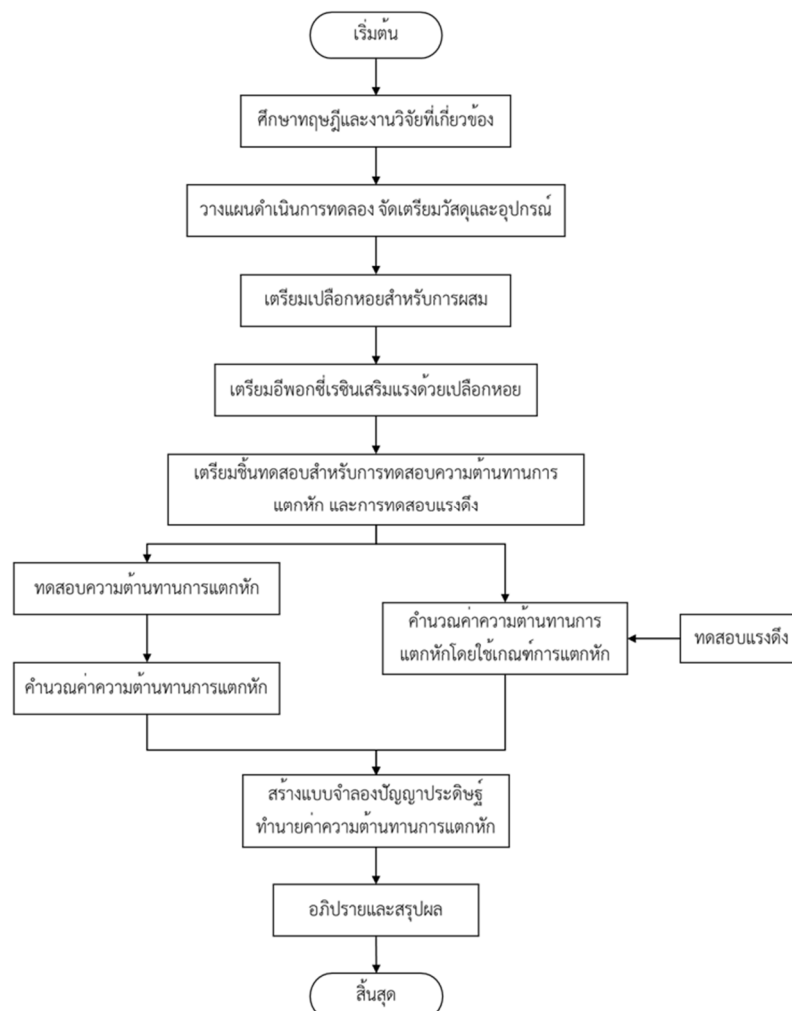


บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ดำเนินการศึกษาเพื่อสร้างสมการทำนายผลความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบผสม 1 และ 3 ของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเปลือกหอยแมลงภู่นำโดยอิทธิพลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาเปลือกหอยแมลงภู่นำและสัดส่วนการผสมเปลือกหอยแมลงภู่นำด้วยวิธีปัญหาประดิษฐ์ ซึ่งลำดับขั้นตอนทั้งหมดในการดำเนินงานวิจัยสามารถสรุปได้ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนผังขั้นตอนการดำเนินงานงานวิจัย

3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย (Materials)

3.1.1.1 เปลือกหอยแมลงภู่

3.1.1.2 อีพอกซีชนิด Bisphenol-A Diglycidyl Ether (BADGE) และสารช่วยให้แข็งตัว (Hardener) ชนิด Aliphatic amine

3.1.1.3 ซิลิโคน (Silicone)

3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.2.1 เครื่องบด (Crushing machine) ยี่ห้อ Fritsch รุ่น Fritsch D-55734

3.1.2.2 เครื่องร่อนและตะแกรกร่อน (Sieve shaker machine) ยี่ห้อ Fritsch รุ่น A-3 Pro

3.1.2.3 ตู้อบลมร้อน (Hot air oven) สำหรับการเตรียมอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเปลือกหอยแมลงภู่

3.1.2.4 เตาเผาวัสดุ (High temperature furnaces) ยี่ห้อ Carbolite สำหรับเผาเปลือกหอยแมลงภู่

3.1.2.5 เครื่องกัด (Milling machine) สำหรับการเตรียมชิ้นทดสอบให้ได้ขนาดและรูปร่างที่ต้องการ

3.1.2.6 เครื่องทดสอบเนกประสงค์ (Universal Testing Machines, UTM) ยี่ห้อ Lloyd รุ่น LD series

3.1.2.7 กล้องจุลทรรศน์ถ่ายภาพและจำลองพื้นผิวแบบ 3 มิติ (3D Measuring Leser Microscope) ยี่ห้อ OLYMPUS รุ่น OLS5100

3.1.2.8 เครื่องวัดขนาดอนุภาคโดยใช้เลเซอร์ (Laser Diffraction Particle Size Analyzer) ยี่ห้อ Horiba รุ่น LA-950V2

3.1.2.9 กล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอ (Stereo-Microscope with integrated camera) ยี่ห้อ Leica รุ่น EZ4W สำหรับถ่ายภาพพื้นผิวการแตกหักของชิ้นทดสอบ

3.1.2.10 เครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์เพื่อศึกษาวัสดุทางการแพทย์แบบผง (Powder x-ray diffractometer: XRD) ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance เพื่อวิเคราะห์หาองค์ประกอบของเปลือกหอยแมลงภู่

3.1.2.11 เครื่องวิเคราะห์ธาตุด้วยการเรืองแสงรังสีเอ็กซ์แบบกระจายพลังงาน (Energy dispersive spectrometer x-ray fluorescence: ED-XRF) ยี่ห้อ Horiba รุ่น XGT-5200 เพื่อวิเคราะห์ธาตุของเปลือกหอยแมลงภู่

3.2 การเตรียมวัสดุ

การเตรียมวัสดุในการศึกษานี้สามารถแบ่งขั้นตอนออกเป็น 2 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ การเตรียมเปลือกหอยแมลงภู่ การเตรียมอิพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเปลือกหอยแมลงภู่ โดยการเตรียมเปลือกหอยแมลงภู่เพื่อใช้ในการเสริมแรงอิพอกซีเรซินนั้นจะอ้างอิงขั้นตอนการเตรียมจากงานวิจัยของคุณ Oladele et al. [21] โดยรายละเอียดขั้นตอนการเตรียมมีดังนี้

3.2.1 การเตรียมเปลือกหอยแมลงภู่

3.2.1.1 นำเปลือกหอยแมลงภู่ล้างด้วยน้ำสะอาดเพื่อขจัดสิ่งสกปรก หลังจากนั้นนำเปลือกหอยแมลงภู่ไปตากแดดให้แห้งเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3.2.1.2 เพื่อศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิในการเผาเปลือกหอยแมลงภู่ นำเปลือกหอยแมลงภู่ไปเผาที่อุณหภูมิที่ต่างกัน ได้แก่ 500, 700 และ 900 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง แสดงดังรูปที่ 3.2

3.2.1.3 หลังการเผาเรียบร้อยแล้วนำเปลือกหอยแมลงภู่ที่ได้ไปบดด้วยเครื่องบด (Crushing machine) ยี่ห้อ Fritsch รุ่น Fritsch D-55734

3.2.1.4 นำเปลือกหอยแมลงภู่ที่ผ่านการบดเรียบร้อยแล้วจากกระบวนการก่อนหน้านี้ไปแยกขนาดด้วยเครื่องร่อนและตะแกรกร่อน (Sieve shaker machine) ยี่ห้อ Fritsch รุ่น A-3 Pro ให้ได้ขนาดเล็กกว่า 150 ไมโครเมตร แสดงดังรูปที่ 3.3

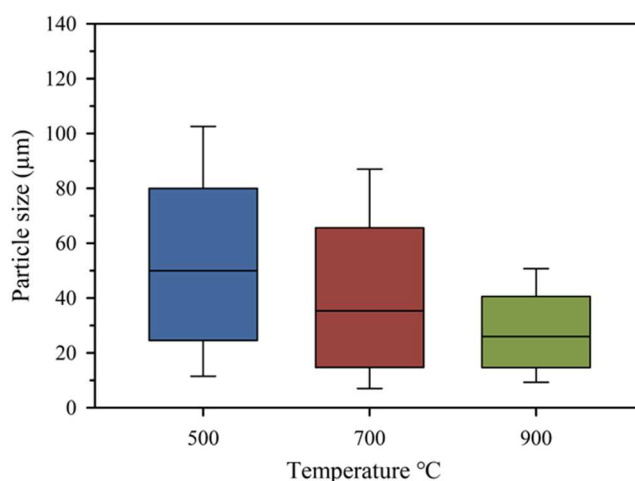
3.2.1.5 หลังจากนั้นบรรจุเปลือกหอยแมลงภู่ที่ผ่านการร่อนใส่ถุงซิปล็อคและเก็บไว้ในตู้ควบคุมความชื้น ทำการสุ่มตัวอย่างเปลือกหอยแมลงภู่ที่ผ่านการบดไปทำการวัดขนาดอนุภาคด้วยเครื่องวัดขนาดอนุภาคโดยใช้เลเซอร์ โดยรูปที่ 3.4 แสดงขนาดของเปลือกหอยแมลงภู่ที่อุณหภูมิเผาต่าง ๆ หลังผ่านการบด



รูปที่ 3.2 การเผาเปลือกหอยแมลงภู่ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ในเตาเผา



