

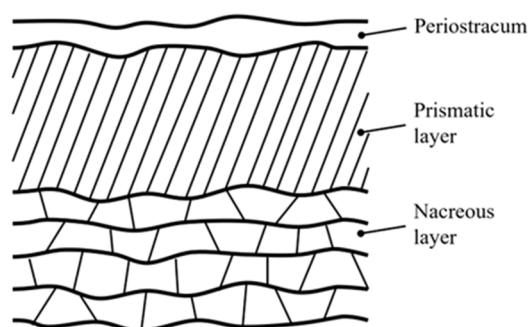
บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 หอยแมลงภู (Mussel shell)

หอยแมลงภู (Mussel shell) มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Perna viridis* เป็นสัตว์น้ำชนิดหนึ่งที่อยู่ในกลุ่มสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลัง เป็นหอยสองฝา (Bivalve mollusk) ซึ่งจัดอยู่ในไฟลัมมอลลัสคา (Mollusca) อาศัยอยู่ในพื้นที่น้ำตื้นชายฝั่งทะเล น้ำกร่อย หรือแหล่งน้ำที่มีการไหลเวียนดี มีบทบาทสำคัญในระบบนิเวศ ช่วยปรับปรุงคุณภาพน้ำ ลดสารแขวนลอยในแหล่งน้ำ ปรับสมดุลสิ่งแวดล้อม และเป็นแหล่งอาหารสำคัญของสิ่งมีชีวิตหลากหลายชนิด หอยแมลงภูเป็นที่นิยมบริโภคกันเป็นอย่างมาก จึงเป็นหนึ่งในสัตว์น้ำเศรษฐกิจที่สำคัญ ที่มีการเพาะเลี้ยงกันมาเป็นเวลานาน การเพาะเลี้ยงส่วนใหญ่ทำในลักษณะการแขวนหอยจากทุ่นในทะเล (Longline farming) หอยแมลงภูมีเปลือกแข็งเป็นรูปทรงยาวรี ลักษณะโค้งมนเล็กน้อย มีสีเขียวไปจนถึงน้ำตาลเข้ม เปลือกหอยแมลงภูประกอบด้วยโครงสร้าง 3 ชั้น [11, 12] ได้แก่

- 1) ชั้นเปลือกนอกสุด (Periostracum) เป็นสารอินทรีย์ประเภทโปรตีนที่เรียกว่า Conchiolin มีลักษณะเป็นแผ่นบางและยืดหยุ่น มักมีสีคล้ำหรือดำ มีบทบาทในการปกป้องชั้นแร่ด้านในจากสารเคมีในสิ่งแวดล้อมและให้ความแข็งแรงแก่เปลือก โดยทำงานร่วมกับแร่ธาตุอื่น ๆ เช่น แคลเซียมคาร์บอเนตที่อยู่ในเปลือก
- 2) ชั้นผลึกแนวตั้ง (Prismatic layer) องค์ประกอบเป็นผลึกแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) แคลไซต์ (Calcite) และอาราโกไนต์ (Aragonite) ผลึกจัดเรียงแน่น มีลักษณะคล้ายแท่งหรือเสาเล็ก ๆ (Prism) ซึ่งเป็นโครงสร้างหลักที่ให้ความแข็งแรงและความทนทานต่อแรงอัด
- 3) ชั้นเปลือกในสุด หรือชั้นนacreous (Nacreous layer) เป็นชั้นบาง ๆ ของแผ่นแคลเซียมคาร์บอเนตเรียงซ้อนกันแบบอิฐเรียง และมีโปรตีนเป็นตัวประสาน ลักษณะมีความมันวาวเป็นนacre ช่วยทำให้เปลือกมีความเหนียวสูง และยังชะลอการขยายตัวของรอยร้าวด้วย

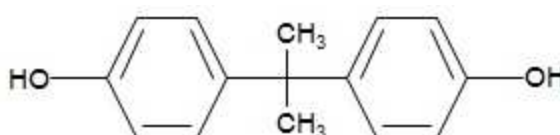


รูปที่ 2.1 โครงสร้างทั้ง 3 ชั้นของเปลือกหอยแมลงภู
(ที่มา : (Derkach et al., 2023))

2.2 อีพอกซีเรซิน (Epoxy resin)

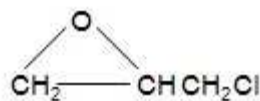
อีพอกซีเรซิน (Epoxy resin) เป็นโคพอลิเมอร์ (Copolymer) ที่ประกอบด้วยมอนอเมอร์ (Monomer) 2 ชนิดขึ้นไป จัดอยู่ในกลุ่มเทอร์โมเซตติงพอลิเมอร์ (Thermosetting polymer) ที่เมื่อผ่านกระบวนการผลิตแล้วจะไม่สามารถคืนรูปหรือนำกลับมาใช้ใหม่ได้ มีความแข็งแรง ทนต่อสารเคมี มีการหดตัวต่ำ และง่ายต่อการขึ้นรูป โดยทั่วไปในปฏิกิริยาการสังเคราะห์อีพอกซีเรซินประกอบด้วยสารเคมี 3 ชนิด [13, 14] ได้แก่

- 1) บิสฟีนอล-เอ (Bisphenol A) เป็นสารเคมีประเภทโพลีคาร์บอเนต (Polycarbonate Plastic) มีสมบัติแข็งแรง ไม่มีสี สามารถละลายตัวได้เมื่อได้รับความร้อน ลักษณะโครงสร้างทางเคมีแสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของบิสฟีนอล-เอ (Bisphenol A)
(ที่มา : (Ratna & Debdatta, 2009))

- 2) อีพิคลอโรไฮดริน (Epichlorohydrin) เป็นสารประกอบออร์กาโนคลอรีน (Organochlorine) และอีพอกไซด์ (Epoxide) มีกลิ่นฉุน ติดไฟง่าย เหลวใส ไม่มีสี ลักษณะโครงสร้างทางเคมีแสดงดังรูปที่ 2.3

