

การใช้ปัญญาประดิษฐ์ทำนายความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบผสม
1 และ 2 ของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยใบอ้อย



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและระบบกระบวนการ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2564

ARTIFICIAL INTELLIGENCE PREDICTIONS OF MIXED MODE I/II
FRACTURE TOUGHNESS ON EPOXY RESIN REINFORCED
SUGARCANE LEAVE FIBER



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Doctoral of Philosophy in Mechanical and Process System Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2021

การใช้ปัญญาประดิษฐ์ทำนายความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบผสม 1 และ
2 ของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยใบอ้อย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีอนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม
หลักสูตรปริญญาวิชาชีพบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

S. Bureerat

(ศ. ดร.สุจินต์ บุรีรัตน์)

ประธานกรรมการ

↓

(ผศ. ดร.ประเสริฐ เอ่งฉ้วน)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

อัญญา อธิภักดิ์

(ผศ. ดร.อัญญาพล อธิภักดิ์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม)

ว. วรณวนิช

(ผศ. ดร.วราณวนิช บุ่งสุต)

กรรมการ

อ. ดร.สมศักดิ์ ศิวดำรงพงศ์

(อ. ดร.สมศักดิ์ ศิวดำรงพงศ์)

กรรมการ

↓

(อ. ดร.จิตติมา วระกุล)

กรรมการ

ดร. ฉัตรชัย โชติษฐียงกูร

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและประกันคุณภาพ

ดร. พรศิริ จงกล

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

อรรถสิทธิ์ เวียงคำ: การใช้ปัญญาประดิษฐ์ทำนายความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาวะแบบผสม 1 และ 2 ของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยไบบออย (ARTIFICIAL INTELLIGENCE PREDICTIONS OF MIXED MODE I/II FRACTURE TOUGHNESS ON EPOXY RESIN REINFORCED SUGARCANE LEAVE FIBER) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประเสริฐ เองฉ้วน, 117 หน้า.

คำสำคัญ : เส้นใยไบบออย/อีพอกซีเรซิน/ความต้านทานการแตกหัก/ภาวะแบบผสม 1 และ 2/เกณฑ์การแตกหัก/ปัญญาประดิษฐ์

ปัจจุบันมนุษย์มีการจัดการของเสียอย่างเป็นระบบมากขึ้นไม่ว่าจะเป็นของเสียจากอุตสาหกรรมหรือของเสียจากภาคเกษตรกรรมที่ตอบสนองความต้องการด้านอุปโภคและบริโภค ซึ่งหนึ่งในนั้นคือการแปรรูปของเสียจากกระบวนการผลิตให้มีมูลค่ามากขึ้น การทำไบบออยนับเป็นหนึ่งในประเภทของภาคเกษตรกรรมที่ได้รับความนิยมในประเทศไทยที่ก่อให้เกิดของเสียจากขั้นตอนการเก็บเกี่ยวหรือการแปรรูปไม่ว่าจะเป็นขานอ้อยที่เป็นส่วนของลำต้นที่คั้นน้ำตาลออกแล้วหรือไบบออยที่ถูกตัดหรือลากลอบเผาเพื่อให้สามารถเก็บเกี่ยวอ้อยได้โดยง่าย นักวิจัยหลายท่านได้พยายามนำของเสียจากอ้อยไปใช้ให้เกิดประโยชน์ไม่ว่าจะเป็นการนำไปทำเป็นพลังงานทดแทนหรือการนำไปผสมกับวัสดุต่างๆ เพื่อสร้างเป็นวัสดุชนิดใหม่โดยมักจะเป็นการผสมกับอีพอกซีเรซินซึ่งเป็นวัสดุในกลุ่มพอลิเมอร์ เนื่องจากคุณสมบัติในการขึ้นรูปและคุณสมบัติทางกลที่ค่อนข้างสูง การนำวัสดุผสมดังกล่าวไปใช้งานในเชิงวิศวกรรมนอกเหนือจากคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ต้องคำนึงถึงแล้วนั้นยังมีอีกหนึ่งพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญไม่แพ้กันคือความต้านทานการแตกหักของวัสดุซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่อธิบายพฤติกรรมของวัสดุกรณีที่มีความไม่ต่อเนื่องหรือรอยร้าวเกิดขึ้นกับวัสดุและมีภาระภายนอกมากระทำซึ่งเหตุการณ์เหล่านี้มีโอกาสเกิดขึ้นได้ค่อนข้างสูงกับวัสดุผสม ความต้านทานการแตกหักสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 รูปแบบตามทิศทางของภาระที่กระทำกับพื้นผิวรอยร้าวซึ่งในความเป็นจริงทิศทางของภาระที่กระทำกับรอยร้าวส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นแบบผสมกัน โดยในงานวิจัยชิ้นนี้จะเลือกพิจารณาเฉพาะความต้านทานการแตกหักที่เกิดจากการรับภาระแบบผสม 1 และ 2 เท่านั้น ความต้านทานการแตกหักของวัสดุสามารถคำนวณได้หลายวิธีเช่น การทดสอบวัสดุจริงและนำค่าภาระที่ได้จากการทดสอบมาคำนวณด้วยสมการมาตรฐานหรือการทำนายผลด้วยสมการมาตรฐานทั่วไป เป็นต้น วิธีการคำนวณความต้านทานการแตกหักที่กล่าวถึงข้างต้นล้วนเป็นวิธีที่มีค่าใช้จ่ายที่สูงไม่ว่าจะเป็นค่าวัสดุหรือค่าอุปกรณ์คอมพิวเตอร์ อีกทั้งยังต้องการทักษะที่ค่อนข้างเฉพาะทางในการคำนวณ ในช่วงไม่กี่ปีมานี้มีนักวิจัยหลายท่านพยายามนำวิธีปัญญาประดิษฐ์ที่กำลังได้รับความนิยมเข้ามาช่วยในการคำนวณพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับความต้านทานการแตกหักของวัสดุ วิธีปัญญาประดิษฐ์เป็นการสร้างแบบจำลองเพื่อทำนายผลลัพธ์ของปัญหาใดๆ โดยอ้างอิงจากการทำงานของสมองมนุษย์ที่ตอบสนอง

ต่อสิ่งกระตุ้นภายนอก สำหรับงานวิจัยชิ้นนี้จะนำวิธีปัญญาประดิษฐ์มาช่วยในการทำนายความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบผสม 1 และ 2 ของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยใบบัวโดยเปรียบเทียบกับการทำนายจากเกณฑ์การแตกหักซึ่งเป็นสมการที่ถูกคิดค้นขึ้นเพื่อทำนายความต้านทานการแตกหักของวัสดุ การสร้างแบบจำลองปัญญาประดิษฐ์จะใช้ปัจจัยรับเข้า 3 ปัจจัยได้แก่ ความยาวของใบบัว (มิลลิเมตร) สัดส่วนการผสม (ร้อยละโดยน้ำหนัก) และพารามิเตอร์ของการรับภาระแบบผสม ผลลัพธ์หรือเป้าหมายของการทำนายได้แก่ ความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบที่ 1 (K_1) และความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบที่ 2 (K_2) อัลกอริทึมของปัญญาประดิษฐ์ที่เลือกใช้ประกอบด้วย โครงข่ายประสาทเทียม โครงข่ายประสาทแบบถดถอยทั่วไปและกระบวนการถดถอยแบบเกาส์เซียน ผลของการวิจัยแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการทำนายของวิธีปัญญาประดิษฐ์ที่ค่อนข้างสูงกว่าเมื่อเทียบกับเกณฑ์การแตกหักที่ถูกออกแบบมาเพื่อใช้ในการทำนายความต้านทานการแตกหักของวัสดุ



สาขาวิชา วิศวกรรมการผลิต

ปีการศึกษา 2564

ลายมือชื่อนักศึกษา อรรกรวี

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ✓

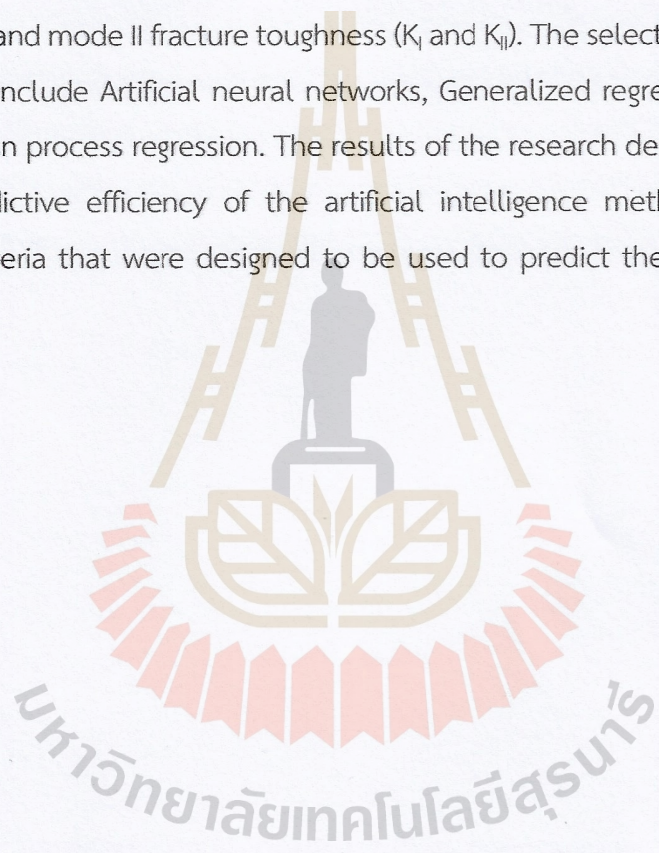
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม อัญญา วัฒนทนต์

ATTASIT WIANGKHAM : ARTIFICIAL INTELLIGENCE PREDICTIONS OF MIXED MODE I/II FRACTURE TOUGHNESS ON EPOXY RESIN REINFORCED SUGARCANE LEAVE FIBER. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. PRASERT AENGCHUAN, Ph.D.,117 PP.

Keyword : Sugarcane leaves fiber/Epoxy/Fracture toughness/Mixed mode i-ii/Fracture criteria/Artificial intelligence

Nowadays, human waste management is more systematic, whether it is industrial waste or agricultural waste that meets consumer and consumer needs. One of the waste managements is the processing of waste from the production process to be more valuable. Sugarcane cultivation is one of the popular agricultural sectors in Thailand that generates waste from the harvesting or processing process, such as bagasse which is the part of the trunk where the sugar is extracted, or the sugarcane leaves that have been cut or burned to make it easy to harvest. Many researchers have tried to make good use of the waste from sugarcane, whether it is used as renewable energy or mixed with other materials to create a new material, it is often mixed with epoxy resin, which is one of the polymer materials due to its high formability and mechanical properties. In the engineering application of such composites, in addition to the basic properties of the material to be considered another important parameter to be considered is the fracture toughness of the material. The fracture toughness describes the behavior of materials where unhomogenized or cracks occur in the material and are subjected to external loads which events are quite likely to occur with composites. Fracture toughness can be divided into three modes according to the direction of the load acting on the crack surface. In the fact, the direction of the load acting on the crack is mostly mixed modes. In this study, only the fracture toughness caused by mixed mode I and II was considered. The fracture toughness can be calculated in several ways such as testing the actual material and taking the load value obtained into standard equations or predicting results with general prediction standard equations etc. The fracture toughness calculation methods mentioned above are all costly methods, whether it is the cost of materials or the cost of computing equipment, and also require quite specialized skills in calculations. In recent years, a number of researchers have tried to

use artificial intelligence methods to calculate parameters related to fracture toughness of materials. The artificial intelligence method is modeling to predict the results of any problem based on the behavior of the human brain in response to external stimuli. In this study, an artificial intelligence method was applied to predict fracture toughness under mixed mode I and II loading of epoxy resin reinforced with sugarcane leaves fiber by comparing it with the fracture criteria. Artificial intelligence modeling uses three inputs were the length of the sugarcane leaves (mm), the mixing ratio. (percent by weight), and mixed mode parameters. The results of the prediction are mode I and mode II fracture toughness (K_I and K_{II}). The selected artificial intelligence algorithms include Artificial neural networks, Generalized regression neural networks, and Gaussian process regression. The results of the research demonstrated a relatively higher predictive efficiency of the artificial intelligence method compared to the fracture criteria that were designed to be used to predict the fracture toughness of materials.



School of Manufacturing Engineering
 Academic Year 2021

Student's Signature อรรถกร
 Advisor's Signature ✓
 Co-advisor's Signature อัญญา อัญญา

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยชิ้นนี้สามารถสำเร็จลงได้ด้วยดีนั้นเกิดจากความร่วมมือและความอนุเคราะห์ของหลายบุคคลด้วยกันไม่ว่าจะเป็น นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาร่วมสาขาวิชา เจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือและวิทยาศาสตร์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ต่างช่วยชี้แนะแนวทางการทำวิจัย สนับสนุนด้านวัสดุการทำวิจัย สนับสนุนเครื่องมือสำหรับการทำวิจัยและแนะแนวการเขียนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์ตามที่คาดหวัง

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณ บิดา มารดา ญาติสนิทมิตรสหายต่างๆ และคุณข้าวสวย (แพนสาว) ที่เป็นกำลังใจในช่วงเวลาที่ยากลำบากเสมอมา ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะ เป็นประโยชน์ต่อผู้อ่านที่ต้องการนำปัญญาประดิษฐ์มาประยุกต์ใช้ในเชิงวิศวกรรมและขอให้ผู้ที่ได้อ่านวิทยานิพนธ์เล่มนี้จงประสบความสำเร็จในการทำวิจัยตามที่คาดหวังไว้ทุกประการ

อรรณสิทธิ์ เวียงคำ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ณ
สารบัญรูปภาพ.....	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ต
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	4
1.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	4
1.5 สถานที่ทำวิจัย.....	4
1.6 เครื่องมือที่ใช้ในการทำวิจัย.....	4
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 อ้อย.....	6
2.2 อีพอกซีเรซิน (Epoxy resin).....	7
2.3 ความเสียหายของวัสดุ (Failure of materials).....	8
2.4 กลศาสตร์การแตกหัก (Fracture mechanics).....	11
2.5 วิธีปัญญาประดิษฐ์ (Artificial intelligence method).....	19
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	21
3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	29
3.1 การเตรียมวัสดุ.....	29
3.1.1 การเตรียมเส้นใยใบอ้อย.....	29

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.1.2 การออกแบบการทดลอง.....	31
3.1.3 การเตรียมอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยใบบัว.....	32
3.2 การทดสอบวัสดุ.....	34
3.2.1 การทดสอบแรงดึง (Tensile testing).....	34
3.2.2 การทดสอบความต้านทานการแตกหัก (Fracture toughness testing).....	36
3.2.3 การคำนวณความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบผสม 1 และ 2.....	38
3.3 การทำนายความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบผสม 1 และ 2.....	43
3.3.1 การทำนายด้วยเกณฑ์การแตกหัก (Fracture criterion).....	43
3.3.2 การทำนายผลด้วยวิธีปัญญาประดิษฐ์ (Artificial intelligence method).....	48
3.3.3 การปรับค่าไฮเปอร์พารามิเตอร์และการวัดประสิทธิภาพแบบจำลอง.....	55
4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล.....	58
4.1 ผลการทดสอบแรงดึง.....	58
4.2 ผลการทดสอบความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบผสม 1 และ 2.....	66
4.3 การทำนายความต้านทานการแตกหัก.....	74
4.3.1 การทำนายผลด้วยเกณฑ์การแตกหัก.....	74
4.3.2 การทำนายผลด้วยวิธีปัญญาประดิษฐ์.....	76
4.3.3 การปรับปรุงประสิทธิภาพการทำนายผลของแบบจำลองปัญญาประดิษฐ์.....	88
5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	91
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	91
5.1.1 คุณสมบัติทางกลของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยใบบัว.....	91
5.1.2 การทำนายความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบผสม 1 และ 2 ของ อีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยใบบัว.....	91
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	92
รายการอ้างอิง.....	94
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก ผลการทดสอบคุณสมบัติของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยใบบัว.....	101
ภาคผนวก ข ผลการทำนายความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบผสม 1 และ 2.....	104
ภาคผนวก ค บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา.....	112

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ประวัติผู้เขียน..... 117



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวัสดุผสมเศษอ้อย (กลุ่มวัสดุหลักพอลิเมอร์)	22
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวัสดุผสมจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร (กลุ่มความหนาแน่นต่ำ)	23
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับขนาดของเส้นใย (มิลลิเมตร) ต่อคุณสมบัติทางกลของวัสดุผสม	24
3.1 ตารางแสดงปัจจัยการออกแบบการทดสอบแรงดึง	31
3.2 ตารางแสดงปัจจัยการออกแบบการทดสอบความต้านทานการแตกหัก	32
3.3 ตารางแสดงขนาดของชิ้นงานทดสอบแรงดึง	35
3.4 ขนาดของชิ้นทดสอบความต้านทานการแตกหัก	37
3.5 ตารางแสดงมุมของรอยร้าวเริ่มต้นและปัจจัยรูปร่างชิ้นทดสอบที่สัดส่วน a_0/W และสัดส่วน S/W เท่ากับ 0.6	43
3.6 ไฮเปอร์พารามิเตอร์ของอัลกอริทึมที่เลือกใช้ในงานวิจัย	55
4.1 ตารางการปรับค่าที่เหมาะสมของไฮเปอร์พารามิเตอร์	79
4.2 เงื่อนไขการทดลองสำหรับการทำนายนอกเหนือจากปัจจัยที่ใช้สร้างแบบจำลอง	84
ก.1 ผลการทดสอบแรงดึงของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยใบอ้อย	102
ก.2 ผลการทดสอบความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบผสมที่ขนาด 1 มิลลิเมตร	102
ก.3 ผลการทดสอบความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบผสมที่ขนาด 2 มิลลิเมตร	103
ก.4 ผลการทดสอบความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบผสมที่ขนาด 3 มิลลิเมตร	103
ก.5 ผลการทดสอบความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบผสมที่ขนาด 4 มิลลิเมตร	103
ข.1 ผลการทำนายด้วยเกณฑ์การแตกหักของเส้นใยใบอ้อยขนาด 1 มิลลิเมตร	105
ข.2 ผลการทำนายด้วยเกณฑ์การแตกหักของเส้นใยใบอ้อยขนาด 2 มิลลิเมตร	106
ข.3 ผลการทำนายด้วยเกณฑ์การแตกหักของเส้นใยใบอ้อยขนาด 3 มิลลิเมตร	107
ข.4 ผลการทำนายด้วยเกณฑ์การแตกหักของเส้นใยใบอ้อยขนาด 4 มิลลิเมตร	107
ข.5 ชุดข้อมูลสำหรับการฝึกสอนแบบจำลองปัญญาประดิษฐ์	108
ข.6 ชุดข้อมูลสำหรับการทดสอบแบบจำลองปัญญาประดิษฐ์	109
ข.7 ผลการทำนายด้วยแบบจำลอง Multiple regression analysis	109
ข.8 ผลการทำนายด้วยแบบจำลอง Artificial neural networks	110
ข.9 ผลการทำนายด้วยแบบจำลอง Generalized regression neural networks	110

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข.10 ผลการทำนายด้วยแบบจำลอง Gaussian process regression	111



สารบัญรูปร่างภาพ

รูปที่	หน้า
2.1	โครงสร้างทางเคมีของ Bisphenol A..... 8
2.2	โครงสร้างทางเคมีของ Epichlorohydrin..... 8
2.3	โครงสร้างปฏิกิริยาของการสังเคราะห์อีพอกซีเรซิน..... 8
2.4	กราฟความสัมพันธ์ของความเค้น (Stress) กับความเครียด (Strain)..... 9
2.5	กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นกับความเครียดของวัสดุเปราะและวัสดุเหนียว..... 10
2.6	ผลกระทบของความหนาต่อความต้านทานการแตกหัก..... 16
2.7	รูปแบบการเสีรูปร่างที่ปลายรอยร้าวของวัสดุ..... 17
2.8	เอลิเมนต์รอยร้าวของ Byskov..... 19
2.9	เอลิเมนต์ไอโซพาราเมตริก..... 19
2.10	เอลิเมนต์เอกฐานไอโซพาราเมตริก..... 19
2.11	ความสัมพันธ์ของปัญญาประดิษฐ์ การเรียนรู้ของเครื่องและการเรียนรู้เชิงลึก..... 20
2.12	ขั้นตอนทดสอบความต้านทานการแตกหักตามงานวิจัยของคุณ M Zappalorto et al.[41]..... 25
2.13	ขั้นตอนทดสอบความต้านทานการแตกหักตามงานวิจัยของคุณ A Mousavi et al.[42]..... 25
2.14	ขั้นตอนทดสอบความต้านทานการแตกหักตามงานวิจัยของคุณ SS Mousavi et al.[43]..... 26
2.15	ขั้นตอนทดสอบความต้านทานการแตกหักตามงานวิจัยของคุณ MRM Aliha et al.[44]..... 27
3.1	ขั้นตอนการปรับปรุงใบอ้อยตามงานวิจัยของคุณ MR Cabral et al.[48]..... 30
3.2	เส้นใยใบอ้อยหลังปรับปรุงคุณสมบัติตามงานวิจัยของคุณ MR Cabral et al.[48]..... 30
3.3	การวัดเส้นใยใบอ้อยด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง..... 30
3.4	ขนาดของเส้นใยใบอ้อยที่ตะแกรงร่อนเบอร์ 18, 35, 60 และ 120..... 31
3.5	การใส่เส้นใยใบอ้อยลงในแม่พิมพ์ซิลิโคนในขั้นตอนการเตรียมอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยใบอ้อย..... 33
3.6	ขั้นตอนการจัดฟองอากาศที่อาจเกิดขึ้นจากขั้นตอนการเทอีพอกซีเรซินลงแม่พิมพ์..... 33
3.7	การเตรียมชิ้นงานสำหรับถ่ายภาพการกระจายตัวของเส้นใยใบอ้อยด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง..... 34
3.8	รูปร่างของขั้นตอนทดสอบแรงดึง..... 35
3.9	ลักษณะของการทดสอบแรงดึง..... 35

สารบัญรูปร่างภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.10 การเตรียมชิ้นงานทดสอบแรงดึงเพื่อศึกษาผลกระทบของการเตรียมวัสดุ.....	36
3.11 รูปร่างของชิ้นทดสอบความต้านทานการแตกหัก	37
3.12 ลักษณะการทดสอบความต้านทานการแตกหักบนเครื่องทดสอบเนกประสงค์	38
3.13 การวัดมุมของรอยร้าวเริ่มต้นด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่มุมของรอยร้าวเริ่มต้น 20°	38
3.14 การแบ่งเอลิเมนต์ของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์	40
3.15 ผลของภาระและระยะยึดของชิ้นทดสอบความต้านทานการแตกหักจากการทดสอบจริง เทียบกับระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	41
3.16 ปัจจัยรูปร่างชิ้นทดสอบที่สัดส่วนของระยะพิน (S/W) เท่ากับ 0.5	42
3.17 ปัจจัยรูปร่างชิ้นทดสอบที่สัดส่วนของระยะพิน (S/W) เท่ากับ 0.6	42
3.18 ค่า T-Stress ตามเงื่อนไขการทดสอบตามตารางที่ 3.5	45
3.19 แผนผังการสร้างแบบจำลองปัญหาประดิษฐ์.....	48
3.20 แผนผังวิธีการสอบทวนไขว้แบบ K-Fold.....	49
3.21 โครงสร้างของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม.....	50
3.22 โครงสร้างของแบบจำลองโครงข่ายแบบถดถอยทั่วไป	52
4.1 ผลความเค้นครากของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยไบอล์ที่ยึดส่วนต่างๆ	59
4.2 ผลความเค้นแรงดึงของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยไบอล์ที่ยึดส่วนต่างๆ.....	60
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นคราก ความเค้นแรงดึงและสัดส่วนการผสมเส้นใยไบอล์ที่ ขนาดเส้นใยไบอล์ 3 มิลลิเมตร	60
4.4 ผลโมดูลัสความยืดหยุ่นของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยไบอล์ที่ยึดส่วนต่างๆ.....	61
4.5 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนความเค้นครากของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วย เส้นใยไบอล์	62
4.6 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนความเค้นแรงดึงของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วย เส้นใยไบอล์	62
4.7 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนโมดูลัสความยืดหยุ่นของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วย เส้นใยไบอล์	63
4.8 ภาพถ่ายการกระจายตัวของเส้นใยไบอล์ในอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยไบอล์	64
4.9 ผลความเค้นครากต่อน้ำหนักของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยไบอล์ที่ยึดส่วนต่างๆ.....	65
4.10 ผลความเค้นแรงดึงต่อน้ำหนักของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยไบอล์ที่ยึดส่วนต่างๆ....	66

สารบัญรูปร่างภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.11 ผลโมดูลัสความยืดหยุ่นต่อน้ำหนักของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยใบบัวที่สัดส่วน ต่างๆ	66
4.12 ขึ้นทดสอบความต้านทานการแตกหักของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยใบบัว	67
4.13 ความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบผสม 1 และ 2 ของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วย เส้นใยใบบัวร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก	68
4.14 ความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบผสม 1 และ 2 ของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วย เส้นใยใบบัวร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก	69
4.15 ความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบผสม 1 และ 2 ของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วย เส้นใยใบบัวร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก	69
4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างภาระและระยะยืดของขึ้นทดสอบความต้านทานการแตกหักที่ สัดส่วนการผสมร้อยละ 5 โดยน้ำหนักและค่า M^e เท่ากับ 0.5	70
4.17 กลไกการแตกหักของขึ้นทดสอบความต้านทานการแตกหัก	70
4.18 พื้นผิวการแตกหักของขึ้นทดสอบความต้านทานการแตกหักที่ค่า $M^e=1$	71
4.19 พื้นผิวการแตกหักของขึ้นทดสอบความต้านทานการแตกหักที่ค่า $M^e=0.5$	72
4.20 พื้นผิวการแตกหักของขึ้นทดสอบความต้านทานการแตกหักที่ค่า $M^e=0$	73
4.21 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบที่ 1	74
4.22 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบที่ 2	74
4.23 ผลการทำนายความต้านทานการแตกหักด้วยเกณฑ์การแตกหักที่ขนาดเส้นใย ใบบัว 3 มิลลิเมตร	76
4.24 ผลการทำนายความต้านทานการแตกหักด้วยวิธีการวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณ	78
4.25 ผลการทำนายความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบที่ 1 ด้วยแบบจำลอง โครงข่ายประสาทเทียม	80
4.26 ผลการทำนายความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบที่ 1 ของแบบจำลอง โครงข่ายประสาทเทียมในช่วงการฝึกสอนเทียบกับผลการทดลองจริง	80
4.27 ผลการทำนายความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบที่ 2 ด้วยแบบจำลองโครงข่าย ประสาทเทียม	81
4.28 ผลการทำนายความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบที่ 1 ด้วยแบบจำลองโครงข่าย ประสาทแบบถดถอยทั่วไป	82

สารบัญรูปรภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.29 ผลการทำนายความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบที่ 2 ด้วยแบบจำลองโครงข่าย ประสาทแบบถดถอยทั่วไป.....	82
4.30 ผลการทำนายความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบที่ 1 ด้วยแบบจำลองกระบวนการ การถดถอยแบบเกาส์เซียน.....	83
4.31 ผลการทำนายความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบที่ 2 ด้วยแบบจำลองกระบวนการ การถดถอยแบบเกาส์เซียน	84
4.32 ผลการทำนายความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบที่ 1 นอกเหนือปัจจัยที่ใช้สร้าง แบบจำลอง.....	86
4.33 ผลความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ระหว่างค่าทำนายกับค่าทดสอบจริงของความต้านทานการ แตกหักภายใต้ภาระแบบที่ 1	86
4.34 ผลการทำนายความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบที่ 2 นอกเหนือปัจจัยที่ใช้สร้าง แบบจำลอง.....	87
4.35 ผลความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ระหว่างค่าทำนายกับค่าทดสอบจริงของความต้านทานการ แตกหักภายใต้ภาระแบบที่ 2	88
4.36 ความสัมพันธ์ของจำนวนข้อมูลกับประสิทธิภาพการทำนายผลของแบบจำลองปัญญา ประดิษฐ์.....	89
4.37 การแบ่งกลุ่มข้อมูลสำหรับการปรับปรุงประสิทธิภาพแบบจำลองปัญญาประดิษฐ์	89
4.38 ผลการทำนายความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบที่ 1 หลังการปรับปรุง.....	90
4.39 ผลการทำนายความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบที่ 2 หลังการปรับปรุง	90

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

β	=	มุมของรอยร้าวเริ่มต้น
σ_{00}	=	ความเค้นสัมผัส
σ_f	=	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัญญาณ (Signal standard deviation)
σ_n	=	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการรบกวน (Noise standard deviation)
σ_s	=	พารามิเตอร์สำหรับปรับความเรียบ (Smoothing parameter)
σ_t	=	ความเค้นแรงดึง
ANNs	=	โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial neural networks)
ASED	=	เกณฑ์การแตกหักแบบ Average strain energy density
GMTS	=	เกณฑ์การแตกหักแบบ Generalized maximum tangential stress
GPR	=	กระบวนการถดถอยแบบเกาส์เซียน (Gaussian process regression)
GRNNs	=	โครงข่ายประสาทแบบถดถอยทั่วไป (Generalized regression neural networks)
ICB	=	ขั้นตอนทดสอบประเภทรอยร้าวแบบเฉียงรับแรงดัด
K_I	=	ตัวประกอบความเข้มของความเค้นภายใต้ภาระแบบที่ 1
K_{II}	=	ตัวประกอบความเข้มของความเค้นภายใต้ภาระแบบที่ 2
M^e	=	พารามิเตอร์ของการรับภาระแบบผสม (Mode mixing parameters)
l	=	มาตราส่วนความยาวที่ใช้วัดระยะหนึ่งของปัจจัยรับเข้า (Length-scale)
OM	=	กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical microscope)
R_{1C}	=	รัศมีปริมาตรควบคุมภายใต้ภาระแบบที่ 1
R_{2C}	=	รัศมีปริมาตรควบคุมภายใต้ภาระแบบที่ 2
r_c	=	ระยะวิกฤต
UTM	=	เครื่องทดสอบแบบอเนกประสงค์ (Universal testing machine)
Y_I	=	ปัจจัยรูปร่างขั้นตอนทดสอบภายใต้ภาระแบบที่ 1 (Mode I geometry factor)
Y_{II}	=	ปัจจัยรูปร่างขั้นตอนทดสอบภายใต้ภาระแบบที่ 2 (Mode II geometry factor)

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

ปัจจุบันโลกของเราได้เข้าสู่ยุคที่มีการพัฒนาเทคโนโลยีขั้นสูงอย่างก้าวกระโดด มีการจัดตั้งโรงงานอุตสาหกรรมใหม่ๆ มากมายทั่วโลก อย่างไรก็ตามแม้จะมีสัดส่วนของภาคอุตสาหกรรมเกี่ยวกับเทคโนโลยีค่อนข้างสูงในหลายประเทศแต่ก็ยังคงมีหลายส่วนในประเทศเหล่านั้นที่ถูกแบ่งออกมาเพื่อ การเกษตรกรรมซึ่งนับเป็นสัดส่วนของอุตสาหกรรมที่ค่อนข้างใหญ่เมื่อเทียบกับภาพรวมของ อุตสาหกรรมภายในประเทศ การพัฒนาของเทคโนโลยีที่ก้าวกระโดดนี้เองทำให้สังคมปัจจุบันเริ่มมี การตระหนักถึงการรักษาสิ่งแวดล้อมมากยิ่งขึ้น มีการคิดค้นวิธีการมากมายเพื่อลดมลพิษที่เกิดขึ้นกับ โลกเพื่อให้มนุษย์สามารถอยู่อาศัยอย่างสะดวกสบายต่อไปได้อีกยาวนาน โดยหนึ่งในวิธีการลดมลพิษ ที่ได้รับความนิยมคือวิธีการจัดการของเสียอย่างเป็นระบบ ไม่ว่าจะเป็นของเสียจากอุตสาหกรรม เทคโนโลยีที่ตอบสนองความต้องการด้านความเป็นอยู่ของมนุษย์หรือของเสียจากภาคเกษตรกรรมที่ ตอบสนองความต้องการด้านอุปโภคและบริโภค การจัดการของเสียอย่างเป็นระบบประกอบด้วย วิธีการต่างๆ อาทิ การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตหรือการเพาะปลูกเพื่อลดของเสียที่เกิดขึ้นตั้งแต่ ช่วงเริ่มต้นของกระบวนการ การแปรรูปของเสียจากกระบวนการผลิตหรือการเพาะปลูกให้มีมูลค่า มากกว่าการกำจัดทิ้งแบบเดิม เป็นต้น ซึ่งในส่วนต่อไปของการวิจัยนี้จะกล่าวถึงเฉพาะของเสียที่เกิด จากภาคการเกษตรเท่านั้น

สำหรับภาคเกษตรกรรมของแต่ละประเทศจะมีลักษณะการทำเกษตรกรรมที่แตกต่างกัน ตามแต่ความต้องการพื้นฐานของประเทศนั้นๆ ไม่ว่าจะเป็นการใช้เป็นอาหาร ทำเชื้อเพลิง หรือทำ เครื่องนุ่งห่ม เป็นต้น ในปีพ.ศ. 2563 ข้อมูลจากกระทรวงเกษตรและสหกรณ์แห่งประเทศไทยระบุว่า ผลผลิตจากภาคการเกษตรในประเทศคิดเป็นมูลค่าประมาณ 8% ของผลิตภัณฑ์มวลรวมของประเทศ (GDP) ซึ่งการทำไร่ไถ่ยังเป็นหนึ่งในประเภทของภาคเกษตรกรรมที่ได้รับความนิยมในประเทศไทย การทำไร่ไถ่ก่อให้เกิดของเสียจากขั้นตอนการเก็บเกี่ยวหรือการแปรรูปไม่ว่าจะเป็นขานอ้อยที่เป็น ส่วนของลำต้นที่คั้นน้ำตาลออกแล้วหรือใบอ้อยที่ถูกตัดหรือลากลอบเผาเพื่อให้อ้อยสามารถเก็บเกี่ยวได้ โดยง่าย นักวิจัยหลายท่านได้พยายามนำของเสียจากอ้อยไปใช้ให้เกิดประโยชน์ไม่ว่าจะเป็นนำไป ทำเป็นพลังงานทดแทน [1, 2] หรือการนำไปผสมกับวัสดุต่างๆ เพื่อสร้างเป็นวัสดุชนิดใหม่ [3-5] เป็นต้น เมื่อมีการนำวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมาผสมเป็นวัสดุชนิดใหม่มักจะเป็นการผสมกับวัสดุกลุ่ม พอลิเมอร์เนื่องจากคุณสมบัติในการขึ้นรูปและคุณสมบัติทางกลที่ค่อนข้างดี [6-8] ซึ่งอีพอกซีเรซินก็ นับเป็นหนึ่งในพอลิเมอร์ที่ได้รับความนิยมในการนำมาทำเป็นวัสดุหลักของวัสดุผสมเหล่านั้น อีพอกซี-

เรซินมีลักษณะกายภาพก่อนการผสมกับสารช่วยแข็งตัวเป็นของเหลวที่มีความหนืดค่อนข้างต่ำสามารถไหลได้ดี ทำให้สามารถหล่อขึ้นรูปเป็นรูปร่างที่ซับซ้อนได้ อีพอกซีเรซินเมื่อผสมกับสารช่วยแข็งตัวจะเริ่มเกิดปฏิกิริยาทางเคมีจนเกิดการแข็งตัวในที่สุดซึ่งระยะเวลาการแข็งตัวขึ้นอยู่กับประเภทและสัดส่วนการผสมของอีพอกซีเรซิน เมื่อแข็งตัวเต็มที่แล้วจะมีคุณสมบัติทางกลที่ค่อนข้างสูง ทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมีและมีความสามารถในการต้านทานไฟฟ้า เป็นต้น การนำวัสดุผสมจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรและอีพอกซีเรซินไปใช้งานในเชิงวิศวกรรมนอกเหนือจากคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ต้องคำนึงถึงแล้วนั้นความต้านทานการแตกหักของวัสดุนับเป็นอีกหนึ่งพารามิเตอร์ที่ต้องคำนึงถึง สำหรับการผสมวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรกับอีพอกซีเรซินนั้นนอกจากจะเป็นการช่วยลดปริมาณการใช้อีพอกซีเรซินซึ่งเป็นวัสดุหลักในวัสดุผสมลงแล้วนั้นยังถือเป็นการช่วยลดการนำอีพอกซีเรซินไปใช้งานที่เกินกว่าที่จำเป็นกล่าวคือ จากการศึกษาเบื้องต้นจะพบว่าอีพอกซีเรซินนั้นมีความคุณสมบัติทางกลที่ค่อนข้างสูงแต่กลับถูกนำไปใช้งานที่ต้องรับภาระที่สัมพันธ์กับคุณสมบัติต่างๆ ที่ค่อนข้างต่ำ

สำหรับความต้านทานการแตกหักเป็นพารามิเตอร์ที่อธิบายพฤติกรรมของวัสดุกรณีที่มีความไม่ต่อเนื่องหรือรอยร้าวเกิดขึ้นกับวัสดุและมีภาระภายนอกมากระทำซึ่งเหตุการณ์เหล่านี้มีโอกาสเกิดขึ้นได้ค่อนข้างสูงกับวัสดุผสม ความต้านทานการแตกหักสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 รูปแบบตามทิศทางของภาระที่กระทำกับพื้นผิวรอยร้าว [9] ซึ่งในความเป็นจริงทิศทางของภาระที่กระทำกับรอยร้าวส่วนใหญ่มักจะเกิดขึ้นแบบผสมกัน โดยในงานวิจัยชิ้นนี้จะเลือกพิจารณาเฉพาะความต้านทานการแตกหักที่เกิดจากการรับภาระแบบผสม 1 และ 2 เท่านั้นซึ่งเป็นรูปแบบของความต้านทานการแตกหักที่ได้รับความนิยมในการศึกษา ความต้านทานการแตกหักของวัสดุสามารถคำนวณได้หลายวิธีเช่น การทดสอบวัสดุจริงและนำค่าภาระที่ได้จากการทดสอบมาคำนวณด้วยสมการมาตรฐาน [10, 11] หรือการทำนายผลด้วยสมการมาตรฐานทั่วไป [12, 13] เป็นต้น การคำนวณความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบผสมของอีพอกซีเรซินบริสุทธิ์ซึ่งเป็นวัสดุหลักของวัสดุผสมเหลือใช้ทางการเกษตรนั้นสามารถคำนวณได้จากการทดสอบวัสดุจริงและนำผลการทดสอบที่ได้ไปคำนวณต่อด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ [14] ซึ่งเป็นการคำนวณที่มีความซับซ้อนและต้องใช้เวลาในการคำนวณที่ค่อนข้างมาก อีกทั้งยังสามารถเกิดความผิดพลาดขึ้นได้โดยง่ายไม่ว่าจะเป็นความผิดพลาดจากการเตรียมชิ้นทดสอบหรือการคำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ การคำนวณความต้านทานการแตกหักของวัสดุอีพอกซีเรซินบริสุทธิ์หรือวัสดุอื่นที่กล่าวถึงข้างต้นล้วนเป็นวิธีที่ใช้ทรัพยากรสูงไม่ว่าจะเป็นค่าวัสดุสำหรับการทดสอบหรือค่าอุปกรณ์คอมพิวเตอร์สำหรับการคำนวณ อีกทั้งยังต้องการทักษะที่ค่อนข้างเฉพาะทางในการคำนวณความต้านทานการแตกหัก เพื่อลดการใช้ทรัพยากรหรือความยุ่งยากที่เกิดขึ้นในการคำนวณความต้านทานการแตกหักทำให้ในช่วงไม่กี่ปีมานี้มีนักวิจัยหลายท่านพยายามนำวิธีปัญญาประดิษฐ์ที่กำลังได้รับความนิยมเข้ามาช่วยในการคำนวณพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับความ

ด้านทานการแตกหักของวัสดุไม่ว่าจะเป็นการทำนายความต้านทานการแตกหัก [15-17] การทำนายหรืออธิบายทิศทางการขยายตัวของรอยร้าว [18, 19]

วิธีปัญญาประดิษฐ์เป็นการสร้างแบบจำลองเพื่อทำนายผลลัพธ์ของปัญหาโดยอ้างอิงจากการทำงานของสมองมนุษย์ที่เมื่อมีสิ่งกระตุ้นภายนอกมากกระทำกับร่างกาย สัญญาณจะถูกส่งผ่านเซลล์ประสาทเข้าสู่สมองเพื่อตัดสินใจในการตอบสนองต่อสิ่งกระตุ้นภายนอกนั้น การสร้างแบบจำลองปัญญาประดิษฐ์แบ่งเป็นขั้นตอนการเรียนรู้ของแบบจำลองที่อ้างอิงมาจากการเรียนรู้ของมนุษย์และขั้นตอนการทดสอบแบบจำลองที่พิจารณาว่าแบบจำลองสามารถรับมือกับปัญหาได้ดีหรือไม่ สำหรับงานวิจัยชิ้นนี้จะนำวิธีปัญญาประดิษฐ์มาช่วยในการทำนายความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบผสม 1 และ 2 ของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยไบออยโดยเปรียบเทียบกับการทำนายจากเกณฑ์การแตกหักซึ่งเป็นสมการที่ถูกคิดค้นขึ้นเพื่อทำนายความต้านทานการแตกหักของวัสดุ การสร้างแบบจำลองปัญญาประดิษฐ์จะใช้ปัจจัยรับเข้า 3 ปัจจัยได้แก่ ความยาวของเส้นใยไบออย (มิลลิเมตร) สัดส่วนการผสม (ร้อยละโดยน้ำหนัก) และพารามิเตอร์ของการรับภาระแบบผสม ผลลัพธ์หรือเป้าหมายของการทำนายได้แก่ ความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบที่ 1 (K_I) และความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบที่ 2 (K_{II}) อัลกอริทึมของปัญญาประดิษฐ์ที่เลือกใช้ได้แก่ โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial neuron network, ANNs) โครงข่ายประสาทแบบถดถอยทั่วไป (Generalized regression neural network, GRNNs) และกระบวนการถดถอยแบบเกาส์เซียน (Gaussian process regression, GPR)

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาผลกระทบของความยาวเส้นใยไบออยต่อความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบผสม 1 และ 2 ของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยไบออย

1.2.2 เพื่อศึกษาผลกระทบของสัดส่วนการผสมเส้นใยไบออยต่อความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบผสม 1 และ 2 ของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยไบออย

1.2.3 เพื่อศึกษาผลกระทบร่วมระหว่างความยาวเส้นใยไบออยและสัดส่วนการผสมของเส้นใยไบออยต่อความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบผสม 1 และ 2 ของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยไบออย

1.2.4 เพื่อสร้างสมการทำนายผลความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบผสม 1 และ 2 ของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยไบออยภายใต้อิทธิพลของความยาวเส้นใยไบออยและสัดส่วนการผสมเส้นใยไบออยด้วยวิธีปัญญาประดิษฐ์

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 ศึกษาบ่อนอีพอกซีชนิด Diglycidyl ether Bisphenol-A (DGEBA) และสารช่วยให้แข็งตัว (Hardener) ชนิด Aliphatic Amine
- 1.3.2 ศึกษาบ่อนไบออยพ่นซ์ขอนแก่น
- 1.3.3 ศึกษาผลกระทบของความยาวเส้นใยไบออยขนาด 1, 2, 3 และ 4 มิลลิเมตรต่อวัสดุอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยไบออย
- 1.3.4 ศึกษาผลกระทบของสัดส่วนการผสมเส้นใยไบออยในวัสดุผสมคิดเป็นร้อยละโดยน้ำหนักเท่ากับ 5, 10 และ 15
- 1.3.5 ศึกษาผลกระทบร่วมของความยาวเส้นใยไบออยและสัดส่วนการผสมเส้นใยไบออยต่อความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบผสม 1 และ 2 ของวัสดุอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยไบออย
- 1.3.6 สร้างแบบจำลองทำนายความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบผสม 1 และ 2 ด้วยวิธีการเรียนรู้แบบมีผู้ฝึกสอน (Supervised learning)
- 1.3.7 วัดประสิทธิภาพการทำนายผลของแบบจำลองปัญญาประดิษฐ์ภายใต้ขอบเขตของปัจจัยที่ใช้สร้างแบบจำลองเท่านั้น

1.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย

- 1.4.1 ศึกษาข้อมูลหรืองานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 1.4.2 ออกแบบการทดลองและเตรียมชิ้นทดสอบสำหรับการทดสอบ
- 1.4.3 ทดสอบตามการออกแบบการทดลองที่ออกแบบไว้
- 1.4.4 วิเคราะห์ผลการทดลองและสร้างแบบจำลองทำนายผลการทดลอง
- 1.4.5 สรุปผลการทดลอง
- 1.4.6 เผยแพร่งานวิจัย

1.5 สถานที่ทำวิจัย

- 1.5.1 อาคารเครื่องมือ 1, 3, 5, 6 และ 10 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ตำบลสุรนารี อำเภอเมืองนครราชสีมา จังหวัดนครราชสีมา

1.6 เครื่องมือที่ใช้ในการทำวิจัย

- 1.6.1 เครื่องบด (Crushing machine) ยี่ห้อ Fritsch รุ่น Fritsch D-55734 สำหรับบดเส้นใยไบออย

- 1.6.2 เครื่องร่อนและตะแกรงร่อน (Sieve shaker machine) ยี่ห้อ Fritsch รุ่น A-3 Pro สำหรับการร่อนเส้นใยไบโອයที่ผ่านการบดแล้วเพื่อคัดแยกขนาด
- 1.6.3 เครื่องกวนสารแบบแม่เหล็ก (Magnetic stirrer) สำหรับการผสมอีพอกซีเรซิน
- 1.6.4 เครื่องสุญญากาศ (Vacuum chamber) สำหรับการกำจัดฟองอากาศที่เกิดขึ้นกับวัสดุผสม
- 1.6.5 ตู้อบลมร้อน (Hot air oven) สำหรับขั้นตอนการเตรียมอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยไบโອය
- 1.6.6 เครื่องกัด (Milling machine) สำหรับการเตรียมชิ้นทดสอบให้ตามขนาดที่ต้องการ
- 1.6.7 เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal testing machine, UTM) ยี่ห้อ Lloyd รุ่น LD series กำลังการทดสอบ 100 กิโลนิวตัน สำหรับการทดสอบการรับแรงดึงและความต้านทานการแตกหักของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยไบโອය
- 1.6.8 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical microscope, OM) ยี่ห้อ Leica สำหรับการวัดขนาดของเส้นใยไบโອය ความยาวรอยร้าวเริ่มต้นของชิ้นทดสอบความต้านทานการแตกหักและการศึกษาพื้นผิวการแตกหักของชิ้นทดสอบ
- 1.6.9 คอมพิวเตอร์สมรรถนะสูงพร้อมโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรมกรรม ABAQUS สำหรับการคำนวณพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับความต้านทานการแตกหักของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยไบโອය

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.7.1 ทราบถึงผลกระทบของความยาวเส้นใยไบโອයต่อความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบผสม 1 และ 2 ของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยไบโອය
- 1.7.2 ทราบถึงผลกระทบของสัดส่วนการผสมเส้นใยไบโອයต่อความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบผสม 1 และ 2 ของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยไบโອය
- 1.7.3 ทราบถึงผลกระทบร่วมของความยาวเส้นใยไบโອයและสัดส่วนการผสมเส้นใยไบโອයต่อความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบผสม 1 และ 2 ของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยไบโອය
- 1.7.4 สามารถสร้างแบบจำลองปัญญาประดิษฐ์ในการทำนายความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบผสม 1 และ 2 ของพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยไบโອයภายใต้อิทธิพลของความยาวเส้นใยไบโອයและสัดส่วนการผสมเส้นใยไบโອය

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 อ้อย

อ้อย [20, 21] มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Saccharum officinarum* เป็นพืชในตระกูล Poaceae หรือ Gramineae วงศ์เดียวกับไผ่ หญ้าและธัญพืชต่างๆ เช่น ข้าว ข้าวสาลี ข้าวโพด เป็นต้น อ้อยนั้นมีการกำเนิดในเขตร้อนของทวีปเอเชียซึ่งส่วนใหญ่จะถูกนำมาใช้ทำน้ำตาลเพื่อการอุปโภคและบริโภค โดยลำต้นของอ้อยจะมีน้ำตาลซูโครสประมาณ 17-35% เมื่อลำต้นถูกคั้นเอาน้ำอ้อยออกมาเรียบร้อยแล้วจะเรียกส่วนนั้นว่า ชานอ้อย (Bagasse) ซึ่งสามารถนำไปทำเป็นกระดาษ พลาสติก เป็นเชื้อเพลิง หรืออาหารสัตว์ เป็นต้น อ้อยเป็นพืชชนิดหนึ่งที่มีความสำคัญเป็นอย่างมากเมื่อพิจารณาในแง่ของผลผลิตเพราะอ้อยสามารถใช้ปัจจัยสำหรับการเจริญเติบโตเช่น แสงแดด น้ำ อากาศ และธาตุอาหารได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้อ้อยยังเป็นพืชที่ปลูกง่ายและเมื่อปลูกครั้งหนึ่งแล้ว สามารถเก็บเกี่ยวได้หลายครั้ง อ้อยชอบอากาศร้อนและชุ่มชื้น ดังนั้นประเทศที่ปลูกอ้อย ซึ่งมีประมาณ 70 ประเทศจึงอยู่ในแถบร้อนและชุ่มชื้นในระหว่างเส้นรุ้งที่ 35 องศาเหนือ และ 35 องศาใต้ ประเทศผู้ปลูกอ้อยที่สำคัญ ได้แก่ บราซิล คิวบา อินเดีย อ้อยมีลักษณะทางพฤกษศาสตร์เป็นไม้ล้มลุก สูง 2 ถึง 5 เมตร แตกกอแน่น ลำต้นสีม่วงแดงตั้งหรือมีโคนทอดเอน มีเขี้ยวปกคลุม ไม่แตกกิ่งก้าน ใบเดี่ยวเรียงสลับเป็น 2 แถว กว้าง 2.5 ถึง 5 เซนติเมตร ยาว 0.5 ถึง 1 เมตร ใบตั้งหรือทอดโค้ง ใบรูปใบหอกแกมรูปแถบขอบใบมีหนามเล็กๆหยาบ ดอกช่อ ออกที่ปลายยอด ช่อแยกแขนง รูปพีระมิด เปราะ ช่อดอกย่อยรูปใบหอกถึงรูปใบหอกแกมรูปขอบขนาน มีขนสีขาวยปกคลุม ผลเป็นผลแบบผลธัญพืช แห้งและมีขนาดเล็ก

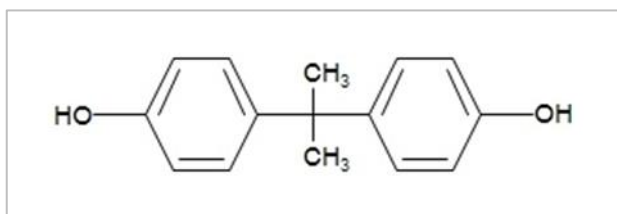
ลักษณะทั่วไปของอ้อยเมื่อแยกตามส่วนประกอบสามารถสรุปได้ดังนี้