รูปที่ 3.3 การนำเปลือกหอยแมลงภู่นำมาเผาด้วยเครื่องร้อนและตะแกรงร้อน



รูปที่ 3.4 ขนาดของเปลือกหอยแมลงภู่นำมาเผาด้วยเครื่องวัดขนาดอนุภาคโดยใช้เลเซอร์

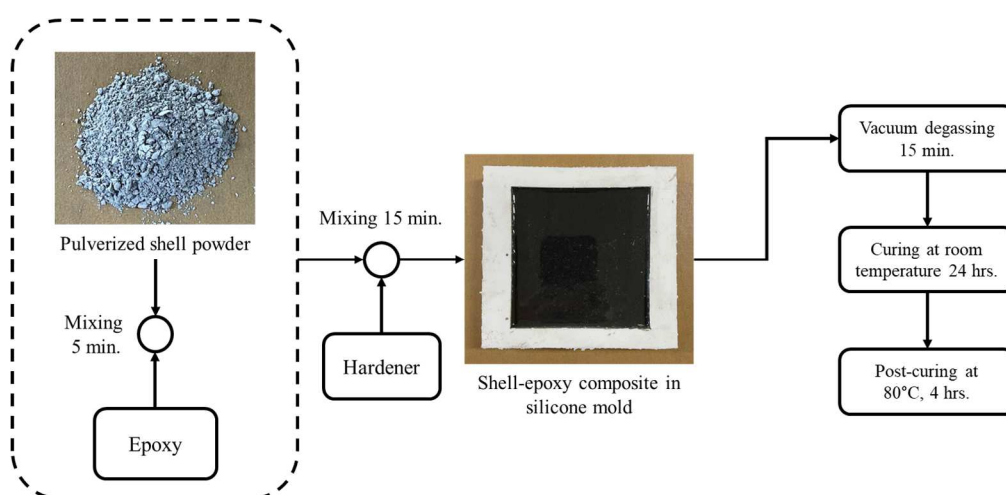
เพื่อศึกษาผลกระทบของช่วงอุณหภูมิต่าง ๆ ที่ใช้ในการเผาต่อองค์ประกอบทางเคมี และโครงสร้างของเปลือกหอยแมลงภู่นำมาเผา เปลือกหอยแมลงภู่นำมาเผาและบดให้ได้ขนาดแล้ว จะถูก สุ่มตัวอย่างเพื่อนำไปวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมี ธาตุ สารประกอบ และ โครงสร้างผลึก โดยจะทำการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุและการเปลี่ยนแปลงของปริมาณธาตุต่าง ๆ ในเปลือกหอยด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุด้วยการเรืองแสงรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน (ED-XRF) ยี่ห้อ Horiba รุ่น XGT-5200 แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ชนิดโรเดียม (Rhodium, Rh) โดยใช้ตัวตรวจจับ ชนิดซิลิคอนฟอสฟอไรต์ (Si-PIN) ซึ่งมีหลักการทำงานคือ เมื่อวัสดุได้รับการยิงด้วยรังสีเอกซ์ พลังงาน จากรังสีจะกระตุ้นอิเล็กตรอนในอะตอมของธาตุให้หลุดออกจากวงโคจรชั้นใน ทำให้อะตอมอยู่ใน สถานะไม่เสถียร จึงเกิดการจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอนใหม่และมีการปล่อยรังสีฟลูออเรสเซนซ์

(Fluorescence) ออกมา ซึ่งแต่ละธาตุจะมีความยาวคลื่นและพลังงานเฉพาะตัวของแต่ละธาตุ เครื่องจะทำการตรวจจับสัญญาณเหล่านี้เพื่อวิเคราะห์ชนิดและปริมาณของธาตุได้อย่างแม่นยำ [44] การวิเคราะห์เปลือกหอยจะดำเนินการในรูปแบบการวิเคราะห์เฉพาะจุด (Point analysis) โดยกำหนดขนาดลำแสงที่ 1.2 มิลลิเมตร กำหนดเวลาในการวัดที่ 30 วินาทีต่อจุด ทำการวัดเป็นเวลา 10 นาที

สำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของเปลือกหอยเพื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของเฟสและโครงสร้างของผลึกจะทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) โดยอาศัยหลักการที่เมื่อรังสีเอกซ์ (X-ray) ตกกระทบกับระนาบผลึกของวัสดุภายใต้มุมที่เหมาะสมแสงบางส่วนจะเกิดการเลี้ยวเบนและสะท้อนกลับในทิศทางต่าง ๆ หลังจากวิเคราะห์ผลที่ได้จากการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ จะสามารถระบุชนิดของผลึก สารประกอบ หรือการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกที่เกิดขึ้นได้ [45] การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของเปลือกหอยจะดำเนินการด้วยเครื่อง XRD ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance โดยใช้แหล่งกำเนิดรังสี $\text{Cu-K}\alpha$ (Copper K-alpha) ที่แรงดัน 40 keV และกระแส 40 mA ช่วงมุม 2θ ที่ใช้ในการตรวจสอบอยู่ที่ 20 ถึง 70 องศา ความละเอียดของการขยับมุมในแต่ละขั้นตอน (Increment) ที่ 0.02 องศา และระยะเวลาเก็บข้อมูลต่อจุด (Time per step) เท่ากับ 0.5 วินาที

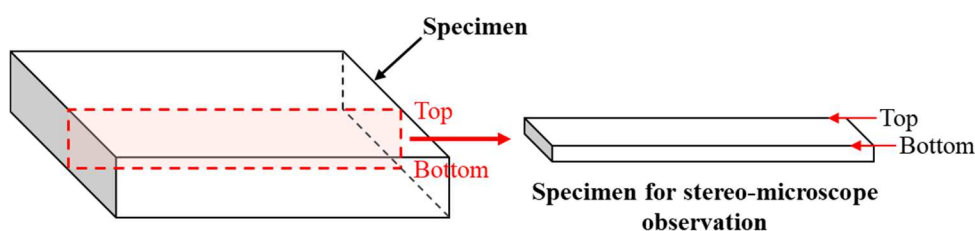
3.2.2 การเตรียมอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเปลือกหอยแมลงภู่

การเตรียมอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเปลือกหอยแมลงภู่ที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะเป็นชนิด Bisphenol-A Diglycidyl Ether (BADGE) และสารช่วยให้แข็งตัว (Hardener) ชนิด Aliphatic amine รุ่น 021 จากบริษัท เอสเจ สีนธูปันท์เทรดดิ้ง จำกัด ขั้นตอนการผสมอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเปลือกหอยแมลงภู่สามารถสรุปเป็นได้ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ขั้นตอนการผสมอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเปลือกหอยแมลงภู่

- 3.2.2.1 ทำการซังน้ำหนักของเปลือกหอยแมลงภู่น้ำตามสัดส่วนการผสมที่ออกแบบไว้
- 3.2.2.2 เตรียมอีพอกซีเรซินและสารช่วยให้แข็งตัวในสัดส่วนการผสม 2 ต่อ 1 (อีพอกซีเรซินต่อสารช่วยให้แข็งตัว)
- 3.2.2.3 ทำการผสมเปลือกหอยแมลงภู่น้ำที่เตรียมไว้เข้ากับอีพอกซีเรซิน และกวนส่วนผสมด้วยมือเป็นเวลา 5 นาทีเพื่อให้สารทั้งสองชนิดผสมเป็นเนื้อเดียวกัน
- 3.2.2.4 เมื่อกวนส่วนผสมในขั้นตอนก่อนหน้าครบตามเวลาที่กำหนด จึงทำการผสมสารช่วยให้แข็ง และทำการกวนผสมต่อเป็นเวลาอีก 15 นาที จากนั้นทำการเทอีพอกซีเรซินที่ผสมกับเปลือกหอยแมลงภู่น้ำเรียบร้อยแล้วลงในแม่พิมพ์ซิลิโคนที่เตรียมไว้
- 3.2.2.5 นำแม่พิมพ์ซิลิโคนที่เทอีพอกซีเรซินใส่เรียบร้อยแล้วตามขั้นตอนที่ 3.2.2.4 เข้าเครื่องสุญญากาศเป็นเวลา 15 นาที เพื่อกำจัดฟองอากาศที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนการกวนผสม
- 3.2.2.6 เมื่อครบเวลาที่กำหนดตามขั้นตอนที่ 3.2.2.5 นำแม่พิมพ์ออกจากเครื่องสุญญากาศและพักให้อีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยอนุภาคเปลือกหอยแมลงภู่น้ำแข็งตัวที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นจึงนำเข้าสู่ตู้อบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง
- 3.2.2.7 เมื่อครบเวลาตามขั้นตอนที่ 3.2.2.6 นำอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยอนุภาคเปลือกหอยแมลงภู่น้ำออกจากตู้อบร้อน ทำการพักไว้ให้เย็นตัวจึงแกะออกจากแม่พิมพ์ซิลิโคนเพื่อเตรียมตัดเป็นชิ้นงานทดสอบต่อไป
- ขั้นตอนการเตรียมอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเปลือกหอยแมลงภู่น้ำนั้น อาจมีฟองอากาศเกิดขึ้นในระหว่างการผสม จึงทำการแก้ไขปัญหาดังกล่าวด้วยการนำวัสดุผสมเข้าเครื่องสุญญากาศ และเพื่อยืนยันว่าในขั้นตอนการผสม เปลือกหอยที่ทำส่วนผสมในอีพอกซีเรซินมีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นทดสอบ จึงทำการเตรียมอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเปลือกหอยแมลงภู่น้ำเพื่อศึกษาการกระจายตัวของวัสดุเสริมแรงด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอ ลักษณะการเตรียมชิ้นงานแสดงดังรูปที่ 3.6

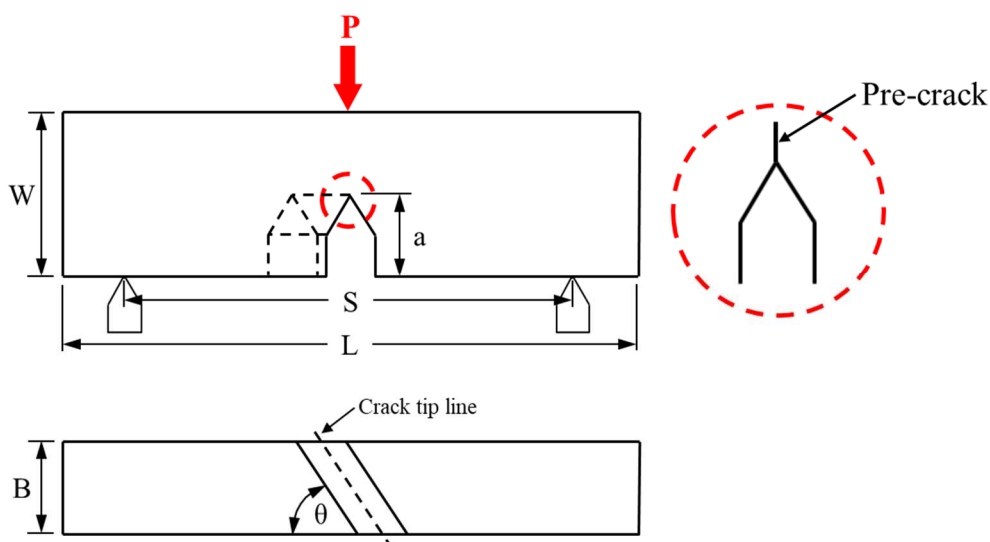


รูปที่ 3.6 การเตรียมชิ้นงานศึกษาการกระจายตัวของเปลือกหอยด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอ

3.3 การทดสอบความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบผสม 1 และ 3

3.3.1 การเตรียมชิ้นทดสอบทดสอบความต้านทานการแตกหัก

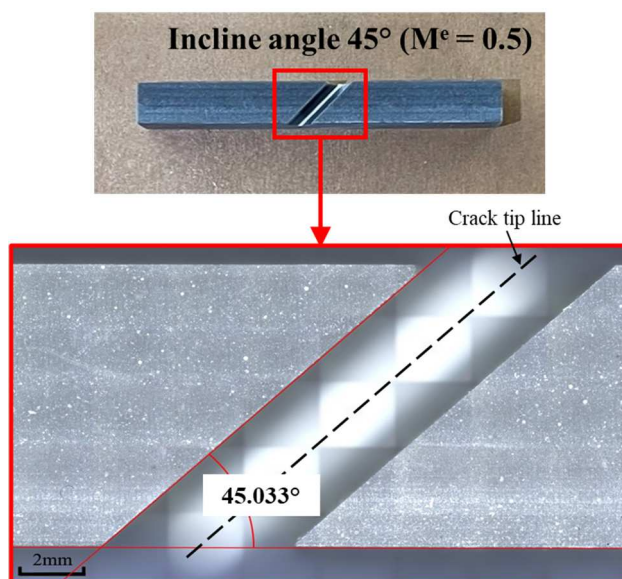
การเตรียมชิ้นทดสอบความต้านทานการภายใต้ภาระแบบผสม 1 และ 3 ทำการอ้างอิงขนาดและรูปร่างชิ้นทดสอบจากงานวิจัยของคุณ Mohamad Alsaadi et al. [35] โดยใช้ชิ้นทดสอบแบบมีรอยร้าวข้างเดียวรับแรงกดดัด (Single edge notched bend, SENB) ซึ่งการเตรียมชิ้นทดสอบนำอิพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเปลือกหอยแมลงภู่จากหัวข้อ 3.2.3.7 กัดให้ได้รูปร่างและขนาดดังรูปที่ 3.7 ด้วยเครื่องกัดแบบควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ (Milling CNC) จากนั้นทำการเตรียมรอยบาก (Notch) และเตรียมรอยร้าวเริ่มต้น (Pre-crack) โดยใช้ใบมีดกัดเตอร์ตามมาตรฐาน ASTM D5045 [46] เมื่อเตรียมส่วนของรอยบากและรอยร้าวเริ่มต้นเสร็จสิ้น จึงนำชิ้นงานทดสอบไปวัดความลึกรอยร้าวเริ่มต้น และมุมรอยร้าวเริ่มต้นด้วยกล้องจุลทรรศน์ถ่ายภาพและจำลองพื้นผิวแบบ 3 มิติ โดยลักษณะการวัดแสดงดังรูปที่ 3.8 และรูปที่ 3.9



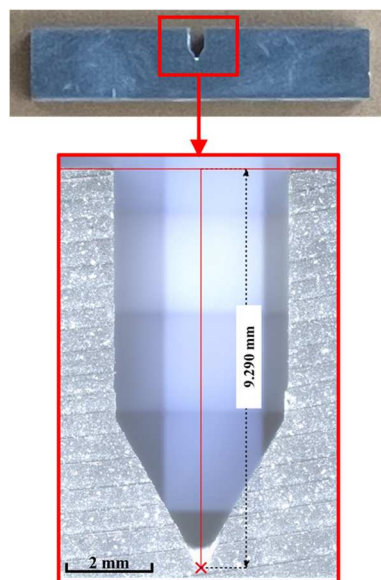
รูปที่ 3.7 รูปร่างของชิ้นทดสอบความต้านทานการแตกหัก

ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงขนาดชิ้นงานทดสอบความต้านทานการแตกหัก

ตัวแปร	ความหมาย	ขนาด	หน่วย
L	ความยาวชิ้นทดสอบ (Length)	88±1	มิลลิเมตร
W	ความกว้างชิ้นทดสอบ (Width)	20±0.50	มิลลิเมตร
B	ความหนาชิ้นทดสอบ (Thickness)	10±0.50	มิลลิเมตร
S	ระยะห่างระหว่างพินรองรับชิ้นทดสอบ (Length of span)	80	มิลลิเมตร
a	ความลึกรอยร้าวเริ่มต้น (Crack length)	9±0.50	มิลลิเมตร
θ	มุมรอยร้าวเริ่มต้น (Crack inclination angle)	30, 45, 75, 90±1	องศา



รูปที่ 3.8 การวัดมุมรอยร้าวเริ่มต้นด้วยกล้องจุลทรรศน์ถ่ายภาพและจำลองพื้นผิวแบบ 3 มิติ



รูปที่ 3.9 การวัดความลึกรอยร้าวเริ่มต้นด้วยกล้องจุลทรรศน์ถ่ายภาพและจำลองพื้นผิวแบบ 3 มิติ

เพื่อศึกษาผลกระทบของปัจจัยหลัก 3 ปัจจัยต่อความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบผสม 1 และ 3 ของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเปลือกหอยแมลงภู่ จึงทำการออกแบบการทดลอง โดยปัจจัยที่ทำการศึกษา ได้แก่ อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาเปลือกหอยแมลงภู่ สัดส่วนการผสมเปลือกหอยแมลงภู่ในวัสดุผสม และมุมของรอยร้าวเริ่มต้น (Crack inclination angle, θ) ซึ่งส่งผล

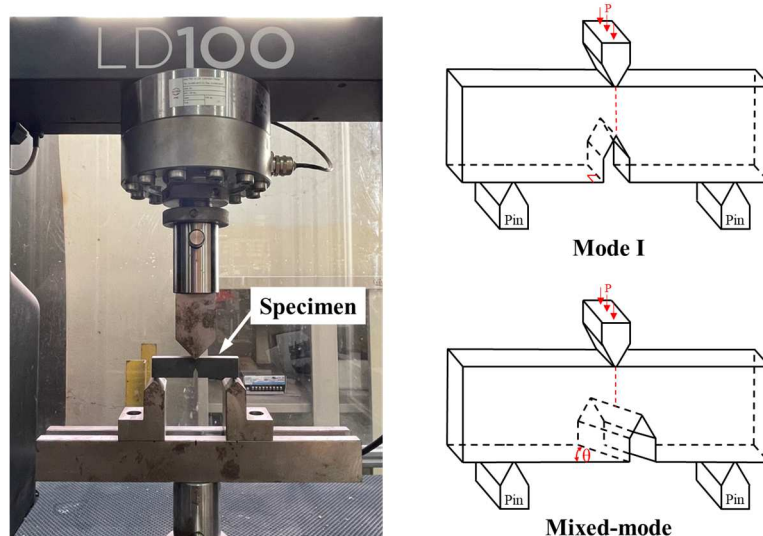
ต่อสัดส่วนการรับภาระแบบผสม 1 และ 3 หรือที่เรียกว่า พารามิเตอร์การรับภาระแบบผสม (Mode mixity parameter, M^e) โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ (General full factorial design) ด้วยโปรแกรม Minitab ที่จำนวนการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง ระดับของแต่ละปัจจัย ที่ทำการศึกษาก็จะแสดงไว้ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ตารางแสดงปัจจัยการออกแบบการทดสอบความต้านทานการแตกหัก

ปัจจัย	ระดับปัจจัย			
	1	2	3	4
อุณหภูมิการเผาเปลือกหอยแมลงภู (องศาเซลเซียส)	500	700	900	-
สัดส่วนการผสม (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	10	20	30	-
มุมของรอยร้าวเริ่มต้น (องศา)	30	45	75	90

3.3.2 การทดสอบความต้านทานการแตกหักและการคำนวณ

การทดสอบความต้านทานการแตกหักของวัสดุอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเปลือกหอยจะทำการทดสอบโดยการรับภาระเป็นลักษณะกดตัด 3 จุด (Three point bending test) ด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal testing machines, UTM) ที่อัตราภาระเท่ากับ 2 มิลลิเมตร ต่อนาที การติดตั้งขึ้นทดสอบและลักษณะการทดสอบความต้านทานการแตกหักแสดงดังรูปที่ 3.10 จนกระทั่งขึ้นงานทดสอบเกิดการแตกหักหรือขาดออกจากกัน โดยในแต่ละเงื่อนไขการทดสอบจะทำการทดสอบซ้ำ 3 ครั้ง และทำการเก็บข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างระยะยืดและภาระตลอดการทดสอบ เพื่อไปคำนวณหาความต้านทานการแตกหักต่อไป