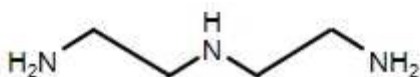


รูปที่ 2.3 โครงสร้างทางเคมีของอีพิคลอโรไฮดริน (Epichlorohydrin)
(ที่มา : (Ratna & Debdatta, 2009))

- 3) สารเพิ่มความแข็ง (Hardener) เป็นสารประกอบโพลีเอมีน (Polyamine) โดยจะทำปฏิกิริยาเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลแบบร่างแห (Cross link) ของหมู่ เอมีน (Amine) กับ หมู่อีพอกไซด์ (Epoxide) ของสารประกอบ ซึ่งเป็นตัวช่วยเร่งปฏิกิริยา ตัวอย่างสารเพิ่มความแข็ง (Hardener) เช่น ไตรเอทิลีนเตตรามีน (Triethylene tetramine, TETA) และไดเอทิลีนไตรเอมีน (Diethylene triamine, DETA) ลักษณะโครงสร้างทางเคมีแสดงดังรูปที่ 2.4 และรูปที่ 2.5 ตามลำดับ

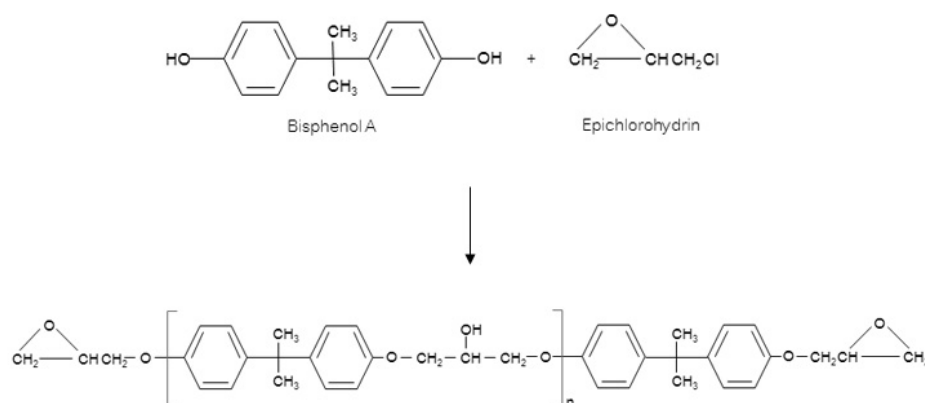


รูปที่ 2.4 โครงสร้างทางเคมีของ ไตรเอทิลีนเตตรามีน (Triethylene tetramine)
(ที่มา : (Ratna & Debdatta, 2009))



รูปที่ 2.5 ไดเอทิลีนไตรเอมีน (Diethylene triamine)
(ที่มา : (Ratna & Debdatta, 2009))

โดยปฏิกิริยาการสังเคราะห์อีพอกไซด์เรซินสามารถสรุปได้ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ปฏิกริยาการสังเคราะห์อีพอกซีเรซิน (Epoxy resin)
(ที่มา : (Ratna & Debdatta, 2009))

2.3 กลศาสตร์การแตกหัก (Fracture mechanics)

กลศาสตร์การแตกหัก (Fracture mechanics) เป็นสาขาของกลศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาการแพร่กระจายของรอยร้าวในวัสดุ เมื่อวัตถุที่เกิดรอยร้าวได้รับภาระ บริเวณที่ส่วนปลายของรอยร้าวจะเกิดการเสียรูปมากกว่าและอาจเสียหายก่อนบริเวณอื่น การศึกษาผลของรอยร้าวต่อความสามารถในการรับภาระของชิ้นส่วนจึงเน้นที่ความเค้น-ความเครียดบริเวณปลายรอยร้าว ซึ่งวิชากลศาสตร์การแตกหักประกอบด้วย 4 ส่วนคือ [15]

- 1) พารามิเตอร์ปลายรอยร้าว (Crack tip parameter) แสดงถึงระดับความรุนแรงบริเวณปลายรอยร้าวของวัสดุ
- 2) ความต้านทานการแตกหัก (Fracture toughness) หรือค่าวิกฤติของพารามิเตอร์ปลายรอยร้าว แสดงความสามารถในการต้านทานการขยายตัวของรอยร้าวจากขนาดเริ่มต้นของวัสดุ
- 3) เกณฑ์การแตกหัก (Fracture criteria) สำหรับตรวจสอบว่าวัสดุเกิดการแตกหักหรือยัง หรือคำนวณขนาดของรอยร้าวและภาระที่จะส่งผลให้เกิดการแตกหัก
- 4) สหสัมพันธ์ (Correlation) ของอัตราการขยายตัวของรอยร้าว สำหรับคำนวณเวลาที่ส่งผลให้รอยร้าวขยายตัวจากความยาวค่าหนึ่งถึงอีกค่าหนึ่ง

2.3.1 กลศาสตร์การแตกหักยืดหยุ่นเชิงเส้น (Linear elastic fracture mechanics, LEFM)

กลศาสตร์การแตกหักสามารถแบ่งประเภทได้ตามพฤติกรรมการเสียรูปของวัสดุ บริเวณใกล้กับปลายรอยร้าว ซึ่งกลศาสตร์การแตกหักยืดหยุ่นเชิงเส้น ใช้กับกรณีการแตกหักของวัตถุที่มีรอยร้าว โดยวัสดุบริเวณปลายรอยร้าวเสียรูปแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น (ไม่เกิดการคราก)