- รากของอ้อยนั้นจะเป็นรากที่อยู่ใต้ดิน มีขนาดใหญ่กระจายทั่วลำต้น มีความยาวประมาณ 100 เซนติเมตร โดยรากของอ้อยนั้นจะแบ่งออกเป็น 2 ชุดด้วยกัน ทั้งรากของท่อนพันธุ์ที่ใช้ลำเลียงน้ำและธาตุอาหารจนกว่าหน่ออ่อนจะเติบโตและรากชนิดนี้จะหมดสภาพไปเองต่อไปก็คือรากของหน่อซึ่งเป็นรากขนาดใหญ่ที่เจริญออกจากปุ่มรากของหน่อที่เติบโตแล้ว รากของอ้อยนั้นจะมีการเติบโตทดแทนกันอย่างสม่ำเสมอและรากเก่าก็จะหมดสภาพลงไปตามกาลเวลา
- ลำต้นขนาดใหญ่ของอ้อยนั้นจะประกอบไปด้วยข้อปล้องจำนวนมาก ปล้องเหล่านี้จะยาวหรือสั้นก็จะขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำที่ได้รับ ยิ่งมีน้ำมาก ปล้องก็จะยาวและทำให้ลำต้นสูงใหญ่ตาม

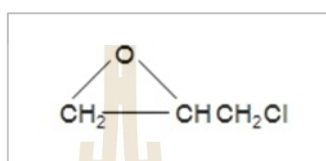
- ใบมีลักษณะคล้ายใบข้าวที่ขนาดใหญ่ขึ้น ใบอ้อยจะมี 2 ส่วนด้วยกันคือ กาบใบและแผ่นใบ โดยกาบใบคือส่วนที่โอบรอบลำต้นสลับซ้าย ขวาไปมาจากต้นถึงปลายลำต้นและแผ่นใบเป็นส่วนที่ถัดเข้าไปจากกาบใบจะมีแกนตรงกลางที่ทำให้แผ่นใบมีลักษณะแข็งตั้งตรงได้
- ดอกของอ้อยนั้นจะเป็นดอกเล็กๆที่ติดกันเป็นคู่ ๆ แต่ในหนึ่งคู่ก็จะแยกออกเป็นดอกที่มีก้านและไม่มีก้าน แต่ละดอกจะมีขนสีขาวอยู่ที่รอบฐาน เมื่อดอกบาน ขนเหล่านี้ก็จะกางออกรอบ ๆ เป็นรัศมีเล็ก ๆ
- ผลของอ้อยมีลักษณะคล้ายผล(เมล็ด)ของข้าวที่มีขนาดเล็กลงมาหลายเท่า และจะติดอยู่กับตัวดอกอย่างแน่น เราจะเรียกเมล็ดอ้อยว่าฟัซซ์หรือฟัฟฟ์ (fuzz หรือ fluff) และเมล็ดเหล่านี้ก็จะนำไปเพาะใหม่ต่อไป

2.2 อีพอกซีเรซิน (Epoxy resin)

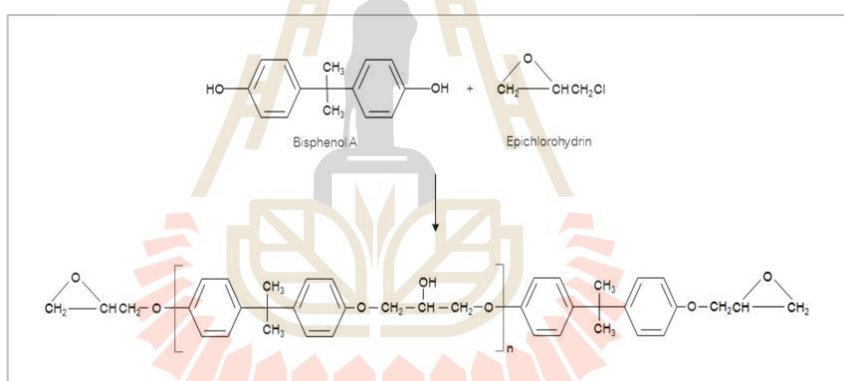
อีพอกซีเรซิน (Epoxy resin) หรืออีพอกซีเป็นวัสดุที่คุ้นเคยกันเป็นอย่างดีในรูปแบบของกาวยึดติดสิ่งของที่มีความสามารถในการยึดติดที่สูง ใช้งานได้ง่ายโดยอีพอกซีเรซิน จัดอยู่ในกลุ่มของเทอร์โมเซตติงพอลิเมอร์ (Thermosetting polymer) โดยเทอร์โมเซตติงพอลิเมอร์นั้นจะเป็นพลาสติกที่เกิดพันธะโควาเลนต์เป็นโครงข่ายของโครงสร้างโมเลกุล ซึ่งบางชนิดเกิดการเชื่อมในแนวขวาง (Cross-linked) ด้วยความร้อนหรือด้วยความร้อนและความกดดัน ทำให้ไม่สามารถหลอมนำกลับมาใช้ใหม่ได้เมื่อเย็นตัวแล้ว ซึ่งโดยทั่วไปแล้วเทอร์โมเซตติงพอลิเมอร์จะมีคุณสมบัติเด่น ๆ ที่เหมาะจะนำมาใช้ในงานวิศวกรรมดังนี้ คือ มีช่วงอุณหภูมิการใช้งานที่กว้าง มีความแข็งแรงสูง สามารถรูปได้ดีเนื่องจากการหดตัวหลังจากการแข็งตัวน้อย มีความเป็นฉนวนทางไฟฟ้าที่ดี ทนต่อการกัดกร่อนได้ดี เป็นต้น ตัวของอีพอกซีเรซินจะเป็นโคพอลิเมอร์ (Co-polymer) หมายถึงเป็นพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยมอนอเมอร์ (Monomer) ตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปซึ่งโดยปกติแล้วอีพอกซีเรซินจะเกิดจากการทำปฏิกิริยาของ Bisphenol A (รูปที่ 2.1) กับ Epichlorohydrin monomer (รูปที่ 2.2) และสารช่วยให้แข็งตัว (Hardener) ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มของโพลีเอมีน (Polyamine) สำหรับ Bisphenol A จะมีสูตรโมเลกุลเป็น $(\text{CH}_3)_2\text{C}(\text{C}_6\text{H}_4\text{OH})_2$ เป็นสารเคมีประเภทโพลีคาร์บอเนต (Polycarbonate) เป็นของแข็งใส ไม่มีสี ไม่แตกหักง่าย สามารถละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ Epichlorohydrin monomer จะมีสูตรโมเลกุลเป็น $\text{C}_3\text{H}_5\text{ClO}$ เป็นของเหลวที่ไม่มีสี มีกลิ่นฉุน ติดไฟง่าย สามารถละลายน้ำได้พอประมาณ ตัวอย่างการทำปฏิกิริยาของการสังเคราะห์อีพอกซีเรซินจากสาร Bisphenol A และ Epichlorohydrin monomer จะแสดงดังรูปที่ 2.3 โดยเมื่อ n มีค่าประมาณ 20 ถึง 30 พอลิเมอร์ที่ได้จากปฏิกิริยาจะเป็นของแข็ง



รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของ Bisphenol A



รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของ Epichlorohydrin

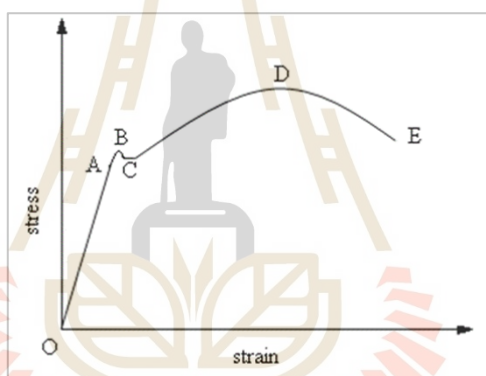


รูปที่ 2.3 โครงสร้างปฏิกิริยาของการสังเคราะห์อีพอกซีเรซิน

2.3 ความเสียหายของวัสดุ (Failure of materials)

ความเสียหายของวัสดุ (Failure of materials) คือการเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือขนาดของส่วนต่าง ๆ ของวัสดุที่นำไปสู่ความเสียหายหรือความสูญเสียเช่นการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุ (Deformation) เป็นต้น การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุ (Deformation) การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุสามารถแสดงได้จากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจากการทดสอบแรงดึง (Tensile test) โดยจะได้กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดดังรูปที่ 2.4 จากการศึกษาเส้นโค้งความสัมพันธ์จะพบว่าเมื่อเริ่มดึงชิ้นงานทดสอบอย่างช้าๆ ความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นจนถึงจุด A ทำให้ได้เส้นโค้งที่เป็นไปตามกฎของฮุก (Hook's law) ซึ่งกล่าวถึงความเค้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเครียดโดยเรียกจุด A ว่าพิกัดสัดส่วน

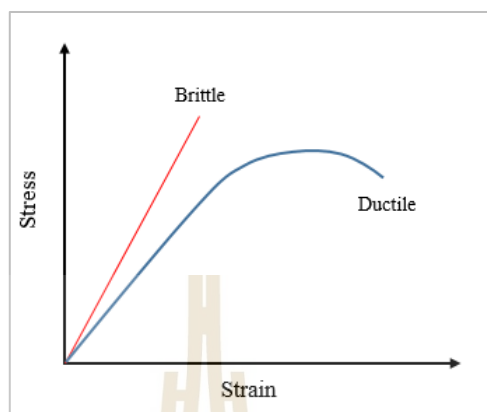
(Proportional limit) และภายใต้สัดส่วนนี้วัสดุจะแสดงพฤติกรรมการเสียรูปแบบยืดหยุ่น (Elastic deformation) นั่นคือเมื่อรับแรงกระทำไม่เกินช่วงนี้หากปล่อยแรงวัสดุจะกลับมามีขนาดเท่าเดิม ไม่มีการเสียรูปเกิดขึ้นเมื่อเพิ่มแรงกระทำต่อไปจนถึงจุด A เส้นโค้งความสัมพันธ์จะค่อยๆ เปลี่ยนจากการเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นเป็นการเพิ่มขึ้นแบบไม่เป็นเชิงเส้นจนถึงจุด B เรียกว่าฟิสิกส์ยืดหยุ่น (Elastic limit) ซึ่งจุดนี้จะเป็นจุดกำหนดความเค้นสูงสุดที่จะไม่ทำให้เกิดการเสียรูปแบบถาวรของวัสดุ (Plastic deformation) โดยเมื่อความเค้นมีค่าเกินจุด B ไปแล้ววัสดุจะเสียรูปอย่างถาวร กล่าวคือเมื่อออกแรงกระทำจนถึงจุด B ไปแล้วหากปล่อยแรงที่กระทำขนาดของวัสดุจะไม่กลับมาเท่ากับขนาดเริ่มต้นอีกแล้วเนื่องจากเกิดการเสียรูปแบบถาวร โดยจุด B จะขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ สภาพแวดล้อม อุณหภูมิ เป็นต้นความเค้นที่จุด B จะเรียกว่าความเค้นคราก (Yield stress) ในวัสดุโลหะหลายชนิดนั้นจะมีการพบการเกิดขึ้นของจุด C ซึ่งวัสดุจะเกิดการเสียรูปอย่างรวดเร็วโดยความเค้นไม่เพิ่มขึ้นหรือในบางกรณีลดลง



รูปที่ 2.4 กราฟความสัมพันธ์ของความเค้น (Stress) กับความเครียด (Strain)

หลังจากเลยจุดคราก (จุด B) แล้ว วัสดุจะเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกโดยความเค้นจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ หรืออาจจะคงที่จนถึงจุดสูงสุด (จุด D) ซึ่งค่าความเค้น ณ จุดนี้เรียกว่าความทนทานสูงสุด (Ultimate strength) หรือความเค้นแรงดึง (Tensile strength) ซึ่งเป็นค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุจะทนได้ก่อนที่จะขาดหรือแตกออกจากกัน ณ จุด E สำหรับวัสดุบางชนิดวัสดุจะเสียหายทันทีเมื่อเลยช่วงการเสียรูปแบบยืดหยุ่น (ก่อนจุด D) จะเรียกพฤติกรรมการแตกหักเช่นนี้ว่าการแตกแบบเปราะ (Brittle fracture) ดังรูปที่ 2.5 วัสดุที่แสดงพฤติกรรมการแตกหักเช่นนี้จะเรียกว่าวัสดุเปราะ (Brittle materials) ส่วนมากจะเกิดขึ้นกับวัสดุจำพวก เซรามิก โลหะที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน พอลิเมอร์บางชนิด เป็นต้น เมื่อพิจารณาพื้นที่หน้าตัดของฉนวนจะไม่ได้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงขนาดหน้าตัดก่อนการแตกหักหรือเปลี่ยนแปลงน้อยมากและไม่แสดงถึงการยืดตัวให้เห็น สำหรับวัสดุที่แสดงพฤติกรรมในเส้นโค้งครบทุกจุดหรือแสดงพฤติกรรมถึงจุด D แล้วจึงแตกหักจะเรียกพฤติกรรมการแตกหักเช่นนี้ว่าการแตกแบบเหนียว (Ductile fracture) ดังรูปที่ 2.5 เช่นเดียวกัน

วัสดุที่แสดงพฤติกรรมเช่นนี้จะเรียกว่าวัสดุเหนียว (Ductile materials) เมื่อพิจารณาพื้นที่หน้าตัดของผิวรอยแตกจะพบถึงการเปลี่ยนแปลงขนาดก่อนเกิดการแตกหักหรือพบการยืดตัวเกิดขึ้นกับวัสดุ



รูปที่ 2.5 กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นกับความเครียดของวัสดุเปราะและวัสดุเหนียว

การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุ (Deformation) เป็นความเสียหายที่ทำให้รูปร่างวัสดุเปลี่ยนแปลงทำให้ภาระที่เกิดขึ้นในวัสดุนั้นเปลี่ยนแปลงไปไม่ตรงกับที่ได้ออกแบบและคำนวณไว้ ซึ่งอาจจะเกิดความเสียหายตามมา ซึ่งการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

2.3.1 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา

การเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา (Time independent) เป็นการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของชิ้นงานที่เกิดจากแรงที่กระทำในทันที สามารถแบ่งได้เป็น

2.3.1.1 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบยืดหยุ่น (Elastic deformation) เป็นการเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือขนาดที่สามารถกลับคืนรูปร่างหรือสภาวะเดิมได้ทันทีเมื่อหยุดแรงที่กระทำนั้นต่อวัสดุ

2.3.1.2 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบถาวร (Plastic deformation) เป็นการเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือขนาดอย่างถาวรของวัสดุในทันทีที่มีแรงมากระทำถึงแม้ว่าจะหยุดให้แรงที่กระทำนั้นแล้วก็ไม่สามารถกลับคืนรูปแบบเดิม ซึ่งการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเช่นนี้จะเกิดขึ้นเมื่อแรงที่กระทำมีค่ามากกว่า จุดคราก (Yield point) ของวัสดุนั้น

2.3.2 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่ขึ้นอยู่กับเวลา

การเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่ขึ้นอยู่กับเวลา (Time dependent deformation) หรือการคืบ (Creep) เป็นการสะสมของการเปลี่ยนแปลงขนาดหรือรูปร่างของชิ้นงานที่เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาเมื่อมีแรงมากระทำโดยความรุนแรงของความคืบขึ้นอยู่กับความเครียด เวลา อุณหภูมิและคุณสมบัติของวัสดุ เป็นต้น

2.4 กลศาสตร์การแตกหัก (Fracture mechanics)

2.4.1 องค์ประกอบของกลศาสตร์การแตกหัก

เมื่อวัสดุที่มีรอยร้าวรับภาระ บริเวณปลายรอยร้าวจะเสียรูปมากกว่าบริเวณที่อยู่ห่างออกไปจึงมีโอกาสเสียหายก่อนบริเวณอื่น การศึกษาผลกระทบของรอยร้าวต่อความแข็งแรงของวัสดุ จึงเน้นที่สนามความเค้น-ความเครียดบริเวณปลายรอยร้าวเป็นหลัก นอกจากนี้รอยร้าวยังสามารถเติบโตได้ในสภาวะการใช้งาน สภาพการณ์ทั้งหมดนี้จึงทำให้หลักการของกลศาสตร์การแตกหัก ประกอบด้วยองค์ประกอบ 4 ส่วนคือ [9]

2.4.1.1 พารามิเตอร์ปลายรอยร้าว (Crack tip parameter) สำหรับแสดงระดับความรุนแรงที่เกิดกับวัสดุที่บริเวณปลายรอยร้าว

2.4.1.2 ความต้านทานการแตกหัก (Fracture toughness) หรือค่าวิกฤติของพารามิเตอร์ปลายรอยร้าวสำหรับแสดงความสามารถของวัสดุที่จะต้านทานการเติบโตของรอยร้าวจากขนาดรอยร้าวเริ่มต้น

2.4.1.3 เกณฑ์การแตกหัก (Fracture criteria) สำหรับตรวจสอบว่าเกิดการแตกหักหรือไม่หรือใช้คำนวณว่าการแตกหักจะเกิดขึ้นเมื่อรอยร้าวมีขนาดเท่าใดหรือเกิดขึ้นเมื่อรับภาระเท่าใด

2.4.1.4 สหสัมพันธ์ (Correlation) ระหว่างอัตราการเติบโตของรอยร้าว (ตามรูปแบบความเสียหาย เช่น ความล้า การคืบ การผุกร่อน ฯลฯ) กับพารามิเตอร์ปลายรอยร้าว สำหรับคำนวณเวลาหรือจำนวนรอบที่รอยร้าวเติบโตจากความยาวค่าหนึ่งไปสู่อีกค่าหนึ่ง

พารามิเตอร์ปลายรอยร้าวเป็นฟังก์ชันของ ขนาด รูปร่าง ลักษณะการวางตัวของรอยร้าว ตำแหน่งของรอยร้าวบนวัตถุ ขนาดภาระ ชนิดของภาระ รูปทรงเรขาคณิตของวัตถุ ฯลฯ ความต้านทานการแตกหักขึ้นอยู่กับชั้นของวัสดุ สถานะความเค้นที่ปลายรอยร้าว (ความเค้นระนาบหรือความเครียดระนาบ) รูปแบบของการเสียรูปที่ปลายรอยร้าว อัตราเร็วของการเสียรูป อุณหภูมิ สภาพแวดล้อม กรรมวิธีทางความร้อน เป็นต้น ความต้านทานการแตกหักนับเป็นคุณสมบัติของวัสดุ เพราะว่ามันขึ้นอยู่กับขนาดและรูปทรงของชิ้นทดสอบที่ใช้หาค่าดังกล่าว ดังนั้นความต้านทานการแตกหักจากชิ้นทดสอบจึงสามารถนำไปใช้กับโครงสร้างจริงได้ แต่มีเงื่อนไขว่าสภาวะทดสอบ (รูปแบบของการเสียรูปที่ปลายรอยร้าว สถานะความเค้น อุณหภูมิ สภาพแวดล้อม ฯลฯ) ต้องเหมือนกับสภาวะการใช้งานจริงของโครงสร้าง ปกติแล้วนั้นกลศาสตร์การแตกหักจะแบ่งออกตามลักษณะของการเสียรูปที่ปลายรอยร้าวก่อนเกิดการแตกหักได้แก่ กลศาสตร์การแตกหักแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น (Linear elastic fracture mechanics) และกลศาสตร์การแตกหักแบบอลาสติก - พลาสติก (Elastic - plastic fracture mechanics) สำหรับงานวิจัยชิ้นนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีของกลศาสตร์การแตกหักแบบยืดหยุ่นเชิงเส้นซึ่งเกิดการเสียรูปขึ้นน้อยมากก่อนเกิดการแตกหักเท่านั้นดังที่แสดงในทฤษฎีที่เกี่ยวข้องส่วนถัดไป

2.4.2 กลศาสตร์การแตกหักยืดหยุ่นเชิงเส้น (Linear elastic fracture mechanics, LEFM)

กลศาสตร์การแตกหักยืดหยุ่นเชิงเส้น (Linear elastic fracture mechanics, LEFM) [9] ศึกษาการแตกหักของวัสดุที่มีรอยร้าวที่บริเวณรอยร้าวของวัสดุเกิดการเสียรูปแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น (ไม่มีการครากเกิดขึ้น) ดังนั้นโดยหลักแล้วกลศาสตร์การแตกหักยืดหยุ่นเชิงเส้น จึงเหมาะกับการวิเคราะห์วัสดุที่มีพฤติกรรมการแตกหักแบบเปราะเท่านั้น อย่างไรก็ตามก็ข้อมูลจากการทดสอบการแตกหักของชิ้นส่วนที่มีรอยร้าว แสดงให้เห็นว่ากลศาสตร์การแตกหักยืดหยุ่นเชิงเส้นสามารถทำนายการแตกหักในกรณีที่ปลายรอยร้าวมีบริเวณครากขนาดเล็กเมื่อเทียบกับความยาวรอยร้าวและมิติระนาบ (Planar dimension) ของวัสดุได้ แต่อาจจะต้องปรับแก้ค่าของพารามิเตอร์ปลายรอยร้าวเนื่องจากผลของบริเวณคราก สำหรับการแตกหักแบบเปราะเมื่อภาระถึงค่าวิกฤติรอยร้าวจะเติบโตจากขนาดเริ่มต้นอย่างรวดเร็วจนทำให้ชิ้นส่วนเสียหาย เนื่องจากอัตราการเติบโตสูงมากจึงเรียกว่าการเติบโตอย่างไร้เสถียรภาพ (Unstable growth) สำหรับวัสดุที่มีความเหนียวพอสมควร เช่น เหล็กกล้าความแข็งแรงสูงหรือวัสดุที่มีสถานะที่ปลายรอยร้าวเป็นแบบความเค้นระนาบ (Plane stress) นั้น เมื่อภาระเพิ่มขึ้นถึงค่าวิกฤติ รอยร้าวจะเติบโตจากความยาวเดิมด้วยอัตราเร็วที่ต่ำกว่ากรณีการแตกหักแบบเปราะอย่างมาก รอยร้าวจะเติบโตเป็นระยะทางหนึ่งแล้วจะหยุด การเติบโตของรอยร้าวในลักษณะนี้เรียกว่า การเติบโตอย่างมีเสถียรภาพ (Stable growth) ขณะที่เพิ่มภาระขึ้นเรื่อย ๆ รอยร้าวก็จะเติบโตต่อไปอย่างมีเสถียรภาพ จนกระทั่งภาระเพิ่มขึ้นถึงขีดจำกัดค่าหนึ่งรอยร้าวก็จะเติบโตอย่างไร้เสถียรภาพในที่สุด การวิเคราะห์เสถียรภาพของรอยร้าวในกรณีที่ขนาดบริเวณครากยังไม่ขัดแย้งกับเงื่อนไขของกลศาสตร์การแตกหักยืดหยุ่นเชิงเส้นนั้นสามารถใช้พารามิเตอร์ปลายรอยร้าวของกลศาสตร์การแตกหักยืดหยุ่นเชิงเส้นได้ ซึ่งสามารถหาพารามิเตอร์ที่ปลายรอยร้าวของกลศาสตร์การแตกหักยืดหยุ่นเชิงเส้นได้ดังนี้

2.4.2.1 แนวทางพลังงาน

ปีค.ศ. 1921 A.A. Griffith นักวิทยาศาสตร์ชาวอังกฤษได้เสนอวิธีพลังงานสำหรับทำนายความเค้นแตกหักซึ่งเป็นการวิเคราะห์ห้วงกว้าง (Global analysis) เพราะพิจารณาการเปลี่ยนแปลงพลังงานศักย์ของวัตถุทั้งชิ้นเนื่องจากการเติบโตของรอยร้าว โดยกำหนดเกณฑ์การแตกหักของวัสดุไว้ดังนี้ เกณฑ์การแตกหักของวัสดุตามกฎทรงพลังงาน (Conservation of energy theorem) ที่กล่าวไว้ว่า สำหรับวัตถุที่ไม่มีรอยร้าว งานของภาระภายนอก (External work: W) ที่กระทำต่อวัตถุ จะไม่สูญหายแต่จะสะสมในรูปพลังงานความเครียด (Strain energy: U) ภายในวัตถุ ดังนี้

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

สำหรับวัตถุที่มีรอยร้าว งานของแรงภายนอก (W) จะสะสมอยู่ในรูปพลังงานความเครียด (U) และใช้ไปกับการสร้างผิวรอยร้าวใหม่ (W_s) เนื่องจากพิจารณาขณะที่รอยร้าวเติบโตจากขนาดเริ่มต้น กฎทรงพลังงานจึงต้องเขียนอยู่ในรูปของการเปลี่ยนแปลงเทียบกับพื้นที่รอยร้าว (dA) ดังนี้

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

$$\frac{d}{dA}(W - U) = \frac{dW_s}{dA} \quad (3)$$

ซึ่งสมการที่ (4) ใช้คำนวณหาสถานะที่รอยร้าวเริ่มต้นเติบโตจากความยาวเดิม ซึ่งในกรณีของการแตกหักแบบเปราะ สถานะนี้คือสถานะที่ขึ้นส่วนแตกหักโดยสมบูรณ์ ดังนั้นสมการนี้ก็คือ เกณฑ์การแตกหัก (Fracture criteria) จากนิยามของพลังงานศักย์รวม (Total potential energy: Π)

$$\Pi = U - W \quad (4)$$

จะเขียนสมการได้เป็น

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

เนื่องจากเทอมทางขวามือเป็นบวกเสมอ ดังนั้นพลังงานศักย์รวมของระบบจะลดลงเมื่อรอยร้าวเติบโต ในปี ค.ศ.1956 Irwin เรียกเทอมด้านซ้ายของสมการที่ (4) หรือสมการที่ (5) ว่าอัตราการปลดปล่อยพลังงาน (Energy release rate, G^2) แต่ในปัจจุบันนิยมเรียกว่าแรงขับเคลื่อนรอยร้าว (Crack driving force) และเรียกเทอมด้านขวามือว่าความต้านทานการเติบโตของรอยร้าว (Crack growth resistance, R) ดังนี้

$$G = \frac{dW}{dA} - \frac{dU}{dA} = \frac{d\Pi}{dA} \quad (6)$$

และ

$$R = \frac{dW_s}{dA} \quad (7)$$

เกณฑ์การแตกหัก (Fracture criteria) จึงเขียนได้เป็น

$$G = R \quad (8)$$

เมื่อรอยร้าวเริ่มเติบโตจากความยาวเดิมตามเงื่อนไขในสมการที่ (8) การเติบโตจะมีเสถียรภาพหรือไม่ขึ้นอยู่กับอัตราการเปลี่ยนแปลงของ G และ R เทียบกับพื้นที่รอยร้าว หรือ dG/dA และ dR/dA โดย

$$\text{การเติบโตจะไร้เสถียรภาพเมื่อ} \quad \frac{dG}{dA} > \frac{dR}{dA} \quad (9)$$

$$\text{การเติบโตจะมีเสถียรภาพเมื่อ} \quad \frac{dG}{dA} < \frac{dR}{dA} \quad (10)$$

$$\text{ยังไม่สามารถบอกได้เมื่อ} \quad \frac{dG}{dA} = \frac{dR}{dA} \quad (11)$$

