผสมที่ทำการศึกษา ซึ่งแสดงถึงความแข็งแรงเชิงกล (Strength) ที่ดี อย่างไรก็ตาม แม้ว่าการเสริมแรงที่สัดส่วนร้อยละ 10 โดยน้ำหนักจะแสดงค่าแรงดึงสูง แต่กลับมีค่าความต้านทานการแตกหัก (Fracture toughness) ต่ำที่สุดในกลุ่มวัสดุเสริมแรงที่สัดส่วนการผสมอื่น ๆ (ซึ่งผลความต้านทานการแตกหักจะกล่าวถึงในหัวข้อ 4.1.2) ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่ารอยร้าวที่เกิดขึ้นภายในวัสดุสามารถขยายตัวได้อย่างรวดเร็ว พฤติกรรมดังกล่าวสามารถอธิบายได้โดยอาศัยทฤษฎีของ Griffith (1997) ซึ่งเสนอว่ารอยร้าวจะสามารถขยายตัวได้ก็ต่อเมื่อพลังงานที่ปลดปล่อยจากระบบในขณะเกิดรอยร้าว (G) มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับพลังงานที่ใช้ในการสร้างพื้นผิวรอยร้าวใหม่ (2γ) วัสดุที่มีความสามารถในการดูดซับพลังงานได้น้อยจะมีแนวโน้มที่รอยร้าวจะขยายตัวได้ง่ายขึ้น [65] อันเป็นลักษณะของวัสดุที่มีค่าความต้านทานการแตกหักต่ำ ในทางกลับกัน วัสดุที่เสริมแรงด้วยเปลือกหอยในสัดส่วนร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก แม้จะแสดงค่าแรงดึงต่ำลง แต่กลับให้ค่าความต้านทานการแตกหักที่สูงขึ้นอย่างชัดเจน ซึ่งสามารถอธิบายได้จากกลไกการต้านรอยร้าวที่เกิดจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณอนุภาคเสริมแรง โดยเฉพาะกลไกในระดับจุลภาค เช่น การเบี่ยงเบนรอยร้าว (Crack deflection), การเชื่อมรอยร้าวโดยอนุภาค (Particle bridging) และการหน่วงรอยร้าว (Crack pinning) ซึ่งล้วนช่วยในการกระจายและหน่วงการเคลื่อนที่ของรอยร้าว [66] ส่งผลให้วัสดุสามารถดูดซับพลังงานได้มากขึ้นก่อนเกิดการแตกหัก ซึ่งกลไกเหล่านี้ล้วนช่วยชะลอการขยายตัวของรอยร้าวและเพิ่มพลังงานที่วัสดุต้องใช้ในเปิดรอยร้าว โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกลุ่มที่เสริมแรงด้วยเปลือกหอยร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ที่มีปริมาณอนุภาคเพียงพอในการกระจายตัวอย่างมีประสิทธิภาพและสร้างแรงยึดเหนี่ยวที่เหมาะสมระหว่างอนุภาคเปลือกหอยกับอีพอกซีเรซิน ดังนั้น ความแตกต่างระหว่างค่าความแข็งแรงเชิงกลและความ

ด้านทานการแตกหักของวัสดุในแต่ละกลุ่มจึงสามารถอธิบายได้จากการความสามารถในการรับแรงของวัสดุบริสุทธิ์ กับประสิทธิภาพของกลไกการหน่วงรอยร้าวที่เกิดจากอนุภาคเสริมแรงในระดับจุลภาค ซึ่งเป็นลักษณะทั่วไปที่พบในวัสดุเสริมแรงตามแนวคิดของ Hull และ Clyne (1996) โดยแสดงให้เห็นว่า วัสดุที่มีอนุภาคเสริมแรงในปริมาณที่เหมาะสมอาจไม่ได้ให้ค่าความแข็งแรงสูงสุด แต่สามารถเพิ่มความสามารถในการต้านทานการแตกร้าได้ดีกว่า [67]

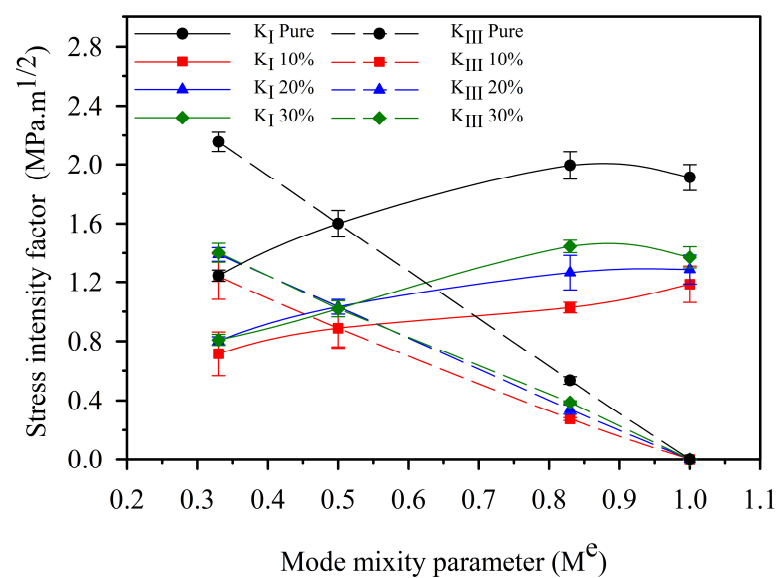
4.1.2 ผลการทดสอบความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบผสม 1 และ 3

ความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบผสม 1 และ 3 ของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเปลือกหอยแมลงภู่จะแยกพิจารณาตามรูปแบบของภาระที่กระทำกับแนวรอยร้าวเป็นความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระรูปแบบที่ 1 หรือ K_I และความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระรูปแบบที่ 3 หรือ K_{III} ซึ่งภาระที่กระทำกับรอยร้าวในรูปแบบผสมระหว่างภาระรูปแบบ 1 ที่กระทำในทิศทางการเปิดรอยร้าว (Opening mode) และภาระรูปแบบ 3 ที่กระทำในลักษณะการฉีก (Tearing mode) หรือรูปแบบการเฉือนนอกระนาบรอยร้าว (Out-of-plane shear mode) สำหรับขึ้นทดสอบความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบผสมของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเปลือกหอยแมลงภู่ที่ก่อนการทดสอบแล้วและหลังการทดสอบจะแสดงไว้ดังรูปที่ 4.9 ขึ้นทดสอบหลังจากผ่านการทดสอบมีลักษณะการแตกหักขึ้นกับสัดส่วนการรับรูปแบบของภาระแสดงได้ด้วยค่าพารามิเตอร์การรับภาระแบบผสม หรือ M^e ซึ่งค่า M^e เท่ากับ 1 ลักษณะการรับภาระแบบเปิด (รูปแบบที่ 1) คือรอยร้าวจะมีการขยายตัวในแนวเดียวกับรอยร้าวเริ่มต้น เมื่อค่า M^e ลดลงขึ้นทดสอบจะได้รับภาระรูปแบบการเฉือนนอกระนาบรอยร้าว (รูปแบบที่ 3) มากขึ้น ซึ่งส่งผลให้ลักษณะการแตกหักเปลี่ยนจากการขยายตัวในแนวเดียวกับรอยร้าวไปเป็นการขยายตัวแบบทำมุมกับรอยร้าว เริ่มต้นจากผลกระทบของแรงเฉือนซึ่งมุมของการขยายตัวของรอยร้าวเริ่มต้นจะขึ้นอยู่กัสัดส่วนของการรับภาระรูปแบบที่ 3

ความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบผสม 1 และ 3 ของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเปลือกหอยแมลงภู่ที่อุณหภูมิการเผา 500 องศาเซลเซียสในสัดส่วนการผสมต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 4.10 ถึงรูปที่ 4.12 เมื่อพิจารณาความต้านทานการแตกหักในทุกสัดส่วนการผสมเปลือกหอยพบว่าความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบที่ 1 จะเพิ่มขึ้นเมื่อค่า M^e เพิ่มขึ้นตรงกันข้ามกับความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบที่ 3 จะลดลงเมื่อค่า M^e เพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาถึงผลกระทบของสัดส่วนการผสมจะเห็นว่าความต้านทานการแตกหักทั้งภาระแบบที่ 1 และภาระแบบที่ 3 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อสัดส่วนการผสมเปลือกหอยแมลงภู่เพิ่มขึ้น ซึ่งสัดส่วนการผสมเปลือกหอยที่ร้อยละ 30 โดยน้ำหนักมีค่าความต้านทานการแตกหักทั้งรูปแบบที่ 1 และรูปแบบที่ 3 สูงสุด แต่อย่างไรก็ตามวัสดุผสมก็ยังคงมีความต้านทานการแตกหักน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุอีพอกซีเรซินบริสุทธิ์

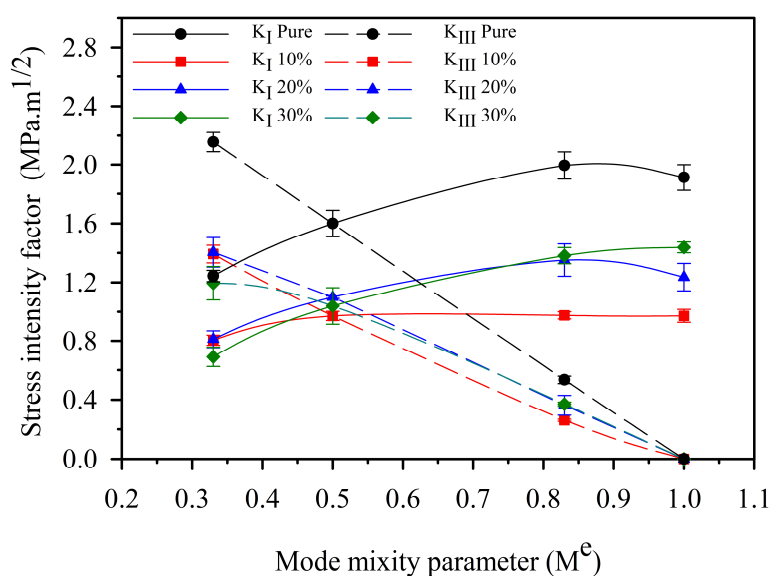


รูปที่ 4.9 ขั้นตอนทดสอบความต้านทานการแตกหักของอีพอกซีเสริมแรงด้วยเปลือกหอยแมลงภู่ที่อุณหภูมิการเผา 700 °C ที่สัดส่วนการผสม 20 %wt.

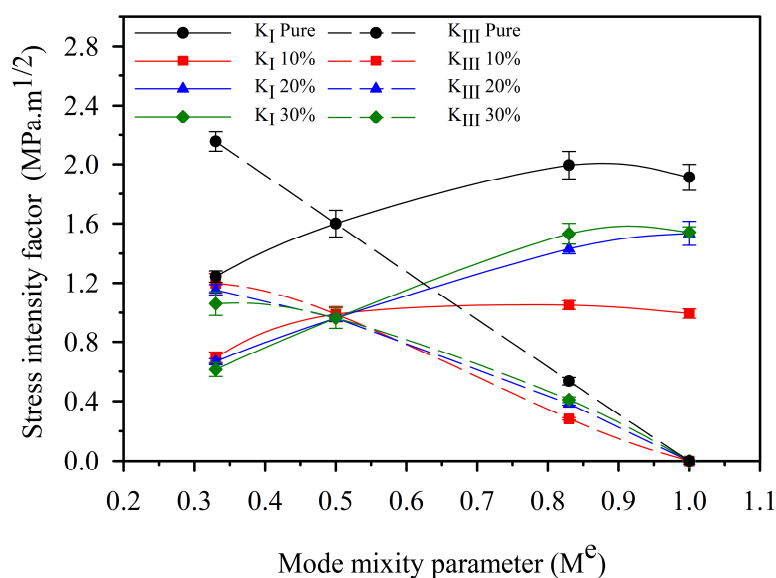


รูปที่ 4.10 ความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบผสม 1 และ 3 ของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเปลือกหอยแมลงภู่ที่อุณหภูมิการเผา 500 องศาเซลเซียส

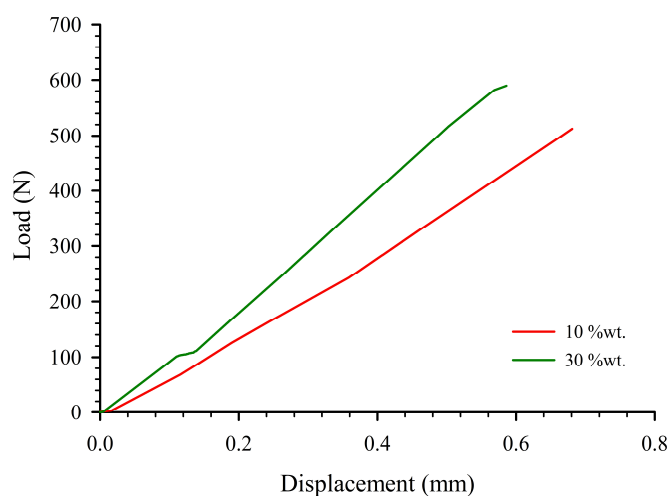
นอกจากนี้อีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเปลือกหอยแมลงภู่ที่อุณหภูมิการเผาอื่น ๆ แสดงดังรูปที่ 4.11 และรูปที่ 4.12 ความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบผสม 1 และ 3 ที่เกิดขึ้นพบว่าที่สัดส่วนการผสมร้อยละ 30 โดยน้ำหนักความต้านทานการแตกหักรูปแบบที่ 1 ยังคงมีความต้านทานการแตกหักสูงที่สุด แต่ในส่วนของความต้านทานการแตกหักรูปแบบที่ 3 พบว่ามีค่าต่ำกว่าสัดส่วนการผสมอื่นเล็กน้อย และวัสดุผสมก็ยังคงมีความต้านทานการแตกหักน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุอีพอกซีเรซินบริสุทธิ์ในทุกอุณหภูมิการเผา ซึ่งการที่วัสดุเสริมแรงสามารถรับภาระที่เกิดจากแรงกระทำภายนอกได้เมื่อพิจารณาจากสมการคำนวณความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบผสม 1 และ 3 ดังสมการที่ (15) และ (16) บอกได้ว่าความต้านทานการแตกหักของวัสดุขึ้นกับภาระสูงสุดที่วัสดุรับได้ก่อนเกิดการแตกหัก ดังนั้นเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างภาระและระยะยึดตัวของชิ้นทดสอบความต้านทานการแตกหัก (รูปที่ 4.13) ที่ค่า M^e เท่ากับ 0.5 ระหว่างสัดส่วนการผสมเปลือกหอยร้อยละ 10 โดยน้ำหนักเทียบกับร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก (พบว่าภาระที่เกิดกับชิ้นทดสอบที่มีสัดส่วนการผสมร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก มีค่ามากกว่าภาระที่เกิดกับชิ้นทดสอบที่มีสัดส่วนการผสมร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ซึ่งตรงกันข้ามกับระยะยึดที่สัดส่วนการผสมร้อยละ 10 โดยน้ำหนักจะมีค่ามากกว่าสัดส่วนการผสมร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ดังนั้นเมื่อนำภาระจากการทดสอบไปคำนวณความต้านทานการแตกหักจึงทำให้ค่าความต้านทานการแตกหักของชิ้นทดสอบที่มีสัดส่วนการผสมร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก มีค่ามากกว่าชิ้นทดสอบที่มีสัดส่วนการผสมร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.11 ความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบผสม 1 และ 3 ของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเปลือกหอยแมลงภู่ที่อุณหภูมิการเผา 700 องศาเซลเซียส