2.3.1.1 เกณฑ์การแตกหัก

A.A. Griffith ได้เสนอวิธีแนวทางพลังงาน (Energy approach) สำหรับทำนายความเค้นแตกหัก ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ห้วงกว้าง (Global analysis) เพราะพิจารณาการเปลี่ยนแปลงพลังงานศักย์วัสดุจากการขยายตัวของรอยร้าว โดยเกณฑ์การแตกหักมีหลักการที่ว่าวัตถุที่ไม่มีรอยร้าว งานที่เกิดจากภาระภายนอก (External work, W) ที่กระทำต่อวัตถุจะไม่เกิดการสูญเสียแต่จะสะสมในรูปพลังงานความเครียด (Strain energy, U) ภายในวัตถุ ตามกฎทรงพลังงาน (Conservation of energy theorem) ดังนั้น

$$W = U \quad (1)$$

กรณีวัตถุที่มีรอยร้าว งานของแรงภายนอก (W) จะสะสมในรูปพลังงานความเครียด (U) และเกิดการสร้างผิวรอยร้าวใหม่ (W_s) เนื่องจากพิจารณาขณะที่รอยร้าวขยายตัวจากขนาดเริ่มต้น จึงเขียนกฎทรงพลังงานในรูปของอัตราการเปลี่ยนแปลงเทียบกับพื้นที่รอยร้าว (dA) ดังนี้

$$\frac{dW}{dA} = \frac{dU}{dA} + \frac{dW_s}{dA} \quad (2)$$

สมการที่ (3) ใช้ในการคำนวณหาสถานะที่รอยร้าวเริ่มต้นเกิดการขยายตัวจากความยาวเดิม ซึ่งในกรณีของการแตกหักเปราะ สถานะนี้คือสถานะที่ขึ้นส่วนแตกหักอย่างสมบูรณ์ ดังนั้นสมการนี้ก็คือเกณฑ์การแตกหัก (Fracture criteria) จากนิยามของพลังงานศักย์รวม (Total potential energy, Π)

$$\Pi = W - U \quad (3)$$

สมการที่ (3) จะเขียนได้เป็น

$$-\frac{d\Pi}{dA} = \frac{dW_s}{dA} \quad (4)$$

ซึ่งพลังงานศักย์จะลดลงเมื่อรอยร้าวเกิดการขยายตัว

ต่อมา Irwin เรียกเทอมด้านซ้ายของสมการที่ (4) ว่าอัตราปลดปล่อยพลังงาน (Energy release rate, G^2) ปัจจุบันนิยมเรียกว่า แรงขับเคลื่อนรอยร้าว (Crack driving

force) และเรียกทอมด้านขวาว่า ความต้านทานการขยายตัวของรอยร้าว (Crack growth resistance, R) ดังนั้น

$$G = -\frac{d\Pi}{dA} \quad (5)$$

และ

$$R = \frac{dW_s}{dA} \quad (6)$$

เกณฑ์การแตกหักจึงเขียนได้เป็น

$$G = R \quad (7)$$

เมื่อรอยร้าวเริ่มเกิดการขยายตัวจากความยาวเดิมตามเงื่อนไขในสมการที่ (7) การขยายตัวจะมีเสถียรภาพหรือไม่ ขึ้นอยู่กับอัตราการเปลี่ยนแปลงค่า G และ R เทียบกับ พื้นที่รอยร้าวหรือ dG/dA และ dR/dA โดยเมื่อ

$$\frac{dG}{dA} > \frac{dR}{dA} \quad \text{การเติบโตจะมีเสถียรภาพ} \quad (8)$$

$$\frac{dG}{dA} < \frac{dR}{dA} \quad \text{การเติบโตจะมีเสถียรภาพ} \quad (9)$$

$$\frac{dG}{dA} = \frac{dR}{dA} \quad \text{บอกไม่ได้ว่าเติบโตแบบใด} \quad (10)$$

2.3.1.2 ตัวประกอบความเข้มของความเค้น (Stress intensity factor, K)

ในกลศาสตร์การแตกหัก ตัวประกอบความเข้มของความเค้น (Stress intensity factor, K) เป็นพารามิเตอร์ที่มักใช้กับวัสดุยืดหยุ่นเชิงเส้นที่เป็นเนื้อเดียวกัน เพื่อทำนายสถานะความเค้น หรือความเข้มของความเค้น บริเวณใกล้กับปลายรอยร้าว ซึ่งเกิดจากความเค้นตกค้าง [3] และมีประโยชน์ในการกำหนดเกณฑ์ความเสียหายของวัสดุที่เปราะได้ ซึ่งขนาดของ K ขึ้นอยู่กับรูปทรงของชิ้นงาน ขนาดและตำแหน่งของรอยร้าว และขนาดและการกระจายของของภาระที่กระทำ สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$K = Y\sigma\sqrt{\pi a} \quad (11)$$

เมื่อ Y ปัจจัยรูปร่าง (Geometry factor) ซึ่งจะขึ้นกับรูปร่างของชิ้นทดสอบและรูปร่างของรอยแตกร้าว

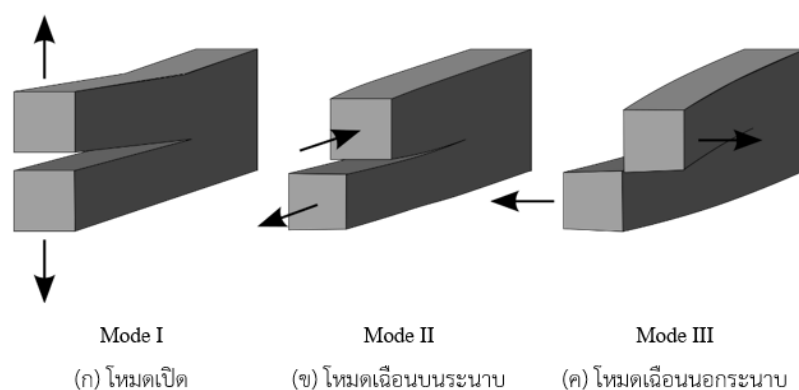
σ แทนขนาดความเค้นที่กระทำต่อรอยร้าว

a แทนความยาวรอยร้าวของชิ้นทดสอบ

2.3.2 รูปแบบการเสียรูปที่ปลายรอยร้าว

เมื่อพิจารณาจากทิศทางการเคลื่อนตัวของระนาบรอยร้าวเทียบกับขอบระนาบรอยร้าว การเสียรูปที่ปลายรอยร้าวสามารถแบ่งได้ 3 รูปแบบ คือ