2.4.2.2 ตัวประกอบความเข้มของความเค้น

ตัวประกอบความเข้มของความเค้น (Stress intensity factor, K) เป็นพารามิเตอร์ที่แสดงถึงความรุนแรงหรือขนาดของความเค้นที่เกิดขึ้นในบริเวณใกล้เคียงปลายรอยร้าว พารามิเตอร์นี้จะถูกใช้ในสภาพของกลศาสตร์การยืดหยุ่นเชิงเส้นเท่านั้น ขนาดของตัวประกอบความเข้มของความเค้นขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยด้วยกัน อาทิเช่น รูปร่างของชิ้นงาน ขนาดของภาระที่กระทำ รูปแบบของภาระ ขนาดของรอยร้าว เป็นต้น โดยทั่วไปแล้วตัวประกอบความเข้มของความเค้นสามารถคำนวณได้ด้วยสมการต่อไปนี้

$$K = \sigma \cdot Y \cdot \sqrt{\pi a} \quad (12)$$

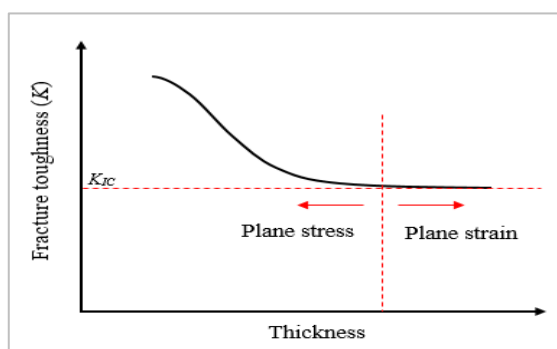
เมื่อ	σ	แทนความเค้นที่กระทำกับรอยร้าว
	Y	แทนปัจจัยรูปร่างของชิ้นทดสอบ (Geometry factor)
	a	แทนความยาวรอยร้าวของชิ้นทดสอบ

เมื่อขนาดของตัวประกอบความเข้มของความเค้นถึงค่าวิกฤต (Critical stress intensity factor, K_{IC}) จะก่อให้เกิดความไม่เสถียรของการแตกหัก ค่าวิกฤตของตัวประกอบความเข้มของความเค้นนี้เรียกว่า ค่าความต้านทานการแตกหักของวัสดุ (Fracture toughness) โดยความต้านทานการแตกหักจะแสดงถึงความสามารถในการรับภาระของชิ้นงานที่มีรอยร้าวตามทฤษฎีกลศาสตร์การแตกหักยืดหยุ่นเชิงเส้น ความต้านทานการแตกหักสามารถพิจารณาเป็นขีดจำกัดในการออกแบบของขนาดของตัวประกอบความเข้มของความเค้น สำหรับวัสดุที่มีรอยร้าวในลักษณะเช่นเดียวกับการพิจารณาความเค้นครากที่เป็นขีดจำกัดของความเค้นในการออกแบบสำหรับวัสดุภายใต้การรับภาระคงที่ (Static load) โดยมีเงื่อนไขในการพิจารณาดังนี้

$$\text{เกิดการแตกหักเมื่อ} \quad K_I \geq K_{IC} \quad (13)$$

$$\text{ไม่เกิดการแตกหักเมื่อ} \quad K_I < K_{IC} \quad (14)$$

ค่าความต้านทานการแตกหักนี้มีความสัมพันธ์กับขนาดความยาวรอยร้าว ขนาดภาระและความเค้นที่มากระทำ กล่าวคือ เมื่อความยาวรอยร้าวในชิ้นงานมีค่ามากขึ้น จะทำให้ความสามารถในการรับภาระของชิ้นงานลดน้อยลงและเมื่อรอยร้าวที่มีความยาวถึงความยาวรอยร้าววิกฤต (Critical crack length) ภายใต้ภาระในขณะนั้น จะทำให้ชิ้นงานไม่สามารถรับภาระได้อีกต่อไป โดยก่อให้เกิดการเสียหายของชิ้นงานทันที เมื่อภาระความเค้นที่มากระทำต่อชิ้นงานมีค่ามาก จะมีโอกาสทำให้ชิ้นงานเกิดการแตกร้าวได้มากกว่าชิ้นงานที่อยู่ภายใต้ภาระที่ต่ำกว่า สำหรับชิ้นงานที่มีมิติความกว้าง ความสูง และความยาวเท่ากัน เมื่อความหนาของชิ้นงานเปลี่ยนแปลงไป ความต้านทานการแตกหักจะแตกต่างกันออกไป โดยหากทำการทดลองในชิ้นงานที่มีความหนาจากน้อยไปมาก จะพบว่าเมื่อชิ้นงานมีขนาดบางค่าความต้านทานการแตกหักจะมีค่าสูงและค่าความต้านทานการแตกหักจะมีค่าลดลงเมื่อความหนาของชิ้นงานเพิ่มขึ้น แต่เมื่อชิ้นงานมีความหนามากขึ้นจนกระทั่งเกิดสภาวะความเครียดระนาบ (Plane strain) แล้วค่าความต้านทานการแตกหักจะมีค่าคงที่ แม้ว่าจะเพิ่มความหนาให้แก่ชิ้นงานอีกก็ตามดังแสดงในรูปที่ 2.6 โดยความต้านทานการแตกหักภายใต้สภาวะความเครียดระนาบนี้จะไม่ขึ้นกับรูปร่างของชิ้นงาน



รูปที่ 2.6 ผลกระทบของความหนาต่อความต้านทานการแตกหัก

สภาพความเค้นแบบระนาบ (Plane stress) เป็นสภาพที่วัสดุมีความเค้นในระนาบ 2 มิติ เท่านั้น ซึ่งมักจะเกิดในกรณีที่วัสดุสามารถเปลี่ยนแปลงขนาดหรือความเครียดได้อย่างอิสระในแนวตั้งฉากกับระนาบจึงส่งผลให้เกิดสภาพความเครียดแบบ 3 มิติขึ้น โดยเกิดในชิ้นส่วนทางวิศวกรรมที่มีลักษณะบาง ขณะที่สภาพความเครียดแบบระนาบเป็นสภาพที่วัสดุมีความเครียดในระนาบ 2 มิติเท่านั้น ซึ่งมักจะเกิดในกรณีที่วัสดุไม่สามารถเปลี่ยนแปลงขนาดหรือความเครียดได้อย่างอิสระในแนวตั้งฉากกับระนาบจึงส่งผลให้เกิดสภาพความเค้นแบบ 3 มิติขึ้น โดยมักเกิดในชิ้นส่วนทางวิศวกรรมที่มีลักษณะหนา การเปรียบเทียบสภาพความเค้นระนาบและสภาพความเครียดระนาบเมื่อพิจารณาค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นภายใต้ภาระรูปแบบที่ 1 (K_{IC}) ของวัสดุต่าง ๆ พบว่าค่า K_{IC} จะมีค่าต่ำหรือเกิดการแตกหักแบบเปราะได้ง่าย ในกรณีสภาพความเครียดระนาบหรือชิ้นส่วนทางวิศวกรรมที่มีลักษณะหนา เนื่องจากในสภาพเครียดแบบระนาบจะส่งผลให้เกิดสภาพความเค้นแบบ 3 มิติที่ส่วนปลายของรอยร้าวซึ่งเป็นสภาพที่รุนแรง (ค่า K_{IC} ต่ำ) กว่าสภาพความเค้น 2 มิติ ในกรณีความเค้นระนาบ ดังนั้นค่า K_{IC} ของวัสดุในกรณีความเครียดระนาบจึงถูกใช้ในการออกแบบและวิเคราะห์ความต้านทานการแตกหักของชิ้นส่วน ขอบเขตของกลศาสตร์แตกหักยืดหยุ่นเชิงเส้นหรือเงื่อนไขที่ทำให้ตัวประกอบความเข้มของความเค้นนั้นไม่สามารถระบุความเค้นหรือความเครียดบริเวณปลายรอยร้าวของวัสดุได้อย่างแม่นยำจะเกิดขึ้นเมื่อขนาดบริเวณเสียรูปพลาสติก (Plastic zone size) ใหญ่กว่ามิติรูปร่างที่เล็กที่สุดของวัสดุ โดยขอบเขตของตัวประกอบความเข้มของความเค้นจะขึ้นอยู่กับรูปร่างของวัตถุ ความยาวรอยร้าว ชนิดของภาระที่มากกระทำกับวัตถุ เป็นต้น สำหรับการคำนวณหาขอบเขตกลศาสตร์แตกหักยืดหยุ่นเชิงเส้นนั้นมีด้วยกันหลายวิธีทั้งการเปรียบด้วยกราฟหรือการวิเคราะห์ด้วยสมการ โดยสมการที่ใช้สำหรับการคำนวณขอบเขตของกลศาสตร์การแตกหักยืดจะแสดงดังสมการที่ 15

$$\left. \begin{array}{l} B \\ a \\ b \\ H \end{array} \right\} \geq 2.5 \left(\frac{K_I}{\sigma_y} \right)^2 \quad (15)$$

เมื่อ	B	แทนความหนาของวัตถุ
	a	แทนความยาวรอยร้าวที่เกิดขึ้นกับวัตถุ
	b	แทนระยะจากปลายรอยร้าวถึงขอบของวัตถุ
	H	แทนระยะตั้งฉากจากระนาบรอยร้าวถึงขอบวัตถุ

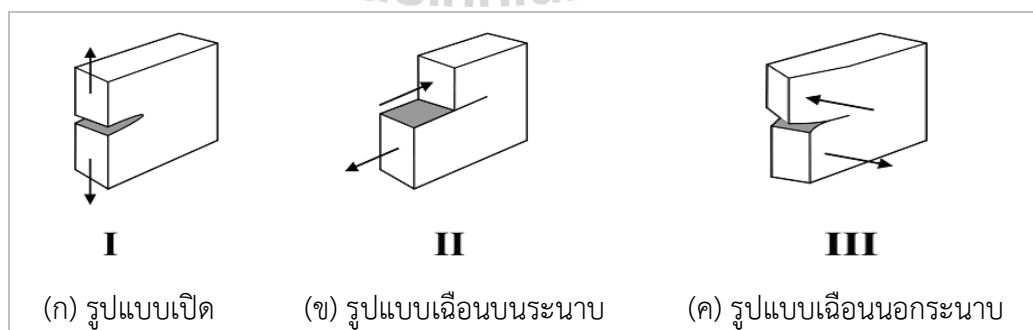
2.4.3 การวิเคราะห์ความเค้นที่ปลายรอยร้าว

การนิยามรูปแบบของการเสียรูปที่ปลายรอยร้าว พิจารณาจากทิศทางการเคลื่อนตัวของระนาบรอยร้าวเทียบกับระนาบรอยร้าวหรือขอบหน้ารอยร้าวเดิม นิยามดังกล่าวจะแบ่งรูปแบบของการเสียรูปออกเป็น 3 รูปแบบ ดังนี้

2.4.3.1 รูปแบบที่ 1 (Mode I) หรือรูปแบบการรับภาระแบบเปิด (Opening mode) ในรูปแบบนี้ผิวของรอยร้าวจะเคลื่อนตัวตั้งฉากกับระนาบของรอยร้าวเดิมดังรูปที่ 2.7 (ก)

2.4.3.2 รูปแบบที่ 2 (Mode II) หรือรูปแบบเฉือนบนระนาบ (In-plane shear mode) หรือรูปแบบการไถล (Sliding mode) ในรูปแบบนี้ผิวของรอยร้าวจะเคลื่อนที่สัมพันธ์กันในทิศตั้งฉากกับขอบหน้ารอยร้าวเดิมดังรูปที่ 2.7 (ข)

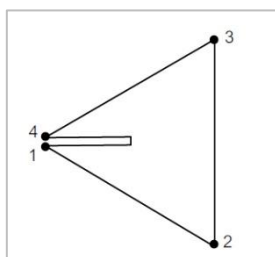
2.4.3.3 รูปแบบที่ 3 (Mode III) หรือรูปแบบเฉือนนอกระนาบ (Out-of-plane shear mode) หรือรูปแบบการฉีก (Tearing mode) รูปแบบนี้ผิวของรอยร้าวจะเคลื่อนที่สัมพันธ์กันในทิศทางขนานกันกับขอบหน้ารอยร้าวเดิมดังรูปที่ 2.7 (ค)



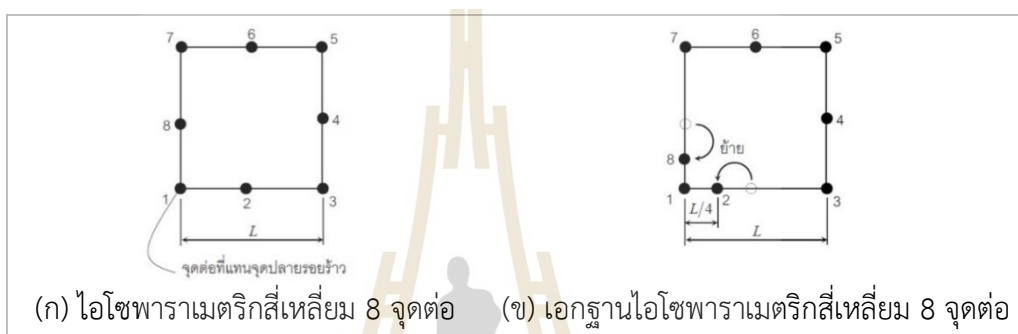
รูปที่ 2.7 รูปแบบการเสียรูปที่ปลายรอยร้าวของวัสดุ

2.4.4 การวิเคราะห์ความต้านทานการแตกหักด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ปัจจุบันมีการใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขอย่างเช่น วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อหาผลเฉลยของพารามิเตอร์ความต้านทานการแตกหักอย่างกว้างขวาง วิธีเชิงตัวเลขนั้นจะมีบทบาทสำคัญเมื่อวัสดุมีรูปร่างซับซ้อนหรือมีเงื่อนไขขอบเขตซับซ้อน โปรแกรมช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรมสำเร็จรูปอย่างเช่น โปรแกรม ANSYS หรือโปรแกรม ABAQUS จะมีรูทีน (Routine) หาผลเฉลยของความต้านทานการแตกหักบรรจุอยู่แล้ว ผู้ใช้จึงไม่ต้องเสียเวลานำข้อมูลความเค้นหรือระยะเคลื่อนตัวมาหาค่าผลเฉลย อย่างไรก็ตามถ้าโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ไม่มีรูทีนนี้ ผู้ใช้สามารถนำผลเฉลยความเค้นหรือระยะเคลื่อนตัวที่จุดต่อ (Node) มาคำนวณหาผลเฉลยของความต้านทานการแตกหักได้ด้วยการแบ่งเอลิเมนต์เป็นส่วน ๆ เริ่มแรกการหาผลเฉลยความต้านทานการแตกหักด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์รวมกับการประมาณค่านอกช่วงนั้นใช้เอลิเมนต์สามเหลี่ยมแบบสามจุดต่อ แต่ว่าเอลิเมนต์แบบนี้ไม่สามารถแสดงความเป็นเอกฐานของความเค้นที่จุดปลายรอยร้าวได้ ผลเฉลยความต้านทานการแตกหักจึงไม่ค่อยแม่นยำ (คลาดเคลื่อนประมาณ 4 เปอร์เซ็นต์) แม้จะใช้เอลิเมนต์ขนาดเล็กจำนวนมากที่บริเวณปลายรอยร้าวแล้วก็ตาม ข้อจำกัดนี้ทำให้เกิดการพัฒนาเอลิเมนต์ชนิดใหม่ขึ้นเพื่อใช้สำหรับปลายรอยร้าวซึ่งเรียกว่าเอลิเมนต์รอยร้าว (Crack element) หรือเอลิเมนต์ปลายรอยร้าว (Crack-tip element) เป็นเอลิเมนต์ชนิดใหม่ที่สามารถแสดงความเป็นเอกฐาน ณ จุดต่อที่อยู่ปลายรอยร้าวได้ (โดยการเลือกฟังก์ชันประมาณค่าภายในที่เหมาะสม) รูปที่ 2.8 แสดงตัวอย่างเอลิเมนต์รอยร้าวของ Byskov ในเวลาต่อมา Barsoum พบว่าเอลิเมนต์ไอโซพาราเมตริกสี่เหลี่ยม 8 จุดต่อในรูปที่ 2.9 (ก) สามารถแสดงความเป็นเอกฐานได้ ถ้าย้ายจุดต่อที่อยู่กึ่งกลางของขอบเอลิเมนต์ด้านที่ชิดกับปลายรอยร้าวมาอยู่ในตำแหน่งห่างจากจุดต่อที่เป็นปลายรอยร้าวเท่ากับ $1/4$ เท่าของความยาวขอบของเอลิเมนต์ดังรูปที่ 2.9 (ข) เอลิเมนต์ที่ได้มีชื่อเรียกว่า เอลิเมนต์เอกฐานไอโซพาราเมตริก (Singularity isoparametric element) นอกจากเอลิเมนต์เอกฐานไอโซพาราเมตริกในรูปที่ 2.9 แล้วยังมีเอลิเมนต์แบบอื่น ๆ อีกเช่น เอลิเมนต์สามเหลี่ยม 8 จุดต่อในรูปที่ 2.10 (ก) ซึ่งได้จากการยุบขอบด้านหนึ่งของเอลิเมนต์และบังคับให้ระยะเคลื่อนตัวของจุดต่อบนขอบนั้น (ในรูปคือจุดต่อที่ 1, 8 และ 7) เท่ากัน เอลิเมนต์ชนิดนี้มีสมบัติเทียบเท่ากับเอลิเมนต์ในรูปที่ 2.9 (ข) แต่มีข้อดีตรงที่ว่าถ้ายกเลิกเงื่อนไขที่บังคับว่าระยะเคลื่อนตัวของจุดต่อที่ 1, 8 และ 7 ต้องเท่ากันแล้วเอลิเมนต์จะสามารถจำลองความเป็นเอกฐาน (Singularity, $r-1$) ซึ่งเกิดขึ้นที่ปลายรอยร้าวเมื่อวัสดุเสียรูปแบบพลาสติกสมบูรณ์ (Perfectly plastic) นอกจากนี้ยังมีเอลิเมนต์สามเหลี่ยม 6 จุดต่อในรูปที่ 2.10 (ข) ซึ่งเป็นเอลิเมนต์ได้รับความนิยมมากที่สุด

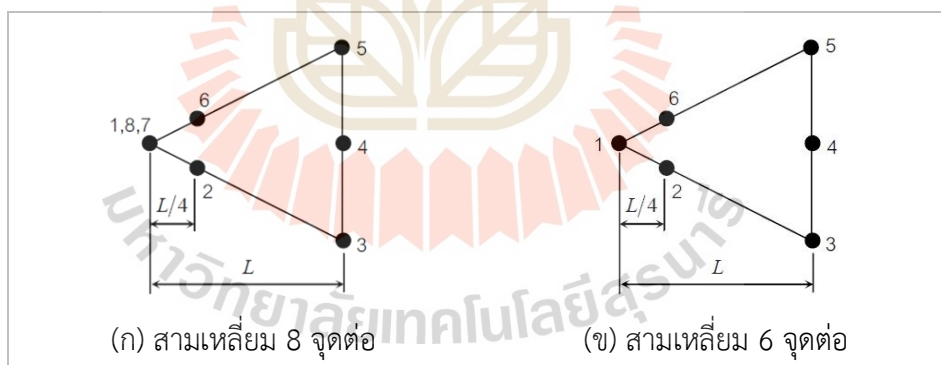


รูปที่ 2.8 เอลิเมนต์รอยร้าวของ Byskov



(ก) ไอโซพารามेटริกสี่เหลี่ยม 8 จุดต่อ (ข) เอกฐานไอโซพารามेटริกสี่เหลี่ยม 8 จุดต่อ

รูปที่ 2.9 เอลิเมนต์ไอโซพารามेटริก



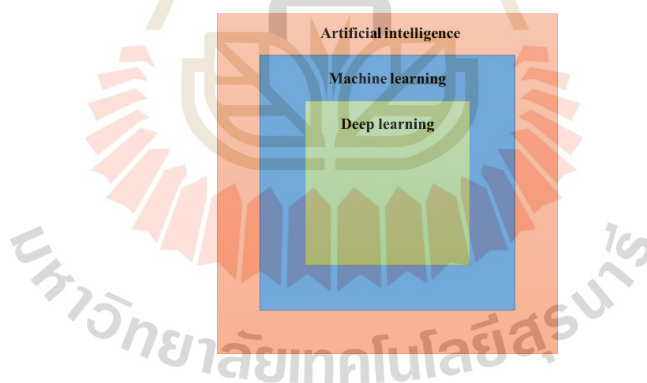
(ก) สามเหลี่ยม 8 จุดต่อ (ข) สามเหลี่ยม 6 จุดต่อ

รูปที่ 2.10 เอลิเมนต์เอกฐานไอโซพารามेटริก

2.5 วิธีปัญญาประดิษฐ์ (Artificial intelligence method)

คำว่าปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence, AI) ถูกใช้ครั้งแรกเมื่อประมาณ ค.ศ. 1956 โดย John McCarthy ความหมายของปัญญาประดิษฐ์มีการให้ความหมายและคำจำกัดความไว้มากมาย แต่มักจะเกี่ยวข้องกับกระบวนการคิดและการให้เหตุผลโดยมีมนุษย์เป็นต้นแบบ ซึ่งสามารถแตกแขนงออกเป็นหลายสาขาเช่น [22, 23]

- การประมวลภาษาธรรมชาติ (Natural language processing, NLP) ซึ่งเกี่ยวข้องกับการสื่อสารด้วยภาษาที่มนุษย์ใช้งานเช่น ข้อความ ตัวอักษร เสียงพูด เป็นต้น ตัวอย่างของ NLP ที่พบเจอได้ในชีวิตประจำวันเช่น Chatbot Siri เป็นต้น
 - คอมพิวเตอร์วิทัศน์ (Computer vision) ซึ่งเทียบได้กับการสร้างตาให้กับเครื่องจักรที่สามารถรับรู้สภาพแวดล้อมต่างๆ ได้ด้วยภาพเช่น การจดจำใบหน้ามนุษย์ การจำแนกประเภทของสิ่งของในภาพ เป็นต้น
 - หุ่นยนต์ (Robotics) ซึ่งเกี่ยวข้องกับการสร้างเครื่องกลหรือระบบกลไกที่สามารถทำงานลักษณะต่างๆ ได้อย่างแม่นยำ คล้ายกับการสร้างร่างกายให้กับปัญญาประดิษฐ์
 - ระบบผู้เชี่ยวชาญ (Expert system) เป็นการจำลองผู้เชี่ยวชาญเสมือนในระบบงานนั้นๆ ด้วยชุดโปรแกรมคอมพิวเตอร์ให้สามารถทำงานแทนผู้เชี่ยวชาญจริงได้หรือสามารถช่วยในการประกอบการตัดสินใจได้อย่างมีเหตุผลเช่น ระบบการวินิจฉัยโรค ระบบซื้อขายหุ้น เป็นต้น
- อย่างไรก็ตามเครื่องมือที่สาขาต่างๆ เหล่านี้ใช้ในการแก้ปัญหาส่วนใหญ่ในปัจจุบันคือ การเรียนรู้ของเครื่อง (Machine learning, ML) ซึ่งประสบความสำเร็จอย่างรวดเร็วในยุคปัจจุบัน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การเรียนรู้เชิงลึก (Deep learning, DL) ซึ่งเป็นหนึ่งวิธีของปัญญาประดิษฐ์ เช่นเดียวกับการเรียนรู้ของเครื่องดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ของปัญญาประดิษฐ์ การเรียนรู้ของเครื่องและการเรียนรู้เชิงลึก

สำหรับในงานวิจัยนี้จะเรียกปัญญาประดิษฐ์ การเรียนรู้ของเครื่องและการเรียนรู้เชิงลึกรวมกันว่า “ปัญญาประดิษฐ์” ขั้นตอนการเรียนรู้ของวิธีปัญญาประดิษฐ์สามารถแบ่งออกเป็นกลุ่มใหญ่ๆ ได้เป็น

- การเรียนรู้แบบมีผู้ฝึกสอน (Supervised learning) ซึ่งเป็นลักษณะการเรียนรู้ของปัญญาประดิษฐ์ที่อาศัยประสบการณ์หรือชุดข้อมูลในการฝึกสอนแบบจำลองปัญญาประดิษฐ์ให้มีประสบการณ์หรือความเข้าใจในความสัมพันธ์ของปัญหาและผลลัพธ์ของปัญหาที่ต้องการวิเคราะห์หรือทำนายผล