รูปที่ 3.10 ลักษณะการทดสอบความต้านทานการแตกหักบนเครื่องทดสอบอเนกประสงค์

ความต้านทานการแตกหักภายใต้การรับภาระแบบผสม 1 และ 3 เป็นการรับภาระในรูปแบบที่ผสมระหว่างภาระรูปแบบ 1 ที่กระทำในทิศทางการเปิดรอยร้าว (Opening mode) และภาระรูปแบบ 3 ที่กระทำในลักษณะการฉีก (Tearing mode) หรือรูปแบบการเฉือนนอกระนาบรอยร้าว (Out-of-plane shear mode) โดยมีค่าพารามิเตอร์การรับภาระแบบผสม (Mode mixity parameter, M^e) ที่แสดงถึงสัดส่วนการรับภาระระหว่างรูปแบบ 1 และรูปแบบ 3 สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (12) โดยเมื่อค่า M^e เท่ากับ 0 หมายความว่าชิ้นงานทดสอบรับภาระรูปแบบที่ 3 เพียงรูปแบบเดียว ค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 หมายความว่าชิ้นงานทดสอบรับภาระแบบผสมรูปแบบที่ 1 และรูปแบบที่ 3 และเมื่อค่าเท่ากับ 1 หมายความว่าชิ้นงานทดสอบรับภาระรูปแบบที่ 1 เพียงรูปแบบเดียว และในงานวิจัยนี้จะใช้ค่าองค์ประกอบความเข้มของความเค้น (Stress intensity factor, K_A) เป็นตัวแทนของค่าความต้านทานการแตกหักที่เกิดขึ้นกับวัสดุอีพอกซีเรซิน ซึ่งจะแยกพิจารณาตามรูปแบบภาระรูปแบบที่ 1 (K_I) และภาระรูปแบบที่ 3 (K_{III}) สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (15) และ (16) ตามลำดับ

$$M_{I/III}^e = \frac{2}{\pi} \tan^{-1} \frac{K_I}{K_{III}} \quad (12)$$

$$K_A = \left(\frac{P}{BW^{1/2}} \right) f \left(\frac{a}{W} \right) \quad (13)$$

$$f \left(\frac{a}{W} \right) = 6 \left(\frac{a}{W} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{\left[1.99 - \left(\frac{a}{W} \right) \left(1 - \frac{a}{W} \right) \left(2.15 - 3.93 \frac{a}{W} + 2.7 \left(\frac{a}{W} \right)^2 \right) \right]}{\left(1 - 2 \frac{a}{W} \right) \left(1 - \frac{a}{W} \right)^{\frac{1}{2}}} \quad (14)$$

$$K_I = K_A \sin^2 \theta \quad (15)$$

$$K_{III} = K_A \sin \theta \cos \theta \quad (16)$$

เมื่อ	$f \left(\frac{a}{W} \right)$	แทนพารามิเตอร์ความสัมพันธ์ที่ขึ้นกับสัดส่วนความยาวรอยร้าวเริ่มต้นต่อความกว้างชิ้นทดสอบ
	P	แทนภาระสูงสุดที่เกิดขึ้นกับชิ้นทดสอบ
	a	แทนความยาวรอยร้าวเริ่มต้นของชิ้นทดสอบ

W	แทนความกว้างชั้นทดสอบ
B	แทนความหนาชั้นทดสอบ
θ	แทนมุมรอยร้าวเริ่มต้น

จากสมการที่ (13)-(16) ความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบผสม 1 และ 3 จะขึ้นอยู่กับความหนา และความกว้างของชิ้นงานทดสอบสามารถทำการวัดขนาดได้ก่อนการทดสอบ ภาระสูงสุดที่เกิดกับชิ้นงานทดสอบเป็นค่าที่ได้จากการทดสอบ และมุมรอยร้าวเริ่มต้น ซึ่งเป็นตัวแปรที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์การรับภาระแบบผสม มุมของรอยร้าวเริ่มต้นและค่า M^e ต่าง ๆ ที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้จะแสดงไว้ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ตารางแสดงมุมของรอยร้าวเริ่มต้นที่ค่า M^e ต่าง ๆ

Mode	M^e	มุมรอยร้าวเริ่มต้น ($^{\circ}$)
I/III	0.33	30
I/III	0.50	45
I/III	0.83	75
I	1.00	90

3.4 การทำนายความต้านทานการแตกหัก

3.4.1 การทำนายด้วยเกณฑ์การแตกหัก (Fracture criterion)

การศึกษาและอธิบายพฤติกรรมเมื่อวัสดุที่มีรอยร้าวเกิดภาระกระทำจากภายนอกได้ มีการประยุกต์ใช้ความสัมพันธ์ของความเครียด ความเค้น และอัตราการปลดปล่อยพลังงาน เพื่อคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับกลศาสตร์การแตกหัก และสามารถใช้ในการทำนายความต้านทานการแตกหักของวัสดุได้ โดยจะเรียกสมการสำหรับทำนายความต้านทานการแตกหักนี้ว่า เกณฑ์การแตกหัก (Fracture criterion) ซึ่งเกณฑ์การแตกหักที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายสำหรับการทำนายความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบผสม 1 และ 3 ของวัสดุ ทฤษฎีเบื้องต้นของเกณฑ์การแตกหักที่ใช้ในงานวิจัยนี้อธิบายไว้ดังต่อไปนี้

3.4.1.1 Maximum tangential stress criterion (MTS)

เกณฑ์การแตกหักแบบ Maximum tangential stress criterion หรือ MTS [47] ซึ่งมีหลักการ คือ การเติบโตของรอยร้าวจะเริ่มต้นขึ้นเมื่อค่าความเค้นสัมผัสถึงค่าระยะวิกฤตจากปลายรอยร้าว และค่าระยะวิกฤตในทิศทางของความเค้นสัมผัส (Tangential stress, $\sigma_{\theta\theta}$) สูงสุดรอบปลายรอยร้าว ที่ทำให้วัสดุเกิดการเสียหาย สามารถอธิบายได้ดังสมการที่ (17)

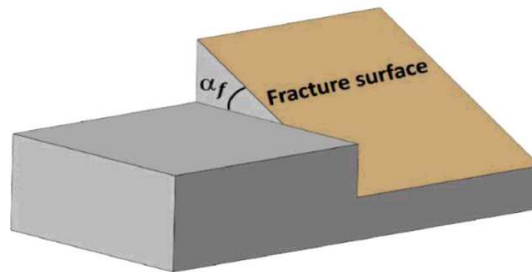
$$\sigma_{\alpha\alpha} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos^3 \frac{\theta}{2} \cos^2 \alpha - \frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \sin 2\alpha + \frac{2\nu K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \sin^2 \alpha \quad (17)$$

เมื่อ	r	แทนระยะถึงปลายรอยร้าวในพิกัดเชิงขั้ว (Polar coordinate)
	θ	แทนมุมที่รอยร้าวเริ่มขยายตัวโดยวัดจากทิศทางของรอยร้าวเริ่มต้น
	α	มุมรอยร้าวเริ่มต้น (Incline crack angle)
	ν	อัตราส่วนของปัวซอง (Poisson's ratio)

โดยมุมการวางแนวรอยร้าวเมื่อต้องการให้ค่าความเค้นสัมผัสมีค่าสูงสุด (α_f) แสดงดังรูปที่ 3.11 และเกิดการแตกหักภายใต้ภาระแบบผสม 1 และ 3 สามารถหาได้จากสมการที่ (18)

$$\alpha_f = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left[\frac{2K_{III}}{(2\nu-1)K_I} \right] \quad (18)$$

$$\frac{K_I}{K_{Ic}} \cos^2 \alpha_f - \frac{K_{III}}{K_{Ic}} \sin 2\alpha_f + \frac{2\nu K_I}{K_{Ic}} \sin^2 \alpha_f = 1 \quad (19)$$



รูปที่ 3.11 ลักษณะมุมการวางแนวรอยร้าวเมื่อต้องการให้ค่าความเค้นสัมผัสมีค่าสูงสุด (α_f)
(ที่มา : (Aliha, M et al., 2016))

3.4.1.2 Local strain energy density criterion (Local SED)

เกณฑ์การแตกหักแบบ Local strain energy density หรือ Local SED พัฒนามาจากเกณฑ์การแตกหัก SED ที่ทำการศึกษาความหนาแน่นของพลังงานความเครียด (Strain energy density) รอบปลายรอยร้าวของวัสดุ [48] โดยหลักการ คือ เมื่อความหนาแน่นของพลังงานความเครียดเฉลี่ยเหนือปริมาตรควบคุมถึงค่าพลังงานความเครียดวิกฤติ (Critical strain energy,

W_c) วัสดุจะเกิดการแตกหัก โดยปริมาตรควบคุมจะขึ้นอยู่กับลักษณะรอยร้าวเริ่มต้นและสมบัติของวัสดุ เกณฑ์การแตกหักแบบ Local SED สามารถอธิบายได้ดังสมการที่ (20)

$$\frac{\overline{W}_I}{W_{Ic}} + \frac{\overline{W}_{III}}{W_{IIIc}} = 1 \quad (20)$$

เมื่อ W_{Ic} แทนความหนาแน่นของพลังงานความเครียดวิกฤตการรับภาระรูปแบบที่ 1 จากสมการที่ (21)

W_{IIIc} แทนความหนาแน่นของพลังงานความเครียดวิกฤตการรับภาระรูปแบบที่ 3 จากสมการที่ (22)

$\overline{W}_I$ แทนความหนาแน่นของพลังงานความเครียดของการรับภาระรูปแบบที่ 1 จากสมการที่ (23)

$\overline{W}_{III}$ แทนความหนาแน่นของพลังงานความเครียดของการรับภาระรูปแบบที่ 3 จากสมการที่ (24)

$$W_{Ic} = \frac{\sigma_t^2}{2E} \quad (21)$$

$$W_{IIIc} = \frac{\tau_t^2}{2G} \quad (22)$$

เมื่อ σ_t แทนความเค้นแรงดึงสูงสุดของวัสดุ

E แทนโมดูลัสของสภาพยืดหยุ่น (Modulus of elasticity)

τ_t แทนความเค้นแรงเฉือนของวัสดุ

G แทนค่าโมดูลัสแรงเฉือนของวัสดุ

$$\overline{W}_I = \frac{e_1}{R_{Ic}} \frac{K_I^2}{E} \quad (23)$$

$$\overline{W}_{III} = \frac{e_3}{R_{IIIc}} \frac{K_{III}^2}{E} \quad (24)$$

เมื่อ e_1 และ e_3 มีค่าเท่ากับ 0.119 และ 0.414 ตามลำดับ ซึ่งได้จากงานวิจัยของคุณ Filippo Berto et al. [48]

R_{1c} และ R_{3c} แทนรัศมีของปริมาตรควบคุมตามการรับภาระรูปแบบที่ 1 และ 3 ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (32) และ (33) ตามลำดับ

$$R_{1c} = 2e_1 \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_t} \right)^2 = \frac{(1+\nu)(5-8\nu)}{4\pi} \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_t} \right)^2 \quad (25)$$