- 1) ภาวะรูปแบบที่ 1 (Mode I) หรือภาวะแบบเปิด (Opening mode) ฝักรอยร้าวจะมีลักษณะการเคลื่อนตัวตั้งฉากกับระนาบของรอยร้าว เป็นรูปแบบภาวะที่การเสียรูปที่สร้างความเสียหายมากที่สุด
- 2) ภาวะรูปแบบที่ 2 (Mode II) หรือภาวะแบบเฉือนบนระนาบ (In-plane shear mode) ฝักรอยร้าวจะมีลักษณะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์กันในทิศทางตั้งฉากกับขอบหน้าของรอยร้าว
- 3) ภาวะรูปแบบที่ 3 (Mode III) หรือภาวะแบบเฉือนนอกระนาบ (Out-of-plane shear mode) ฝักรอยร้าวจะมีลักษณะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์กันในทิศทางขนานกับขอบหน้าของรอยร้าว



รูปที่ 2.7 รูปแบบการเสียรูปที่ปลายรอยร้าว
(ที่มา : (Anderson, T.L et al., 2017))

2.4 วิธีการปัญญาประดิษฐ์ (Artificial intelligence method)

ปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence, AI) เป็นวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีของการฝึกฝนที่ทำให้เครื่องจักรและคอมพิวเตอร์มีการเรียนรู้ได้เสมือนกับสมองมนุษย์ สามารถคิดวิเคราะห์ และตัดสินใจเพื่อแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ได้ โดยมีการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine learning, ML) และการ

เรียนรู้เชิงลึก (Deep learning, DL) เป็นส่วนหนึ่งของปัญญาประดิษฐ์ ซึ่งขั้นตอนการเรียนรู้ของปัญญาประดิษฐ์สามารถจำแนกได้ 3 กลุ่มได้แก่ [16, 17]

- 1) การเรียนรู้โดยมีผู้สอน (Supervised learning) เปรียบเสมือนกับการเรียนการสอน เป็นการเรียนรู้ที่อาศัยข้อมูลในการฝึกฝนโดยอาศัยชุดข้อมูลต่าง ๆ ซึ่งประกอบไปด้วยชุดของข้อมูลและชุดผลลัพธ์ของข้อมูลที่ต้องการ โดยผลที่ได้จากการเรียนรู้สามารถคาดคะเนผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจากการได้รับข้อมูล
- 2) การเรียนรู้โดยไม่มีผู้สอน (Unsupervised learning) เป็นการเรียนรู้ที่ให้เครื่องจักรนั้นสามารถเรียนรู้ได้ด้วยตนเอง โดยให้เครื่องจักรวิเคราะห์จากการจำแนกและสร้างแบบแผนจากข้อมูลที่ได้รับ
- 3) การเรียนรู้แบบเสริมกำลัง (Reinforcement learning) เป็นการเรียนรู้สิ่งต่าง ๆ จากการลองผิดลองถูก โดยทำการเรียนรู้จากการลองผิดลองถูกในสถานการณ์อดีตหรือระบบจำลอง ด้วยแนวคิดที่ว่าจะเลือกทางเลือกที่ทำให้ได้ผลลัพธ์มากที่สุด และพัฒนาระบบการตัดสินใจของตัวเองให้ดีขึ้น

2.4.1 การเรียนรู้ของเครื่อง (Machine learning, ML) เป็นอัลกอริทึมในการเรียนรู้ด้วยวิธีการสร้างแบบจำลองปัญหาก่อน สำหรับใช้ในการแบ่งหมวดหมู่ลักษณะเด่นของข้อมูล เพื่อใช้จำแนกและตัดสินใจ ซึ่งการเรียนรู้ต้องใช้ขั้นตอนการกระตุ้น เนื่องจากการเรียนรู้ของเครื่องโดยทั่วไป เมื่อมีข้อมูลใหม่เข้ามาจะไม่มีกระบวนการในทันที แต่จะต้องอาศัยความรู้เฉพาะทางสำหรับคุณลักษณะในการจัดหมวดหมู่ของข้อมูลบางกลุ่ม (Hand-craft features)

2.4.2 การเรียนรู้เชิงลึก (Deep learning, DL) เป็นอัลกอริทึมที่เลียนแบบการทำงานของโครงข่ายประสาทของมนุษย์ (Neurons) โดยนำระบบโครงข่ายประสาท (Neural network, NN) มาซ้อนกันหลาย ๆ ชั้น (Layer) ยิ่งซ้อนกันหลายชั้น โครงข่ายก็ยิ่งมีความซับซ้อนและลึกขึ้น จึงเป็นที่มาของคำว่า Deep learning โดยมีการทำงานซับซ้อนกว่าการเรียนรู้ของเครื่องที่จะนำข้อมูลไปใช้ในการตรวจสอบรูปแบบ (Pattern) หรือจัดประเภทข้อมูล (Classify the data) แบบทันทีโดยไม่ต้องมีการสร้างการกระตุ้น และทำการประมวลผลอัตโนมัติเพื่อหาข้อมูลตัวอย่าง ทำให้เป็นเรียนรู้ที่ไม่ต้องมีแบบแผนหรือหมวดหมู่

2.5 แบบจำลองหลายระดับความเที่ยงตรง (Multi-fidelity model)