- การเรียนรู้แบบไม่มีผู้ฝึกสอน (Unsupervised learning) เป็นลักษณะการเรียนรู้ที่ไม่ต้องอาศัยประสบการณ์หรือชุดข้อมูลในการฝึกสอนแบบจำลองปัญญาประดิษฐ์ซึ่งแบบจำลองจะทำการเรียนรู้ความสัมพันธ์ของปัญหาและผลลัพธ์ของปัญหาด้วยตัวเอง
 - การเรียนรู้แบบเสริมกำลัง (Reinforcement learning) เป็นลักษณะการเรียนรู้ที่มีลักษณะคล้ายกับการลองผิดลองถูกของมนุษย์ซึ่งมีการเรียนรู้ตลอดเวลาในระหว่างการลองผิดลองถูกว่าสิ่งไหนดีหรือไม่ดีจากสถานการณ์จำลองที่สร้างขึ้น
การเรียนรู้ของปัญญาประดิษฐ์นั้นจะถูกเลือกใช้ให้เหมาะสมกับลักษณะของปัญหาที่ต้องการนำปัญญาประดิษฐ์เข้ามาใช้แก้ปัญหา โดยสำหรับลักษณะของปัญหาหรือข้อมูลที่ใช้ปัญญาประดิษฐ์ในการแก้ปัญหาสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภทได้ดังนี้
 - ปัญหาหรือข้อมูลแบบถดถอย (Regression) ซึ่งข้อมูลของปัญหาลักษณะนี้จะเป็นข้อมูลแบบต่อเนื่อง สามารถมีค่ากลางหรือทศนิยมระหว่างข้อมูลได้
 - ปัญหาหรือข้อมูลแบบการจัดกลุ่มที่มีการระบุหมวดหมู่ชัดเจน (Classification) ซึ่งข้อมูลหรือปัญหาลักษณะนี้จะเป็นข้อมูลแบบไม่ต่อเนื่องแต่จะมีการระบุหมวดหมู่ของข้อมูลอย่างชัดเจนว่าคืออะไร
 - ปัญหาหรือข้อมูลแบบการจัดกลุ่มที่ไม่มีการระบุหมวดหมู่ชัดเจน (Clustering) ซึ่งปัญหาลักษณะนี้จะคล้ายกับปัญหาหรือข้อมูลแบบการจัดกลุ่มที่มีการระบุหมวดหมู่ชัดเจน (Classification) เพียงแต่ปัญหาลักษณะนี้ไม่ได้ระบุหมวดหมู่ของข้อมูลว่าคืออะไร เพียงจัดข้อมูลที่คล้ายกันอยู่หมวดหมู่เดียวกันเท่านั้น

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยเกี่ยวข้องหรือปรีทัศน์วรรณกรรมนั้นจะเป็นการรวบรวมงานวิจัยที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับ การทำนายความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบผสม 1 และ 2 ของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วย เส้นใยใบบอ้อย ไม่ว่าจะเป็นการเตรียมวัสดุผสม การเตรียมการทดสอบความต้านทานการแตกหักของ วัสดุผสมหรือการทำนายความต้านทานการแตกหักด้วยวิธีปัญญาประดิษฐ์ ซึ่งงานวิจัยที่เกี่ยวข้องใน หัวข้อต่างๆ ข้างต้นจะสรุปไว้ดังนี้

2.6.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเตรียมวัสดุผสม

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเตรียมวัสดุผสมจะแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มได้แก่ กลุ่มงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสัดส่วนการผสมวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรต่อวัสดุหลักและกลุ่มงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับขนาดของเส้นใยจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรในวัสดุผสม ตารางที่ 2.1 แสดงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวัสดุผสมที่มีเศษเหลือจากอ้อยได้แก่ ชานอ้อย (Sugarcane bagasse) และใบบอ้อย (Sugarcane leaves) เป็นส่วนผสม ซึ่งส่วนมากจะเป็นงานวิจัยที่มีชานอ้อยเป็นส่วนผสมมากกว่าที่มี

ใบอ้อย การผสมส่วนใหญ่จะผสมวัสดุหลักและวัสดุเสริมแรงในสัดส่วนร้อยละโดยน้ำหนักเป็นหลักที่ สัดส่วนการผสมประมาณร้อยละ 3 ถึง 55

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวัสดุผสมเศษอ้อย (กลุ่มวัสดุหลักพอลิเมอร์)

ผู้วิจัย	วัสดุหลัก	วัสดุเสริมแรง	สัดส่วน	หน่วย
SLM Filho [3]	Rubber tire particles	Bagasse fibers	3, 5	%wt.
M Madhoushi [4]	Polypropylene	Bagasse fibers	40, 55	%wt.
SKJ Yadav [7]	Epoxy resin	Sugarcane leave	2 - 8	%vol
A Bartos et al. [5]	Polypropylene	Bagasse fibers	0 - 30	%wt.
A Bartos et al. [8]	Poly(lactic acid)	Bagasse fibers	0 - 30	%wt.
NSM El-Tayeb [24]	Polyester	Bagasse fibers	3 - 4	%wt.
VS Candido [25]	Polyester	Bagasse fibers	10, 20, 30	%vol

ชานอ้อยเป็นส่วนลำต้นของอ้อยที่คั้นน้ำตาลออกเรียบร้อยแล้วทำให้ชานอ้อยมีความหนาแน่นรวม (Bulk density) อยู่ที่ประมาณ 0.90 ถึง 1.30 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร [26-29] ซึ่งมีความหนาแน่นรวมที่ค่อนข้างใกล้เคียงกับวัสดุหลักที่นำมาผสม (อ้างอิงจากอีพอกซีเรซินที่มีความหนาแน่นประมาณ 1.1 ถึง 1.30 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร) การที่วัสดุหลักและวัสดุเสริมแรงมีความหนาแน่นที่ใกล้เคียงกันทำให้สามารถทำการผสมที่สัดส่วนร้อยละโดยน้ำหนักหรือสัดส่วนร้อยละโดยปริมาตรที่ค่อนข้างสูงตามตารางที่ 2.1 ได้ ความหนาแน่นของชานอ้อยค่อนข้างต่างจากเส้นใยใบอ้อยที่มีความหนาแน่นรวมประมาณ 0.36 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (อ้างอิงจากการศึกษาเบื้องต้นโดยวัดความหนาแน่นตามมาตรฐาน ASTM D6683 [30]) การนำเส้นใยใบอ้อยไปผสมกับอีพอกซีเรซินนั้นเนื่องจากความแตกต่างของความหนาแน่นของวัสดุทั้งสองที่ค่อนข้างมากทำให้การผสมในสัดส่วนร้อยละโดยน้ำหนักหรือสัดส่วนร้อยละโดยปริมาตรที่สูงตามตารางที่ 2.1 เป็นไปได้ยาก

ยกตัวอย่างการผสมเส้นใยใบอ้อยที่สัดส่วนร้อยละโดยน้ำหนักเท่ากับ 40 กรณีที่อีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยใบอ้อยมีน้ำหนัก 100 กรัม ขั้นตอนการผสมจะต้องเตรียมเส้นใยใบอ้อยหนัก 40 กรัมและอีพอกซีเรซินหนัก 60 กรัม สมมติการผสมวัสดุผสมเกิดขึ้นในถ้วยปิกเกอร์เมื่อคำนึงถึงความสัมพันธ์ของความหนาแน่น น้ำหนักและปริมาตรตามสมการที่ (16) พบว่าเส้นใยใบอ้อยหนัก 40 กรัมที่มีความหนาแน่นรวม 0.36 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรจะมีปริมาตรเท่ากับ 111.11 ลูกบาศก์เซนติเมตร ต่างจากอีพอกซีเรซินหนัก 60 กรัมที่มีความหนาแน่น 1.30 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรจะมีปริมาตร 46.15 ลูกบาศก์เซนติเมตร ความแตกต่างด้านปริมาตรที่ค่อนข้างมากทำให้การผสมวัสดุทั้งสองชนิดเข้าด้วยกันนั้นเป็นไปได้ยากนั่นเอง

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (16)$$

เมื่อ	ρ	แทนความหนาแน่นของวัสดุ
	m	แทนน้ำหนักของวัสดุ
	V	แทนปริมาตรของวัสดุ

ด้วยเหตุดังกล่าวทำให้การศึกษาสัดส่วนการผสมของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในกลุ่มวัสดุผสมจากขานอ้อยไม่สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับวัสดุผสมจากเส้นใยใบอ้อยได้ ดังนั้นงานวิจัยชิ้นนี้จึงเลือกศึกษาสัดส่วนการผสมที่สามารถเป็นไปได้จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวัสดุผสมทางการเกษตรที่มีความหนาแน่นใกล้เคียงกับความหนาแน่นของเส้นใยใบอ้อยซึ่งแสดงไว้ดังตารางที่ 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวัสดุผสมทางการเกษตรที่มีความหนาแน่นใกล้เคียงกับความหนาแน่นของเส้นใยใบอ้อยนั้นจะมีสัดส่วนการผสมของวัสดุเสริมแรงร้อยละโดยน้ำหนักอยู่ที่ประมาณ 5 ถึง 20

ตารางที่ 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวัสดุผสมจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร (กลุ่มความหนาแน่นต่ำ)

ผู้วิจัย	วัสดุหลัก	วัสดุเสริมแรง		
		ประเภท	ความหนาแน่น (g/cm ³)	สัดส่วน (%wt.)
S Ugochukwu [31]	Epoxy resin	Napier fiber	0.36	5, 10, 15
MJM Ridzuan [32]	Epoxy resin	Napier fiber	0.36	5, 7.5, 10
B Marques [33]	Polyurethane	Rice husk	0.4 – 0.7 [29]	5, 10, 15
MH JA [34]	Polyester	Napier fiber	0.36	5, 10, 15, 20

สำหรับวัสดุผสมกรณีวัสดุเสริมแรงมีลักษณะเป็นเส้นใยนั้น ขนาดของเส้นใย (Fiber length) จะส่งผลต่อคุณสมบัติทางกลของวัสดุผสมไม่ว่าทางใดก็ทางหนึ่ง กลุ่มงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับขนาดของเส้นใยจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรในวัสดุผสมจะแสดงไว้ดังตารางที่ 2.3 ซึ่งขนาดของเส้นใยจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่เลือกใช้ในงานวิจัยกลุ่มนี้ จะค่อนข้างมีความหลากหลายขึ้นอยู่กับประเภทของวัสดุหลักหรือลักษณะวิธีการเตรียมวัสดุผสมเช่น การกวนผสม การเทผสมหรือการฉีดขึ้นรูป เป็นต้น งานวิจัยที่เกี่ยวข้องจะพบว่าขนาดของเส้นใยที่ใช้จะมีตั้งแต่อย่างน้อยกว่า 1 มิลลิเมตรถึงประมาณ 9 มิลลิเมตรซึ่งการเลือกใช้ขนาดดังกล่าวผู้ทำการวิจัยไม่ได้ให้เหตุผลเพิ่มเติม

ใด ๆ ในการเลือก เพียงให้เหตุผลว่าเพื่อทำการศึกษผลกระทบที่เกิดจากการเลือกขนาดของเส้นใยที่แตกต่างกันต่อคุณสมบัติของวัสดุในด้านต่างๆ ของวัสดุผสมในงานวิจัยของตนเองเท่านั้น

ตารางที่ 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับขนาดของเส้นใย (มิลลิเมตร) ต่อคุณสมบัติทางกลของวัสดุผสม

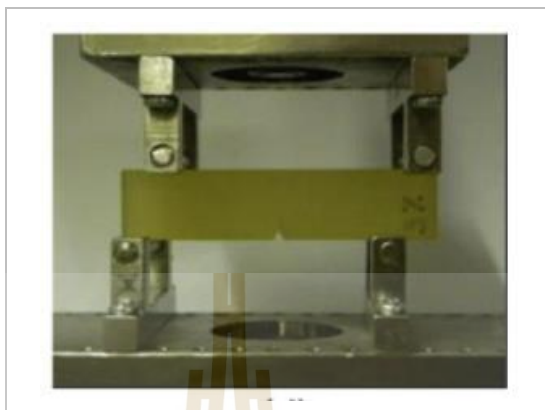
ผู้วิจัย	วัสดุเสริมแรง / หลัก	ความยาวเส้นใย	คุณสมบัติที่ศึกษา
SS Chauhan [35]	Wood dust/GFRP	0.30, 0.45, 0.60	Tensile
A Bartos [5]	Bagasse/Polypropylene	0.8, 3.0	Tensile, Impact
SK Ye [36]	Wood dust/PP	0.13, 0.18, 0.85	Tensile
HM Naguib [37]	Bagasse/Polyester	0.5, 1.0	Tensile, Flexural
DM Panait [38]	Hemp/Polypropylene	1, 2.5, 4	Tensile
D Ariawan [39]	Zalacca/HDPE	1, 3, 6, 9	Tensile
Q Tang [40]	Bamboo/Phenolic resin	<1 , 1-3	Compressive, Impact
KS Kumar [41]	Sisal, Banana/Polyester	3, 4, 5	Tensile, Flexural, Impact

2.6.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบผสม 1 และ 2

สำหรับวัสดุผสมเชิงวิศวกรรมจะถูกพัฒนาขึ้นโดยมีจุดประสงค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพด้านใดด้านหนึ่งของวัสดุเดิม เช่น ความสามารถในการรับภาระ การต้านทานการสึกหรอ การต้านทานการกัดกร่อนหรือประสิทธิภาพด้านน้ำหนัก เป็นต้น นอกจากนี้การพัฒนาวัสดุผสมบางครั้งยังมีจุดประสงค์เพื่อนำของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการต่างๆ ของการผลิตสินค้าอุปโภคและบริโภคกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์ การนำวัสดุผสมที่พัฒนาขึ้นใหม่ไปใช้ในเชิงวิศวกรรมนั้นมีปัจจัยมากมายที่ต้องคำนึงซึ่งความต้านทานการแตกหักของวัสดุผสมนับเป็นปัจจัยหนึ่งที่ต้องคำนึงถึงเช่นเดียวกัน เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาความต้านทานการแตกหักสำหรับงานวิจัยชิ้นนี้เช่น ลักษณะของชิ้นทดสอบ การเตรียมรอยร้าว วิธีการทดสอบ การคำนวณความต้านทานการแตกหัก เป็นต้น งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับความต้านทานการแตกหักจะแสดงดังต่อไปนี้

คุณ M Zappalorto et al. [42] ได้ทำการศึกษาความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบผสม 1 และ 2 ของวัสดุผสมจากอนุภาคดินเหนียวกับอีพอกซีเรซินด้วยชิ้นทดสอบแบบมีรอยร้าวข้างเดียวกับแรงกดตัด 4 จุด (Single edge notch – four-point bending test) ดังรูปที่ 2.12 ขั้นตอนการเตรียมวัสดุผสมเป็นลักษณะของการกวนผสมและเทลงแม่พิมพ์เพื่อหล่อเป็นชิ้นทดสอบความต้านทานการแตกหัก การทดสอบความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบผสมใน

ลักษณะนี้พารามิเตอร์ของการรับภาระแบบผสมจะเปลี่ยนไปตามระยะของจุดกุดตัดทั้ง 4 จุดที่กระทำกับแนวของรอยร้าวเริ่มต้นบนชิ้นทดสอบ



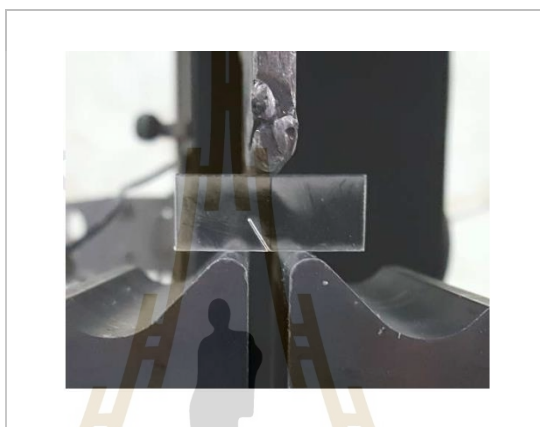
รูปที่ 2.12 ชิ้นทดสอบความต้านทานการแตกหักตามงานวิจัยของคุณ M Zappalorto et al. [41]

คุณ A Mousavi et al. [43] ได้ทำการศึกษาความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบผสม 1 และ 2 ของวัสดุผสมจากอนุภาคไฮดรอกซีอะพาไทต์ (Hydroxyapatite, HAP) อนุภาคอลูมินา (Alumina) กับโพลี (เมทิลเมทาคริเลต) (Poly (methyl methacrylate), PMMA) ด้วยชิ้นทดสอบแบบรอยร้าวเอียงรับแรงกดตัดแบบไม่สมมาตร (Inclined edge crack asymmetric bend) ดังรูปที่ 2.13 ชิ้นทดสอบความต้านทานการแตกหักตามงานวิจัยของคุณ A Mousavi et al. รอยร้าวเริ่มต้นของชิ้นทดสอบจะมีลักษณะเอียงทำมุมกับแนวภาระที่กระทำกับชิ้นทดสอบ พารามิเตอร์ของการรับภาระแบบผสมจะเปลี่ยนไปตามมุมเอียงของรอยร้าวเริ่มต้นและระยะวางตัวของพินด้านล่างในการรับภาระแบบกดตัด 3 จุด



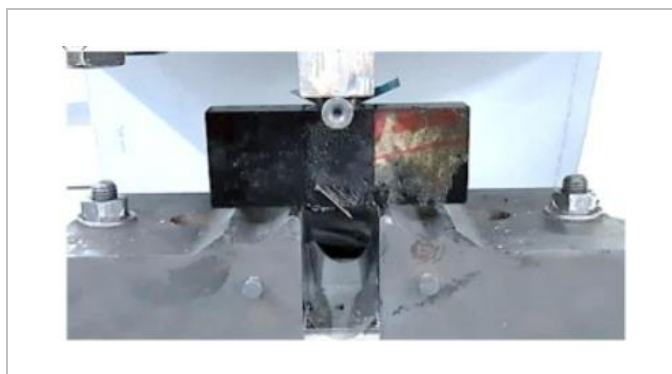
รูปที่ 2.13 ชิ้นทดสอบความต้านทานการแตกหักตามงานวิจัยของคุณ A Mousavi et al. [43]

คุณ SS Mousavi et al. [44] ได้ทำการออกแบบชิ้นทดสอบและชุดทดสอบความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบผสม 1 และ 2 ชิ้นทดสอบลักษณะดังกล่าวเรียกว่าชิ้นทดสอบรับแรงดัดขนาดเล็ก (Short bend beam specimen) ที่ถูกออกแบบมาให้สามารถสร้างพารามิเตอร์ของการรับภาระแบบผสมได้หลากหลายในช่วง 0 ถึง 1 และชิ้นงานยังมีขนาดที่เล็กเหมาะกับการทดสอบที่มีวัสดุสำหรับเตรียมชิ้นทดสอบจำกัด ลักษณะของการให้ภาระที่กระทำกับชิ้นทดสอบจะเป็นแบบกดตัด 3 จุด



รูปที่ 2.14 ชิ้นทดสอบความต้านทานการแตกหักตามงานวิจัยของคุณ SS Mousavi et al. [44]

คุณ MRM Aliha et al. [45] ได้ทำการออกแบบชิ้นทดสอบความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบผสม 1 และ 2 แบบใหม่ที่เหมาะสมกับเครื่องทดสอบขนาดกลางทั่วไป ลักษณะของชิ้นทดสอบจะมีรอยร้าวที่ทำมุมกับแนวภาระที่กระทำกับชิ้นทดสอบและมีการให้ภาระแบบกดตัด 3 จุด (Inclined notched bend beam – three-point bending test) ดังรูปที่ 2.15 ซึ่งขนาดของชิ้นงานนั้นสามารถทำการปรับเปลี่ยนได้ตามลักษณะหรืออุปกรณ์การทดสอบของผู้ต้องการนำไปใช้ อีกทั้งชิ้นงานยังสามารถสร้างพารามิเตอร์ของการรับภาระแบบผสมได้อย่างครอบคลุมและเป็นไปตามทฤษฎีของเกณฑ์การแตกหัก



รูปที่ 2.15 ชั้นทดสอบความต้านทานการแตกหักตามงานวิจัยของคุณ MRM Aliha et al. [45]

2.6.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำนายความต้านทานการแตกหัก

สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำนายความต้านทานการแตกหักนั้นจะมุ่งศึกษาถึงการนำวิธีปัญญาประดิษฐ์มาช่วยในการทำนายผลความต้านทานการแตกหัก ซึ่งงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำนายความต้านทานการแตกหักจะแสดงต่อไปนี้

คุณ KM Hamdia et al. [15] ทำการทำนายความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบที่ 1 ของวัสดุพอลิเมอร์ผสมอนุภาคระดับนาโนด้วยอัลกอริทึมโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial neuron networks, ANNs) และวิธีระบบอนุมานฟัซซีโครงข่ายปรับตัวได้ (Adaptive neuro-fuzzy inference system, ANFIS) เทียบกับสมการทำนายผลของคุณ Huang และ Kinloch ด้วยจำนวนข้อมูลทั้งหมด 115 ข้อมูล ซึ่งมีปัจจัยรับเข้า 5 ปัจจัย ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองด้วยตัวชี้วัดต่างๆ แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองปัญญาประดิษฐ์มีประสิทธิภาพที่ดีกว่าโดยมีค่า R^2 ประมาณ 0.92 ซึ่งมากกว่าสมการทำนายผลของคุณ Huang และ Kinloch ที่มีค่า R^2 ประมาณ 0.7

คุณ DG Roy et al. [46] ทำการทำนายความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบที่ 1 ของหินด้วยอัลกอริทึมโครงข่ายประสาทเทียมและวิธีระบบอนุมานฟัซซีโครงข่ายปรับตัวได้เทียบกับตรรกศาสตร์คลุมเครือ (Fuzzy inference system, FIS) และการวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณ (Multiple linear regression analysis, MRA) โดยใช้ข้อมูลในการสร้างแบบจำลองทั้งหมด 45 ข้อมูล ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองด้วยตัวชี้วัดต่างๆ แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองปัญญาประดิษฐ์นั้นมีประสิทธิภาพการทำนายที่ดีกว่าแบบจำลองอื่นๆ อย่างเห็นได้ชัด

คุณ L Qiao et al. [16] ทำการทำนายความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบที่ 1 ของเหล็กไฟร์ลไลท์ด้วยอัลกอริทึมโครงข่ายประสาทแบบถดถอยทั่วไป (Generalized regression neural networks, GRNNs) และนำเสนอวิธีการหาไฮเปอร์พารามิเตอร์ที่เหมาะสมด้วยอัลกอริทึมแบบแมลงหวี่ (Fruit fly optimization algorithm) ด้วยจำนวนข้อมูลทั้งหมด 14 ข้อมูล ผลการวิจัยแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของแบบจำลองที่ค่อนข้างใกล้เคียงกับผลลัพธ์จากเหตุการณ์

จริง ซึ่งวิธีการหาไฮเปอร์พารามิเตอร์ที่เหมาะสมด้วยอัลกอริทึมแบบแมลงหิ่งห้อยนั้นส่งผลให้แบบจำลองมีประสิทธิภาพที่ดีที่สุดเมื่อเทียบกับการหาไฮเปอร์พารามิเตอร์ที่เหมาะสมด้วยวิธีการค้นหาแบบกริด

คุณ HE Balcioglu et al. [47] ทำการทำนายความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบผสม 1 และ 2 ของวัสดุพอลิเมอร์คอมโพสิตด้วยอัลกอริทึมแบบเพื่อนบ้านใกล้ที่สุด (K nearest neighbors, KNN) ต้นไม้ของการตัดสินใจ (Decision tree) แรนดอมฟอเรสต์ (Random forest) และซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน (Support vector machine) ด้วยจำนวนข้อมูลทั้งหมด 200 ข้อมูลและทำการทำนายผลเปรียบเทียบกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าผลการทำนายจากวิธีปัญญาประดิษฐ์นี้มีความใกล้เคียงกับผลลัพธ์จากเหตุการณ์จริงเป็นอย่างมากและมีความผิดพลาดค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ สำหรับอัลกอริทึมของปัญญาประดิษฐ์ที่มีประสิทธิภาพคือซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนเคอร์เนลพื้นฐานแวนด์รมี



บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 การเตรียมวัสดุ

3.1.1 การเตรียมเส้นใยไบอ้อย

งานวิจัยชิ้นนี้เลือกใช้ไบอ้อยพันธุ์ขอนแก่น ที่มีอายุการเก็บเกี่ยว 8 เดือนจากไร่อ้อยในพื้นที่ การเตรียมเส้นใยไบอ้อยเพื่อใช้ในการเสริมแรงให้กับอีพอกซีเรซินสามารถสรุปเป็นขั้นตอนได้ดังนี้

3.1.1.1 เมื่อได้รับไบอ้อยจากไร่อ้อยในพื้นที่แล้วจะทำการแยกก้านกับไบอ้อยออกจากกัน

3.1.1.2 นำไบอ้อยที่ได้จากขั้นตอนก่อนหน้ามาล้างด้วยน้ำสะอาดเพื่อขจัดสิ่งสกปรกออกจากไบอ้อย หลังจากนั้นนำไบอ้อยไปตากให้แห้งด้วยแสงแดดเป็นเวลา 48 ชั่วโมง

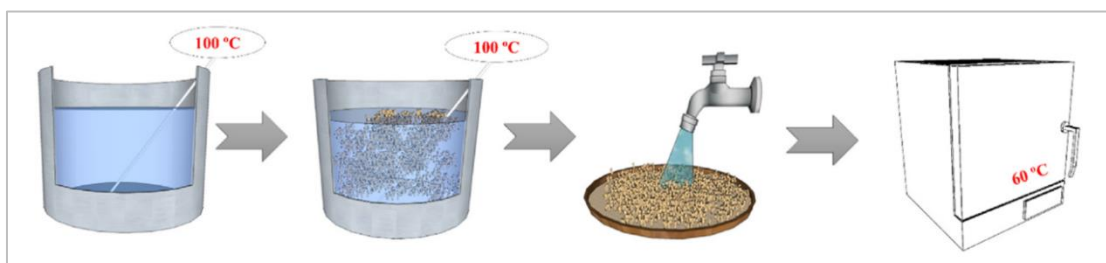
3.1.1.3 เมื่อตากไบอ้อยเรียบร้อยแล้วจึงนำไบอ้อยจากมาปรับปรุงคุณสมบัติ (Treatment) ตามงานวิจัยของคุณ MR Cabral et al. [48] ดังรูปที่ 3.1 ด้วยการต้มไบอ้อยในน้ำที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสในสัดส่วนของไบอ้อยเท่ากับ 31.25 กรัมต่อน้ำหนึ่งลิตรและคงอุณหภูมิดังกล่าวไว้เป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นจึงนำไบอ้อยข้างต้นมาล้างด้วยน้ำแบบไหลผ่านที่อุณหภูมิห้อง ในขั้นตอนสุดท้ายนั้นจะอบไบอ้อยที่ผ่านการล้างด้วยน้ำสะอาดในตู้อบลมร้อน (Hot air oven) ด้วยอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง (ส่วนต่อจากนี้จะเรียกไบอ้อยที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณสมบัติแล้วว่า “เส้นใยไบอ้อย”) โดยหลังการปรับปรุงคุณสมบัติของเส้นใยไบอ้อยแล้วนั้นจะทำให้ส่วนประกอบที่ไม่ส่งผลต่อความแข็งแรงของเส้นใยไบอ้อยลดลงอีกทั้งน้ำหนักของไบอ้อยยังลดลงเมื่อเทียบกับก่อนที่ทำการปรับปรุงคุณสมบัติดังกล่าวงานวิจัยของคุณ MR Cabral et al. [48] รูปที่ 3.2

3.1.1.4 หลังการปรับปรุงคุณสมบัติเรียบร้อยแล้วนำเส้นใยไบอ้อยที่ได้ไปบดด้วยเครื่องบด (Crushing machine) ยี่ห้อ Fritsch รุ่น Fritsch D-55734

3.1.1.5 เพื่อศึกษาผลกระทบของความยาวเส้นใยไบอ้อยต่อคุณสมบัติของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยไบอ้อย นำเส้นใยไบอ้อยที่ผ่านการบดเรียบร้อยแล้วจากกระบวนการก่อนหน้าไปแยกขนาดด้วยเครื่องร่อนและตะแกรงร่อน (Sieve shaker machine) ยี่ห้อ Fritsch รุ่น A-3 Pro

3.1.1.6 หลังจากนั้นบรรจุเส้นใยไบอ้อยจากตะแกรงร่อนมาตรฐานแต่ละเบอร์ใส่ถุงซิปลอยและเก็บไว้ในตู้ควบคุมความชื้น ทำการสุ่มเส้นใยไบอ้อยจากตะแกรงมาตรฐานแต่ละเบอร์ประมาณ 50 เส้น เพื่อวัดความยาวเส้นใยไบอ้อยด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical micro-

scope, OM) ดังรูปที่ 3.3 ขนาดที่ได้จากการวัดจะแสดงไว้ดังรูปที่ 3.4 โดยเส้นใยใบอ้อยใช้ในงานวิจัย
ชิ้นนี้จะมีความหนาแน่นรวม (Bulk density) เท่ากับ 0.36 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการปรับปรุงใบอ้อยตามงานวิจัยของคุณ MR Cabral et al.[48]

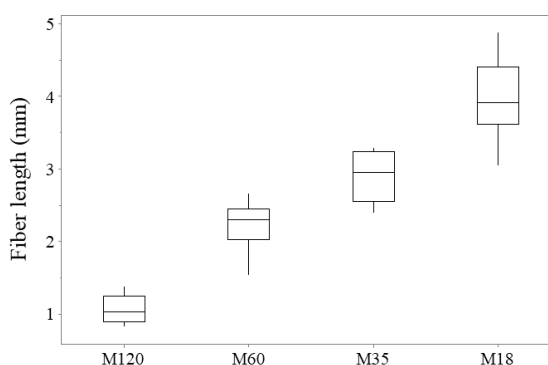
Table 3 – Chemical composition of sugarcane bagasse fibers (Standard deviations in parentheses).		
Compound (%)	Non-treated sugarcane bagasse fibers	Treated sugarcane bagasse fibers
Cellulose	38.1 ^a (0.6)	38.3 ^a (0.2)
Hemicellulose	28.1 ^a (0.5)	25.0 ^a (0.2)
Lignin	24.8 ^a (0.2)	24.8 ^a (0.2)
Extractives	9.0 ^a (0.5)	7.1 ^a (0.1)
Humidity content	7.1 ^a (0.1)	7.1 ^a (0.1)
Ash	0.9 ^a (0.1)	0.5 ^a (0.1)

^a Each value represents the mean of three replicates.