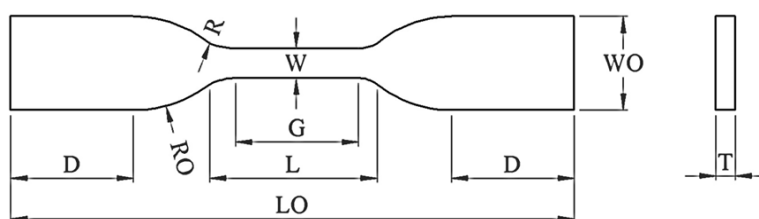
$$R_{3c} = \frac{e_3}{1+\nu} \left(\frac{K_{IIIc}}{\tau_t} \right)^2 \quad (26)$$

เมื่อ ν อัตราส่วนของปัวซอง (Poisson's ratio) เท่ากับ 0.33

เพื่อทำนายค่าความต้านทานการแตกหักโดยใช้เกณฑ์การแตกหัก จำเป็นต้องทราบค่าความความเค้นแรงดึงสูงสุดของ โมดูลัสของสภาพยืดหยุ่น ความเค้นแรงเฉือนของ และโมดูลัสแรงเฉือนของวัสดุ ซึ่งหาได้จากการทดสอบแรงดึง ดังนั้นงานวิจัยนี้จะทำการทดสอบแรงดึง โดยการเตรียมชิ้นทดสอบและขั้นตอนการทดสอบแรงดึงจะแสดงในหัวข้อถัดไป

3.4.1.3 การทดสอบแรงดึง (Tensile testing)

การเตรียมชิ้นทดสอบแรงดึงและการทดสอบแรงดึง (Tensile testing) อ้างอิงรูปร่างและขนาดชิ้นงานทดสอบ เงื่อนไขการทดสอบ และการติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบตาม มาตรฐานการทดสอบแรงดึง ASTM D638 [49] ซึ่งเป็นมาตรฐานที่ใช้สำหรับการทดสอบแรงดึงของ วัสดุประเภทพอลิเมอร์ โดยชิ้นงานทดสอบแรงดึงจะทำเตรียมจากอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยอนุภาค เปลือกหอยแมลงภู่มักจากหัวข้อ 3.2.3.7 ให้ได้รูปร่างและขนาดของชิ้นงานทดสอบแรงดึงตามที่แสดงดัง รูปที่ 3.12 และตารางที่ 3.4



รูปที่ 3.12 รูปร่างและขนาดชิ้นงานทดสอบแรงดึง

ตารางที่ 3.4 ตารางแสดงขนาดของชิ้นงานทดสอบแรงดึง

ตัวแปร	ความหมาย	ขนาด	หน่วย
W	ความกว้างส่วนคอคอด (Width of narrow section)	6 ± 0.50	มิลลิเมตร
L	ความยาวส่วนคอคอด (Length of narrow section)	33 ± 0.50	มิลลิเมตร
WO	ความกว้างทั้งหมด (Width overall)	19 ± 6.40	มิลลิเมตร
LO	ความยาวทั้งหมด (Length overall)	115*	มิลลิเมตร
G	ความยาวเกจ (Gage length)	25 ± 0.13	มิลลิเมตร
D	ความยาวส่วนจับยึด (Length of grips section)	25 ± 5.00	มิลลิเมตร
R	รัศมีส่วนโค้ง (Radius of fillet)	14 ± 1.00	มิลลิเมตร
RO	รัศมีส่วนนอก (Outer radius)	25 ± 1.00	มิลลิเมตร
T	ความหนา (Thickness)	4**	มิลลิเมตร

*มาตรฐานกำหนดความยาวทั้งหมด (Length overall, LO) ไว้ที่ 115 มิลลิเมตรขึ้นไป (ไม่กำหนดความยาวสูงสุด)

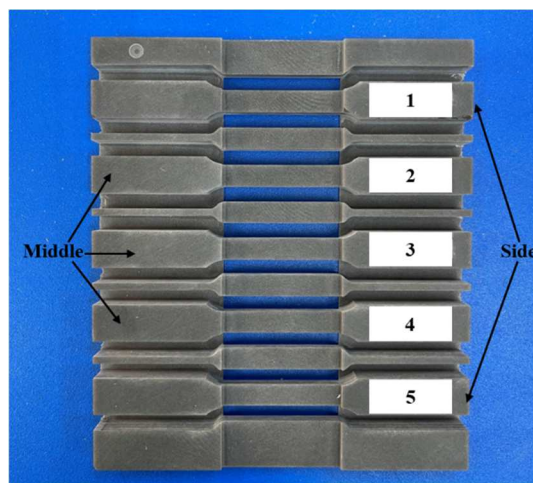
**สำหรับชิ้นงานทดสอบแรงดึง Type IV กำหนดความหนา (Thickness) ไว้ไม่เกิน 4 มิลลิเมตร

ทำการทดสอบแรงดึงโดยให้อัตราการรับภาระ (Loading rate) ที่ 2 มิลลิเมตรต่อนาที ทำการทดสอบซ้ำ 5 ครั้งในแต่ละเงื่อนไขการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal testing machines, UTM) ยี่ห้อ Lloyd รุ่น LD series กำลังการทดสอบ 100 กิโลนิวตัน การให้ภาระจะดำเนินไปจนกระทั่งชิ้นงานทดสอบเกิดการแตกหักหรือขาดออกจากกัน ระหว่างการทดสอบจะทำการเก็บบันทึกข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างระยะยืดและภาระเพื่อไปคำนวณหาความเค้นแรงดึงและค่าต่าง ๆ ที่ใช้ในการทำนายความต้านทานการแตกหักด้วยเกณฑ์การแตกหักต่อไป เงื่อนไขการทดสอบจะใช้ออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบไป เช่นเดียวกับการออกแบบการทดลองเพื่อทดสอบความต้านทานการแตกหักแสดงดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 ตารางแสดงปัจจัยการออกแบบการทดสอบแรงดึง

ปัจจัย	ระดับปัจจัย		
	1	2	3
อุณหภูมิการเผาเปลือกหอยแมลงภู่ (องศาเซลเซียส)	500	700	900
สัดส่วนการผสม (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	10	20	30

นอกจากการทดสอบแรงดึงเพื่อใช้ในการทำนายความต้านทานการแตกหัก ด้วยเกณฑ์การแตกหัก ผลการทดสอบแรงดึงจะถูกนำมาวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อยืนยันสมบัติทางกลว่า ในการเตรียมวัสดุผสมแต่ละครั้งหรือภายในแม่พิมพ์เดียวกันในแต่ละตำแหน่ง (Position) ของแม่พิมพ์ ให้สมบัติทางกลที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งชิ้นทดสอบ 1 แผ่นจะถูกตัดขึ้นรูปเป็นชิ้นทดสอบแรงดึง 5 ชิ้นและ กำหนดหมายเลขเพื่อระบุตำแหน่งของชิ้นทดสอบแสดงดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 การเตรียมชิ้นงานทดสอบแรงดึงเพื่อศึกษาผลกระทบของการเตรียมวัสดุ

3.4.2 การทำนายด้วยวิธีปัญญาประดิษฐ์ (Artificial intelligence method)

3.4.2.1 การเตรียมข้อมูล (Data preparation)

การสร้างแบบจำลองปัญญาประดิษฐ์เพื่อทำนายความต้านทานการแตกหัก ภายใต้ภาระแบบผสม 1 และ 3 ของวัสดุอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเปลือกหอยแมลงภู์ลักษณะการ เรียนรู้แบบมีผู้ฝึกสอน (Supervised learning) ข้อมูลที่ใช้ถูกแบ่งออกเป็นสองกลุ่ม ได้แก่ ข้อมูลความ เทียงตรงสูง (High-fidelity data) ที่ได้จากการทดสอบจริง (Experiment) 44 จุด และข้อมูลความ เทียงตรงต่ำ (Low-fidelity data) 198 จุด ที่ได้จากการทำนายเบื้องต้นด้วยเกณฑ์การแตกหัก (Criteria) โดยข้อมูลทั้งสองกลุ่มถูกจัดเก็บในรูปแบบตาราง และนำเข้าโดยใช้ไลบรารี Pandas ผ่าน การอ่านจากไฟล์ Excel หลังจากนั้นจะทำการจัดเรียงลำดับข้อมูลใหม่แบบสุ่ม (shuffle) เพื่อป้องกัน ความลำเอียง (Bias) ที่อาจเกิดจากลำดับข้อมูลเดิม โดยใช้ค่าการสุ่มแบบคงที่ (random_state=42) เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ทำซ้ำได้ สำหรับชุดข้อมูลแต่ละกลุ่ม ได้ทำการแยกปัจจัยรับเข้า (Input factor) ได้แก่ อุณหภูมิในการเผาเปลือกหอย (องศาเซลเซียส), สัดส่วนการผสมเปลือกหอย (ร้อยละโดย น้ำหนัก) และค่าพารามิเตอร์การรับภาระแบบผสม ในส่วนผลลัพธ์ (Output) ของแบบจำลองได้แก่ ความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระรูปแบบที่ 1 (K_I) และความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระ รูปแบบที่ 3 (K_{III}) เนื่องจากแบบจำลองที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือโครงข่ายประสาทเทียมเชิงลึก (Deep

neural network, DNN) ซึ่งมีความไวต่อระดับค่าของข้อมูล (Scale) จึงมีการดำเนินการปรับมาตรฐานข้อมูล (Standardization) โดยใช้วิธี Z-score normalization ผ่านไลบรารี StandardScaler จาก scikit-learn ซึ่งเป็นกระบวนการทางสถิติที่ใช้เพื่อปรับขนาดของข้อมูลให้มีลักษณะที่เหมาะสมต่อการประมวลผลด้วยอัลกอริธึมการเรียนรู้ของเครื่องทั้งในส่วนของการป้อนข้อมูลเข้าและผลลัพธ์ วิธีการนี้ช่วยลดผลกระทบจากความต่างของระดับค่าระหว่างปัจจัย และส่งผลให้กระบวนการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียมมีประสิทธิภาพและประสิทธิผลที่สูงขึ้น [50] ค่ามาตรฐานหรือที่เรียกอีกชื่อว่า Z-score คำนวณได้จากสมการ (27)

$$z_i = \frac{x_i - \mu}{\sigma} \quad (27)$$

เมื่อ	x_i	แทน	ข้อมูลก่อนการปรับมาตรฐาน
	μ	แทน	ค่าเฉลี่ยของปัจจัย
	σ	แทน	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของปัจจัย

สำหรับชุดข้อมูลความเที่ยงตรงสูงมีการแบ่งข้อมูลออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่

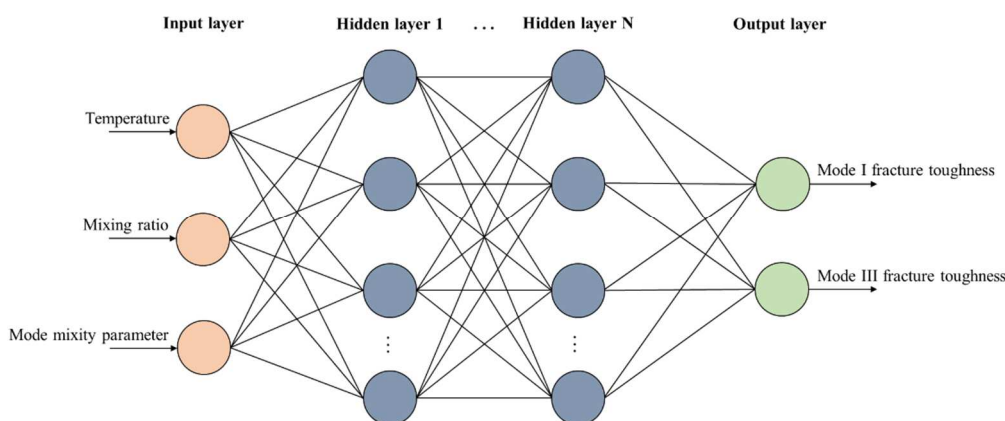
- ชุดฝึกสอน (Training set) สำหรับใช้ฝึกสอนแบบจำลองหลักโดยตรง
- ชุดตรวจสอบ (Validation set) สำหรับประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองขณะฝึกสอนเพื่อใช้ในการปรับค่าไฮเปอร์พารามิเตอร์ (Hyperparameters)
- ชุดทดสอบ (Test set) สำหรับประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองหลังจากสิ้นสุดการฝึกสอนเพื่อวัดประสิทธิภาพของแบบจำลอง

งานวิจัยนี้ได้กำหนดอัตราส่วนของการแบ่งข้อมูลเป็นชุดทดสอบ 20% ของข้อมูลทั้งหมด ข้อมูลส่วนที่เหลืออีก 80% จะถูกแบ่งอีก 10% สำหรับชุดตรวจสอบ ทำให้ชุดข้อมูลสุดท้ายได้เป็นชุดฝึกสอน 72% ชุดตรวจสอบ 8% และชุดทดสอบ 20% การแบ่งชุดข้อมูลในอัตราส่วนดังกล่าวสอดคล้องกับแนวปฏิบัติมาตรฐานในงานวิจัยด้านการเรียนรู้ของเครื่อง โดยเฉพาะในกรณีที่ขนาดของชุดข้อมูลไม่ใหญ่มาก ซึ่งจำเป็นต้องรักษาสมดุลระหว่างขนาดของชุดฝึกและความเพียงพอของข้อมูลในการประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลอง [50, 51] ขณะที่ชุดข้อมูลความเที่ยงตรงต่ำซึ่งมีขนาดชุดข้อมูลมากกว่าและมีความแม่นยำต่ำกว่า จะถูกใช้ทั้งหมดเป็นชุดฝึกสอนแบบจำลอง (Training set) โดยไม่มีการแบ่งออกเป็นชุดทดสอบหรือตรวจสอบ เนื่องจากวัตถุประสงค์ของข้อมูลกลุ่มนี้คือเพื่อสร้างแบบจำลองเบื้องต้นที่ใช้เสริมการเรียนรู้ของข้อมูลความเที่ยงตรงสูงในกระบวนการเรียนรู้แบบหลายระดับความเที่ยงตรง การเตรียมข้อมูลในลักษณะดังกล่าวจะช่วยให้สามารถฝึกสอนแบบจำลองเชิงลึกได้ทั้งในลักษณะความเที่ยงตรงเดียว (Single-fidelity) และหลายระดับความเที่ยงตรง (Multi-fidelity)

3.4.2.2 การสร้างแบบจำลองปัญญาประดิษฐ์ (Artificial intelligence Modeling)

3.4.2.2.1 โครงข่ายประสาทเทียมเชิงลึก (Deep neural network: DNN)

งานวิจัยนี้ได้ใช้โครงข่ายประสาทเทียมเชิงลึก ซึ่งเป็นหนึ่งในอัลกอริทึมที่ได้รับความนิยม เหมาะสำหรับงานที่มีความซับซ้อน ลักษณะโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมประกอบด้วย ชั้นรับเข้า (Input layer) ชั้นซ่อน (Hidden layer) และชั้นผลลัพธ์ (Output layer) ในแต่ละชั้นจะมีหน่วยประมวลผลย่อย (Node) ที่ถูกเชื่อมต่อกันด้วยเส้นเชื่อมที่มีการถ่วงน้ำหนัก (Weight) แสดงดังรูปที่ 3.14 ซึ่งกระบวนการเรียนรู้เป็นแบบมีผู้สอน (Supervise) และใช้วิธีการส่งค่าย้อนกลับ (Backpropagation) ซึ่งจะทำให้การส่งสัญญาณผิดพลาด (Error signal) ย้อนกลับเข้าสู่โครงข่ายประสาท และทำการปรับค่าน้ำหนักจนเข้าใกล้ผลลัพธ์ที่กำหนดไว้ [52, 53]



รูปที่ 3.14 โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมเชิงลึก

หลักการทำงานของโครงข่ายประสาทเทียม การคำนวณหาผลลัพธ์ ทำได้โดยการใส่ข้อมูลป้อนเข้าไปในโครงข่ายประสาท และคำนวณค่าผลรวมของโหนดในชั้นซ่อน โดยจะมีฟังก์ชันสำหรับคำนวณเมื่อได้รับข้อมูลจากโหนดในชั้นก่อนหน้า เรียกว่า ฟังก์ชันกระตุ้น (Activation function) ชั้นซ่อนจะมีหน้าที่ในการปรับค่าข้อมูลที่เข้ามาในชั้นต่าง ๆ ให้สามารถแยกแยะความแตกต่างโดยใช้เส้นตรงเส้นเดียวได้ (Linearly separable) ฟังก์ชันกระตุ้นที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้แก่

ฟังก์ชันกระตุ้นแบบ ReLU (Rectified linear unit) ซึ่งจะได้ค่าของโหนดในชั้นซ่อนที่อยู่ในช่วง 0 ถึง ∞ ดังสมการที่ (28)

$$f(x) = \max(0, x) \quad (28)$$

ฟังก์ชันกระตุ้นแบบ Tanh (Hyperbolic tangent) ค่าของปัจจัยรับเข้าจะถูกแปลงให้อยู่ในช่วง -1 ถึง 1 ดังสมการที่ (29)

$$\tanh(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} \quad (29)$$

ฟังก์ชันกระตุ้นแบบ Sigmoid ค่าของปัจจัยรับเข้าจะถูกแปลงให้อยู่ในช่วง 0 ถึง 1 ดังสมการที่ (30)

$$\text{sigmoid}(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (30)$$

ฟังก์ชันกระตุ้นแบบ Linear ค่าของปัจจัยรับเข้าจะเท่ากับค่าที่ป้อนเข้าโดยตรงไม่มีการแปลงรูปดังสมการที่ (31)

$$f(x) = x \quad (31)$$

เมื่อ x แทนข้อมูลของปัจจัยรับเข้า

หลังจากการปรับค่าผลรวมด้วยฟังก์ชันกระตุ้นจะทำการหาค่าความผิดพลาดของโหนดในชั้นผลลัพธ์ โดยการนำผลลัพธ์ที่คำนวณได้จริงเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่กำหนดไว้ หากค่าอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้จะทำการรับข้อมูลชุดถัดไป แต่หากค่าไม่อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้จะทำการปรับค่าน้ำหนัก เมื่อทำการปรับน้ำหนักแล้วจึงทำการรับข้อมูลชุดถัดไปและทำซ้ำอีกรอบจนกระทั่งถึงข้อมูลชุดสุดท้ายนับเป็น 1 รอบของการคำนวณ (1 Epoch) จากนั้นจะทำการหาค่าผิดพลาดรวมเฉลี่ย (Mean squared error, MSE) เพื่อตรวจสอบว่าค่าโดยเฉลี่ยในการทำนายผลนั้นมีค่าน้อยกว่าค่าคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้หรือไม่ ถ้าโครงข่ายประสาทเทียมเชิงลึกที่สร้างขึ้นนั้นให้ผลลัพธ์ที่ถูกต้องจึงทำการเสร็จสิ้นการเรียนรู้

3.4.2.2.2 การปรับค่าไฮเปอร์พารามิเตอร์ (Hyperparameter tuning)

การปรับค่าไฮเปอร์พารามิเตอร์ของแบบจำลองปัญญาประดิษฐ์เป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญต่อประสิทธิภาพการทำนายผลของแบบจำลอง เพื่อให้ได้ค่าไฮเปอร์พารามิเตอร์ของแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุด (Hyperparameter optimization) ในการพัฒนาแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมเชิงลึก งานวิจัยนี้ใช้วิธีการค้นหาแบบตัวประมาณค่าความน่าจะเป็นแบบพาร์เซนที่มีโครงสร้างต้นไม้ (Tree-structured parzen estimator, TPE) ซึ่งเป็นหนึ่งในวิธีการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีแบบเบย์เซียน (Bayesian optimization) ที่มีประสิทธิภาพ โดยใช้