แบบจำลองหลายระดับความเที่ยงตรง (Multi-fidelity model) เป็นแบบจำลองที่ใช้ประโยชน์จากค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่มีความเที่ยงตรงสูง (High-fidelity data) และข้อมูลที่มีความเที่ยงตรงต่ำ (Low-fidelity data) เพื่อปรับปรุงและเพิ่มความแม่นยำในการทำนายผลของแบบจำลอง ในขณะที่เดียวกันสามารถลดความยากหรือค่าใช้จ่ายที่จำเป็นต่อการกำหนดพารามิเตอร์เพื่อให้ได้ข้อมูลที่เพียงพอสำหรับการสร้างแบบจำลองที่มีประสิทธิภาพ [18, 19]

2.5.1 ข้อมูลที่มีความเที่ยงตรงสูง (High-fidelity data, HiFi) คือ ข้อมูลที่เป็นผลลัพธ์โดยตรงจากการทดลอง หรือข้อมูลจริงที่สามารถตอบสนองพฤติกรรมหรือสถานการณ์ที่แท้จริงของปัญหาได้อย่างแม่นยำ แต่จำเป็นต้องใช้ต้นทุนและเวลาที่สูงในการจัดเตรียมและรวบรวมข้อมูล ทำให้มีข้อมูลอย่างจำกัด ซึ่งส่งผลต่อความสามารถตอบสนองพฤติกรรมหรือสถานการณ์ที่แท้จริงของปัญหาให้ลดลงได้

2.5.2 ข้อมูลที่มีความเที่ยงตรงต่ำ (Low-fidelity data, LoFi) คือ ข้อมูลที่เป็นผลลัพธ์จากสมการที่จำลองพฤติกรรมหรือสถานการณ์ของปัญหา มักจะมีความคลาดเคลื่อนระหว่างผลลัพธ์จริงและผลลัพธ์ที่ได้จากการสมการทำนายหรือแบบจำลอง ซึ่งค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพการทำนายของแบบจำลองนั้น แต่เนื่องจากการได้มาซึ่งข้อมูลประเภทนี้มีต้นทุนที่ต่ำทั้งทางด้านค่าใช้จ่าย เวลา เครื่องมือ เมื่อเทียบกับข้อมูลที่มีความเที่ยงตรงสูง จึงยังเป็นทางเลือกในการนำไปใช้เพื่อตอบสนองพฤติกรรมหรือสถานการณ์ที่แท้จริงของปัญหาได้

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

หัวข้องานวิจัยเกี่ยวข้องจะทำการการรวบรวมงานวิจัยที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับการทำนายความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบผสม 1 และ 3 ของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเปลือกหอยแมลงภู่ ตั้งแต่การเตรียมวัสดุผสม การทดสอบความต้านทานการแตกหักของวัสดุผสม การทำนายความต้านทานการแตกหัก และการทำนายด้วยแบบจำลองหลายระดับความเที่ยงตรง ซึ่งงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในหัวข้อต่างๆ ข้างต้นจะสรุปไว้ดังนี้

2.6.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเตรียมวัสดุผสม

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเตรียมวัสดุผสมจะกล่าวถึง งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสัดส่วนการผสมเปลือกหอยต่อวัสดุหลัก และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิการเผาและขนาดของเปลือกหอยที่ใช้ในการผสม ตารางที่ 2.1 แสดงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวัสดุผสมจากเปลือกหอย โดยเปลือกหอยที่นำมาผสมจะแบ่งออกเป็นสองกลุ่มหลัก ได้แก่ เปลือกหอยหาคหรือหอยน้ำจืด (Snail shell) และ เปลือกหอยทะเล (Sea shell) โดยส่วนใหญ่จะผสมวัสดุหลักและวัสดุเสริมแรงในสัดส่วนการผสมประมาณร้อยละ 2 ถึง 40 โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวัสดุผสมเปลือกหอย (วัสดุหลักกลุ่มพอลิเมอร์)

ผู้วิจัย	วัสดุหลัก	วัสดุเสริมแรง	สัดส่วน	หน่วย
Gbadeyan et al. [20]	Epoxy resin	Snail shells	5, 10, 15, 20	%wt.
Syamimi et al. [2]	Epoxy resin	Sea shells	5, 10, 15	%wt.
Oladele et al. [21]	Epoxy resin	Snail shells	3, 6, 9, 12, 15	%wt.
Odusanya et al. [22]	Polyester	Snail shell, sea shells	5, 10, 15, 20, 25, 30	%wt.

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวัสดุผสมเปลือกหอย (วัสดุหลักกลุ่มพอลิเมอร์) (ต่อ)

ผู้วิจัย	วัสดุหลัก	วัสดุเสริมแรง	สัดส่วน	หน่วย
Karthick et al. [23]	Polymethyl methacrylate	Sea shells	2, 4, 6, 8, 12, 16, 20	%wt.
Oladele et al. [24]	Polypropylene	Snail shells	3, 6, 9, 12, 15	%wt.
Fombuena et al. [25]	Epoxy resin	Sea shells	5, 10, 20, 30, 40	%wt.

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า โดยทั่วไปหอยทะเลมีปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต (ประมาณร้อยละ 90-95 โดยน้ำหนัก) สูงกว่าเมื่อเทียบกับหอยน้ำจืด (ประมาณร้อยละ 80-90 โดยน้ำหนัก) [26-28] ซึ่งแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นองค์ประกอบหลักในเปลือกหอยที่ช่วยในการเสริมความแข็งแรงให้วัสดุผสม ผู้วิจัยจึงได้เลือกใช้หอยทะเลในการศึกษา

การเตรียมเปลือกหอยเพื่อเสริมแรงในวัสดุผสมนั้น เพื่อขจัดสารอินทรีย์ที่ตกค้างและเพื่อศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาเปลือกหอยต่อความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบผสม 1 และ 3 ผู้วิจัยจึงได้ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาเพื่อเตรียมเปลือกหอยสำหรับกระบวนการผสม นอกจากนี้ยังทำการศึกษาน้ำหนักของเปลือกหอยที่ใช้ในการผสมและสมบัติทางกลต่าง ๆ ที่ผู้วิจัยท่านอื่นเลือกศึกษาแสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องอุณหภูมิการเผากับขนาดของเปลือกหอยต่อสมบัติทางกลของวัสดุผสม