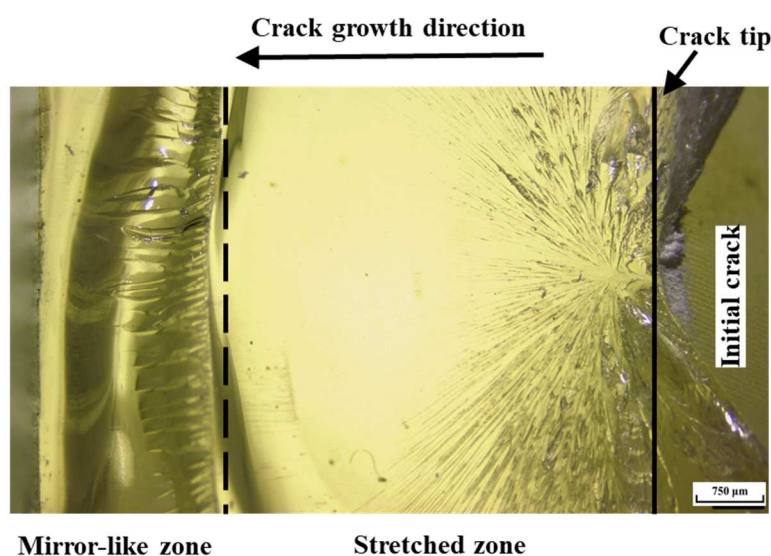
รูปที่ 4.12 ความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบผสม 1 และ 3 ของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเปลือกหอยแมลงภูที่อุณหภูมิการเผา 900 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างภาระและระยะยืดของชิ้นทดสอบความต้านทานการแตกหักที่อุณหภูมิการเผาเปลือกหอยแมลงภู 700 องศาเซลเซียสและค่า M^e เท่ากับ 0.50

พื้นผิวการแตกหักของชิ้นทดสอบความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบผสม 1 และ 3 ($M^e = 0.50$) ของอีพอกซีบริสุทธิ์ที่พื้นผิวแบ่งออกเป็นบริเวณต่าง ๆ ดังรูปที่ 4.14 ได้แก่ บริเวณรอยร้าวเริ่มและบริเวณปลายรอยร้าวจากขั้นตอนการเตรียมชิ้นทดสอบ และบริเวณพื้นผิวการแตกหัก ซึ่งเป็นผลจากการขยายตัวของรอยร้าวเมื่อชิ้นทดสอบได้รับแรงกระทำ พื้นผิวการแตกหักของอีพอกซีบริสุทธิ์เมื่อได้รับภาระกระทำกับรอยร้าวจนเกิดการขยายตัว พฤติกรรมการขยายตัวของรอย

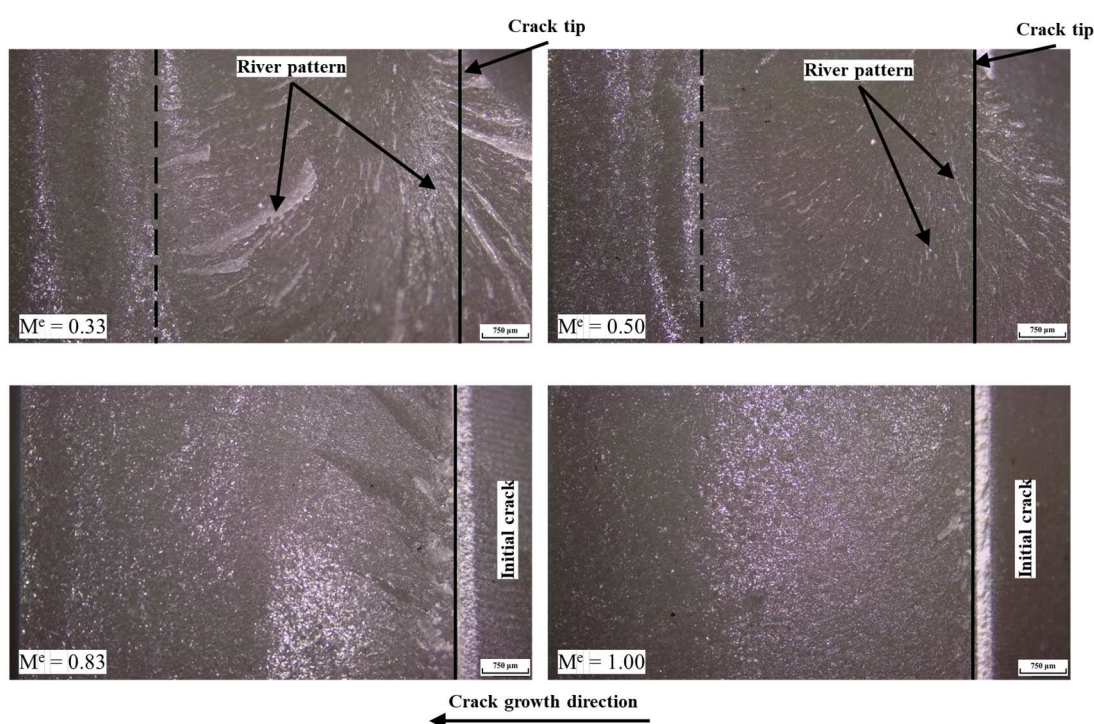
ร้าวจะเริ่มแผ่ขยายไปซ้าย ในช่วงเริ่มต้นการขยายตัวของรอยร้าวจะเป็นไปอย่างคงที่ เมื่อขึ้นทดสอบได้ รับภาระต่อเนื่องเป็นระยะเวลาหนึ่ง บริเวณใกล้แนวรอยร้าวจะเริ่มแสดงพฤติกรรมการเสียรูปใน ลักษณะยืดตัว (Stretched zone) โดยบริเวณนี้แสดงลักษณะการแตกหักที่มีความเหนียว ภายหลังจากนั้น เมื่อความสามารถในการรับภาระของวัสดุลดลงจะเกิดการแตกหักแบบฉับพลัน ซึ่งจะเห็นได้จากพื้นผิวรอยแตกบริเวณถัดไปที่มีลักษณะเรียบและมันวาวคล้ายกระจก (Mirror-like zone) ขณะที่ การแตกหักของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเปลือกหอยแมลงภู่นั้นลักษณะพื้นผิวรอยร้าวจะไม่สามารถ แบ่งออกเป็นบริเวณได้อย่างชัดเจนเหมือนอีพอกซีเรซินบริสุทธิ์ ซึ่งเกิดจากบริเวณที่เป็นอีพอกซีเรซิน และบริเวณที่เป็นเปลือกหอยมีความสามารถในการรับภาระได้แตกต่างกันและยังมีการเสียรูปก่อน เกิดการแตกหักที่ต่างกันทำให้พื้นผิวการแตกหัก จึงไม่สามารถแยกเป็นบริเวณต่าง ๆ ได้แบบอีพอกซี บริสุทธิ์



รูปที่ 4.14 พื้นผิวการแตกหักของอีพอกซีเรซินบริสุทธิ์ที่ $M^e = 0.50$

การศึกษาลักษณะพื้นผิวการแตกหักของขึ้นทดสอบความต้านทานการแตกหัก ภายใต้ภาระแบบผสม 1 และ 3 ของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเปลือกหอยแมลงภู่นำด้วยอุณหภูมิการ เเผาเปลือกหอยแมลงภู่นำ 700 องศาเซลเซียส ที่ระดับการรับภาระแบบผสมต่างกัน ได้แก่ $M^e = 0.33$, 0.50 , 0.83 และ 1.00 (รูปที่ 4.15) แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงเชิงคุณลักษณะของพื้นผิวรอย แตกอย่างมีนัยสำคัญ สามารถสังเกตทิศทางการขยายตัวของรอยร้าว (Crack propagation direction) ลักษณะเป็นเส้นโค้งเว้าไหลไปรวมกันคล้ายลวดลายแม่น้ำ (River Pattern) ซึ่งสามารถ พบได้เด่นชัดในบริเวณที่มืองค์ประกอบของการรับภาระแบบเฉือน (Shear) ร่วมกับการรับภาระแบบ เปิดรอยร้าว (Opening mode) ในกรณีที่ M^e มีค่าเท่ากับ 0.33 และ 0.50 ซึ่งเป็นช่วงที่ขึ้นทดสอบอยู่

ภายใต้อิทธิพลของแรงเฉือนที่สูง พบว่ามีลวดลายแม่น้ำปรากฏอย่างชัดเจน โดยลวดลายมีลักษณะไหลไปบรรจบกันที่ปลายรอยร้าว (Crack tip) เมื่อระดับ M^c เพิ่มขึ้นเป็น 0.83 ลวดลายดังกล่าวเริ่มจางลง และมีทิศทางที่ไม่ชัดเจน สะท้อนให้เห็นถึงการลดลงของอิทธิพลของภาระแบบเฉือน และการรับภาระเปิดรอยร้าว (รูปแบบที่ 1) เริ่มมากขึ้นจนกระทั่ง M^c มีค่าเท่ากับ 1.00 ซึ่งขึ้นทดสอบได้รับภาระรูปแบบที่ 1 ล้วน ไม่มีลักษณะลวดลายแม่น้ำปรากฏและพื้นผิวจะมีลักษณะเรียบและมันวาวคล้ายกระจกซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของการแตกหักภายใต้แรงเปิดรอยร้าวแต่มีลักษณะไม่ชัดเจนเมื่อเทียบกับอีพอกซีเรซินบริสุทธิ์



รูปที่ 4.15 พื้นผิวการแตกหักของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเปลือกหอยแมลงภู่ที่ M^c ต่าง ๆ

งานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) เพื่อประเมินผลกระทบของปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมกรรมการแตกหักของวัสดุ ได้แก่ อุณหภูมิการเผาเปลือกหอย (Temperature), สัดส่วนการผสม (Mixing ratio), มุมรอยร้าว (Crack angle) รวมถึงปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่าง ๆ ต่อความต้านทานการแตกหักรูปแบบที่ 1 (K_I) และความต้านทานการแตกหักรูปแบบที่ 3 (K_{III}) โดยใช้ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของความต้านทานการแตกหักรูปแบบที่ 1 ของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเปลือกหอยแมลงภู่แสดงดังตารางที่ 4.4 เมื่อพิจารณาในระดับของปัจจัยหลัก (Main Effects) พบว่าสัดส่วนการผสมและมุมรอยร้าวมีผลกระทบต่อค่าความต้านทานการแตกหักอย่างชัดเจน โดยมีค่า P-value เท่ากับ 0.000 ทั้งสอง

ปัจจัย ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนเปลือกหอยที่ใช้การเสริมแรง และมุมของรอยร้าวในชั้นทดสอบมีผลโดยตรงต่อค่าความต้านทานการแตกหักรูปแบบที่ 1 ส่วนปัจจัยอุณหภูมิไม่มีผลกระทบที่มีนัยสำคัญทางสถิติโดยมีค่า P-value เท่ากับ 0.685 แสดงให้เห็นว่าช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาเปลือกหอยไม่ได้ส่งผลกระทบโดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานการแตกหักรูปแบบที่ 1 ในส่วนของปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองปัจจัย (2-Way Interactions) พบว่าปฏิสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับมุมรอยร้าว และระหว่างสัดส่วนการผสมกับมุมรอยร้าวมีผลกระทบต่อความต้านทานการแตกหักรูปแบบที่ 1 อย่างมีนัยสำคัญ โดยมีค่า P-value เท่ากับ 0.000 สะท้อนให้เห็นว่าแม้ปัจจัยอุณหภูมิจะไม่มีผลโดยตรงในเชิงเดียว แต่เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงร่วมกับมุมรอยร้าวจะส่งผลกระทบต่อความต้านทานการแตกหักรูปแบบที่ 1 ได้อย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ปฏิสัมพันธ์ระดับสามปัจจัย (3-Way Interaction) ระหว่างอุณหภูมิ สัดส่วนการผสม และมุมรอยร้าว ยังมีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยมีค่า P-value เท่ากับ 0.001 จึงจำเป็นต้องพิจารณาผลกระทบทุกปัจจัยร่วมกัน

ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของความต้านทานการแตกหักรูปแบบที่ 1 ของอิพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเปลือกหอยแมลงภู

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	35	7.857	0.225	33.820	0.000
Linear	7	6.537	0.934	140.684	0.000
Temperature	2	0.005	0.003	0.381	0.685
Mixing ratio	2	0.972	0.486	73.194	0.000
Crack angle	3	5.560	1.853	279.212	0.000
2-Way Interactions	16	1.049	0.066	9.872	0.000
Temperature*Mixing ratio	4	0.020	0.005	0.765	0.552
Temperature*Crack angle	6	0.245	0.041	6.168	0.000
Mixing ratio*Crack angle	6	0.783	0.130	19.668	0.000
3-Way Interactions	12	0.279	0.023	3.413	0.001
Temperature*Mixing ratio*Crack angle	12	0.279	0.023	3.413	0.001
Error	72	0.478	0.007		
Total	107	8.335			

สำหรับผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของความต้านทานการแตกหักรูปแบบที่ 3 ของอิพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเปลือกหอยแมลงภู เมื่อพิจารณาในระดับของปัจจัยหลักพบว่า มุมรอยร้าว อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาเปลือกหอย และสัดส่วนการผสมวัสดุเสริมแรงมีผลกระทบต่อค่าความต้านทานการแตกหักรูปแบบที่ 3 อย่างมีนัยสำคัญโดยมีค่า P-Value เท่ากับ 0.000, 0.002 และ

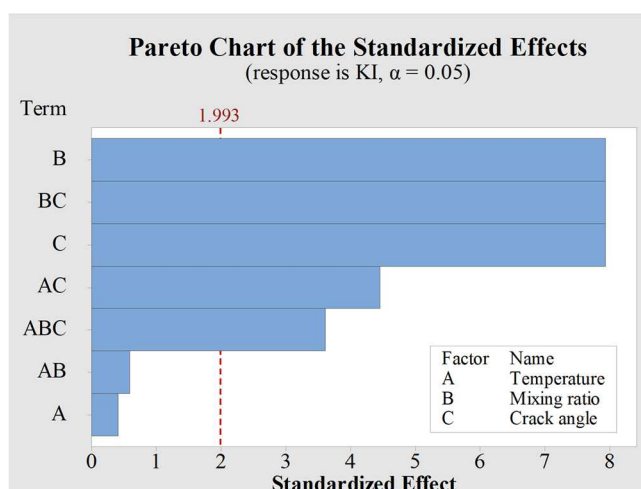
0.008 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าทั้งสามปัจจัยหลักล้วนมีความสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานการแตกหักรูปแบบที่ 3 ในส่วนของการวิเคราะห์การปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองปัจจัยพบว่า การปฏิสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและมมรยร้าวมีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีค่า P-Value เท่ากับ 0.000 เช่นเดียวกับการปฏิสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนการผสมและมมรยร้าว โดยมีค่า P-Value เท่ากับ 0.010 และระหว่างอุณหภูมิกับสัดส่วนการผสม โดยมีค่า P-Value เท่ากับ 0.027 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อนำปัจจัยเหล่านี้มาวิเคราะห์ร่วมกันยังส่งผลกระทบต่อค่าความต้านทานการแตกหักรูปแบบที่ 3 อีกด้วย อย่างไรก็ตามการปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยทั้งสามพร้อมกันระหว่างอุณหภูมิ สัดส่วนการผสม และมมรยร้าว ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ โดยมีค่า P-Value เท่ากับ 0.100

ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของความต้านทานการแตกหักรูปแบบที่ 3 ของ อีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเปลือกหอยแมลงภู

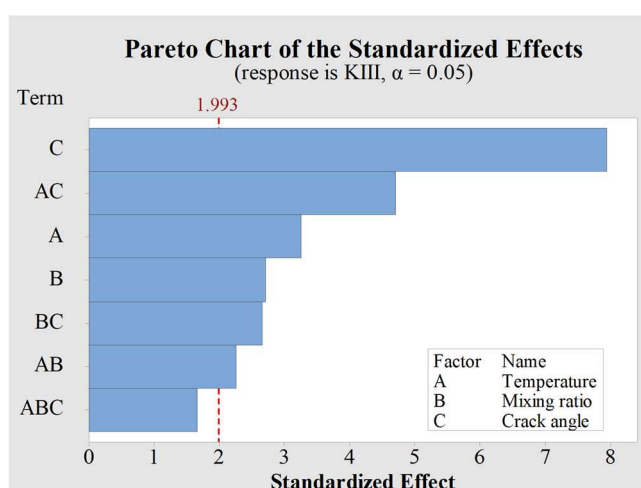
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	35	28.172	0.805	163.302	0.000
Linear	7	27.729	3.961	803.672	0.000
Temperature	2	0.068	0.034	6.935	0.002
Mixing ratio	2	0.050	0.025	5.102	0.008
Crack angle	3	27.610	9.203	1867.210	0.000
2-Way Interactions	16	0.346	0.022	4.388	0.000
Temperature*Mixing ratio	4	0.058	0.014	2.918	0.027
Temperature*Crack angle	6	0.197	0.033	6.677	0.000
Mixing ratio*Crack angle	6	0.091	0.015	3.079	0.010
3-Way Interactions	12	0.097	0.008	1.638	0.100
Temperature*Mixing ratio *Crack angle	12	0.097	0.008	1.638	0.100
Error	72	0.355	0.005		
Total	107	28.526			

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนจากตารางที่ 4.4 และตารางที่ 4.5 พบว่า ปัจจัยหลัก ได้แก่ อุณหภูมิที่ใช้ในการเผา, สัดส่วนการผสม และมมรยร้าวมีผลกระทบต่อค่าความต้านทานการแตกหักอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ผลการวิเคราะห์ดังกล่าวสามารถสนับสนุนด้วยการใช้กราฟพาเรโต (Pareto chart) ซึ่งแสดงลำดับความสำคัญของปัจจัยต่อผลการตอบสนอง โดยเรียงจากผลกระทบมากไปน้อยตามค่าผลกระทบมาตรฐาน (Standardized effect) เส้นประแนวตั้งสีแดงมีค่าเท่ากับ 1.993 (รูปที่ 4.16) เป็นค่าขอบเขตนัยสำคัญทางสถิติ (Critical value) ที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 ซึ่งใช้เป็นเกณฑ์พิจารณาว่าผลของปัจจัยใดมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อพิจารณาผลการตอบสนองของความต้านทานการแตกหักรูปแบบที่ 1 (รูปที่ 4.16(ก)) พบว่าสัดส่วนการผสม (B) และ

มุมรอยร้าว (C) เป็นปัจจัยที่มีค่าผลกระทบมาตรฐานสูงกว่าค่าขอบเขตนัยสำคัญอย่างชัดเจน สอดคล้องกับผล ANOVA ที่แสดงให้เห็นว่าสัดส่วนการผสมและมุมรอยร้าวมีผลอย่างมีนัยสำคัญ (ค่า P-value น้อยกว่า 0.05) นอกจากนี้ปฏิสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนการผสมและมุมรอยร้าว (BC) ยังแสดงผลกระทบสูงในกราฟ พาเรโตเช่นเดียวกับที่แสดงในผล ANOVA สำหรับผลการตอบสนองของความต้านทานการแตกหักรูปแบบที่ 3 (รูปที่ 4.16 (ข)) พบว่ามุมรอยร้าวยังคงเป็นปัจจัยที่มีผลกระทบสูงสุด โดยมีค่าผลกระทบมาตรฐานสูงสุดในปัจจัยทั้งหมด และมีความสอดคล้องกับค่า P-value ที่ต่ำมากจากผล ANOVA แสดงให้เห็นว่ามุมรอยร้าวเป็นตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่อความต้านทานการแตกหักรูปแบบที่ 3 อย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้การมีปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างอุณหภูมิ และมุมรอยร้าว (AC) แสดงถึงผลกระทบรองลงมาเช่นกัน



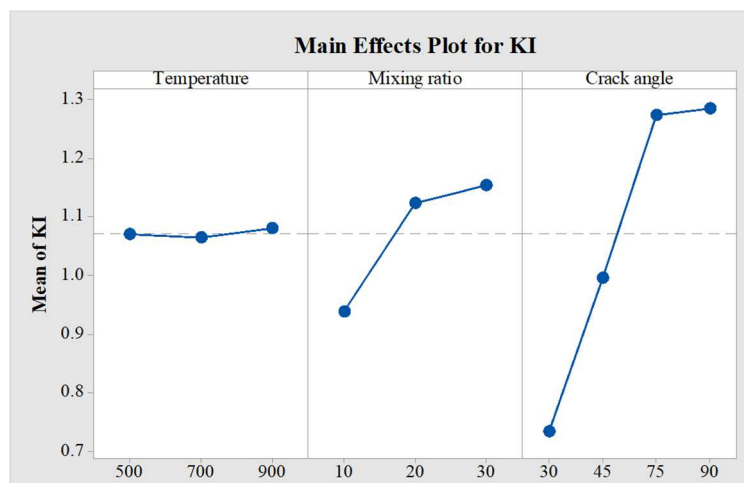
(ก) ความต้านทานการแตกหักรูปแบบที่ 1



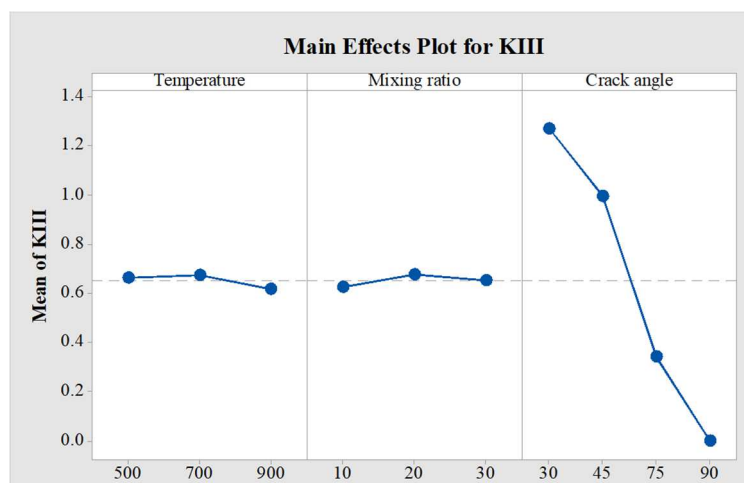
(ข) ความต้านทานการแตกหักรูปแบบที่ 3

รูปที่ 4.16 กราฟพาเรโตของผลกระทบมาตรฐานต่อความต้านทานการแตกหัก

ในการวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีต่อความต้านทานการแตกหักรูปแบบที่ 1 และรูปแบบที่ 3 กราฟพาเรโตของผลกระทบมาตรฐานที่นำเสนอในส่วนก่อนหน้านั้นเป็นเครื่องมือทางสถิติที่ช่วยระบุได้ว่าปัจจัยใดมีผลกระทบต่อค่าความต้านทานการแตกหักอย่างมีนัยสำคัญ โดยวัดจากค่าผลกระทบที่มีนัยสำคัญเชิงสถิติ อย่างไรก็ตาม แม้จะสามารถจัดอันดับความสำคัญของแต่ละปัจจัยหรือปฏิสัมพันธ์ได้ แต่ไม่สามารถแสดงทิศทางของผลกระทบนั้นได้ว่าปัจจัยดังกล่าวส่งผลต่อค่าความต้านทานการแตกหักในลักษณะเชิงบวกหรือเชิงลบ งานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอกราฟผลกระทบของปัจจัยหลัก (Main effects plot) ต่อความต้านทานการแตกหักรูปแบบที่ 1 และรูปแบบที่ 3 (รูปที่ 4.17) เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับของแต่ละปัจจัยกับค่าเฉลี่ยของผลการตอบสนอง (Fitted mean) ซึ่งทำให้สามารถวิเคราะห์ได้ว่าแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงในแต่ละปัจจัยส่งผลต่อค่าความต้านทานการแตกหักในทิศทางใด ซึ่งจากกราฟผลกระทบของปัจจัยหลักต่อความต้านทานการแตกหักรูปแบบที่ 1 (รูปที่ 4.17 (ก)) พบว่าผลกระทบของปัจจัยมุมรอยร้าวมีแนวโน้มเชิงบวก กล่าวคือ เมื่อมุมรอยร้าวเพิ่มขึ้น ค่าความต้านทานการแตกหักรูปแบบที่ 1 เพิ่มขึ้นตามไปด้วย แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มมุมรอยร้าวส่งผลให้ความสามารถในการต้านทานการแตกหักรูปแบบที่ 1 เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ขณะที่ในกรณีของความต้านทานการแตกหักรูปแบบที่ 3 แม้มุมรอยร้าวจะยังเป็นปัจจัยหลักตามกราฟพาเรโตเช่นกัน แต่กราฟผลกระทบของปัจจัยต่อความต้านทานการแตกหักรูปแบบที่ 3 (รูปที่ 4.17(ข)) แสดงให้เห็นผลกระทบของปัจจัยมุมรอยร้าวมีแนวโน้มในเชิงลบอย่างเด่นชัด กล่าวคือ เมื่อมุมรอยร้าวเพิ่มขึ้น ค่าความต้านทานการแตกหักรูปแบบที่ 3 มีแนวโน้มลดลง แสดงให้เห็นว่ามุมรอยร้าวที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความสามารถในการต้านทานการแตกหักรูปแบบที่ 3 ลดลง ปัจจัยอื่น ๆ อย่างสัดส่วนการผสมซึ่งแสดงผลกระทบในระดับที่ค่อนข้างสูงต่อความต้านทานการแตกหักรูปแบบที่ 1 ในกราฟพาเรโต และจากการกราฟผลกระทบของปัจจัยหลักต่อความต้านทานการแตกหักรูปแบบที่ 1 ยังแสดงถึงแนวโน้มของผลกระทบในเชิงบวก ในขณะที่อุณหภูมิการเผาเปลือกหอย ซึ่งกราฟพาเรโตแสดงให้เห็นถึงผลกระทบของปัจจัยต่อความต้านทานการแตกหักที่ต่ำ กราฟผลกระทบของปัจจัยหลักจึงมีลักษณะเส้นกราฟที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงทั้งในเชิงบวกและเชิงลบ แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิการเผาเปลือกหอยไม่ส่งผลกระทบต่อความต้านทานการแตกหักทั้งรูปแบบที่ 1 และรูปแบบที่ 3



(ก) ความต้านทานการแตกหักรูปแบบที่ 1



(ข) ความต้านทานการแตกหักรูปแบบที่ 3

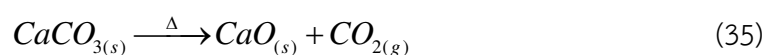
รูปที่ 4.17 กราฟผลกระทบของปัจจัยหลักต่อความต้านทานการแตกหัก