ไลบรารี Optuna ในการดำเนินการ วิธี TPE จะทำการเรียนรู้จากผลการทดลองที่ผ่านมา และเสนอค่าที่คาดว่าจะได้ผลดีกว่าในรอบถัดไป แทนที่จะสุ่มค่าทั้งหมด (Random search) เพื่อค้นหาชุดค่าไฮเปอร์พารามิเตอร์สำหรับแบบจำลองปัญญาประดิษฐ์ที่ให้ประสิทธิภาพการทำนายสูงสุด ซึ่ง Optuna เป็นไลบรารีที่ใช้กระบวนการสร้างและฝึกสอนแบบจำลองที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามค่าพารามิเตอร์ที่สุ่มเลือกในแต่ละรอบของการฝึกสอน หรือเรียกว่า “Define-by-Run” [54] โดยค่าไฮเปอร์พารามิเตอร์ที่ทำการทดลองแสดงดังตารางที่ 3.6

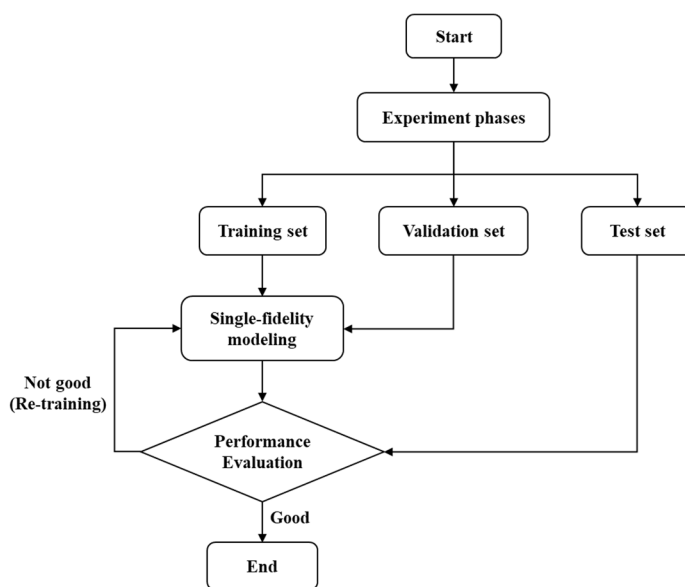
ตารางที่ 3.6 ค่าไฮเปอร์พารามิเตอร์ที่ทำการทดลอง

ไฮเปอร์พารามิเตอร์	ค่าทดลอง
จำนวนชั้นซ่อน (Number of hidden layer)	1, 2, 3
จำนวนหน่วยในชั้นซ่อน (Units in hidden layer)	32, 64, 128
ฟังก์ชันกระตุ้น (Activation function)	ReLU, Tanh, Sigmoid, Linear
การปรับมาตรฐาน (Regularization)	L1, L2, None
อัตราการเรียนรู้ (Learning rate)	0.0001-0.01

การฝึกสอนแบบจำลองแต่ละชุดค่าไฮเปอร์พารามิเตอร์ดำเนินการโดยใช้ข้อมูลจากชุดฝึกสอนความเที่ยงตรงสูงเพียง 30% และประเมินประสิทธิภาพการทำนายโดยใช้ชุดข้อมูลตรวจสอบแบบจำลองด้วยค่า R^2 , MSE และ MARE เพื่อเลือกชุดค่าไฮเปอร์พารามิเตอร์ที่ให้ประสิทธิภาพในการทำนายดีที่สุด ค่าที่ได้จากการปรับนี้จะถูกนำไปใช้ในการสร้างแบบจำลองทั้งในกรณีแบบจำลองความเที่ยงตรงเดียวและแบบจำลองหลายระดับความเที่ยงตรง เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างแบบจำลองทั้งสองได้

3.4.2.3 การพัฒนาแบบจำลองปัญญาประดิษฐ์

3.4.2.3.1 การสร้างแบบจำลองความเที่ยงตรงเดียว (Single-fidelity modeling)



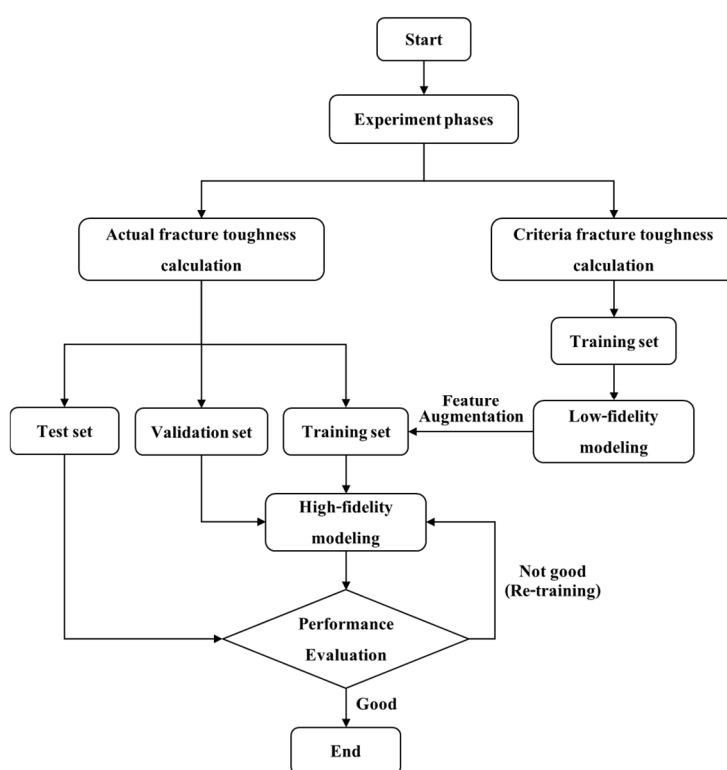
รูปที่ 3.15 แผนผังการสร้างแบบจำลองความเที่ยงตรงเดียว

กระบวนการสร้างแบบจำลองความเที่ยงตรงเดียว (Single-fidelity model) ในงานวิจัยนี้แสดงดังรูปที่ 3.15 โดยขั้นตอนการสร้างแบบจำลองเริ่มตั้งแต่การดำเนินงานตามแผนการทดลอง (Experiment phases) และการรวบรวมข้อมูลความเที่ยงตรงสูง (High-fidelity data) ซึ่งได้จากการทดสอบจริง จากนั้นทำการแบ่งชุดข้อมูลตามขั้นตอนการเตรียมข้อมูลในหัวข้อ 3.4.2.1 และทำการสร้างแบบจำลองความเที่ยงตรงเดียว โดยใช้เฉพาะข้อมูลความเที่ยงตรงสูงเพียงอย่างเดียว ซึ่งในกระบวนการฝึกสอนแบบจำลองจะทำการปรับเพื่อหาค่าไฮเปอร์พารามิเตอร์ที่เหมาะสมตามวิธีการในหัวข้อ 3.4.2.2 เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการทำนายที่ดีที่สุด เมื่อการฝึกสอนแบบจำลองเสร็จสิ้นจะทำการประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองโดยใช้ชุดทดสอบ เพื่อวัดประสิทธิภาพในการทำนายของแบบจำลองจะใช้ตัวชี้วัดประสิทธิภาพที่หลากหลาย (กล่าวในหัวข้อ 3.4.2.5) โดยค่าดังกล่าวจะถูกนำไปวิเคราะห์และเปรียบเทียบกับแบบจำลองหลายระดับความเที่ยงตรง (Multi-fidelity model) ในลำดับถัดไป

3.4.2.3.2 การสร้างแบบจำลองหลายระดับความเที่ยงตรง (Multi-fidelity modeling)

การใช้แบบจำลองปัญญาประดิษฐ์ในการทำนายความต้านทานการแตกหัก แม้จะให้ประสิทธิภาพในการทำนายที่สูง แต่จำเป็นต้องใช้ข้อมูลจำนวนมากเพื่อให้

แบบจำลองสามารถแสดงพฤติกรรมการแตกหักที่แท้จริงของวัสดุได้อย่างถูกต้อง ซึ่งข้อมูลที่น่ามาใช้ฝึกสอนแบบจำลองนั้น มาจากการทดสอบวัสดุด้วยวิธีการทดสอบแบบทำลาย (Destructive test) จึงต้องสิ้นเปลืองวัสดุจำนวนมาก และใช้เวลาในการทดสอบวัสดุค่อนข้างมาก เพื่อแก้ปัญหาความต้องการข้อมูลความเที่ยงตรงสูงจากการทดสอบความต้านทานการแตกหักของวัสดุ ในการสร้างแบบจำลองปัญญาประดิษฐ์ ส่วนหนึ่งของข้อมูลที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองจะถูกแทนที่ด้วยข้อมูลที่มีความเที่ยงตรงต่ำได้จากการคำนวณโดยใช้เกณฑ์การแตกหัก การรวมข้อมูลหลายกลุ่มที่มีระดับความเที่ยงตรงแตกต่างกันเพื่อใช้ในการสร้างแบบจำลอง เรียกว่า แบบจำลองหลายระดับความเที่ยงตรง (Multi-fidelity model) [55, 56]



รูปที่ 3.16 แผนผังการสร้างแบบจำลองหลายระดับความเที่ยงตรง

ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองแบบจำลองหลายระดับความเที่ยงตรงแสดงดังรูปที่ 3.16 โดยเริ่มจากการฝึกสอนแบบจำลองความเที่ยงตรงต่ำ (Low-fidelity model) ด้วยข้อมูลความเที่ยงตรงต่ำ (Low-fidelity data) ที่ได้จากการคำนวณด้วยเกณฑ์การแตกหัก หลังจากการฝึกสอนแบบจำลองความเที่ยงตรงต่ำเสร็จสิ้น แบบจำลองนี้จะสามารถใช้ในการทำนายค่าความต้านทานการแตกหัก เบื้องต้นได้ โดยจะนำปัจจัยรับเข้าจากชุดข้อมูลความเที่ยงตรงสูงซึ่งเป็นข้อมูลจากการทดสอบจริงไปทำนายด้วยแบบจำลองความเที่ยงตรงต่ำที่ได้รับการฝึกฝนไว้แล้ว ผลลัพธ์ที่ได้จากการทำนายนี้จะเรียกว่า ค่าการทำนายเบื้องต้น ค่าทำนายเบื้องต้นดังกล่าวจะถูกนำมาใช้ร่วมกับ