ผู้วิจัย	วัสดุเสริมแรง/หลัก	อุณหภูมิการเผา (องศาเซลเซียส)	ขนาดเปลือกหอย (ไมโครเมตร)	สมบัติที่ศึกษา
Syamimi et al. [2]	Sea shells/ Epoxy resin	100, 800	<500	Tensile, Flexural, Impact
Oladele et al. [29]	Snail shells/ Epoxy resin	1000	<75	Tensile, Flexural
Kolawole et al. [30]	Snail shells/ Epoxy resin	100	<150	Tensile, Flexural, Impact
Oladele et al. [31]	Snail shells/ Epoxy resin	550, 700, 1000	50	Tensile, Flexural, Hardness, Impact

ตารางที่ 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องอุณหภูมิการเผากับขนาดของเปลือกหอยต่อสมบัติทางกลของวัสดุผสม (ต่อ)

ผู้วิจัย	วัสดุเสริมแรง/ หลัก	อุณหภูมิการเผา (องศาเซลเซียส)	ขนาดเปลือกหอย (ไมโครเมตร)	สมบัติที่ ศึกษา
Atuanya et al. [32]	Snail shells/ LDPE	150	75, 125, 250, 500	Tensile, Flexural, Impact

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาเปลือกหอยจะแบ่งออกได้ 2 ช่วงหลัก ได้แก่ การเผาที่ช่วงอุณหภูมิต่ำ (ประมาณ 100-300 องศาเซลเซียส) และการเผาที่ช่วงอุณหภูมิสูง (ประมาณ 500-1000 องศาเซลเซียส) โดยในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้เลือกศึกษาผลของอุณหภูมิการเผาในช่วงอุณหภูมิสูงต่อความต้านทานการแตกหักของวัสดุ เนื่องจากการเผาในช่วงอุณหภูมิสูงสามารถกำจัดสารอินทรีย์ตกค้างได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งยังช่วยให้วัสดุเปลือกหอยที่ผ่านการเผามีลักษณะที่เหมาะสมต่อการบดละเอียดในกระบวนการเตรียมวัสดุผสมอีกด้วย

2.6.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบผสม 1 และ 3

งานวิจัยของ F Ren et al. [33] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการแตกหักของวัสดุอีพอกซีเรซินภายใต้การรับภาระรูปแบบ 1 และการรับภาระแบบผสม 1 และ 3 ด้วยการรับภาระแบบต่อเนื่อง (Monotonic loading) และการรับภาระแบบรอบความล้า (Cyclic fatigue loading) โดยใช้ชิ้นงานทดสอบทรงกระบอกมีรอยร้าวรับแรงบิด (Spiral notch torsion test, SNTT) แสดงดังรูปที่ 2.8 ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าลักษณะทิศทางการขยายตัวของรอยร้าวจะขึ้นกับทิศทางการรับภาระรูปแบบ 1 เป็นหลัก โดยค่าความต้านทานการแตกหักขึ้นอยู่กับรูปแบบการรับภาระ ซึ่งเมื่อค่าความต้านทานการแตกหักจะเพิ่มขึ้นเมื่อรูปแบบภาระเปลี่ยนจากรูปแบบ 1 ไปเป็นรูปแบบ 3 และลักษณะการแตกหักยังเปลี่ยนจากลักษณะการแตกหักแบบตั้งฉากเป็นลักษณะการแตกหักแบบเฉียง



รูปที่ 2.8 แสดงการทดสอบความต้านทานการแตกหักจากงานวิจัยของคุณ F Ren et al. [33]

คุณ PJ Haghighatpour et al. [34] ทำการศึกษาความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบผสม 1 และ 3 ของวัสดุยางมะตอยคอนกรีตชนิดผสมร้อน (Hot Mix Asphalt, HMA) ด้วยชิ้นงานทดสอบแบบแผ่นกลมมีรอยร้าวรับแรงกดตัด 3 จุด (Edge notch disc bend – three point bending test) ที่มีทิศทางรอยร้าวตั้งฉากกับขอบของชิ้นงานทดสอบ แสดงดังรูปที่ 2.9 สำหรับการเปลี่ยนรูปแบบภาระที่กระทำกับชิ้นงานทดสอบจากรูปแบบที่ 1 เป็นรูปแบบที่ 3 จะทำได้โดยการหมุนเปลี่ยนทิศทางการวางชิ้นงานบนเครื่องทดสอบเพื่อให้ผลของมุมของรูปแบบผสม (Mode mixity angle, β) เปลี่ยนแปลงด้วย



รูปที่ 2.9 แสดงการทดสอบความต้านทานการแตกหักวิจัยของคุณ PJ Haghighatpour et al. [34]

งานวิจัยของ Alsaadi M et al. [35] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการแตกหักของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยกากตะกอนน้ำเสีย ซีเมนต์ลอย และซิลิคอนคาร์ไบด์ภายใต้ภาระแบบผสม 1 และ 3 ด้วยชิ้นทดสอบแบบมีรอยร้าวข้างเดียวรับแรงกดตัด 3 จุด (Single edge notch bend – three point bending test) การเปลี่ยนรูปแบบภาระที่กระทำกับชิ้นทดสอบทำได้โดยการเปลี่ยนทิศทางการทำมุมของรอยร้าวกับขอบชิ้นทดสอบ เมื่อต้องการให้ชิ้นทดสอบรับภาระรูปแบบที่ 1 ทิศทางรอยร้าวตั้งฉากกับขอบของชิ้นงานทดสอบ และเมื่อมุมของรอยร้าวเปลี่ยนแปลงไป ผลของมุมของรูปแบบผสม (Mode mixity angle, β) เปลี่ยนแปลงตามไปด้วย