4.2 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกเปลือกหอยแมลงภู

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิการเผาเปลือกหอยแมลงภูต่อความต้านทานการแตกหักภายใต้การระบแบบผสม 1 และ 3 อย่างไรก็ตาม เนื่องจากเปลือกหอยเป็นวัสดุธรรมชาติที่ประกอบด้วยแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) เป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งอยู่ในรูปของโครงสร้างผลึกต่างๆ เช่น แคลไซต์ (Calcite), อราโกไนต์ (Aragonite) และไวเทอไรต์ (Vaterite) โดยโครงสร้างผลึกเหล่านี้มีเสถียรภาพและสมบัติเชิงกลที่แตกต่างกัน และสามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงได้เมื่อได้รับพลังงานความร้อน [68] จึงส่งผลโดยตรงต่อพฤติกรรมทางกลของวัสดุ ดังนั้นการศึกษากการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบทางเคมี ธาตุ สารประกอบ และโครงสร้างผลึกของเปลือกหอยภายหลังจากการเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ จึงมีความสำคัญต่อการประเมินความสอดคล้องระหว่างโครงสร้างระดับ

จุลภาคที่เปลี่ยนแปลงกับสมบัติทางกลที่แสดงออกในระดับมหภาค เพื่อให้ได้วัสดุเสริมแรงที่มีสมบัติเชิงกลเหมาะสมต่อการใช้งานทางวิศวกรรม [69]

การนำเปลือกหอยแมลงภูไปเผาที่ช่วงอุณหภูมิต่าง ๆ เพื่อใช้ในการเสริมแรงอีพอกซีเรซินนั้น กระบวนการนี้จะดำเนินการในเตาเผาที่ควบคุมอุณหภูมิได้ เมื่อแคลเซียมคาร์บอเนตในเปลือกหอยได้รับพลังงานความร้อนสูงมากพอ (ประมาณ 700–900 องศาเซลเซียสขึ้นไป) อาจเกิดกระบวนการสลายตัวทางความร้อน (Thermal decomposition) ส่งผลให้แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) สลายตัวเป็นแคลเซียมออกไซด์ (CaO) และปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ออกมา [70] โดยปฏิกิริยาทางเคมีแสดงในสมการที่ (35)



เมื่อ Δ แทนการให้ความร้อน
 (s) แทนสถานะของแข็ง
 (g) แทนสถานะแก๊ส

โดยผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของเปลือกหอยหลังผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุด้วยการเรืองแสงรังสีเอ็กซ์แบบกระจายพลังงาน (XRF) แสดงดังตารางที่ 4.6

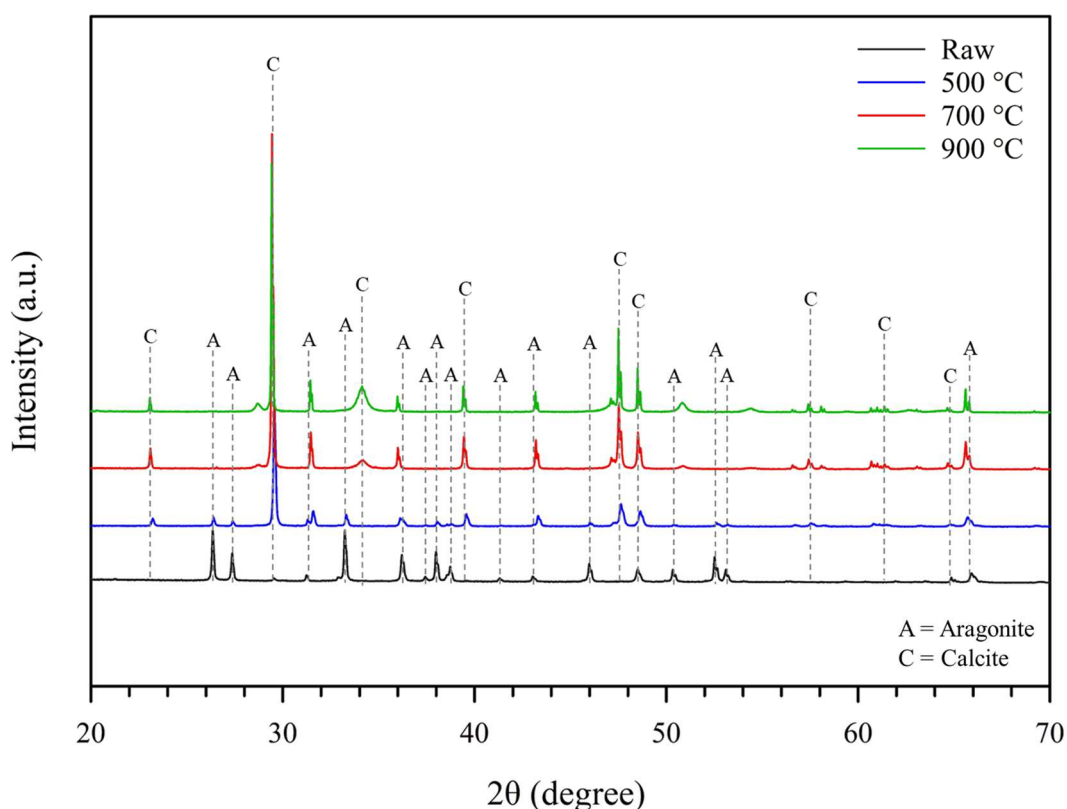
ตารางที่ 4.6 องค์ประกอบทางเคมีของเปลือกหอยแมลงภูที่ผ่านการเผาในอุณหภูมิต่าง ๆ

อุณหภูมิการเผา (°C)	องค์ประกอบ (%)						
	Ca	Fe	Sr	Si	S	Zr	Br
ก่อนการเผา (Raw)	94.05	3.75	1.03	0.70	0.34	0.06	0.07
500	97.53	0.17	1.06	0.76	0.31	0.07	0.10
700	97.70	0.09	0.97	0.77	0.35	0.07	0.06
900	97.96	0.08	0.85	0.55	0.47	0.06	0.04

จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของตัวอย่างเปลือกหอยแมลงภูพบว่า การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในการเผาส่งผลต่อองค์ประกอบทางเคมีของเปลือกหอย โดยเฉพาะธาตุหลักอย่างแคลเซียม (Ca) ปริมาณของแคลเซียม ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของแคลเซียมคาร์บอเนตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิการเผา โดยในตัวอย่างก่อนการเผา (Raw) พบแคลเซียมอยู่ที่ 94.05% และมีการเพิ่มขึ้นเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเป็น 97.53%, 97.70%, 97.96% ที่อุณหภูมิ 500°C, 700°C และ 900°C ตามลำดับ ขณะที่ธาตุเจือปนอื่น ๆ เช่น เหล็ก (Fe), โบรมีน (Br) และซิลิกอน (Si)

มีแนวโน้มลดลง การเพิ่มขึ้นของปริมาณแคลเซียมสะท้อนถึงการขจัดสิ่งเจือปนหรือสารอินทรีย์ออกจากเปลือกหอยระหว่างการเผา ส่งผลให้สมบัติของแคลเซียมคาร์บอเนตสูงขึ้น

แม้ว่าการวิเคราะห์ธาตุด้วยการเรืองแสงรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงานจะสามารถให้ผลเชิงปริมาณเกี่ยวกับชนิดและปริมาณของธาตุที่ปรากฏในตัวอย่างเปลือกหอยได้ แต่ข้อมูลที่ได้นั้นอยู่ในระดับขององค์ประกอบธาตุเท่านั้น ไม่สามารถให้ข้อมูลเชิงโครงสร้างหรือรูปแบบของสารประกอบของธาตุเหล่านั้น อีกทั้งยังไม่สามารถให้ข้อมูลเกี่ยวกับลักษณะโครงสร้างผลึก (Crystalline structure) ของสารประกอบดังกล่าวได้ ดังนั้น เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ครอบคลุมทั้งในระดับองค์ประกอบของธาตุและโครงสร้างผลึก จึงใช้การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) ในการจำแนกชนิดของผลึกในตัวอย่าง และตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงลักษณะการจัดเรียงตัวของอะตอมภายในโครงสร้างผลึกที่เกิดขึ้นภายหลังกระบวนการเผา ซึ่งผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวอย่างเปลือกหอยแสดงดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของเปลือกหอยแมลงภู่วางผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ

จากการวิเคราะห์ลักษณะของพีคที่เกิดขึ้น พบว่าโครงสร้างผลึกของตัวอย่างเปลือกหอยมีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนภายหลังการเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยในตัวอย่างก่อนการเผา (Raw) มีพีคสำคัญที่ตำแหน่งประมาณ 2θ เท่ากับ 26° , 27° , 33° , 38° และ 46° ซึ่งสามารถระบุได้ว่าเป็นพีคของ

เฟสอราโกไนต์ (A) ทั้งหมด แสดงให้เห็นว่าในสภาวะเริ่มต้นก่อนการเผา โครงสร้างผลึกของเปลือกหอยส่วนใหญ่เป็นแคลเซียมคาร์บอเนตในรูปแบบของอราโกไนต์ เมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 500 °C ยังคงพบฟิสิกของเฟสอราโกไนต์ปรากฏอย่างชัดเจนในช่วงมุมเดียวกัน แต่เริ่มมีฟิสิกของเฟสแคลไซต์ (C) ปรากฏขึ้นที่ 2θ เท่ากับ 29°, 39°, 47°, 48° และ 56° ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเริ่มต้นกระบวนการเปลี่ยนเฟสจากอราโกไนต์ไปเป็นแคลไซต์ เมื่ออุณหภูมิการเผาเพิ่มขึ้นเป็น 700°C พบว่าฟิสิกของแคลไซต์มีความเข้มเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะฟิสิกที่ 2θ เท่ากับ 29° ซึ่งเป็นฟิสิกหลักของแคลไซต์ที่มีความเข้มสูงสุดในขณะที่ฟิสิกของอราโกไนต์ที่ตำแหน่ง 26° และ 27° มีความเข้มลดลงอย่างชัดเจน แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนเฟสเพิ่มขึ้น ส่วนตัวอย่างที่เผาที่อุณหภูมิ 900°C ฟิสิกของแคลไซต์มีความเข้มสูงในทุกตำแหน่ง โดยเฉพาะฟิสิกที่ 2θ เท่ากับ 29°, 39° และ 47° ในขณะที่ฟิสิกของอราโกไนต์แทบไม่ปรากฏในช่วงอุณหภูมินี้แล้ว

จากผลการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึกของตัวอย่างเปลือกหอยแมลงภู่ พบว่าการเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของชนิดและสัดส่วนของเฟสผลึกในตัวอย่างอย่างชัดเจน โดยเฉพาะการเปลี่ยนการเปลี่ยนเฟสจากอราโกไนต์ไปเป็นแคลไซต์ ซึ่งสามารถสังเกตได้จากการเปลี่ยนแปลงของตำแหน่งและความเข้มของฟิสิกที่ปรากฏในแต่ละช่วงมุม อย่างไรก็ตาม การประเมินจากลักษณะฟิสิกอย่างเดียวอาจยังไม่เพียงพอในการระบุปริมาณของเฟสแต่ละชนิดอย่างแม่นยำ เนื่องจากฟิสิกของเฟสบางตำแหน่งอาจมีการซ้อนทับกันหรือมีความเข้มใกล้เคียงกันจนยากต่อการแยกแยะด้วยวิธีการดูจากกราฟเพียงอย่างเดียว [71] ดังนั้น เพื่อให้ได้ข้อมูลเชิงปริมาณของเฟสผลึกในตัวอย่างอย่างถูกต้องและเชื่อถือได้ จึงได้ดำเนินการวิเคราะห์เพิ่มเติมโดยใช้โปรแกรม TOPAS ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์สำหรับการวิเคราะห์เชิงปริมาณของเฟสผลึกโดยวิธี Rietveld refinement โปรแกรมดังกล่าวสามารถประมวลผลข้อมูลและทำการปรับเทียบค่าสมการผลึกกับรูปแบบฟิสิกที่เกิดขึ้นในกราฟได้อย่างละเอียด [72, 73] ทำให้สามารถระบุและคำนวณสัดส่วนของเฟสอราโกไนต์และแคลไซต์ได้อย่างแม่นยำ ซึ่งผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณของเฟสอราโกไนต์และแคลไซต์ในตัวอย่างเปลือกหอยแมลงภู่หลังการเผาแสดงตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ผลปริมาณเฟสอราโกไนต์และแคลไซต์ในเปลือกหอยแมลงภู่หลังการเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ

อุณหภูมิการเผา (°C)	ปริมาณเฟสผลึก (%)	
	อราโกไนต์ (Aragonite)	แคลไซต์ (Calcite)
ก่อนการเผา (Raw)	98.24	1.76
500	19.23	80.77
700	0.21	99.79
900	0.48	99.52

ผลจากการวิเคราะห์ปริมาณของเฟสอราโกไนต์และแคลไซต์ในเปลือกหอยแมลงภู์หลังการเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ พบว่าในตัวอย่างก่อนการเผามีอราโกไนต์สูงถึง 98.24% และแคลไซต์เพียง 1.76% จึงสามารถยืนยันได้ว่าในตัวอย่างก่อนการเผามีโครงสร้างผลึกแบบอราโกไนต์เป็นเฟสหลักเพียงอย่างเดียว อย่างไรก็ตาม เมื่อทำการเผาที่ 500°C ปริมาณอราโกไนต์ลดลงเหลือ 19.23% ในขณะที่แคลไซต์เพิ่มขึ้นเป็น 80.77% สะท้อนถึงการเปลี่ยนเฟสที่ชัดเจน ซึ่งสอดคล้องกับการปรากฏของฟิสิกส์แคลไซต์ที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 29° ซึ่งมีความเข้มเพิ่มขึ้นอย่างเด่นชัด และในตัวอย่างที่เผาที่ 700°C ปริมาณแคลไซต์ยังคงอยู่ในระดับที่สูง (99.52%) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างผลึกของเปลือกหอยเกิดการเปลี่ยนเฟสจากอราโกไนต์ไปเป็นแคลไซต์อย่างสมบูรณ์แล้ว การเปลี่ยนเฟสดังกล่าวมีนัยสำคัญต่อสมบัติของวัสดุ เนื่องจากอราโกไนต์และแคลไซต์ แม้จะมีองค์ประกอบทางเคมีที่เหมือนกัน แต่มีโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกัน ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อสมบัติทางกลและพฤติกรรมเมื่อวัสดุอยู่ภายใต้แรงกระทำ [74] โดยอราโกไนต์เป็นผลึกในระบบผลึกออร์โธรอมบิก (Orthorhombic) ซึ่งมีลักษณะการจัดเรียงอะตอมที่แน่นในบางทิศทาง ส่งผลให้มีความแข็งแรงเฉพาะจุดสูง และมักมีรูปผลึกทรงแท่งหรือเข็ม อย่างไรก็ตาม โครงสร้างนี้มีความเปราะสูง (Brittle) และมีเสถียรภาพต่ำจึงสามารถเปลี่ยนเฟสได้ง่ายเมื่อได้รับพลังงานความร้อนจากการเผา [75] ในทางกลับกัน แคลไซต์มีโครงสร้างผลึกแบบไตรโกนอล (Trigonal) ซึ่งมีระนาบผลึกที่สมมาตรและสามารถกระจายแรงในทิศทางต่าง ๆ ได้ดี จึงมีความเหนียวมากกว่าและมีความเสถียรสูง ทำให้สามารถกระจายแรงดึงและแรงบิดได้ดี [68]