ปัจจัยรับเข้าของข้อมูลความเที่ยงตรงสูงผ่านกระบวนการที่เรียกว่า การเสริมคุณลักษณะของข้อมูล (Feature augmentation) ส่งผลให้ข้อมูลของแบบจำลองประกอบด้วยทั้งข้อมูลปัจจัยรับเข้าจากการทดลองจริงและค่าการทำนายจากแบบจำลองความเที่ยงตรงต่ำ การเสริมข้อมูลลักษณะนี้ช่วยให้แบบจำลองสามารถเรียนรู้ความสัมพันธ์เชิงลึกระหว่างปัจจัยรับเข้ากับผลลัพธ์ได้แม่นยำยิ่งขึ้น โดยอาศัยประโยชน์จากข้อมูลความแม่นยำต่ำในลักษณะของข้อมูลสนับสนุน (Auxiliary features) ส่งผลให้แบบจำลองหลายระดับความเที่ยงตรงมีประสิทธิภาพและความแม่นยำในการทำนายสูงกว่าแบบจำลองความเที่ยงตรงเดียว จากนั้นนำข้อมูลที่ผ่านกระบวนการเสริมคุณลักษณะไปใช้ในการฝึกสอนแบบจำลองหลายระดับความเที่ยงตรง ซึ่งในกระบวนการฝึกสอนแบบจำลองจะทำการปรับเพื่อหาค่าไฮเปอร์พารามิเตอร์ที่เหมาะสม ประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองโดยใช้ชุดทดสอบและวัดประสิทธิภาพในการทำนายของแบบจำลองด้วยตัวชี้วัดประสิทธิภาพที่หลากหลายเช่นเดียวกับแบบจำลองความเที่ยงตรงเดียว

3.4.2.5 การวัดประสิทธิภาพแบบจำลอง (Performance evaluation)

การสร้างแบบจำลองเพื่อทำนายผลนั้น จำเป็นต้องมีการวัดประสิทธิภาพของแบบจำลองว่าสามารถทำนายผลได้ใกล้เคียงค่าจากข้อมูลจริงมากน้อยเพียงใด เนื่องจากการทำนายในงานวิจัยนี้ ผลลัพธ์ที่ได้จะมีลักษณะข้อมูลเป็นเชิงตัวเลขแบบต่อเนื่อง จึงเลือกใช้ตัวชี้วัดประสิทธิภาพ (Performance metrics) สำหรับแบบจำลองการถดถอย (Regression model) [57] ที่เหมาะสมกับลักษณะข้อมูลดังกล่าว ซึ่งตัวชี้วัดประสิทธิภาพที่ใช้กันโดยทั่วไปสามารถอธิบายได้ดังนี้

3.4.2.5.1 ค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ หรือฟังก์ชันคะแนนการถดถอย (Coefficient of determination, R^2) เป็นตัวชี้วัดที่แสดงถึงแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างค่าจากข้อมูลจริงกับค่าที่เกิดจากผลการทำนายของแบบจำลอง โดยแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองสามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้มากน้อยเพียงใด ซึ่งจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (32) โดยการตีความค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจแสดงดังตารางที่ 3.7

$$R^2 = 1 - \sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \hat{y}_i)^2}{(y_i - \bar{y})^2} \quad (32)$$

ตารางที่ 3.7 การตีความค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ [58]

R^2	การตีความผลลัพธ์ของแบบจำลอง
0.9-1.0	แบบจำลองสามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้ดีมาก
0.7-0.9	แบบจำลองมีประสิทธิภาพค่อนข้างดี
0.5-0.7	แบบจำลองมีความแม่นยำปานกลาง
<0.5	แบบจำลองอธิบายข้อมูลได้ต่ำ
<0	แบบจำลองไม่สามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้เลย

3.4.2.5.2 ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (Mean square error, MSE) เป็นตัวชี้วัดที่แสดงถึงค่าคลาดเคลื่อนเฉลี่ยระหว่างค่าจากข้อมูลจริงกับค่าที่เกิดจากการทำนายของแบบจำลอง สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (33) โดยการตีความค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสองแสดงดังตารางที่ 3.8

$$MSE = \sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \hat{y}_i)^2}{n} \quad (33)$$

ตารางที่ 3.8 การตีความค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสอง [59]

MSE	การตีความผลลัพธ์ของแบบจำลอง
เข้าใกล้ 0	แบบจำลองมีความแม่นยำสูงมาก ค่าทำนายคลาดเคลื่อนจากค่าจริงน้อย
ค่าปานกลาง	แบบจำลองสามารถทำนายได้ในระดับที่ยอมรับได้ แต่ยังมี ความคลาดเคลื่อนในระดับหนึ่ง
ค่าสูง	แบบจำลองมีประสิทธิภาพต่ำ มีความคลาดเคลื่อนจากค่าจริงมาก และ อาจไม่เหมาะสมสำหรับใช้งานจริง

ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสองเป็นตัวชี้วัดที่นิยมใช้ในปัญหาการถดถอย (Regression) เนื่องจากให้ค่าน้ำหนักสูงกับความผิดพลาดขนาดใหญ่ ส่งผลให้แบบจำลองเรียนรู้ได้รวดเร็วขึ้นเมื่อค่าทำนายมีความคลาดเคลื่อนมาก นอกจากนี้ MSE ยังเป็นฟังก์ชันค่าความเสียหายที่เหมาะสมกับการนำไปใช้งานในการเรียนรู้เชิงลึก (Deep Learning) อีกด้วย

3.4.2.5.3 ค่าเฉลี่ยของร้อยละความผิดพลาดสัมบูรณ์ (Mean absolute percentage error, MAPE) แสดงค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยระหว่างค่าจากข้อมูลจริงและค่าจากการทำนายในมาตราส่วนร้อยละ สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (34) โดยการตีความค่าเฉลี่ยของร้อยละความผิดพลาดสัมบูรณ์แสดงดังตารางที่ 3.9

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \times 100 \quad (34)$$

เมื่อ y_i แทนผลลัพธ์จากเหตุการณ์จริงตำแหน่งที่ i
 $\hat{y}_i$ แทนผลลัพธ์จากการทำนายตำแหน่งที่ i

$\bar{y}$ แทนค่าเฉลี่ยผลลัพธ์จากเหตุการณ์จริง
 n แทนจำนวนข้อมูลทั้งหมด

ตารางที่ 3.9 การตีความค่าเฉลี่ยของร้อยละความผิดพลาดสัมบูรณ์ [60]

MAPE (%)	การตีความผลลัพธ์ของแบบจำลอง
<10%	แบบจำลองมีความแม่นยำสูง
10-20%	แบบจำลองมีความคลาดเคลื่อนน้อย
20-50%	แบบจำลองมีความคลาดเคลื่อนระดับหนึ่ง อาจใช้ได้ในบริบทเชิงประมาณการ
>50%	แบบจำลองคลาดเคลื่อนสูง ไม่ควรใช้สำหรับการตัดสินใจ

ในการประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองที่ใช้ในการทำนายในงานวิจัยนี้ ได้ใช้ตัวชี้วัดประสิทธิภาพ 3 ชนิด ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ (R^2), ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (MSE) และค่าเฉลี่ยของร้อยละความผิดพลาดสัมบูรณ์ (MAPE) โดยพิจารณาเรียงลำดับตามลักษณะการวัดผลและความเหมาะสมในการตีความผลดังนี้ ประการแรก การพิจารณา R^2 ซึ่งเป็นตัวชี้วัดเชิงสัมพัทธ์ที่ใช้วัดว่าแบบจำลองสามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลเป้าหมาย (Target variable) ได้มากเพียงใด โดยมีค่าตั้ง 0 ถึง 1 ค่า R^2 ที่สูงใกล้ 1 บ่งชี้ว่าแบบจำลองสามารถจับแนวโน้มของข้อมูลได้อย่างแม่นยำ ซึ่งถือเป็นการประเมินเบื้องต้นในเชิงสัมพัทธ์ (Relative evaluation) ที่ช่วยชี้ให้เห็นระดับของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระและตัวแปรตามโดยรวมก่อน การพิจารณารายละเอียดเชิงคลาดเคลื่อนจึงเหมาะสมในการใช้ประเมินประสิทธิภาพแบบจำลองเป็นลำดับแรก ประการที่สอง การพิจารณาค่า MSE มีจุดมุ่งหมายเพื่อประเมินค่าความคลาดเคลื่อนเชิงปริมาณระหว่างค่าที่ทำนายกับค่าจริง โดยค่า MSE มีคุณสมบัติในการให้น้ำหนักกับค่าคลาดเคลื่อนที่มีขนาดใหญ่กว่าปกติ (Outliers) เนื่องจากการยกกำลังสอง ส่งผลให้สามารถสะท้อนระดับความแม่นยำของแบบจำลองในเชิงลึกได้ชัดเจนยิ่งขึ้น โดยเฉพาะในกรณีที่การทำนายผิดพลาดมากอาจนำไปสู่ผลกระทบที่สำคัญต่อการใช้งานจริง ประการสุดท้าย ค่า MAPE ถูกนำมาใช้เพื่อประเมินความแม่นยำของแบบจำลองในเชิงสัดส่วน โดยแสดงค่าความผิดพลาดในหน่วยร้อยละเมื่อเทียบกับค่าจริง ทำให้เหมาะสมสำหรับการตีความผลการทำนายในลักษณะที่เข้าใจง่าย โดยเฉพาะในกรณีที่ต้องการเปรียบเทียบผลการทำนายข้ามกลุ่มข้อมูลที่มีหน่วยหรือขนาดที่ต่างกัน การพิจารณาตัวชี้วัดทั้งสามตามลำดับดังกล่าวทำให้สามารถประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองได้อย่างครอบคลุม โดยเริ่มจากการประเมินแนวโน้มโดยรวมด้วยค่า R^2 วิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนจริงเชิงปริมาณด้วยค่า MSE และสรุปผลในเชิงสัดส่วนที่เข้าใจง่ายผ่านค่า MAPE ซึ่งจะช่วยเสริมความน่าเชื่อถือในความถูกต้องของแบบจำลอง สามารถประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองได้อย่างรอบด้าน ทั้งในเชิงภาพรวม ความแม่นยำ และความเหมาะสมต่อการนำไปใช้งานจริง