งานวิจัยของ M.R.Ayatollahi et al. [36] ได้ทำการศึกษาชุดทดสอบความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบผสม 1 และ 3 แบบใหม่ โดยทำการทดสอบบนวัสดุอะคริลิก (Poly methyl methacrylate, PMMA) ด้วยชิ้นงานทดสอบแบบมีรอยร้าวข้างเดียวรับแรงดึง (Single edge notch tension, SENT) ทิศทางของรอยร้าวจะมีลักษณะตั้งฉากกับขอบของชิ้นงานทดสอบ ลักษณะการทดสอบแสดงดังรูปที่ 2.10 รูปแบบการรับภาระจะสามารถเปลี่ยนแปลงตำแหน่งตัวยึดอุปกรณ์ทดสอบเข้ากับเครื่องทดสอบซึ่งมีผลให้มุมของรูปแบบผสม (Mode mixity angle, β) เปลี่ยนแปลงไปด้วย และจากผลการศึกษาและเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่า ชุดทดสอบแบบใหม่ให้ผล

การทดสอบอยู่ในขอบเขตตามทฤษฎีกลศาสตร์การแตกหัก จึงสามารถประยุกต์ใช้ชุดทดสอบใหม่นี้กับการทดสอบความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบผสม 1 และ 3 บนวัสดุอื่น ๆ ได้



รูปที่ 2.10 แสดงการทดสอบความต้านทานการแตกหักงานวิจัยของคุณ M.R.Ayatollahi et al. [36]

2.6.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำนายความต้านทานการแตกหัก

คุณ A. Seibi et al. [5] พัฒนาแบบจำลองทำนายความต้านทานการแตกหักภายใต้การให้ภาระแบบแกนเดียว (Uniaxial loading) และแบบสองแกน (Biaxial loading) บนวัสดุอลูมิเนียมอัลลอยด์ 7075-T651 ด้วยอัลกอริทึมโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial neural network, ANN) ผลลัพธ์บ่งชี้ว่า ANN ทำนายความต้านทานการแตกหักภายใต้สภาวะต่าง ๆ มีความแม่นยำสูงถึง 91% และสามารถระบุความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์แต่ละตัวที่มีอิทธิพลต่อค่าความต้านทานการแตกหักโดยเฉลี่ย นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นว่าปัญญาประดิษฐ์เป็นเครื่องมือวิเคราะห์ที่มีประสิทธิภาพในการลดต้นทุน เวลา และเพิ่มความแม่นยำของการทำนายได้

งานวิจัยของ Jamal Bidadi et al. [37] กล่าวว่าเกณฑ์การแตกหักส่วนใหญ่มีผลการทำนายค่าคลื่อนจากผลการทดลองจริงอยู่มาก จึงนำเสนอเกณฑ์การแตกหักรูปแบบใหม่ที่เรียกว่า 3D-MSTN ซึ่งพัฒนามาจากเกณฑ์แบบ Maximum tangential strain criterion หรือ MTS เพื่อทำนายพฤติกรรมการแตกหักภายใต้ภาระแบบผสม 1 และ 3 ผลการศึกษาเมื่อเปรียบเทียบผลการทำนายบนวัสดุหลายชนิด พบว่าเกณฑ์การแตกหัก 3D-MSTN มีประสิทธิภาพการทำนายที่ดีกว่าเกณฑ์การแตกหักอื่น ๆ โดยมีความคลาดเคลื่อนของการทำนายอยู่ที่ 1.46-11.55%

คุณ Khader M.Hamdia et al. [38] พัฒนาแบบจำลองทำนายความต้านทานการแตกหักบนวัสดุโพลิเมอร์นาโนคอมโพสิตด้วยอัลกอริทึมโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial neural network, ANN) และวิธีระบบอนุมานฟัซซี่โครงข่ายปรับตัวได้ (Adaptive neuro-fuzzy inference

system, ANFIS) ด้วยจำนวนข้อมูลทั้งหมด 115 ข้อมูล ป้อนรับเข้า (Input) 5 ป้อนประสิทธิภาพ การทำนายผลเปรียบเทียบกับสมการการทำนายผลของเทียบกับสมการทำนายผลของคุณ Huang และ Kinloch พบว่าแบบจำลองปัญญาประดิษฐ์ ANN และ ANFIS มีประสิทธิภาพการทำนายที่ดีกว่า โดยมีค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ (Coefficients of determination, R^2) เท่ากับ 0.93 และ 0.94 ตามลำดับ ในขณะที่การทำนายด้วยสมการทำนายผลของคุณ Huang และ Kinloch ที่มีค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจเพียง 0.77 และ 0.86 ตามลำดับ

คุณ Ling Qiao et al. [39] พัฒนาแบบจำลองทำนายความต้านการแตกหักบนวัสดุ เหล็กเพิร์ลไลท์ (Pearlitic steel) ด้วยอัลกอริทึมโครงข่ายประสาทแบบถดถอยทั่วไป (Generalized regression neural network, GRNN) และเพิ่มประสิทธิภาพแบบจำลองด้วยวิธีการหาไฮเปอร์พารามิเตอร์ที่เหมาะสมโดยใช้อัลกอริทึมแบบแมลงหวี่ (Fruit fly optimization algorithm, FOA) โดยใช้ชุดข้อมูลขนาดเล็กที่มีจำนวนข้อมูลทั้งหมด 14 ข้อมูล ผลการวิจัยพบว่าประสิทธิภาพของแบบจำลองใกล้เคียงกับผลลัพธ์จริง และวิธีการหาไฮเปอร์พารามิเตอร์ที่เหมาะสมด้วยอัลกอริทึมแบบแมลงหวี่นั้นส่งผลให้แบบจำลองมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับวิธีการหาไฮเปอร์พารามิเตอร์ที่เหมาะสมด้วยการค้นหาแบบกริด (Grid search)

2.6.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้แบบจำลองหลายระดับความเที่ยงตรง (Multi-fidelity model)