รูปที่ 3.2 เส้นใยใบอ้อยหลังปรับปรุงคุณสมบัติตามงานวิจัยของคุณ MR Cabral et al.[48]



รูปที่ 3.3 การวัดเส้นใยใบอ้อยด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง



รูปที่ 3.4 ขนาดของเส้นใยใบอ้อยที่ตะแกรงร่อนเบอร์ 18, 35, 60 และ 120

3.1.2 การออกแบบการทดลอง

สำหรับการออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบผสม 1 และ 2 ของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยใบอ้อยจะออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบของปัจจัยหลักที่เลือกศึกษา 3 ปัจจัยต่อความต้านทานการแตกหักของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยใบอ้อยได้แก่ ความยาวของเส้นใยใบอ้อย สัดส่วนการผสมเส้นใยใบอ้อยในวัสดุผสมและสัดส่วนของการรับภาระแบบผสมในการรับภาระแบบผสม 1 และ 2 หรือที่เรียกว่าพารามิเตอร์ของการรับภาระแบบผสม (Mode mixity parameter, M^e) สำหรับระดับของแต่ละปัจจัยที่เลือกศึกษาจะแสดงไว้ดังตารางที่ 3.1 และ 3.2 ตามลำดับของการทดสอบอันได้แก่ การทดสอบแรงดึงและการทดสอบความต้านทานการแตกหัก การออกแบบการทดลองจะเลือกใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ (General full factorial design) ด้วยโปรแกรม Minitab ที่จำนวนการทดลองซ้ำในแต่ละเงื่อนไขของการทดลองตามประเภทของการทดสอบซึ่งจะอธิบายเพิ่มเติมในส่วนของการทดสอบวัสดุ

ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงปัจจัยการออกแบบการทดสอบแรงดึง

ปัจจัย	ระดับปัจจัย			
	1	2	3	4
ความยาวของเส้นใยใบอ้อย (มิลลิเมตร)	1	2	3	4
สัดส่วนการผสม (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	5	10	15	-

ตารางที่ 3.2 ตารางแสดงปัจจัยการออกแบบการทดสอบความต้านทานการแตกหัก

ปัจจัย	ระดับปัจจัย			
	1	2	3	4
ความยาวของเส้นใยใบบ่อย (มิลลิเมตร)	1	2	3	4
สัดส่วนการผสม (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	5	10	15	-
พารามิเตอร์ของการรับภาระแบบผสม	0	0.5	1	-

3.1.3 การเตรียมอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยใบบ่อย

ขั้นตอนการเตรียมอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยใบบ่อยจะอ้างอิงวิธีการเตรียมวัสดุผสมตามงานวิจัยของคุณ S Helaili [49] สำหรับอีพอกซีเรซินที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะเป็นชนิด Diglycidyl ether Bisphenol- A (DGEBA) และสารช่วยให้แข็งตัว (Hardener) ชนิด Aliphatic amine รุ่น ER 570 จากบริษัท ปีอาร์พีคอมโพสิท จำกัด ขั้นตอนการผสมเส้นใยใบบ่อยเพื่อเสริมแรงให้อีพอกซีเรซินสามารถสรุปเป็นขั้นตอนได้ดังนี้

3.1.3.1 ผสมอีพอกซีเรซินเข้ากับสารช่วยให้แข็งตัวในสัดส่วนการผสมต่อน้ำหนักเป็น 100 ต่อ 35 กรัม (อีพอกซีเรซินต่อสารช่วยให้แข็งตัว) และทำการกวนผสมด้วยเครื่องกวนสารแบบแม่เหล็ก (Magnetic stirrer) เป็นเวลา 30 นาทีเพื่อให้สารทั้งสองผสมเป็นเนื้อเดียวกัน

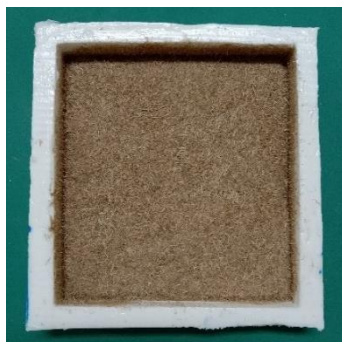
3.1.3.2 ระหว่างการกวนผสมของอีพอกซีเรซินในขั้นตอนก่อนหน้า ทำการชั่งน้ำหนักของเส้นใยใบบ่อยตามสัดส่วนการผสมที่ออกแบบไว้และเทเส้นใยใบบ่อยลงในแม่พิมพ์ซิลิโคนโดยเกลี่ยให้ทั่วทั้งแม่พิมพ์ (รูปที่ 3.5)

3.1.3.3 เมื่อกวนผสมอีพอกซีเรซินครบตามเวลาที่กำหนด นำอีพอกซีเรซินดังกล่าวเข้าเครื่องสุญญากาศ (Vacuum chamber) เป็นเวลา 5 นาที เพื่อกำจัดฟองอากาศที่เกิดขึ้นระหว่างขั้นตอนการกวนผสม หลังจากนั้นเทอีพอกซีเรซินลงในแม่พิมพ์ซิลิโคนที่เตรียมไว้

3.1.3.4 เพื่อกำจัดฟองอากาศที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนการเทหรือฟองอากาศที่แทรกอยู่ระหว่างเส้นใยใบบ่อย นำแม่พิมพ์ซิลิโคนที่เทอีพอกซีเรซินใส่เรียบร้อยตามขั้นตอนที่ 3.1.3.3 เข้าเครื่องสุญญากาศเป็นเวลา 15 นาที (รูปที่ 3.6)

3.1.3.5 เมื่อครบเวลาที่กำหนดตามขั้นตอนที่ 3.1.3.4 นำแม่พิมพ์ออกจากเครื่องสุญญากาศและปล่อยให้อีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยใบบ่อยแข็งตัวที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นจึงนำเข้าอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

3.1.3.6 เมื่อครบเวลาที่กำหนดตามขั้นตอนที่ 3.1.3.5 นำอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยใบบ่อยออกจากตู้อบและปล่อยให้เย็นตัวจนถึงอุณหภูมิห้องจึงแกะออกจากแม่พิมพ์เพื่อเตรียมตัดเป็นชิ้นทดสอบต่างๆ ต่อไป

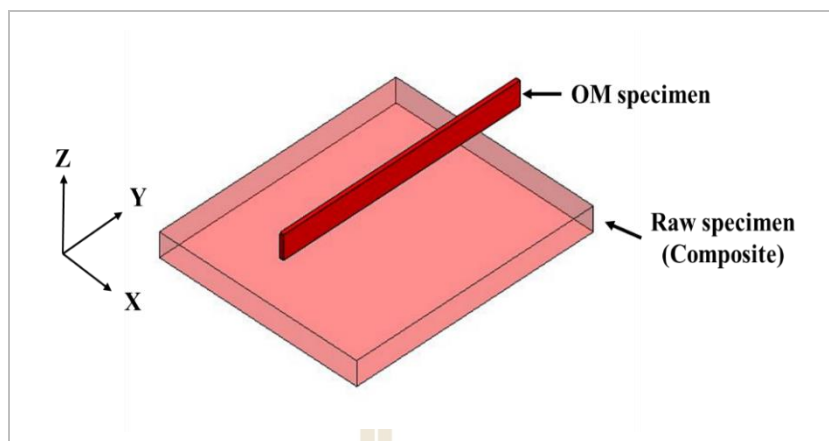


รูปที่ 3.5 การใส่เส้นใยไบออลงในแม่พิมพ์ซิลิโคนในขั้นตอนการเตรียมอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยไบออล



รูปที่ 3.6 ขั้นตอนการจัดฟองอากาศที่อาจเกิดขึ้นจากขั้นตอนการเทอีพอกซีเรซินลงแม่พิมพ์

การเตรียมอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยไบออลนั้นมีหลายปัจจัยที่ต้องคำนึงถึงในขั้นตอนการผสมไม่ว่าจะเป็นฟองอากาศซึ่งอาจเกิดขึ้นได้จากขั้นตอนการผสมอีพอกซีเรซินหรือฟองอากาศที่แทรกอยู่ระหว่างเส้นใยไบออลก่อนการผสม ปัญหาดังกล่าวสามารถแก้ไขได้ด้วยการนำวัสดุผสมเข้าเครื่องสุญญากาศตามที่ได้เสนอไปในขั้นตอนของการเตรียมวัสดุผสม นอกจากนี้ปัจจัยเรื่องฟองอากาศที่ต้องคำนึงถึงยังมีอีกหนึ่งปัจจัยสำคัญที่ต้องคำนึงถึงคือการกระจายตัวของเส้นใยไบออลในเนื้อของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยไบออล สำหรับงานวิจัยชิ้นนี้จะเลือกใช้การผสมที่ทำให้เส้นใยไบออลกระจายตัวในเนื้อวัสดุผสมแบบสุ่ม (เส้นใยไบออลไม่จัดเรียงไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่งเท่านั้น) และเพื่อยืนยันลักษณะการกระจายตัวดังกล่าว อีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยไบออลจะถูกตัดและเตรียมเพื่อศึกษาการกระจายตัวด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงดังรูปที่ 3.7 โดยผลการศึกษาดังกล่าวจะแสดงไว้ในบทที่ 4 ต่อไป

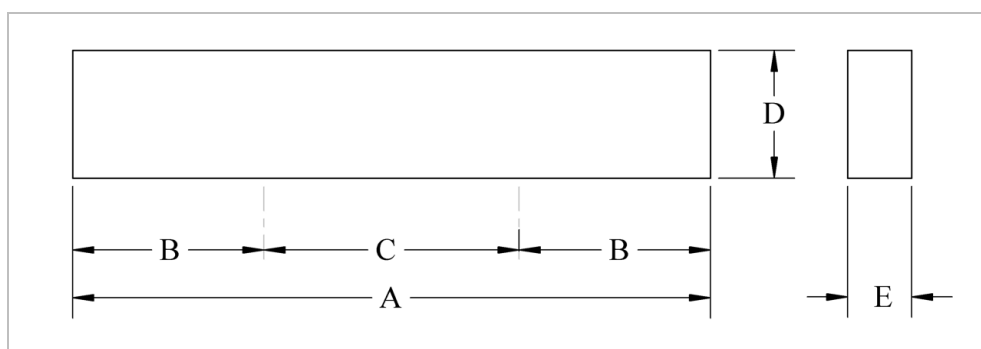


รูปที่ 3.7 การเตรียมชิ้นงานสำหรับถ่ายภาพการกระจายตัวของเส้นใยโดยใช้อุปกรณ์จุลทรรศน์แบบแสง

3.2 การทดสอบวัสดุ

3.2.1 การทดสอบแรงดึง (Tensile testing)

การทดสอบแรงดึง (Tensile testing) ของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยโพลีเอสเตอร์จะอ้างอิงรูปร่างของชิ้นทดสอบ เงื่อนไขการทดสอบ การติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบและการคำนวณผลการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D3039/D3039M [50] ที่เป็นมาตรฐานการทดสอบแรงดึงของวัสดุผสมที่มีพอลิเมอร์เป็นวัสดุหลัก สำหรับมาตรฐาน ASTM D3039/D3039M นั้นไม่ได้กำหนดขนาดของชิ้นทดสอบไว้แบบตายตัว สามารถปรับให้เหมาะสมกับประเภทของวัสดุ ลักษณะการขึ้นรูปหรือขนาดของเครื่องมือในการทดสอบได้ เป็นต้น นอกจากการอ้างอิงตามมาตรฐานการทดสอบนั้นการทดสอบแรงดึงในงานวิจัยนี้จะอ้างอิงขนาดของชิ้นทดสอบตามงานวิจัยของคุณ M Chougan et al. [51] ด้วย โดยรูปร่างและขนาดของชิ้นทดสอบจะแสดงดังรูปที่ 3.8 และตารางที่ 3.3 ตามลำดับ การทดสอบแรงดึงแต่ละเงื่อนไขจะทดสอบซ้ำอย่างน้อย 5 ครั้งบนเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal testing machine, UTM) ยี่ห้อ Lloyd รุ่น LD series กำลังการทดสอบ 100 กิโลนิวตัน ด้วยอัตราการรับภาระ (Loading rate) 1 มิลลิเมตรต่อนาที (รูปที่ 3.9) การทดสอบแรงดึงจะดำเนินการไปจนกระทั่งชิ้นทดสอบจะเกิดการแตกหัก ระหว่างการทดสอบค่าภาระและระยะยืดของชิ้นทดสอบจะถูกบันทึกด้วยชุดควบคุมระบบคอมพิวเตอร์ของเครื่องทดสอบ สำหรับงานวิจัยชิ้นนี้จะทำการทดสอบแรงดึงเพื่อใช้ในการทำนายความต้านทานการแตกหักด้วยเกณฑ์การแตกหัก (Fracture criterion) เป็นหลัก



รูปที่ 3.8 รูปร่างของชิ้นทดสอบแรงดึง

ตารางที่ 3.3 ตารางแสดงขนาดของชิ้นงานทดสอบแรงดึง

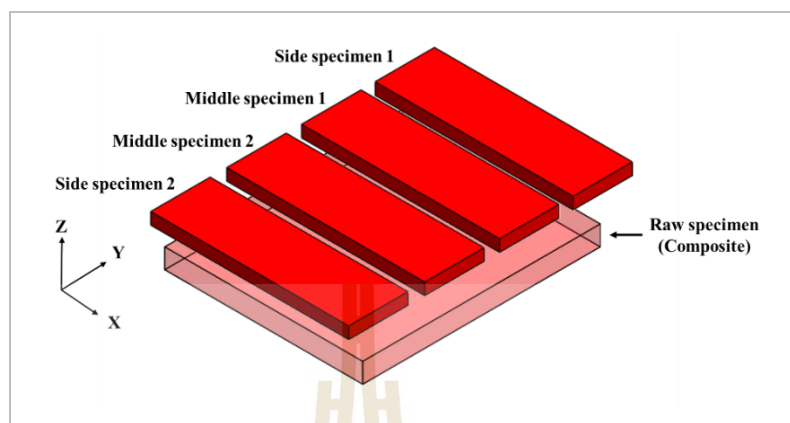
ตัวแปร	ความหมาย	ขนาด	หน่วย
A	ความยาวทั้งหมดของชิ้นทดสอบ (Overall length)	100 ± 3	มิลลิเมตร
B	ความยาวส่วนจับยึด (Gripper length)	30 ± 1	มิลลิเมตร
C	ความยาวเกจ (Gage length)	40 ± 1	มิลลิเมตร
D	ความกว้างของชิ้นทดสอบ (Width)	20 ± 1	มิลลิเมตร
E	ความหนาของชิ้นทดสอบ (Thickness)	8 ± 0.5	มิลลิเมตร



รูปที่ 3.9 ลักษณะของการทดสอบแรงดึง

นอกเหนือจากการทดสอบแรงดึงเพื่อใช้ในการทำนายความต้านทานการแตกหักด้วยเกณฑ์การแตกหัก การทดสอบแรงดึงยังเป็นการยืนยันถึงคุณสมบัติที่ใกล้เคียงกันจากการเตรียมวัสดุผสมแต่ละครั้งหรือภายในวัสดุผสมแม่พิมพ์เดียวกัน การยืนยันคุณสมบัติดังกล่าวชิ้นทดสอบแรงดึงจะถูกตัดขึ้นรูปจากวัสดุผสมในฝั่งขอบของแม่พิมพ์และฝั่งกลางของแม่พิมพ์ดังรูปที่ 3.10 ฝั่งละอย่างน้อย

5 ชั้นและทำการวิเคราะห์ทางสถิติถึงความสัมพันธ์ของฝั่งการเตรียมชิ้นทดสอบ ซึ่งมีความหมายเดียวกันกับลักษณะการเตรียมวัสดุผสมกับคุณสมบัติการรับแรงดึงของวัสดุต่อไป

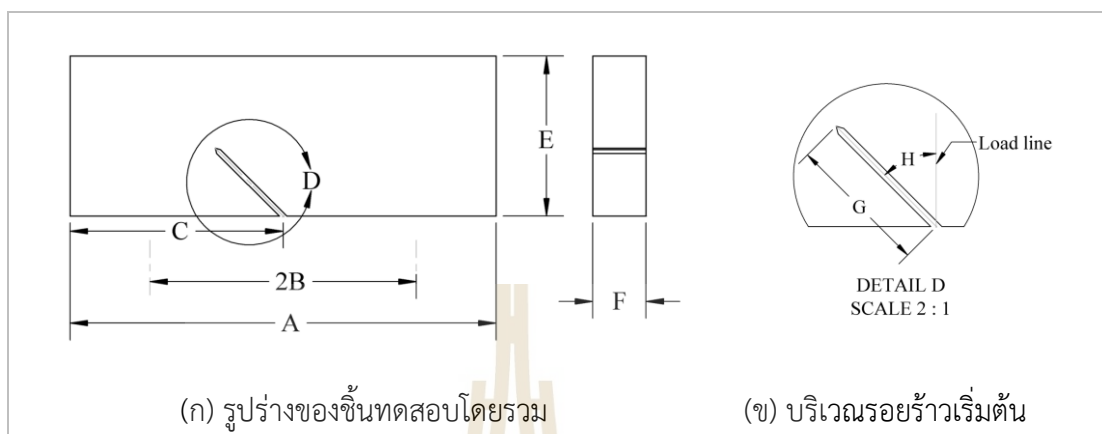


รูปที่ 3.10 การเตรียมชิ้นงานทดสอบแรงดึงเพื่อศึกษาผลกระทบของการเตรียมวัสดุ

3.2.2 การทดสอบความต้านทานการแตกหัก (Fracture toughness testing)

การทดสอบความต้านทานการแตกหัก (Fracture toughness testing) ภายใต้การรับภาระแบบผสม 1 และ 2 จะอ้างอิงรูปร่างและขนาดของชิ้นทดสอบบางส่วนจากงานวิจัยของคุณ M.R. Ayatollahi et al. [45] ดังรูปที่ 3.11 และตารางที่ 3.4 การทดสอบความต้านทานการแตกหักจะใช้ชิ้นทดสอบประเภทรอยร้าวแบบเฉียงรับแรงดัด (Incline crack bending specimen, ICB) ลักษณะการรับภาระเป็นแบบกดดัด 3 จุด (Three point bending test) การทดสอบความต้านทานการแตกหักเป็นการทดสอบที่มีลักษณะเป็นการให้ภาระกับชิ้นทดสอบที่มีรอยร้าวอยู่ก่อนแล้ว ดังนั้นจึงต้องมีการเตรียมรอยร้าวเริ่มต้นให้กับชิ้นทดสอบก่อนและเพื่อให้รอยร้าวเริ่มต้นที่เตรียมมีปลายรอยร้าวที่แหลมคมตามทฤษฎีนั้นรอยร้าวเริ่มต้น (Initial crack) จะถูกเตรียมด้วยเลื่อยและที่บริเวณปลายรอยร้าว (Crack tip) จะถูกเฉือนด้วยใบมีดคัตเตอร์ตามมาตรฐาน ASTM D5045 [52] หลังจากนั้นจึงวัดความยาวรอยร้าวรวมทั้งหมดด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงก่อนเริ่มการทดสอบ การทดสอบความต้านทานการแตกหักจะดำเนินการบนเครื่องทดสอบแบบอเนกประสงค์เช่นเดียวกับการทดสอบแรงดึงที่อัตราภาระเท่ากับ 1 มิลลิเมตรต่อวินาทีดังรูปที่ 3.12 จนกระทั่งชิ้นทดสอบแตกหักหรือขาดออกจากกันจึงหยุดการทดสอบ การทดสอบจะทำซ้ำอย่างน้อย 3 ครั้งในแต่ละเงื่อนไขการทดสอบและทำการเก็บข้อมูลของภาระและระยะยืดที่เกิดขึ้นกับชิ้นทดสอบตลอดการทดสอบเพื่อคำนวณความต้านทานการแตกหักต่อไป การเตรียมชิ้นทดสอบความต้านทานการแตกหักนั้นปัจจัยหนึ่งที่ต้องคำนึงถึงเป็นพิเศษคือองศาของรอยร้าวเริ่มต้นที่กระทำกับแนวภาระ (รูปที่ 3.11 (ข)) เนื่องจากจะส่งผลต่อสัดส่วนการรับภาระระหว่างรูปแบบที่ 1 และรูปแบบที่ 2 ซึ่งงานวิจัยชิ้นนี้จะเตรียมชิ้นทดสอบด้วยเครื่องกัด

แบบควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ (Milling CNC) และทำการสุ่มวัดมุมของรอยร้าวเริ่มต้นด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงดังรูปที่ 3.13

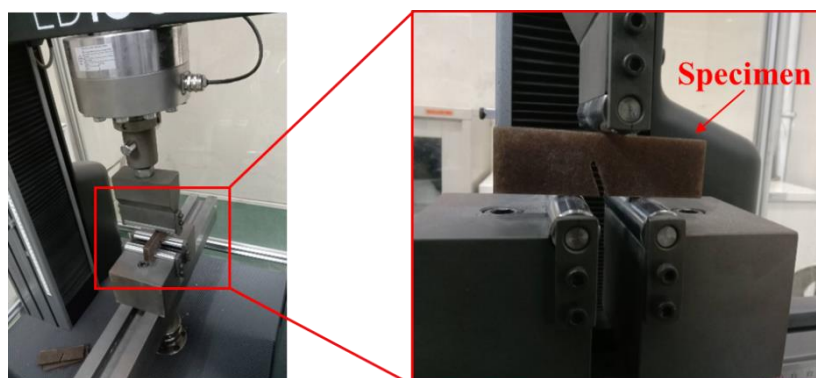


รูปที่ 3.11 รูปร่างของชิ้นทดสอบความต้านทานการแตกหัก

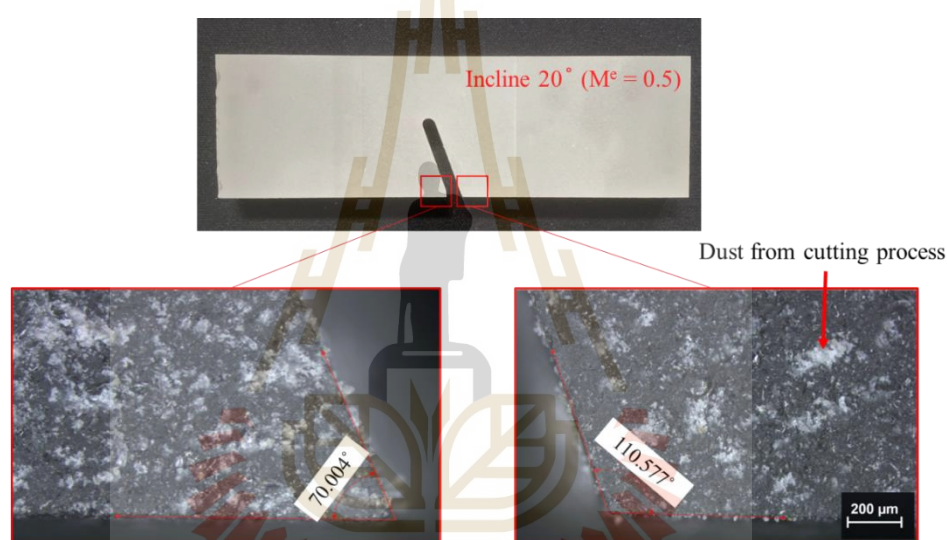
ตารางที่ 3.4 ขนาดของชิ้นทดสอบความต้านทานการแตกหัก