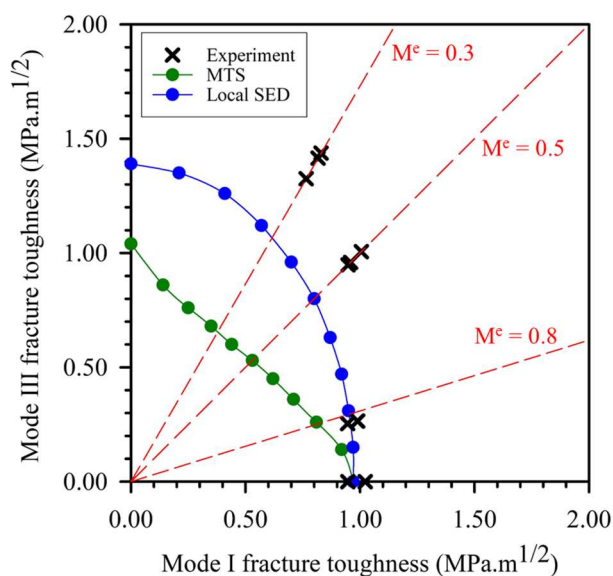
จากลักษณะโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกันของอราโกไนต์และแคลไซต์ ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อสมบัติทางกลและพฤติกรรมของวัสดุ สอดคล้องกับผลการทดสอบสมบัติแรงดึงในหัวข้อ 4.1.1 จากผลการทดลองดังรูป 4.1 ถึง 4.3 อีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเปลือกหอยเผาที่อุณหภูมิ 700 °C และ 900°C ซึ่งมีเฟสแคลไซต์เกือบสมบูรณ์ (~99%) ให้ค่าความเค้นครากและความเค้นแรงดึงสูงที่สุดเมื่อเทียบกับอุณหภูมิอื่น ๆ สะท้อนให้เห็นว่าโครงสร้างผลึกแบบแคลไซต์มีความสามารถในการรับแรงดึงได้ดีกว่า ในขณะที่เปลือกหอยที่เผาที่ 500 °C ซึ่งยังมีอราโกไนต์อยู่มาก (19.23%) พบว่าค่าความเค้นครากและความเค้นแรงดึงต่ำกว่า ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างผลึกจากอราโกไนต์ไปเป็นแคลไซต์ที่อุณหภูมิการเผาที่สูงขึ้น จึงไม่ได้เป็นเพียงการเปลี่ยนเฟสในเชิงโครงสร้างเท่านั้น แต่ยังส่งผลกระทบต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุโดยตรง ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการอธิบายผลการทดสอบแรงดึงอีกด้วย

4.3 ผลการทำนายความต้านทานการแตกหัก

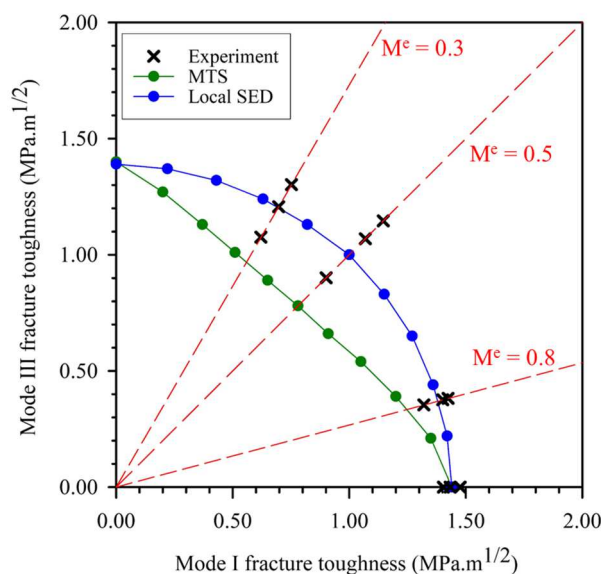
4.3.1 ผลการทำนายด้วยเกณฑ์การแตกหัก

การทำนายความต้านทานการแตกหักภายใต้การรับภาระแบบผสม 1 และ 3 ของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเปลือกหอยแมลงภู์ด้วยเกณฑ์การแตกหักนั้นจะกล่าวถึงเฉพาะผลการทำนายด้วยอุณหภูมิการเผาเปลือกหอยที่ 700 องศาเซลเซียสที่สัดส่วนการผสมร้อยละ 10 และ 30 โดยน้ำหนัก ส่วนผลการทำนายด้วยเกณฑ์การแตกหักที่เงื่อนไขการผสมอื่น ๆ จะแสดงไว้ในภาคผนวก ข (ตารางที่ ข.1 ถึง ข.3) ผลการทำนายความต้านทานการแตกหักภายใต้การรับภาระแบบผสม 1 และ 3 แสดงดัง

รูปที่ 4.19 เภณฑ์การแตกหักที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้แก่ เภณฑ์การแตกหักแบบ MTS และเภณฑ์การแตกหักแบบ Local SED ซึ่งเภณฑ์การแตกหักดังกล่าวจะพิจารณาปัจจัยที่ส่งผลต่อการแตกหักของวัสดุที่ต่างกัน โดยเภณฑ์การแตกหักแบบ MTS การขยายตัวของรอยร้าวจะเริ่มต้นเมื่อความเค้นที่ปลายรอยร้าวมีค่าสูงสุดจนวัสดุเกิดการแตกหัก ส่วนเภณฑ์การแตกหักแบบ Local SED รอยร้าวของวัสดุจะขยายตัวเมื่อความหนาแน่นของพลังงานความเครียดมีค่ามากกว่าปริมาตรควบคุม เมื่อพิจารณาผลความต้านทานการแตกหักจากการทำนายด้วยเภณฑ์การแตกหักทั้งสองพบว่ามีค่าค่อนข้างคลาดเคลื่อนเมื่อเทียบกับผลการทดสอบที่สัดส่วนการผสมเปลือกหอยร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก (รูปที่ 4.19(ก)) ในทางกลับกันผลความต้านทานการแตกหักจากการทำนายด้วยเภณฑ์การแตกหักมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดสอบที่สัดส่วนการผสมเปลือกหอยร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก (รูปที่ 4.19(ข)) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการทำนายด้วยเภณฑ์การแตกหักดังกล่าวอาจให้ผลการทำนายที่มีความคลาดเคลื่อนสูงแม้จะเป็นการทำนายบนวัสดุชนิดเดียว เนื่องจากเภณฑ์การแตกหักนั้นถูกออกแบบมาเพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับวัสดุที่หลากหลายโดยใช้ทฤษฎีกลศาสตร์การแตกหักแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น (Linear elastic fracture mechanics) ที่มีหลักการว่าวัสดุเกิดการเสียรูปน้อยมากก่อนเกิดการแตกหัก [76] ส่งผลให้ผลการทำนายด้วยเภณฑ์การแตกหักของอีพอกซีเรซินเสริมแรงที่สัดส่วนการผสมเปลือกหอยแมลงภู้อยู่ที่ 10 โดยน้ำหนักซึ่งแสดงพฤติกรรมการแตกหักแบบเหนียวที่มีการเสียรูปมากก่อนเกิดการแตกหักมีค่าน้อยกว่าความต้านทานการแตกหักที่ได้จากการทดสอบจริง



(ก) สัดส่วนการผสมร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก



(ข) สัดส่วนการผสมร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก

รูปที่ 4.19 ผลการทำนายความต้านทานการแตกหักด้วยเกณฑ์การแตกหักที่อุณหภูมิการเผาเปลือก
หอยแมลงภู่ 700 องศาเซลเซียส

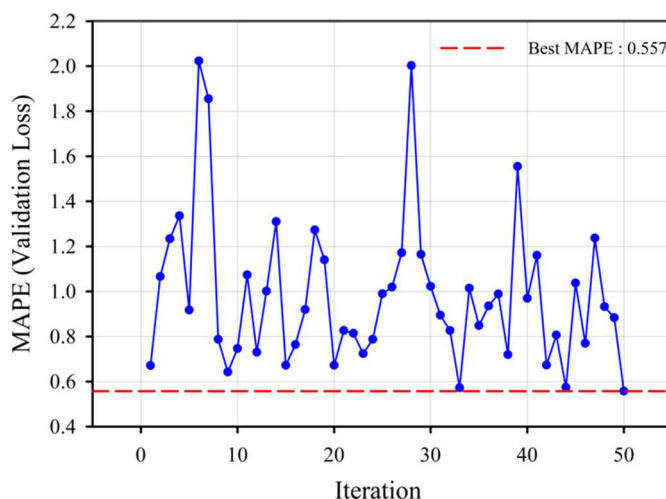
แม้ว่าค่าความต้านทานการแตกหักของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเปลือก
หอยแมลงภู่ที่ได้จากการทำนายด้วยเกณฑ์การแตกหักจะแสดงความคลาดเคลื่อนเมื่อเปรียบเทียบกับ
ผลการทดลองจริง แต่ค่าที่ได้จากการทำนายยังสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการออกแบบเบื้องต้นของ
ชิ้นส่วนหรืออุปกรณ์ทางวิศวกรรมที่ต้องพิจารณาพารามิเตอร์ด้านความต้านทานการแตกหัก อย่างไร
ก็ตาม เนื่องจากค่าที่ทำนายได้มีแนวโน้มต่ำกว่าค่าจริง จึงอาจทำให้มีการออกแบบที่เกินความจำเป็น
(Overdesign) ซึ่งแม้จะมีความปลอดภัยสูง แต่ก็ส่งผลให้การใช้วัสดุไม่เต็มศักยภาพ โดยชิ้นส่วนที่
ออกแบบจะถูกจำกัดให้รับภาระได้น้อยกว่าขีดความสามารถที่แท้จริงของวัสดุ ส่งผลต่อประสิทธิภาพ
ในการประยุกต์ใช้ทางวิศวกรรม

4.3.2 ผลการทำนายด้วยวิธีปัญญาประดิษฐ์

4.3.2.1 ผลการปรับค่าไฮเปอร์พารามิเตอร์

การปรับค่าไฮเปอร์พารามิเตอร์ของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมเชิง
ลึกเพื่อทำนายค่าความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระรูปแบบที่ 1 และค่าความต้านทานการ
แตกหักภายใต้ภาระรูปแบบที่ 3 ได้มีการใช้วิธีการ Optuna เพื่อกำหนดและปรับค่าไฮเปอร์
พารามิเตอร์ (Hyperparameter tuning) เพื่อให้ได้โครงสร้างแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุด โดย
พิจารณาประสิทธิภาพของแบบจำลองด้วยตัวชี้วัดประสิทธิภาพ 3 ชนิด ได้แก่ R^2 , MSE, และ MAPE
ผลการปรับค่าไฮเปอร์พารามิเตอร์โดยใช้ค่าเฉลี่ยของร้อยละความผิดพลาดสัมบูรณ์ (MAPE) จะแสดง
โดยละเอียดไว้ในภาคผนวก ข (ตารางที่ ข.4) ผล MAPE ที่ได้จากการปรับค่าไฮเปอร์พารามิเตอร์ใน

ชุดข้อมูลตรวจสอบ (Validation set) แสดงดังรูปที่ 4.20 พบว่าค่า MAPE มีความแปรปรวนในแต่ละรอบการทดลอง (Iteration) แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของการเลือกค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นต่อประสิทธิภาพของแบบจำลอง ซึ่งพบว่ารอบการทดลองที่ให้ค่า MAPE ที่ดีที่สุดซึ่งอยู่ที่ประมาณ 0.557% นั้นสามารถลดความคลาดเคลื่อนในการทำนายผลได้ดีที่สุด ซึ่งเงื่อนไขการปรับไฮเปอร์พารามิเตอร์ของแบบจำลองที่ให้ประสิทธิภาพโดยรวมดีที่สุดแสดงดังตารางที่ 4.4



รูปที่ 4.20 ผลค่าเฉลี่ยของร้อยละความผิดพลาดสัมบูรณ์ของการปรับค่าไฮเปอร์พารามิเตอร์

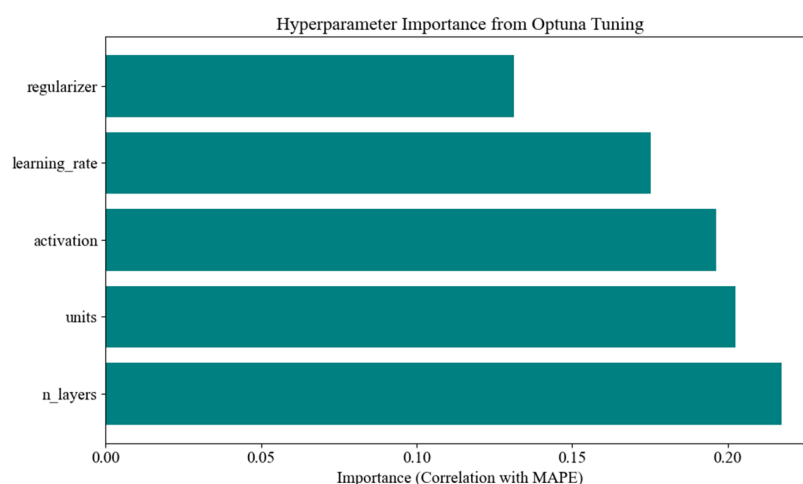
ตารางที่ 4.8 ผลการปรับค่าไฮเปอร์พารามิเตอร์ที่ให้ประสิทธิภาพการทำนายดีที่สุด