งานวิจัย David J.J. Toal et al. [40] นำเสนอการพัฒนาและประเมินประสิทธิภาพของเทคนิคการสร้างแบบจำลองตัวแทน (Surrogate modeling) ด้วยวิธี Kriging ที่รวมข้อมูลจากหลายระดับความเที่ยงตรง (Multi-fidelity) และหลายผลลัพธ์ (Multi-output) เพื่อใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพการออกแบบทางวิศวกรรม การประเมินประสิทธิภาพดำเนินการผ่านสามกรณีศึกษาทางวิศวกรรมที่มีความหลากหลาย ได้แก่ การเพิ่มประสิทธิภาพการออกแบบแผ่นปีก (Airfoil) หลายแบบพร้อมกันโดยใช้ข้อมูลจากหลายระดับความเที่ยงตรง, การวิเคราะห์ผลกระทบของการเลือกวัสดุต่อการสั่นสะเทือนของโครงสร้างคาน (Truss) และการวิเคราะห์และปรับปรุงตำแหน่งของช่องเจาะของระบบเผาไหม้ในกังหันแก๊ส (Gas Turbine Combustor) โดยพิจารณารูปแบบโครงสร้างที่แตกต่างกัน การวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่า การรวมข้อมูลจากหลายระดับความเที่ยงตรงและหลายผลลัพธ์ภายในโมเดล Kriging สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการทำนายและการเพิ่มประสิทธิภาพการออกแบบทางวิศวกรรมได้อย่างมีนัยสำคัญ

งานวิจัยของ Wiangkham et al. [41] นำเสนอการปรับปรุงความแม่นยำของการทำนายค่าความต้านทานการแตกหักภายใต้การรับภาระแบบผสม 1 และ 2 ของวัสดุอะคริลิก (Polymethyl methacrylate, PMMA) โดยใช้แบบจำลองตัวแทนหลายความเที่ยงตรง (Multi-fidelity surrogate model) โดยใช้ข้อมูลจากการทดลองจริง (High-fidelity data) กับข้อมูลจากเกณฑ์การแตกหัก (Low-fidelity data) ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่สร้างจากข้อมูลทั้ง

สองแหล่งมีความแม่นยำในการทำนายสูงกว่าแบบจำลองที่ใช้ข้อมูลจากการทดลองเพียงอย่างเดียว และยังช่วยลดการใช้ข้อมูลจากการทดลองได้อีกด้วย

งานวิจัยของ Lyu et al. [42] ได้เสนอวิธีการใช้ข้อมูลจากหลายระดับความเที่ยงตรง (Multi-fidelity) เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพในการทำนายเชิงวิศวกรรม โดยเฉพาะในปัญหาที่เกี่ยวข้องกับการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (Partial differential equations, PDEs) เช่น การถ่ายเทความร้อน การแพร่ หรือการไหลของของไหลในสนามสามมิติ ซึ่งมักต้องใช้การจำลองที่แม่นยำและมีต้นทุนคำนวณสูงเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว นักวิจัยได้ใช้ Fourier neural operator (FNO) ซึ่งเป็นโครงข่ายประสาทเทียมที่ออกแบบมาเพื่อเรียนรู้การทำงานในเชิงฟังก์ชัน ซึ่งสามารถประมาณความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลรับเข้าและผลลัพธ์ของระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยได้โดยตรง นอกจากนี้ งานวิจัยยังใช้วิธีการถ่ายโอนความรู้ (Transfer learning) โดยเริ่มต้นฝึกแบบจำลองจากข้อมูลความเที่ยงตรงต่ำ (Low-fidelity) ที่มีจำนวนมาก แล้วถ่ายโอนความรู้ในรูปแบบของน้ำหนัก (Weights) ไปยังแบบจำลองที่ใช้ข้อมูลความเที่ยงตรงสูง (High-fidelity) ซึ่งมีจำนวนน้อยกว่า ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า วิธีการนี้สามารถลดความซับซ้อนของโครงสร้างแบบจำลองได้อย่างมีประสิทธิภาพ มีความแม่นยำใกล้เคียงกับการใช้ข้อมูลความเที่ยงตรงสูงเพียงอย่างเดียว และยังช่วยลดการเก็บข้อมูลความเที่ยงตรงสูงจำนวนมาก

งานวิจัยของ Liu et al. [43] ได้นำเสนอแบบจำลองหลายระดับความเที่ยงตรง โดยใช้ Adaptive transfer learning เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำนายของแบบจำลองในสถานการณ์ที่มีข้อมูลจำกัด โดยเฉพาะข้อมูลความเที่ยงตรงสูง ซึ่งมีความแม่นยำสูงแต่มีต้นทุนในการได้มาสูงและปริมาณจำกัด ผู้วิจัยได้พัฒนาแบบจำลองที่เรียกว่า Adaptive transfer learning net (AtNet) ซึ่งออกแบบมาเพื่อเรียนรู้จากข้อมูลหลายความเที่ยงตรง ผ่านการถ่ายโอนความรู้ที่มีความยืดหยุ่นและปรับตัวได้ แบบจำลอง AtNet ใช้ข้อมูลความเที่ยงตรงต่ำ ซึ่งมีปริมาณมากและต้นทุนต่ำ และจากนั้นจะทำการถ่ายโอนความรู้ไปยังงานที่ใช้ข้อมูลความเที่ยงตรงสูงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำนาย โดยผลการทดลองทั้งจากชุดข้อมูลจำลอง (Synthetic datasets) และกรณีศึกษาเชิงวิศวกรรมจริง แสดงให้เห็นว่า AtNet มีประสิทธิภาพกว่าวิธีการเรียนรู้หลายความเที่ยงตรงอื่น ๆ ทั้งในด้านความแม่นยำและความสามารถในการนำความรู้ที่เรียนรู้จากข้อมูลฝึกสอนไปใช้กับข้อมูลใหม่ที่ไม่เคยเห็นมาก่อนได้อย่างถูกต้อง (Generalization)