ตัวแปร	ความหมาย	ขนาด	หน่วย
A	ความยาวของชิ้นทดสอบ (Length)	80 ± 1	มิลลิเมตร
B	ระยะของพินด้านล่าง (Span length)	18*	มิลลิเมตร
C	ระยะห่างของรอยร้าวเริ่มต้น (Crack to length)	40 ± 0.5	มิลลิเมตร
E	ความกว้างของชิ้นทดสอบ (Width)	30 ± 1	มิลลิเมตร
F	ความหนาของชิ้นทดสอบ (Thickness)	10 ± 0.5	มิลลิเมตร
G	ความยาวรอยร้าวเริ่มต้น (Crack length)	18*	มิลลิเมตร
H	มุมของรอยร้าวเริ่มต้น (Incline crack angle)	0 – 32*	องศา

*สำหรับขนาดในส่วนดังกล่าวเป็นขนาดที่ได้จากการออกแบบการทดลองเบื้องต้นซึ่งจะอธิบายไว้ในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 3.12 ลักษณะการทดสอบความต้านทานการแตกหักบนเครื่องทดสอบอเนกประสงค์



รูปที่ 3.13 การวัดมุมของรอยร้าวเริ่มต้นด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่มุมของรอยร้าวเริ่มต้น 20°

3.2.3 การคำนวณความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาวะแบบผสม 1 และ 2

ความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาวะแบบผสม 1 และ 2 ในงานวิจัยชิ้นนี้จะใช้พารามิเตอร์ตัวประกอบความเข้มของความเค้น (Stress intensity factor, K) เป็นตัวแทนของความต้านทานการแตกหักที่เกิดขึ้นกับอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยโพลีเอสเตอร์โดยจะแยกพิจารณาตามรูปแบบของภาระที่กระทำกับชิ้นทดสอบ สำหรับงานวิจัยในส่วนต่อจากนี้จะเรียกตัวประกอบความเข้มของความเค้นว่า “ความต้านทานการแตกหัก” เช่นความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาวะแบบที่ 1 หมายถึงค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นภายใต้ภาวะแบบที่ 1 (K_1) เป็นต้น การรับภาระแบบผสม 1 และ 2 เป็นการรับภาระในลักษณะผสมระหว่างภาวะแบบที่ 1 ที่กระทำในทิศทางเปิดรอยร้าว (Opening mode) กับภาวะแบบที่ 2 ที่กระทำในลักษณะเฉือนรอยร้าว (In-plane shear mode) สัดส่วนของรูปแบบการรับภาระระหว่างแบบที่ 1 และแบบที่ 2 หรือที่เรียกว่าพารามิเตอร์ของการ

รับภาระแบบผสม (Mode mixity parameters, M^e) สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (17) ค่า M^e จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 โดยเมื่อมีค่าเท่ากับ 1 หมายถึงขณะนั้นขึ้นทดสอบรับภาระแบบที่ 1 เพียงอย่างเดียว เมื่อมีค่าน้อยกว่า 1 แต่มากกว่า 0 หมายถึงขณะนั้นขึ้นทดสอบรับภาระทั้งแบบที่ 1 และแบบที่ 2 ผสมกันและเมื่อมีค่าเท่ากับ 0 หมายถึงขณะนั้นขึ้นทดสอบรับภาระแบบที่ 2 เพียงอย่างเดียว สำหรับความต้านทานการแตกหักในกรณีของการรับภาระแบบผสม 1 และ 2 นั้นค่าความต้านทานการแตกหักที่เกิดขึ้นกับขึ้นทดสอบจะแยกพิจารณาตามรูปแบบของภาระเป็น K_I และ K_{II} ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (18) และ (19) ตามลำดับ

$$M^e = \frac{2}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{K_I}{K_{II}} \right) \quad (17)$$

$$K_I = \frac{P}{Wt} \sqrt{\pi a_0} Y_I \left(\frac{a_0}{W}, \frac{S}{W}, \beta \right) \quad (18)$$

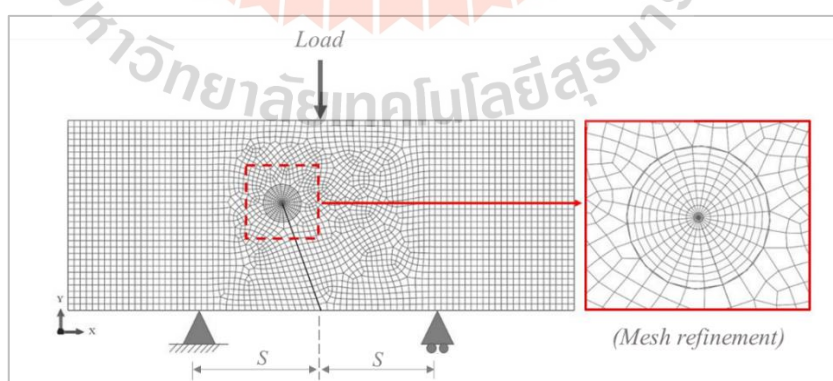
$$K_{II} = \frac{P}{Wt} \sqrt{\pi a_0} Y_{II} \left(\frac{a_0}{W}, \frac{S}{W}, \beta \right) \quad (19)$$

เมื่อ	P	แทนภาระสูงสุดที่เกิดขึ้นกับขึ้นทดสอบ
	W	แทนความกว้างของขึ้นทดสอบ
	t	แทนความหนาของขึ้นทดสอบ
	a_0	แทนความยาวรอยร้าวเริ่มต้นของขึ้นทดสอบ (รวมส่วนที่กรีดด้วยคัตเตอร์)
	Y_I	แทนปัจจัยรูปร่างขึ้นทดสอบภายใต้ภาระแบบที่ 1 (Mode I geometry factor)
	Y_{II}	แทนปัจจัยรูปร่างขึ้นทดสอบภายใต้ภาระแบบที่ 2 (Mode II geometry factor)

ความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบผสม 1 และ 2 ตามสมการที่ (18) และ (19) จะขึ้นอยู่กับความกว้าง, ความหนาและความยาวรอยร้าวเริ่มต้นของขึ้นทดสอบซึ่งเป็นส่วนที่สามารถทำการวัดขนาดได้ตั้งแต่ก่อนเริ่มการทดสอบความต้านทานการแตกหัก ส่วนภาระสูงสุดที่เกิดขึ้นกับขึ้นทดสอบนั้นจะเป็นค่าที่ได้หลังการทดสอบความต้านทานการแตกหักเสร็จสิ้นแล้ว อีกหนึ่งตัวแปรที่สำคัญในการคำนวณความต้านทานการแตกหักคือปัจจัยรูปร่างขึ้นทดสอบภายใต้ภาระแบบที่ 1 และ 2 ที่จะส่งผลต่อค่าความต้านทานการแตกหักของวัสดุอย่างชัดเจนและยังส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่า M^e ปัจจัยรูปร่างขึ้นทดสอบขึ้นอยู่กับสัดส่วนของความยาวรอยร้าวเริ่มต้นต่อความกว้างของขึ้นทดสอบ (a_0/W) สัดส่วนของระยะพินด้นล่างต่อความกว้างของขึ้นทดสอบ (S/W) และมุมของรอยร้าวเริ่มต้นที่กระทำกับแนวภาระ (β) ปัจจัยรูปร่างขึ้นทดสอบสามารถ

คำนวณได้ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สมการที่ (20) ซึ่งงานวิจัยชิ้นนี้เลือกใช้โปรแกรมช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม ABAQUS ในการคำนวณปัจจัยรูปร่างชิ้นทดสอบที่เงื่อนไขต่างๆ สำหรับการแบ่งเอลิเมนต์ของแบบจำลองในการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะแสดงไว้ดังรูปที่ 3.14 โดยแบบจำลองจะมีความกว้าง (W), ความยาว (L) และความหนา (t) เท่ากับ 30, 80 และ 5 มิลลิเมตรตามลำดับ แบบจำลองในการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีจำนวนเอลิเมนต์เฉลี่ยทั้งหมดเท่ากับ 21,536 เอลิเมนต์ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นเอลิเมนต์แบบทรงสี่เหลี่ยม 20 จุดต่อ (C3D20) ยกเว้นที่บริเวณปลายรอยร้าวที่มีการปรับเอลิเมนต์ให้ละเอียดเพื่อให้เข้าใจลักษณะเอกฐานของสนามความเค้น - ความเครียด (Singularity of the stress – strain field) ดังรูปที่ 3.14 (กรอบขวามือ) จะใช้เอลิเมนต์แบบลิ้ม 15 จุดต่อ (C3D15) ที่วงกลมแรกของการปรับขนาดเอลิเมนต์ (ขนาดเอลิเมนต์ 0.10 มิลลิเมตร) โดยเอลิเมนต์ทั้งหมดจะใช้การวิเคราะห์แบบกำลังสอง (Geometric order = Quadratic) การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลอง (Boundary condition) จะกำหนดให้จุดยึดด้านล่างซ้ายไม่สามารถเคลื่อนที่หรือหมุนได้ในทิศทางใดเลย (Fixed) ส่วนจุดยึดด้านล่างขวาสามารถเคลื่อนที่ได้ในแนวแกน X และหมุนรอบทิศทางตั้งฉากกับระนาบ XY เท่านั้น การกำหนดคุณสมบัติของวัสดุให้กับแบบจำลองนั้นจะอ้างอิงจากคุณสมบัติของวัสดุโพลี (เมทิลเมทาคริลิต) ที่มีความเค้นแรงดึง (Tensile stress, σ_t) เท่ากับ 70 MPa, ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of elasticity, E) เท่ากับ 2.95 GPa และอัตราส่วนของปัวซอง (Poisson's ratio, ν) เท่ากับ 0.3 โดยกำหนดให้แรงที่กระทำกับแบบจำลองมีขนาดเท่ากับ 500 นิวตัน

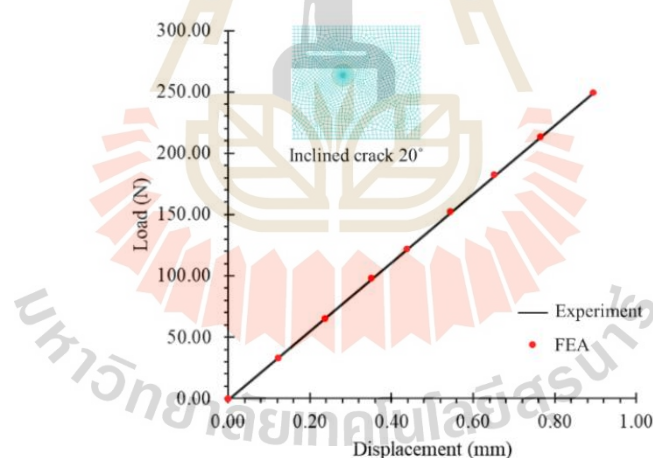
$$Y_i = \frac{K_i W t}{P \sqrt{\pi a_0}}, i = \text{Mode I, II, III} \quad (20)$$



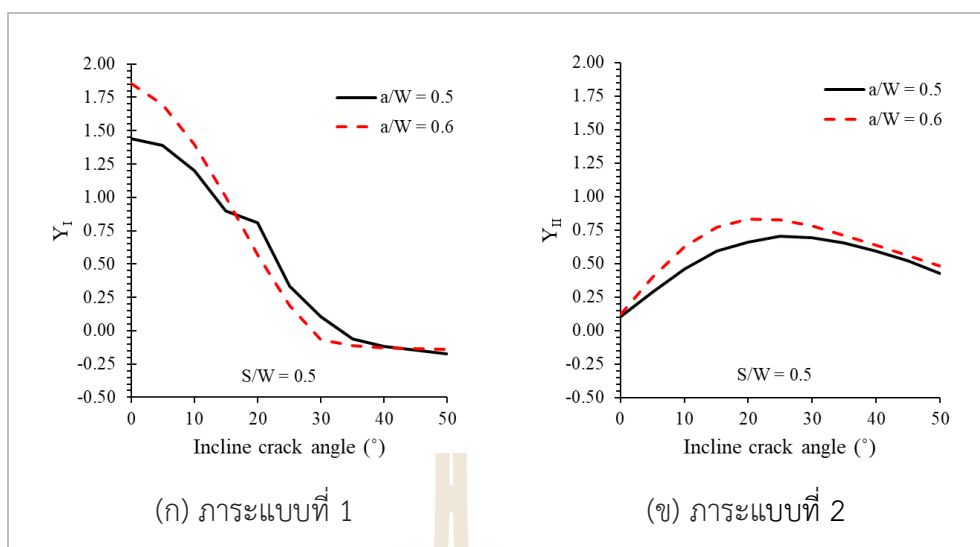
รูปที่ 3.14 การแบ่งเอลิเมนต์ของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

การคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นอกจากมีวัตถุประสงค์เพื่อคำนวณปัจจัยรูปร่างชิ้นทดสอบเงื่อนไขต่างๆ แล้วยังมีจุดประสงค์ในการหามุมของรอยร้าวเริ่มต้น สัดส่วน a_0/W และ

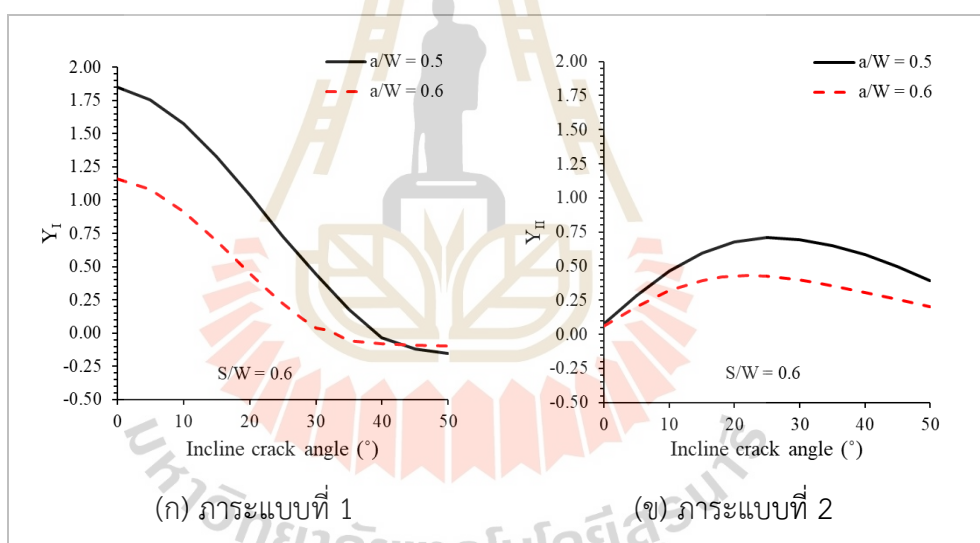
สัดส่วน S/W ที่ทำให้เกิดค่า M^e ในช่วง 0 ถึง 1 เพื่อใช้เตรียมขึ้นทดสอบในการทดสอบความต้านทานการแตกหักต่อไป การยืนยันผลความถูกต้องจากการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะใช้การเปรียบเทียบระหว่างภาระและระยะยึดที่เกิดขึ้นจากการทดสอบจริงบนวัสดุโพลี (เมทิลเมทาคริลิต) เทียบกับภาระและระยะยึดที่เกิดขึ้นบนแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ดังรูปที่ 3.15 ซึ่งมาจากมุมของรอยร้าวเริ่มต้นเท่ากับ 20 องศาโดยกำหนดหนดเงื่อนไขในการทดสอบด้วยการให้แรงกดขึ้นทดสอบจนมีภาระเท่ากับ 250 นิวตันจึงหยุดการทดสอบ ผลการเปรียบเทียบดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมหรือค่าที่สอดคล้องกันอย่างชัดเจนระหว่างการทดสอบจริงกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ซึ่งถือว่าแบบจำลองนั้นสามารถอธิบายพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริงกับวัสดุและสามารถใช้สำหรับการออกแบบการทดลองได้และเมื่อพิจารณาค่า K_I และ K_{II} ระหว่างการทดสอบจริงกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นจะพบว่าค่าทั้งสองมีความใกล้เคียงกันอย่างมากโดยมีความคลาดเคลื่อนประมาณ 2.97% สำหรับปัจจัยรูปร่างที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่เงื่อนไขของมุมรอยร้าวเริ่มต้น สัดส่วน a_0/W และสัดส่วน S/W ต่างๆ จะแสดงไว้ดังรูปที่ 3.16 และ 3.17 โดยแยกพิจารณาตามรูปแบบของภาระที่กระทำกับรอยร้าว (แบบที่ 1 และ 2) และสำหรับมุมของรอยร้าวเริ่มต้นและปัจจัยรูปร่างขึ้นทดสอบที่ค่า M^e ต่างๆ ที่เลือกใช้ในงานวิจัยชิ้นนี้จะแสดงไว้ดังตารางที่ 3.5



รูปที่ 3.15 ผลของภาระและระยะยึดของขึ้นทดสอบความต้านทานการแตกหักจากการทดสอบจริง เทียบกับระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



รูปที่ 3.16 ปัจจัยรูปร่างขึ้นทศอบที่สัดส่วนของระยะพิน (S/W) เท่ากับ 0.5



รูปที่ 3.17 ปัจจัยรูปร่างขึ้นทศอบที่สัดส่วนของระยะพิน (S/W) เท่ากับ 0.6

ตารางที่ 3.5 ตารางแสดงมุมของรอยร้าวเริ่มต้นและปัจจัยรูปร่างขึ้นทดสอบที่สัดส่วน a_0/W และ สัดส่วน S/W เท่ากับ 0.6

มุมของรอยร้าวเริ่มต้น (°)	Y_I	Y_{II}	M^e
0	2.321	0.124	1.0
5	2.156	0.408	0.9
10	1.825	0.640	0.8
15	1.383	0.790	0.7
18	1.093	0.837	0.6
20	0.898	0.889	0.5
22	0.715	0.859	0.4
25	0.446	0.848	0.3
28	0.208	0.820	0.2
30	0.079	0.795	0.1
32	0.041	0.766	0.0

3.3 การทำนายความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาวะแบบผสม 1 และ 2

3.3.1 การทำนายด้วยเกณฑ์การแตกหัก (Fracture criterion)

สำหรับแขนงวิชากลศาสตร์การแตกหักที่มุ่งศึกษาพฤติกรรมของวัสดุที่มีรอยร้าวเมื่อได้รับภาระกระทำจากภายนอกจะมีการใช้พารามิเตอร์ที่หลากหลายในการอธิบายพฤติกรรมที่เกิดขึ้นกับวัสดุ พารามิเตอร์เหล่านั้นล้วนมีพื้นฐานในการคำนวณจากพฤติกรรมของความเค้น ความเครียด หรืออัตราการปลดปล่อยพลังงานที่เป็นคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุ ด้วยเหตุนี้เองนักวิจัยหลายท่านจึงได้ประยุกต์ใช้ความสัมพันธ์ของความเค้น ความเครียดหรืออัตราการปลดปล่อยพลังงานของวัสดุในการทำนายพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับกลศาสตร์การแตกหักโดยเรียกสมการทำนายลักษณะนี้ว่า เกณฑ์การแตกหัก (Fracture criterion) สำหรับงานวิจัยชิ้นนี้จะนำเกณฑ์การแตกหักที่นิยมใช้โดยทั่วไปเข้ามาทำนายความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาวะแบบผสม 1 และ 2 ของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยใบอ้อย ทฤษฎีเบื้องต้นของเกณฑ์การแตกหักที่นำมาใช้แต่ละแบบจะอธิบายไว้ดังต่อไปนี้

3.3.1.1 Generalized maximum tangential stress criterion (GMTS)

เกณฑ์การแตกหักแบบ Generalized maximum tangential stress หรือ GMTS (ส่วนต่อจากนี้ไปจะเรียกว่าเกณฑ์การแตกหักแบบ GMTS) นั้นเป็นเกณฑ์การแตกหักที่พัฒนามาจากเกณฑ์การแตกหักแบบ Maximum tangential stress criterion หรือ MTS เพื่อเพิ่ม

ประสิทธิภาพในการทำนายของเกณฑ์การแตกหักด้วยการเพิ่มส่วนของเทอมที่ไม่เป็นเอกพจน์หรือเรียกว่า T-Stress ในเกณฑ์การแตกหัก MTS [53] สำหรับเกณฑ์การแตกหักแบบ GMTS จะมุ่งศึกษาความเค้นสัมผัส (Tangential stress, $\sigma_{\theta\theta}$) รอบปลายรอยร้าวซึ่งสามารถอธิบายได้ดังสมการที่ (21)

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta_0}{2} \left(K_I \cos^2 \frac{\theta_0}{2} - \frac{3}{2} K_{II} \sin \theta_0 \right) + T \sin^2 \theta_0 + (H.O.T)_{\theta\theta} \quad (21)$$

- เมื่อ r แทนระยะห่างถึงปลายรอยร้าวในพิกัดเชิงขั้ว (Polar coordinate)
 θ_0 แทนมุมที่รอยร้าวเริ่มเจริญเติบโตโดยวัดจากทิศทางของรอยร้าวเริ่มต้น
 T แทนเทอมที่ไม่เป็นเอกพจน์หรือ T- Stress
 $H.O.T$ แทนเทอมกำลังสูงในการแก้ปัญหาของความเครียด

ตามทฤษฎีของความเค้นสัมผัสที่ปลายรอยร้าว รอยร้าวบนวัสดุจะเริ่มเจริญเติบโตในทิศทางที่มีความเค้นสัมผัสมากที่สุด ทิศทางการเจริญเติบโตของรอยร้าว (θ_0) สามารถอธิบายในเทอมของปัจจัยรูปร่างตามสมการที่ (22) และการทำนายความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบผสม 1 และ 2 ของเกณฑ์การแตกหักแบบ GMTS ในเทอมของความต้านทานการแตกหักวิกฤติสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (23) และ (24)

$$\theta_0 = -\cos^{-1} \left(\frac{3(Y_{II}/Y_I)^2 + \sqrt{1+8(Y_{II}/Y_I)^2}}{1+9(Y_{II}/Y_I)^2} \right) \quad (22)$$

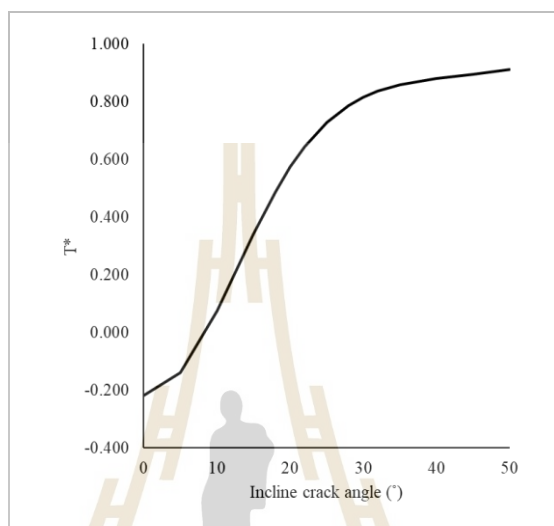
$$\frac{K_{IC}}{K_I} = \cos \frac{\theta_0}{2} \left[\cos^2 \frac{\theta_0}{2} - \frac{3}{2} \frac{Y_{II}}{Y_I} \sin \theta_0 \right] + \sqrt{\frac{2r_c}{a_0}} \frac{T^*}{Y_I} \sin^2 \theta_0 \quad (23)$$

$$\frac{K_{IC}}{K_{II}} = \cos \frac{\theta_0}{2} \left[\frac{Y_I}{Y_{II}} \cos^2 \frac{\theta_0}{2} - \frac{3}{2} \sin \theta_0 \right] + \sqrt{\frac{2r_c}{a_0}} \frac{T^*}{Y_{II}} \sin^2 \theta_0 \quad (24)$$

- เมื่อ r_c แทนระยะวิกฤติ เมื่อเกิดการแตกหักภายใต้สถานะความเครียดระนาบสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (25)
 T^* แทนรูปแบบปกติของค่า T-Stress ซึ่งสามารถคำนวณได้จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ตามสมการที่ (26) [43, 45] และค่า T^* ตามเงื่อนไขการทดสอบตามตารางที่ 3.5 ใต้รูป 3.18

$$r_c = \frac{1}{6\pi} \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_t} \right)^2 \quad (25)$$

$$T = \frac{P}{W_t} T^* \left(\frac{a}{W}, \frac{S}{W}, \beta \right) \quad (26)$$