Layer	Units	Activation	Regularization	Learning rate	R ²	MSE	MAPE
2	64	ReLU	L2	0.0057	0.792	0.128	0.557

เมื่อพิจารณาจากตัวชี้วัดประสิทธิภาพสามชนิด ได้แก่ ค่า R², MSE และ MAPE ค่าความแม่นยำโดยรวมของแบบจำลอง พบว่าแบบจำลองสามารถลดค่า MAPE ได้ต่ำที่สุดในบรรดาทุกการทดลอง โดยมีค่าเท่ากับ 0.557% แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการทำนายที่ดีที่สุด และให้ค่า MSE ต่ำเพียง 0.128 และค่า R² เท่ากับ 0.792 ซึ่งถือว่าอยู่ในระดับที่ค่อนข้างดี ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าแบบจำลองสามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้มากกว่า 79% ในชุดข้อมูลตรวจสอบแบบจำลอง

ในการพัฒนาแบบจำลอง การปรับค่าไฮเปอร์พารามิเตอร์ที่เหมาะสมถือเป็นขั้นตอนสำคัญที่ส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพของแบบจำลอง การใช้ Optuna ช่วยให้ได้ค่าที่เหมาะสมได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม นอกเหนือจากการหาค่าไฮเปอร์พารามิเตอร์ที่ดีที่สุดแล้ว จึงทำการวิเคราะห์ว่าพารามิเตอร์ใดส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของแบบจำลองมากที่สุด โดยรูปที่ 4.21 แสดงผลวิเคราะห์ระดับความสำคัญของพารามิเตอร์แต่ละตัวที่ใช้

ในกระบวนการปรับปรุงประสิทธิภาพของแบบจำลอง โดยวัดจากค่าความสัมพันธ์ (Correlation) ระหว่างค่าของไฮเปอร์พารามิเตอร์นั้นกับค่า MAPE พบว่าจำนวนชั้นซ่อน (n_layers) เป็นพารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลสูงสุดต่อประสิทธิภาพของแบบจำลอง โดยค่าความสัมพันธ์ที่สูงนี้สะท้อนให้เห็นว่าโครงสร้างความลึกของโครงข่ายประสาทเทียมมีผลอย่างมากต่อประสิทธิภาพในการเรียนรู้ของแบบจำลอง พารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลรองลงมาคือจำนวนหน่วยย่อยในแต่ละชั้น (units) และฟังก์ชันกระตุ้น (activation) ซึ่งมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงและการประมวลผลข้อมูลภายในโครงข่ายประสาทเทียม โดยทั้งสองพารามิเตอร์นี้มีความสำคัญในระดับที่ใกล้เคียงกันและมีบทบาทอย่างชัดเจนในการกำหนดความสามารถของแบบจำลองในการเรียนรู้ความสัมพันธ์ในลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear patterns) สำหรับอัตราการเรียนรู้ (learning_rate) พบว่ามีระดับความสัมพันธ์ในระดับกลางแสดงให้เห็นถึงบทบาทในการควบคุมความเร็วของการปรับพารามิเตอร์ระหว่างการฝึกสอนแบบจำลอง ซึ่งหากค่าอัตราการเรียนรู้ไม่เหมาะสมอาจทำให้การเรียนรู้ไม่เสถียรหรือไม่สามารถหาค่าที่ดีที่สุดได้ แม้ว่าจะไม่ใช่พารามิเตอร์หลักที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพสูงสุด แต่ยังคงมีความสำคัญในกระบวนการฝึกสอนแบบจำลอง ในขณะที่พารามิเตอร์ด้านการปรับมาตรฐาน (regularizer) ซึ่งทำหน้าที่ในการควบคุมไม่ให้แบบจำลองเกิดการเรียนรู้มากเกินไป (Overfitting) พบว่าระดับความสำคัญต่ำที่สุด แสดงให้เห็นว่าข้อมูลที่ใช้ในการฝึกสอนแบบจำลองในงานวิจัยนี้อาจไม่มีปัญหาการเรียนรู้มากเกินไป หรืออาจเกิดจากความซับซ้อนของข้อมูลไม่มากพอที่จะจำเป็นต้องใช้การปรับมาตรฐานในระดับสูง

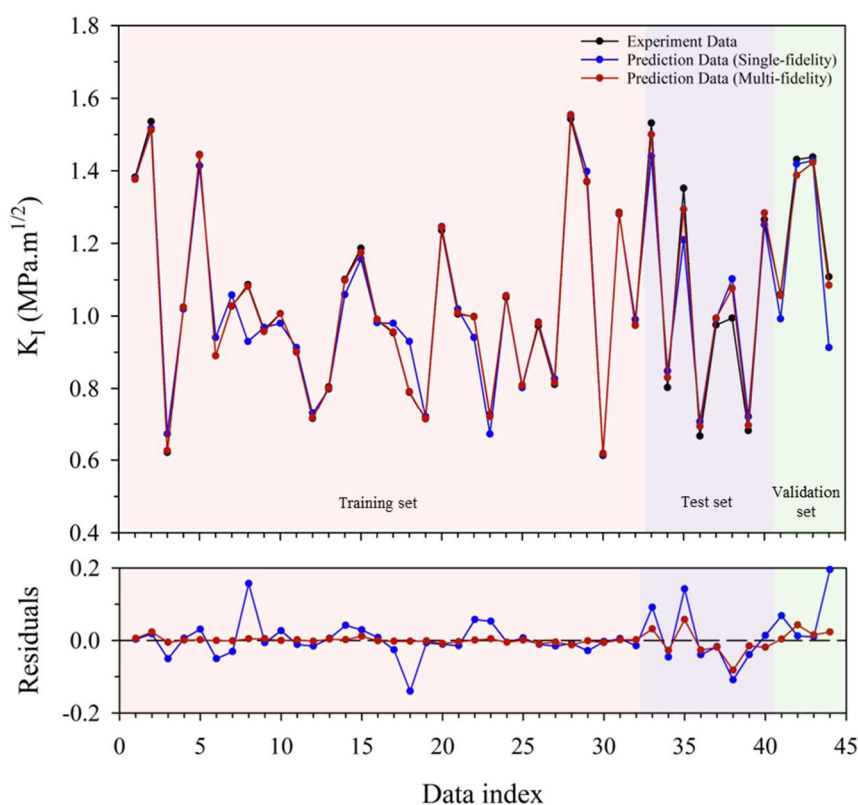


รูปที่ 4.21 ผลระดับความสำคัญของพารามิเตอร์ในการปรับปรุงประสิทธิภาพของแบบจำลอง

4.3.2.2 ผลการทำนายด้วยแบบจำลองปัญญาประดิษฐ์

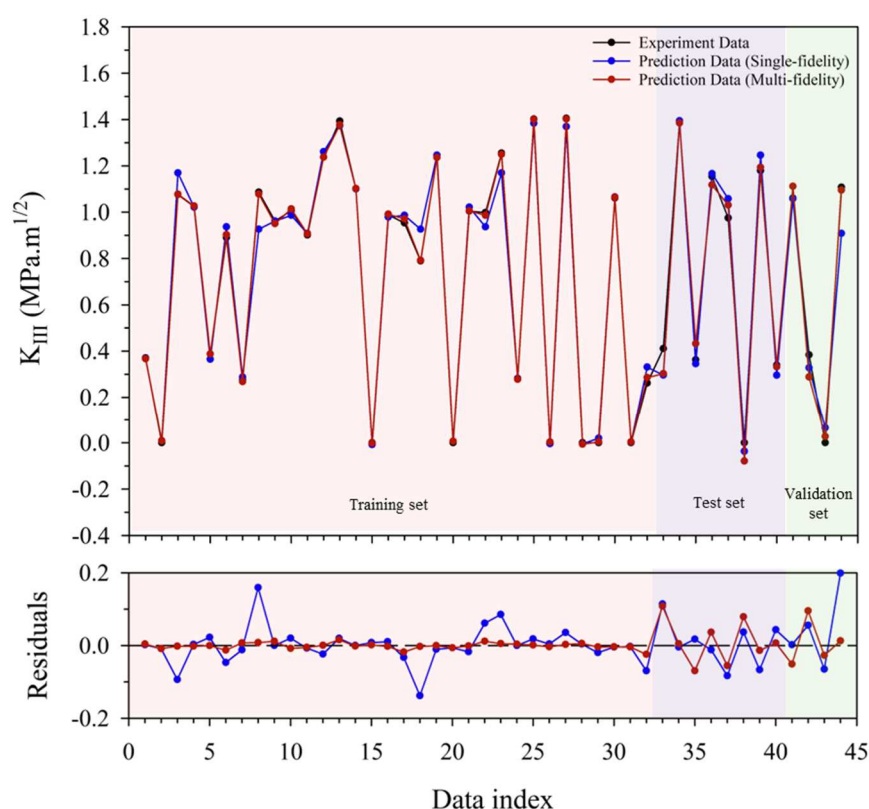
ผลการทำนายความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบผสม 1 และ 3 ของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเปลือกหอยแมลงภู่นิวด้วยแบบจำลองความเค้นตรงเดียวและแบบจำลอง

หลายระดับความเที่ยงตรงที่ฝึกสอนด้วยชุดข้อมูลฝึกสอนแบบจำลอง 100% จากการเปรียบเทียบผลการทำนายค่าความต้านทานการแตกหักรูปแบบที่ 1 ระหว่างแบบจำลองความเที่ยงตรงเดียวและแบบจำลองหลายระดับความเที่ยงตรง กับค่าจากการทดสอบจริง (รูปที่ 4.22) พบว่าแบบจำลองหลายระดับความเที่ยงตรงแสดงผลการทำนายที่แม่นยำและเสถียรกว่าในทุกช่วงของชุดข้อมูล ได้แก่ ชุดฝึกสอน (Training set), ชุดทดสอบ (Test set) และชุดตรวจสอบ (Validation set) ในช่วงของชุดข้อมูลฝึกสอน ทั้งสองแบบจำลองสามารถเรียนรู้แนวโน้มของข้อมูลได้ใกล้เคียงกับค่าจริง อย่างไรก็ตาม แบบจำลองหลายระดับความเที่ยงตรงแสดงผลการทำนายที่สอดคล้องกับค่าจริงมากกว่าแบบจำลองความเที่ยงตรงเดียว โดยมีค่าคลาดเคลื่อน (Residuals) ที่กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอและเข้าใกล้ 0 ซึ่งสะท้อนถึงความสามารถในการเรียนรู้ข้อมูลได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในส่วนของชุดทดสอบ แบบจำลองความเที่ยงตรงเดียวแสดงค่าคลาดเคลื่อนที่สูงขึ้นในช่วงของข้อมูล (Data index) ที่ 33-38 ขณะที่แบบจำลองหลายระดับความเที่ยงตรงในช่วงของข้อมูลเดียวกันยังคงมีคลาดเคลื่อนที่ต่ำกว่าแบบจำลองความเที่ยงตรงเดียว ในช่วงของชุดตรวจสอบ แบบจำลองหลายระดับความเที่ยงตรงยังคงแสดงผลการทำนายที่สอดคล้องกับค่าจากการทดลอง ขณะที่แบบจำลองความเที่ยงตรงเดียวมีความคลาดเคลื่อนมากขึ้นในหลายจุด



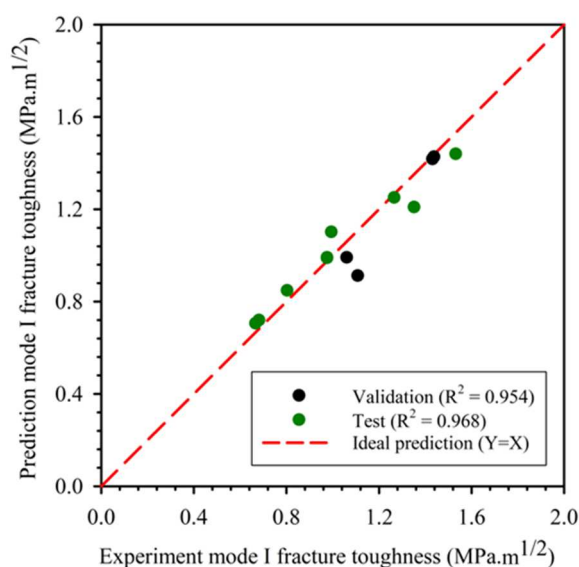
รูปที่ 4.22 ผลการทำนายค่าความต้านทานการแตกหักรูปแบบที่ 1 เปรียบเทียบกับค่าจากการทดสอบจริง

สำหรับการเปรียบเทียบผลการทำนายค่าความต้านทานการแตกหักรูปแบบที่ 3 ระหว่างแบบจำลองความเที่ยงตรงเดียว และแบบจำลองหลายระดับความเที่ยงตรง กับค่าจากการทดสอบจริง (รูปที่ 4.23) พบว่าแบบจำลองหลายระดับความเที่ยงตรงแสดงประสิทธิภาพได้ดีกว่าแบบจำลองความเที่ยงตรงเดียวอย่างชัดเจน โดยพิจารณาจากค่าความคลาดเคลื่อน ในช่วงของชุดฝึกสอน แบบจำลองทั้งสองสามารถเรียนรู้แนวโน้มของข้อมูลได้ใกล้เคียงกับค่าจากการทดสอบจริง อย่างไรก็ตาม แบบจำลองหลายระดับความเที่ยงตรงให้ผลการทำนายที่มีแนวโน้มใกล้เคียงกับข้อมูลการทดสอบจริงได้อย่างสม่ำเสมอ โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนเข้าใกล้ศูนย์ ในขณะที่แบบจำลองความเที่ยงตรงเดียวยังคงมีความคลาดเคลื่อนที่สูงในบางจุดของข้อมูล ในส่วนของชุดทดสอบ แบบจำลองความเที่ยงตรงเดียวและแบบจำลองหลายระดับความเที่ยงตรงแสดงผลการทำนายที่คลาดเคลื่อนกับค่าจากการทดสอบจริงในบางช่วง สำหรับชุดข้อมูลตรวจสอบ แบบจำลองหลายระดับความเที่ยงตรงยังคงสามารถทำนายค่าความต้านทานการแตกหักรูปแบบที่ 3 ได้ใกล้เคียงกับค่าจริงในทุกกรณี ขณะที่แบบจำลองความเที่ยงตรงเดียวแสดงความคลาดเคลื่อนเพิ่มขึ้นสูงในบางจุด



รูปที่ 4.23 ผลการทำนายค่าความต้านทานการแตกหักรูปแบบที่ 3 เปรียบเทียบกับค่าจากการทดสอบจริง

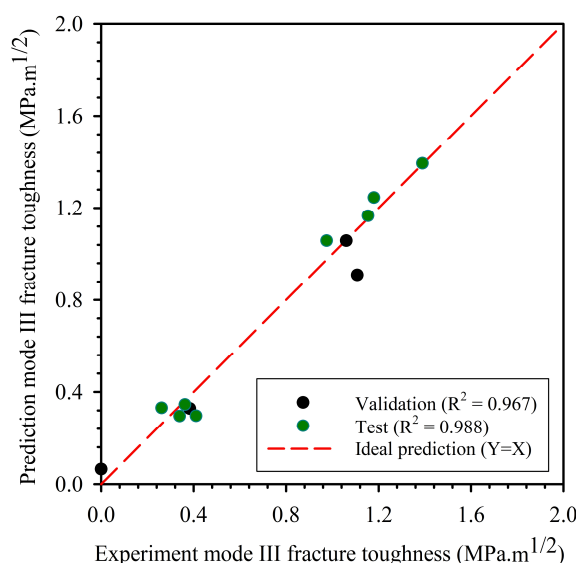
สำหรับผลการทำนายโดยประเมินด้วยตัวชี้วัดประสิทธิภาพแบบจำลองจะแสดงผลการทำนายทั้งช่วงการตรวจสอบแบบจำลอง และช่วงทดสอบแบบจำลอง โดยรูปที่ 4.24 แสดงผลการทำนายความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบที่ 1 ด้วยแบบจำลองความเที่ยงตรงเดียว ซึ่งใช้เฉพาะข้อมูลความเที่ยงตรงสูงในการสร้างแบบจำลอง ผลการทำนายในช่วงการตรวจสอบแบบจำลองมีค่า R^2 เท่ากับ 0.954, MSE เท่ากับ 0.011 และ MAPE เท่ากับ 6.41% แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองมีประสิทธิภาพการทำนายที่สูง เมื่อพิจารณาผลการทำนายของแบบจำลองในช่วงการทดสอบซึ่งเป็นข้อมูลที่แบบจำลองไม่เคยพบเห็นในระหว่างการฝึกสอนมาก่อน มีค่า R^2 เท่ากับ 0.968, MSE เท่ากับ 0.005 และ MAPE เท่ากับ 5.45% แสดงให้เห็นว่าค่าตัวชี้วัดประสิทธิภาพ ได้แก่ ค่า R^2 และ MSE มีแนวโน้มใกล้เคียงกับผลลัพธ์ที่ได้จากชุดข้อมูลตรวจสอบแบบจำลองอย่างมีนัยสำคัญ และค่า MAPE แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองดังกล่าวมีความแม่นยำในการทำนายที่สูง ลักษณะดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองมีความสามารถในการเรียนรู้ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยของข้อมูลกับผลลัพธ์ที่ต้องการทำนายและนำไปใช้กับข้อมูลใหม่ได้อย่างแม่นยำ



รูปที่ 4.24 ผลการทำนายความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบที่ 1 ด้วยแบบจำลองความเที่ยงตรงเดียว

ผลการทำนายความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบที่ 3 ด้วยแบบจำลองความเที่ยงตรงเดียวซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.25 ประสิทธิภาพของการทำนายในช่วงการตรวจสอบแบบจำลองมีค่า R^2 เท่ากับ 0.967, MSE เท่ากับ 0.012 และ MAPE เท่ากับ 10.93% และในช่วงการทดสอบแบบจำลองมีค่า R^2 เท่ากับ 0.988, MSE เท่ากับ 0.004 และ MAPE เท่ากับ 10.92% แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองสามารถทำนายข้อมูลใหม่ที่ไม่เคยเห็น ซึ่งเป็นข้อมูลช่วงการทดสอบแบบจำลองได้ด้วยระดับประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกับข้อมูลที่ใช้ตรวจสอบแบบจำลอง เมื่อ

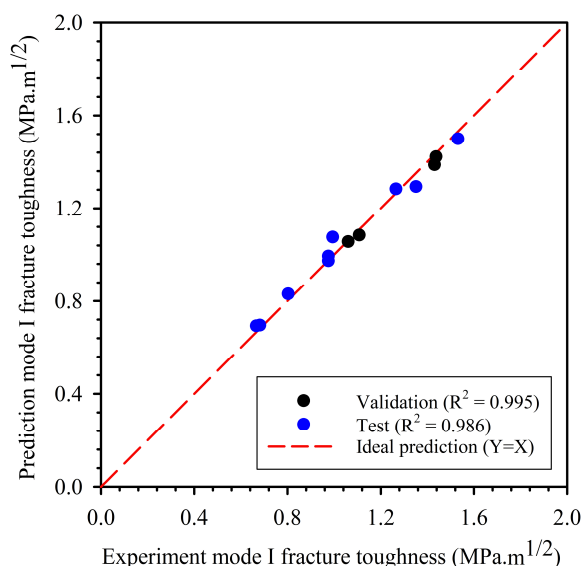
พิจารณาผลการทำนายความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบที่ 3 พบว่ามีค่า MAPE สูงกว่าผลการทำนายความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบที่ 1 เล็กน้อย ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองความเที่ยงตรงเดียวมีประสิทธิภาพในการทำนายผลความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบที่ 1 ได้ค่อนข้างดี และอาจเกิดการคลาดเคลื่อนเล็กน้อยในการทำนายความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบที่ 3



รูปที่ 4.25 ผลการทำนายความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบที่ 3 ด้วยแบบจำลองความเที่ยงตรงเดียว

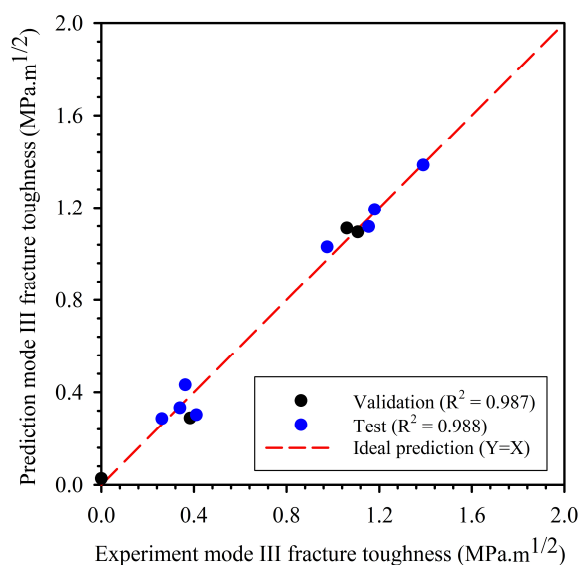
เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำนายค่าความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบผสม 1 และ 3 งานวิจัยนี้ได้นำเสนอแนวทางการประยุกต์ใช้แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมเชิงลึก โดยใช้แนวคิดการเรียนรู้ด้วยข้อมูลหลายระดับความเที่ยงตรง (Multi-fidelity learning) โดยอาศัยข้อมูลจากสองระดับความเที่ยงตรง ได้แก่ ข้อมูลความเที่ยงตรงต่ำ (Low-fidelity data) จากการทำนายเบื้องต้นด้วยเกณฑ์การแตกหัก และข้อมูลความเที่ยงตรงสูง (High-fidelity data) จากการทดลองจริง การรวมข้อมูลทั้งสองระดับเข้าด้วยกันผ่านกระบวนการเสริมคุณลักษณะของข้อมูล (Feature augmentation) ช่วยให้แบบจำลองสามารถเรียนรู้โครงสร้างของข้อมูลที่ซับซ้อนมากขึ้น และลดข้อจำกัดที่เกิดจากขนาดของข้อมูลความเที่ยงตรงสูงที่มีอยู่อย่างจำกัดได้ ผลการทำนายความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบที่ 1 ด้วยแบบจำลองหลายระดับความเที่ยงตรงแสดงดังรูปที่ 4.26 แสดงให้เห็นว่าผลการทำนายในช่วงการตรวจสอบแบบจำลองมีค่า R² เท่ากับ 0.995, MSE เท่ากับ 0.001 และ MAPE เท่ากับ 1.64% และผลการทำนายในช่วงการทดสอบแบบจำลองมีค่า R² เท่ากับ 0.986, MSE เท่ากับ 0.003 และ MAPE เท่ากับ 3.08% แสดงให้เห็นว่าการทำนายด้วยแบบจำลองหลายระดับความเที่ยงตรงในช่วงการทดสอบแบบจำลองมีประสิทธิภาพ

ลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับการทำนายในช่วงการตรวจสอบแบบจำลอง และเมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการทำนายความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบที่ 1 พบว่าแบบจำลองหลายระดับความเที่ยงตรงมีประสิทธิภาพการทำนายที่สูงขึ้นเทียบกับแบบจำลองความเที่ยงตรงเดียว



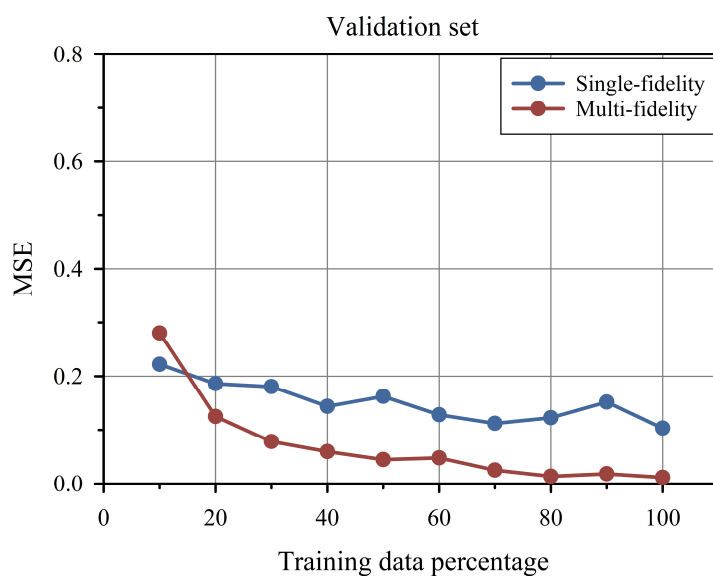
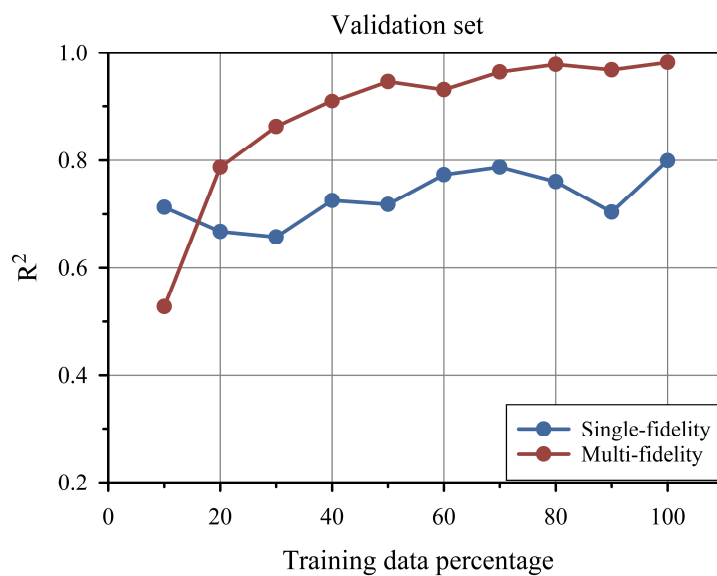
รูปที่ 4.26 ผลการทำนายความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบที่ 1 ด้วยแบบจำลองหลายระดับความเที่ยงตรง

ผลการทำนายความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบที่ 3 ด้วยแบบจำลองหลายระดับความเที่ยงตรงแสดงดังรูปที่ 4.27 แสดงให้เห็นผลการทำนายในช่วงการตรวจสอบแบบจำลองมีค่า R² เท่ากับ 0.987, MSE เท่ากับ 0.003 และ MAPE เท่ากับ 10.27% และผลการทำนายในช่วงการทดสอบแบบจำลองมีค่า R² เท่ากับ 0.988, MSE เท่ากับ 0.004 และ MAPE เท่ากับ 8.40% แสดงให้เห็นว่าการทำนายความต้านทานการแตกหักรูปแบบที่ 3 ด้วยแบบจำลองหลายระดับความเที่ยงตรงในช่วงการทดสอบมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับการทำนายในช่วงการตรวจสอบแบบจำลอง และเมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการทำนายความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบที่ 3 เทียบกับแบบจำลองความเที่ยงตรงเดียว พบว่าในช่วงการตรวจสอบแบบจำลองมีประสิทธิภาพการทำนายสูงขึ้นเล็กน้อย ขณะที่ในช่วงการทดสอบแบบจำลองให้ประสิทธิภาพการทำนายใกล้เคียงกับแบบจำลองความเที่ยงตรงเดียว



รูปที่ 4.27 ผลการทำนายความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบที่ 3 ด้วยแบบจำลองหลายระดับความเที่ยงตรง

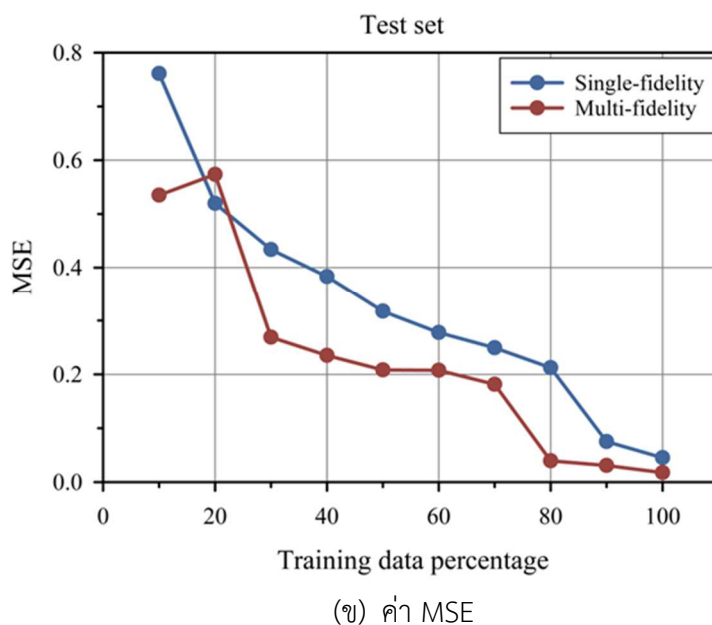
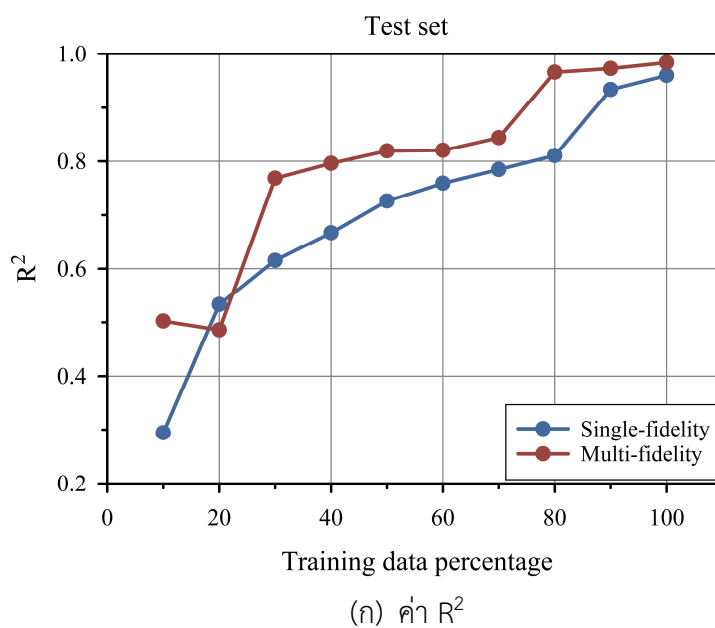
แม้ว่าผลการทำนายความต้านทานการแตกหักของแบบจำลองความเที่ยงตรงเดียวที่ฝึกสอนด้วยชุดข้อมูลความเที่ยงตรงสูงทั้งหมด (100%) จะให้ประสิทธิภาพสูง โดยเฉพาะในด้านค่าความแม่นยำ (R^2) ที่อยู่ในระดับดีมาก และค่าความคลาดเคลื่อนอย่าง MSE และ MAPE อยู่ในเกณฑ์ยอมรับได้ แสดงถึงความสามารถของแบบจำลองในการเรียนรู้ความสัมพันธ์จากข้อมูลที่มีความเที่ยงตรงสูงได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่การใช้ข้อมูลทั้งหมดเช่นนี้มีข้อจำกัดด้านการได้มาซึ่งข้อมูลความเที่ยงตรงสูงที่ได้จากการทดสอบจริงมักมีต้นทุนสูงและใช้เวลานาน และในสถานการณ์ที่ไม่สามารถจัดหาข้อมูลได้มากนัก เช่น มีข้อมูลให้ใช้การฝึกสอนแบบจำลองเพียงแค่ 30-50% อาจส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำนายของแบบจำลองความเที่ยงตรงเดียวได้ จึงนำไปสู่การพัฒนาแบบจำลองหลายระดับความเที่ยงตรง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงนำเสนอผลการทำนายความต้านทานการแตกหักของแบบจำลองความเที่ยงตรงเดียวและแบบจำลองหลายระดับความเที่ยงตรงด้วยระดับข้อมูลที่ใช้ในการฝึกสอนแบบจำลองต่าง ๆ ซึ่งผลการทำนายแสดงดังรูปที่ 4.28 ถึงรูปที่ 4.29 ผลการทำนายความต้านทานการแตกหักด้วยแบบจำลองความเที่ยงตรงเดียวและแบบจำลองหลายระดับความเที่ยงตรงด้วยชุดข้อมูลตรวจสอบแบบจำลองแสดงดังรูปที่ 4.28 ค่า R^2 ของทั้งสองแบบจำลองเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของข้อมูลฝึกสอนแบบจำลองที่เพิ่มขึ้น ซึ่งแบบจำลองหลายระดับความเที่ยงตรงมีค่า R^2 สูงกว่าแบบจำลองความเที่ยงตรงเดียวอย่างสม่ำเสมอในทุกๆ ระดับของข้อมูลฝึกสอนแบบจำลอง (รูปที่ 4.28(ก)) และค่า MSE จะลดลงเมื่อเพิ่มข้อมูลฝึกสอนแบบจำลองแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองสามารถลดข้อผิดพลาดในการทำนายได้มากขึ้นเมื่อมีข้อมูลมากขึ้นแบบจำลองหลายระดับความเที่ยงตรงมีค่า MSE ต่ำกว่าอย่างสม่ำเสมอในทุกช่วงการฝึกสอนแบบจำลอง (รูปที่ 4.28(ข))



รูปที่ 4.28 ผลการทำนายของแบบจำลองความเที่ยงตรงเดียวและแบบจำลองหลายระดับความเที่ยงตรงด้วยชุดตรวจสอบแบบจำลอง

ผลการทำนายความต้านทานการแตกหักด้วยแบบจำลองความเที่ยงตรงเดียวและแบบจำลองหลายระดับความเที่ยงตรงด้วยชุดข้อมูลทดสอบแบบจำลองแสดงดังรูปที่ 4.29 ค่า R^2 ของแบบจำลองหลายระดับความเที่ยงตรงมีแนวโน้มเช่นเดียวกับผลการทำนายด้วยชุดข้อมูลตรวจสอบแบบจำลอง คือ มีการเพิ่มขึ้นตามข้อมูลฝึกสอนแบบจำลองที่เพิ่มขึ้น และมีค่าสูงกว่า

แบบจำลองความเที่ยงตรงเดียว (รูปที่ 4.29(ก)) และค่า MSE ของแบบจำลองหลายระดับความเที่ยงตรงมีค่าต่ำกว่าแบบจำลองความเที่ยงตรงเดียว แต่ในช่วงข้อมูลการฝึกสอนแบบจำลอง 20% ค่า MSE ของแบบจำลองหลายระดับความเที่ยงตรงมีค่าลดลงต่ำกว่าแบบจำลองความเที่ยงตรงเดียวเล็กน้อย (รูปที่ 4.29 (ข))

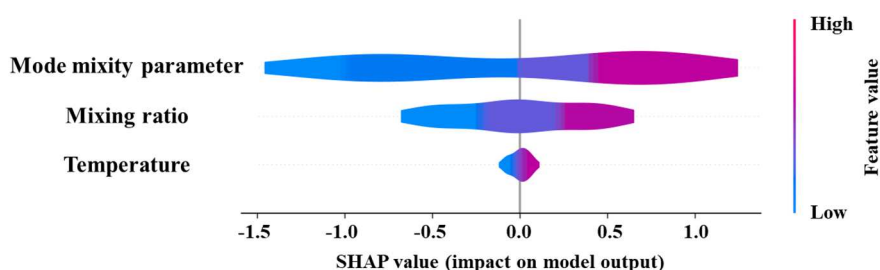


รูปที่ 4.29 ผลการทำนายของแบบจำลองความเที่ยงตรงเดียวและแบบจำลองหลายระดับความเที่ยงตรงด้วยชุดทดสอบแบบจำลอง

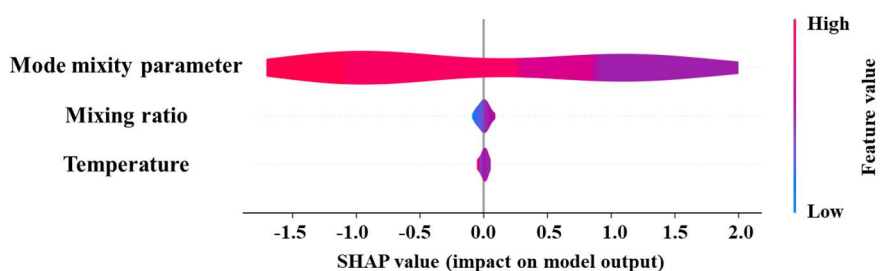
การประยุกต์ใช้แนวทางแบบจำลองหลายระดับความเที่ยงตรงซึ่งนำข้อมูลจากการทำนายเบื้องต้นด้วยเกณฑ์การแตกหักที่มีความแม่นยำต่ำกว่ามาใช้เสริมคุณลักษณะของข้อมูลเที่ยงตรงสูง พบว่าสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของแบบจำลองอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะในช่วงที่มีข้อมูลฝึกสอนแบบจำลองจำนวนน้อย ซึ่งสะท้อนจากค่า R^2 ที่เพิ่มสูงขึ้น และค่า MSE ที่ลดลงอย่างสม่ำเสมอเมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองความเที่ยงตรงเดียวที่ใช้ข้อมูลในปริมาณเท่ากัน ผลการทำนายดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า การใช้ข้อมูลหลายระดับความเที่ยงตรงไม่เพียงแต่ช่วยให้แบบจำลองสามารถเรียนรู้ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้นในสถานการณ์ที่ข้อมูลมีอย่างจำกัด แต่ยังเสนอแนวคิดด้านพัฒนาแบบจำลองที่มีความยืดหยุ่นและช่วยลดต้นทุนการได้มาซึ่งข้อมูล เหมาะแก่การประยุกต์ใช้ทางด้านวิศวกรรมที่ต้องอาศัยข้อมูลจากทั้งทางทฤษฎีและการทดลองจริงควบคู่กันด้วย

4.3.2.3 การวิเคราะห์ความไวของแบบจำลอง (Model sensitivity analysis)

การวิเคราะห์ความไวของแบบจำลอง (Model sensitivity analysis) เพื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงค่าปัจจัยรับเข้าส่งผลกระทบต่อผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองมากนักเพียงใด งานวิจัยนี้จะใช้วิธีการ SHapley Additive exPlanations (SHAP) เป็นวิธีในการอธิบายผลการทำนายของแบบจำลองเชิงลึก ซึ่งถูกเสนอโดยคุณ Shapley [77] เพื่อวิเคราะห์อิทธิพลของแต่ละปัจจัยที่มีต่อผลการทำนายของแบบจำลอง โดยผล SHAP ของค่าความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระรูปแบบที่ 1 และค่าความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระรูปแบบที่ 3 แสดงดังรูปที่ 4.30 และรูปที่ 4.31 ตามลำดับ



รูปที่ 4.30 ค่า SHAP ของความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระรูปแบบที่ 1



รูปที่ 4.31 ค่า SHAP ของความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระรูปแบบที่ 3

จากการวิเคราะห์ค่าความสำคัญของปัจจัยรับเข้าด้วยค่า SHAP ซึ่งเป็นวิธีการอธิบายผลกระทบของปัจจัยรับเข้าต่อผลการทำนายของแบบจำลอง เมื่อค่า SHAP มีค่าห่างจาก 0 มาก (ทั้งทางบวกและทางลบ) บ่งชี้ว่าปัจจัยนั้นมีอิทธิพลสูงต่อการทำนายผลของแบบจำลอง ขณะที่ค่าเข้าใกล้ 0 (ทั้งทางบวกและทางลบ) บ่งชี้ว่าปัจจัยนั้นมีอิทธิพลต่ำต่อการทำนายผลของแบบจำลอง เมื่อพิจารณาค่า SHAP ของความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระรูปแบบที่ 1 และ 3 พบว่า พารามิเตอร์การรับภาระแบบผสมมีอิทธิพลต่อผลลัพธ์มากที่สุดในทั้งสองกรณี โดยแสดงช่วงค่า SHAP ที่กว้างที่สุด ในกรณีของค่า K_I มีช่วง SHAP ที่ประมาณ -1.5 ถึง +1.2 ขณะที่ในกรณีของค่า K_{III} ช่วงค่า SHAP อยู่ระหว่าง -1.5 ถึง +2.0 ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าแบบจำลองมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยพารามิเตอร์การรับภาระแบบผสมสูงทั้งในทางบวกและทางลบ เมื่อพิจารณาจากสีในกราฟ SHAP ซึ่งสามารถบอกถึงทิศทางของผลกระทบของแต่ปัจจัย โดยพบว่าค่าปัจจัย (Feature value) ที่สูง (แสดงด้วยสีม่วงแดง) สัมพันธ์กับค่า SHAP ที่เชิงบวกในกรณีของ K_I ซึ่งหมายความว่า เมื่อค่าของพารามิเตอร์การรับภาระแบบผสมเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าความต้านทานการแตกหักรูปแบบที่ 1 ที่ทำนายได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในกรณีของ K_{III} ค่าปัจจัยที่สูง (แสดงด้วยสีแดง) ปรากฏในบริเวณของค่า SHAP เชิงลบ สะท้อนให้เห็นว่า เมื่อพารามิเตอร์การรับภาระแบบผสมมีค่าสูงขึ้นจะส่งผลให้ค่าความต้านทานการแตกหักรูปแบบที่ 3 ที่ทำนายได้มีแนวโน้มลดลง สำหรับปัจจัยสัดส่วนการผสม ในกรณีของค่า K_I แสดงค่า SHAP อยู่ในช่วงประมาณ -0.5 ถึง +0.8 ซึ่งอยู่ในระดับปานกลางเมื่อเทียบกับพารามิเตอร์การรับภาระแบบผสม แสดงให้เห็นว่า แม้ว่าปัจจัยสัดส่วนการผสมจะไม่ใช่อปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบต่อแบบจำลอง แต่ยังคงมีความสำคัญต่อผลการทำนายค่าความต้านทานรูปแบบที่ 1 ของแบบจำลอง และเมื่อพิจารณาพบว่า ค่าปัจจัยที่สูง (แสดงด้วยสีม่วงแดง) ปรากฏในบริเวณของค่า SHAP เชิงบวก สะท้อนให้เห็นว่าเมื่อสัดส่วนการผสมมีค่าสูงขึ้นจะส่งผลให้ค่าความต้านทานการแตกหักรูปแบบที่ 1 ที่ทำนายได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ขณะที่ในกรณีของ K_{III} ค่า SHAP ของปัจจัยสัดส่วนการผสมอยู่ในช่วงใกล้ศูนย์ ประมาณ -0.1 ถึง +0.1 บ่งชี้ว่าสัดส่วนการผสมมีผลกระทบต่อผลการทำนายค่าความต้านทานรูปแบบที่ 3 ที่ค่อนข้างต่ำ