รูปที่ 3.18 ค่า T-Stress ตามเงื่อนไขการทดสอบตามตารางที่ 3.5

3.3.1.2 Average strain energy density criterion (ASED)

เกณฑ์การแตกหักแบบ Average strain energy density หรือ ASED ถูกนำเสนอโดยคุณ Lazzarin et al. [54, 55] (ส่วนต่อจากนี้ไปจะเรียกว่าเกณฑ์การแตกหักแบบ ASED) การแตกหักแบบ ASED จะมุ่งศึกษาความหนาแน่นของพลังงานความเครียดรอบปลายรอยร้าวของวัสดุซึ่งวัสดุจะเกิดการแตกหักเมื่อความหนาแน่นของพลังงานความเครียดเฉลี่ยเหนือปริมาตรควบคุมถึงพลังงานความเครียดวิกฤติ (Critical strain energy, W_C) โดยปริมาตรควบคุมนั้นจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุและลักษณะของปลายรอยร้าวเริ่มต้น (แหลมหรือทุ) สำหรับกรณีที่ปลายรอยร้าวเริ่มต้นมีลักษณะแหลมคมปริมาตรควบคุมจะเป็นวงกลมที่มีรัศมี R_C โดยมีจุดเริ่มต้นที่ปลายรอยร้าวของวัสดุ จากผลลัพธ์ของความสัมพันธ์ของความเค้น เกณฑ์การแตกหักแบบ ASED สามารถเขียนใหม่ในรูปของความหนาแน่นของพลังงานความเครียดแบบที่ 1 และ 2 ได้ดังสมการที่ (27) [56]

$$\frac{W_1}{W_{1C}} + \frac{W_2}{W_{2C}} = 1 \quad (27)$$

- เมื่อ W_{1C} แทนความหนาแน่นของพลังงานความเครียดวิกฤติของการรับภาระแบบที่ 1 (สมการที่ (28))
- W_{2C} แทนความหนาแน่นของพลังงานความเครียดวิกฤติของการรับภาระแบบที่ 2 (สมการที่ (29))
- W_1 แทนความหนาแน่นของพลังงานความเครียดที่เกิดจากภาระภายนอกแบบที่ 1 (สมการที่ (30))
- W_2 แทนความหนาแน่นของพลังงานความเครียดที่เกิดจากภาระภายนอกแบบที่ 2 (สมการที่ (31))

$$W_{1C} = \frac{\sigma_t^2}{2E} \quad (28)$$

$$W_{2C} = \frac{\tau_t^2}{2G} \quad (29)$$

- เมื่อ G แทนค่าโมดูลัสแรงเฉือนของวัสดุ

$$W_1 = \frac{e_1}{E} \left[\frac{K_I^2}{R_{1C}^{2(1-\lambda_1)}} \right] \quad (30)$$

$$W_2 = \frac{e_2}{E} \left[\frac{K_{II}^2}{R_{2C}^{2(1-\lambda_2)}} \right] \quad (31)$$

- เมื่อ e_1 และ e_2 มีค่าเท่ากับ 0.1186 และ 0.3332 ตามลำดับซึ่งได้จากงานวิจัยก่อนหน้าของคุณ Lazzarin [54]
- λ_1 และ λ_2 แทนค่าลักษณะเฉพาะจากการรับภาระแบบที่ 1 และแบบที่ 2 ของวิลเลียม (Williams' eigenvalues) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.5 [57]
- R_{1C} และ R_{2C} แทนรัศมีของปริมาตรควบคุมตามการรับภาระแบบที่ 1 และแบบที่ 2 ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (32) และ (33) ตามลำดับ

$$R_{1C} = \frac{(1+\nu)(5-8\nu)}{4\pi} \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_t} \right)^2 \quad (32)$$

$$R_{2c} = \frac{9-8\nu}{8\pi} \left(\frac{K_{IIC}}{\tau_t} \right)^2 \quad (33)$$

เมื่อ τ_t แทนความเค้นแรงเฉือนของวัสดุ

3.3.1.3 Richard criterion

เกณฑ์การแตกหักแบบ Richard ถูกนำเสนอโดยคุณ Richard et al. [58, 59] สำหรับเกณฑ์การแตกหักแบบ Richard นั้นรอยร้าวบนวัสดุจะเกิดการเจริญเติบโตเมื่อความต้านทานการแตกหักเปรียบเทียบ (Comparative fracture toughness, K_V) เท่ากับความต้านทานการแตกหักวิกฤติภายใต้การรับภาระแบบที่ 1 ของวัสดุ ความต้านทานการแตกหักเปรียบเทียบของวัสดุสามารถคำนวณได้จากความเค้นเปรียบเทียบตามสมมติฐานทั่วไปของความเค้นต่อความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบผสม สำหรับความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบผสม 1 และ 2 ของเกณฑ์การแตกหักแบบ Richard สามารถอธิบายได้ดังสมการที่ (34) [60]

$$K_V = \frac{K_I}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{K_I^2 + 4(\alpha_1 K_{II})^2} \leq K_{IC} \quad (34)$$

เมื่อ α_1 แทนสัดส่วนระหว่างความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบที่ 1 บริสุทธิ์กับความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบที่ 2 บริสุทธิ์ (K_{IC}/K_{IIC})

ภายใต้เงื่อนไขการแตกหักของวัสดุ เกณฑ์การแตกหักแบบ Richard ($K_V = K_{IC}$) สมการที่ (34) สามารถอธิบายในเทอมของความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบที่ 1 บริสุทธิ์และความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบที่ 2 บริสุทธิ์ที่พารามิเตอร์ของการรับภาระแบบผสมต่างๆ ดังนี้

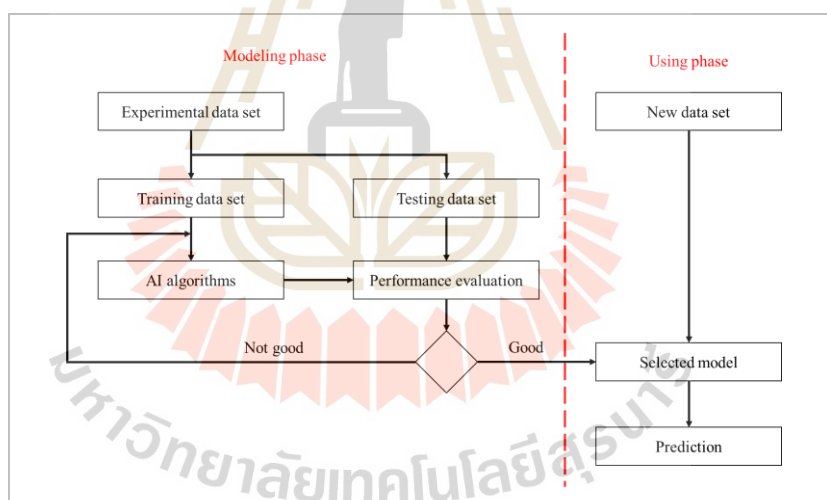
$$\frac{K_I}{K_{IC}} + \left(\frac{K_{II}}{K_{IIC}} \right)^2 = 1 \quad (35)$$

การทำนายความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบผสม 1 และ 2 ของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยใบอ้อยด้วยเกณฑ์การแตกหักนั้นจะเห็นว่าเกณฑ์การแตกหักต้องการพารามิเตอร์บางอย่างที่มาจากการทดสอบจริงเพื่อให้สามารถคำนวณตามสมการทำนายผลของแต่ละเกณฑ์การแตกหักได้ สำหรับเกณฑ์การแตกหักที่เลือกศึกษานั้นต้องการพารามิเตอร์ที่มาจากการทดสอบจริงได้แก่ ความต้านทานการแตกหักวิกฤติภายใต้การรับภาระแบบที่ 1 บริสุทธิ์ (K_{IC}) ความ

เค้นสูงสุดจากการทดสอบแรงดึงของวัสดุและค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น ซึ่งได้มาจากการทดสอบความต้านทานการแตกหักและการทดสอบแรงดึงที่อธิบายไว้ในส่วนก่อนหน้า

3.3.2 การทำนายผลด้วยวิธีปัญญาประดิษฐ์ (Artificial intelligence method)

การทำนายความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาวะแบบผสม 1 และ 2 ของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยใบอ้อยด้วยวิธีปัญญาประดิษฐ์ในขั้นตอนของการสร้างแบบจำลองและการนำไปใช้งานสามารถดังรูปที่ 3.19 การสร้างแบบจำลองปัญญาประดิษฐ์จะใช้ปัจจัยได้แก่ ความยาวของเส้นใยใบอ้อย (มิลลิเมตร) สัดส่วนการผสม (ร้อยละโดยน้ำหนัก) และพารามิเตอร์ของการรับภาวะแบบผสมเป็นปัจจัยรับเข้าของแบบจำลอง (Input factor) ส่วนความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาวะแบบที่ 1 (K_I) และความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาวะแบบที่ 2 (K_{II}) เป็นผลลัพธ์หรือเป้าหมายของแบบจำลอง การสร้างแบบจำลองจะเลือกใช้การสร้างแบบจำลองในลักษณะการเรียนรู้แบบมีผู้ฝึกสอน (Supervised learning) ด้วยข้อมูลจากการทดสอบความต้านทานการแตกหักจริงซึ่งข้อมูลจะถูกแบ่งออกเป็นชุดข้อมูลย่อยได้แก่ ชุดข้อมูลสำหรับการฝึกสอนแบบจำลอง (Training data set) และชุดข้อมูลสำหรับการทดสอบแบบจำลอง (Testing data set)

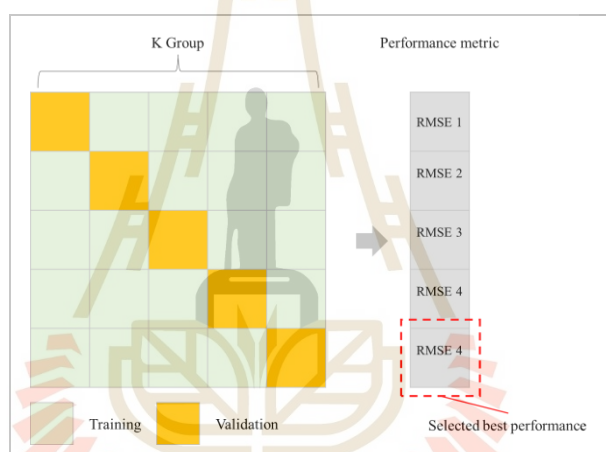


รูปที่ 3.19 แผนผังการสร้างแบบจำลองปัญญาประดิษฐ์

การสร้างแบบจำลองในลักษณะการเรียนรู้แบบมีผู้ฝึกสอนนั้นชุดข้อมูลที่ใช้ในการฝึกสอนแบบจำลองจะส่งผลอย่างมากต่อประสิทธิภาพในการทำนายผลของแบบจำลอง ในงานวิจัยชิ้นนี้เพื่อให้ได้ข้อมูลในชุดข้อมูลฝึกสอนที่เหมาะสมกับแบบจำลองมากที่สุดและหลีกเลี่ยงการเกิดการทำนายผลที่แม่นยำเกินความเป็นจริง (Overfitting) ชุดข้อมูลฝึกสอนและชุดข้อมูลทดสอบจะถูกคัดเลือกด้วยวิธีการสอบทวนไขว้แบบ K-Fold (K-Fold cross validation) โดยมีขั้นตอนดังนี้

- ทำการแบ่งชุดข้อมูลฝึกสอนออกเป็นกลุ่มย่อยจำนวน K กลุ่มซึ่งข้อมูลในกลุ่มย่อยต้องมีจำนวนเท่ากันหรือใกล้เคียงกัน

- เลือกข้อมูลจากกลุ่มย่อยหนึ่งกลุ่มเป็นข้อมูลสำหรับการทดสอบแบบจำลอง
- ข้อมูลจากกลุ่มย่อยที่เหลือจากขั้นตอนก่อนหน้าจะถูกใช้เป็นข้อมูลสำหรับการฝึกสอนแบบจำลอง
- ทำการวัดผลประสิทธิภาพของแบบจำลองด้วยตัวชี้วัดประสิทธิภาพโดยวัดผลจากความแม่นยำในการทำนายผลเทียบกับผลลัพธ์ของข้อมูลกลุ่มทดสอบแบบจำลอง
- เปลี่ยนกลุ่มข้อมูลสำหรับการฝึกสอนแบบจำลองและสำหรับการทดสอบแบบจำลองโดยทำซ้ำไปเรื่อย ๆ จนกว่าข้อมูลในกลุ่มย่อยทุกกลุ่มจะถูกใช้เป็นข้อมูลสำหรับการทดสอบแบบจำลอง
- เลือกข้อมูลฝึกสอนและข้อมูลทดสอบเบื้องต้นที่ทำให้แบบจำลองมีประสิทธิภาพดีที่สุด (รูปที่ 3.20)

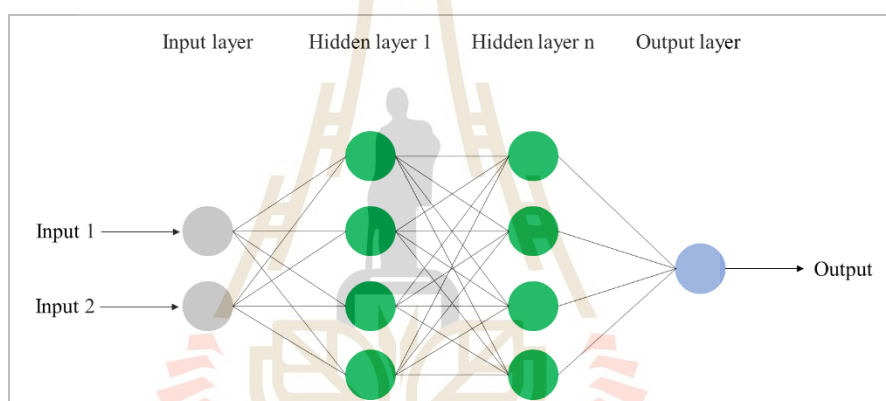


รูปที่ 3.20 แผนผังวิธีการสอบทวนไขว้แบบ K-Fold

การเลือกใช้อัลกอริทึมของปัญหาประดิษฐ์นั้นจะขึ้นอยู่กับลักษณะของปัญหาที่ต้องการทำนายผลซึ่งในงานวิจัยขั้นนี้ปัญหาที่ต้องการทำนายผลคือความต้านทานการแตกหักของวัสดุซึ่งเป็นข้อมูลที่มีลักษณะต่อเนื่องจึงเลือกใช้อัลกอริทึมของปัญหาประดิษฐ์ในกลุ่มของการทำนายแบบถดถอย (Regression) และเนื่องจากทฤษฎีของปัญหาประดิษฐ์ที่กล่าวว่าไม่มีอัลกอริทึมใดเหมาะสมกับทุกปัญหาบนโลกแห่งความเป็นจริง ดังนั้นในงานวิจัยขั้นนี้จึงเลือกใช้อัลกอริทึมปัญหาประดิษฐ์ที่ต่างกัน 3 แบบได้แก่ โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial neuron networks, ANNs) โครงข่ายประสาทแบบถดถอยทั่วไป (Generalized regression neural networks, GRNNs) และกระบวนการถดถอยแบบเกาส์เซียน (Gaussian process regression, GPR) ทฤษฎีเบื้องต้นของอัลกอริทึมแต่ละแบบสามารถอธิบายได้ดังนี้

3.3.2.1 โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial neuron networks, ANNs)

โครงข่ายประสาทเทียมเป็นหนึ่งในอัลกอริทึมของปัญญาประดิษฐ์ที่ได้รับ ความนิยมอย่างแพร่หลาย การทำงานของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมนั้นจะจำลองลักษณะ การทำงานของสมองมนุษย์เมื่อมีสิ่งกระตุ้นภายนอกมากระทำกับร่างกาย ร่างกายจะส่งสัญญาณของ สิ่งกระตุ้นนั้นผ่านเซลล์ประสาทเข้าสู่กระบวนการตัดสินใจภายในสมองก่อนจะตอบสนองต่อสิ่ง กระตุ้นจากภายนอกนั้น โครงสร้างของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมจะแสดงดังรูปที่ 3.21 ซึ่ง แบ่งออกเป็นชั้นทั้งหมด 3 ชั้น สำหรับหน่วยประมวลผลย่อยในแต่ละชั้นของโครงข่ายประสาทเทียม จะเรียกว่า เซลล์ประสาท (neurons) ซึ่งเซลล์ประสาทในแต่ละชั้นจะเชื่อมต่อกันด้วยเส้นเชื่อมเซลล์ ประสาทที่มีการถ่วงน้ำหนัก การทำงานในแต่ละชั้นของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมสามารถ อธิบายได้ดังนี้ [22, 61]



รูปที่ 3.21 โครงสร้างของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม

ชั้นรับเข้า (Input layer) เป็นชั้นที่รับข้อมูลเข้าสู่แบบจำลองโครงข่าย ประสาทเทียมเพื่อเตรียมส่งต่อเข้าสู่ชั้นถัดไป จำนวนเซลล์ประสาทในชั้นนี้จะขึ้นอยู่กับจำนวนของ ปัจจัยรับเข้าที่ต้องการใส่ให้กับแบบจำลอง

ชั้นซ่อน (Hidden layer) เป็นชั้นที่อยู่ระหว่างชั้นรับเข้าและชั้นผลลัพธ์ (Output layer) โดยชั้นซ่อนสามารถมีได้มากกว่า 1 ชั้นแล้วแต่ปัญหาที่นำแบบจำลองโครงข่าย ประสาทเทียมไปใช้งาน ชั้นซ่อนเป็นชั้นที่แบบจำลองเริ่มเกิดการเรียนรู้ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย รับเข้ากับผลลัพธ์ ข้อมูลจากชั้นรับเข้าจะถูกส่งผ่านมายังชั้นซ่อนโดยมีการถ่วงน้ำหนักและมีการ กำหนดความลำเอียงเบื้องต้น การถ่วงน้ำหนักจะแตกต่างกันไปตามแต่ละเซลล์ประสาทในชั้นซ่อนซึ่ง ในการเรียนรู้ครั้งแรกนั้นการถ่วงน้ำหนักและความลำเอียงในชั้นซ่อนจะถูกกำหนดแบบสุ่ม การถ่วง น้ำหนักและความลำเอียงที่เกิดขึ้นกับแต่ละเซลล์ประสาทในชั้นซ่อนถูกแปลงเป็นข้อมูลส่งออกของชั้น

ซ่อนด้วยฟังก์ชันกระตุ้น (Activation function) เพื่อส่งไปยังชั้นถัดไป สำหรับงานวิจัยชิ้นนี้จะใช้ฟังก์ชันกระตุ้นแบบ Log-Sigmoid ดังสมการที่ (36)

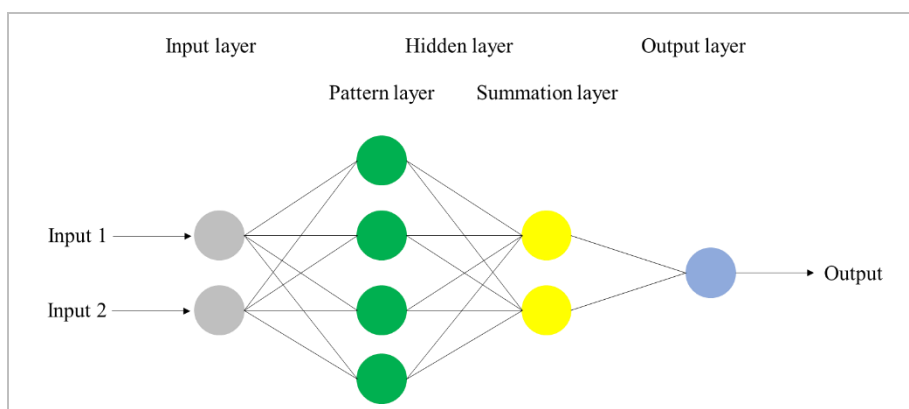
$$\text{Log-Sigmoid}(X) = \frac{1}{1 + e^{-X}} \quad (36)$$

เมื่อ X แทนข้อมูลของปัจจัยรับเข้า

ชั้นผลลัพธ์ (Output layer) เป็นชั้นที่รวบรวมผลลัพธ์ที่ถูกส่งมาจากชั้นซ่อนให้อยู่ในรูปของผลการทำนายของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม ขั้นตอนการเรียนรู้ของแบบจำลองตั้งแต่รับข้อมูลเข้าชั้นรับเข้าจนได้ผลการทำนายของแบบจำลองในชั้นผลลัพธ์เรียกว่า การแพร่แบบส่งไปข้างหน้า (Feed forward propagation) เมื่อแบบจำลองทำนายผลลัพธ์เรียบร้อยแล้ว ในขั้นตอนของการเรียนรู้จะมีการวัดประสิทธิภาพในการทำนายผลเทียบกับผลลัพธ์ของชุดทดสอบเบื้องต้นเพื่อปรับปรุงค่าถ่วงน้ำหนักและความลำเอียงของแบบจำลองในแต่ละเซลล์ประสาทเพื่อให้แบบจำลองสามารถทำนายได้แม่นยำมากขึ้น การปรับปรุงน้ำหนักและความลำเอียงลักษณะนี้เรียกว่า การแพร่แบบย้อนกลับ (Feed backward propagation) สำหรับงานวิจัยชิ้นนี้จะเลือกใช้อัลกอริทึมการแพร่ย้อนกลับแบบ Levenberg-Marquardt [62, 63]

3.3.2.2 โครงข่ายประสาทแบบถดถอยทั่วไป (Generalized regression neural networks, GRNNs)

โครงข่ายประสาทแบบถดถอยทั่วไปถูกนำเสนอครั้งแรกโดยคุณ D.F. Specht [64] โดยโครงข่ายลักษณะนี้เป็นการเรียนรู้แบบการแพร่แบบส่งไปข้างหน้าที่เป็นของแบบจำลองพื้นฐานแนวรัศมี (Radial basis model) แบบจำลองโครงข่ายประสาทแบบถดถอยทั่วไปถูกออกแบบให้เหมาะสำหรับกลุ่มข้อมูลขนาดเล็กเพื่อที่จะอธิบายความสัมพันธ์ของตัวแปรต้นต่อตัวแปรตามหรือผลลัพธ์ของปัญหาที่ต้องการทำนายผล โครงสร้างของแบบจำลองโครงข่ายประสาทแบบถดถอยทั่วไปจะแสดงดังรูปที่ 3.22 แบบจำลองจะแบ่งออกเป็น 3 ชั้นหลักได้แก่ ชั้นรับเข้า ชั้นซ่อน และชั้นผลลัพธ์ โดยชั้นซ่อนจะถูกแบ่งออกเป็นชั้นย่อยอีก 2 ชั้นได้แก่ชั้นรูปแบบ (Pattern layer) และชั้นผลรวม (Summation layer) การทำงานในแต่ละชั้นสามารถอธิบายได้ดังนี้ [16, 65]



รูปที่ 3.22 โครงสร้างของแบบจำลองโครงข่ายแบบถดถอยทั่วไป

ชั้นรับเข้า (Input layer) เป็นชั้นที่รับข้อมูลเข้าสู่แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อเตรียมส่งต่อเข้าสู่ชั้นถัดไป จำนวนเซลล์ประสาทในชั้นนี้จะขึ้นอยู่กับขนาดของเวกเตอร์ของปัจจัยรับเข้า

ชั้นรูปแบบ (Pattern layer) เป็นชั้นที่แบบจำลองเริ่มเกิดการเรียนรู้ ข้อมูลรับเข้าจะถูกแปลงสภาพด้วยเกาส์เซียนคอร์เนลซึ่งเป็นหนึ่งในคอร์เนลพื้นฐานแนวรัศมี จำนวนเซลล์ประสาทในชั้นนี้จะมีจำนวนเท่ากับข้อมูลฝึกสอนที่ป้อนให้กับแบบจำลองและน้ำหนักที่เกิดขึ้นในเซลล์ประสาทแต่ละเซลล์ (P_i) สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (37)

$$P_i = \exp\left(-\frac{(X - X_i)^T (X - X_i)}{2\sigma_s^2}\right) \quad (37)$$

เมื่อ σ_s แทนพารามิเตอร์สำหรับปรับความเรียบ (Smoothing parameter)

ชั้นผลรวม (Summation layer) ในชั้นนี้จะประกอบไปด้วยเซลล์ประสาท 2 ประเภทได้แก่ เซลล์ประสาทที่ทำหน้าที่รวมผลลัพธ์แบบถ่วงน้ำหนัก (Numerator neuron, S_N) และเซลล์ประสาทที่ทำหน้าที่รวมน้ำหนัก (Denominator neuron, S_D) ซึ่งการดำเนินการของเซลล์ประสาททั้งสองสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (38) และ (39) ตามลำดับ

$$S_N = \sum_{i=1}^N Y_i P_i \quad (38)$$

$$S_D = \sum_{i=1}^N P_i \quad (39)$$

เมื่อ Y_i แทนผลลัพธ์ของปัจจัยรับเข้าตำแหน่งที่ i (X_i)

ชั้นผลลัพธ์ (Output layer) เป็นชั้นที่รวบรวมผลลัพธ์จากชั้นผลรวมเพื่อแปรเป็นผลการทำนายของแบบจำลองดังสมการที่ (40)

$$\hat{Y}(X) = \frac{S_N}{S_D} \quad (40)$$

เมื่อ $\hat{Y}(X)$ แทนผลการทำนายของปัจจัยรับเข้า

3.3.2.1 กระบวนการถดถอยแบบเกาส์เซียน (Gaussian process regression, GPR)

แบบจำลองกระบวนการถดถอยแบบเกาส์เซียนเป็นหนึ่งในอัลกอริทึมปัญญาประดิษฐ์ที่มีการเรียนรู้แบบมีผู้ฝึกสอนที่ถูกออกแบบมาเพื่อแก้ปัญหาของกลุ่มข้อมูลขนาดเล็ก แบบจำลองกระบวนการถดถอยแบบเกาส์เซียนเป็นแบบจำลองความน่าจะเป็นแบบเคอร์เนลที่รวมกระบวนการก่อนหน้าหรือข้อมูลที่มีอยู่และข้อมูลการฝึกสอนเพื่ออนุมานผลลัพธ์ของกระบวนการหลังหรือผลการทำนายของแบบจำลอง การดำเนินการของแบบจำลองกระบวนการถดถอยแบบเกาส์เซียนสามารถอธิบายได้ดังนี้

กำหนดให้ D เป็นเซตของข้อมูลฝึกสอนที่นำการถดถอยแบบเกาส์เซียนเข้ามาใช้

$$D = \{(X_i, Y_i) | i = 1, 2, 3, \dots, n\} \quad (41)$$

เมื่อ X_i แทนปัจจัยรับเข้าของชุดข้อมูลฝึกสอน

Y_i แทนผลลัพธ์ของปัจจัยรับเข้า X_i

เมื่อนำกระบวนการถดถอยแบบเกาส์เซียนเข้ามาสู่ฟังก์ชันความสัมพันธ์ของ X และ Y หรือ $f(X)$ สามารถเขียนในรูปแบบใหม่ได้ดังนี้

$$f(X) \sim GP(m(X), k(X, X')) \quad (42)$$

$$m(X) = E[f(X)] \quad (43)$$

$$k(X, X') = E[(f(X) - m(X))(f(X') - m(X'))^T] \quad (44)$$

เมื่อ $m(X)$ เป็นฟังก์ชันค่าเฉลี่ยซึ่งแสดงถึงค่าที่อนุমানไว้ของฟังก์ชัน $f(X)$ ที่ข้อมูลรับเข้า X

$k(X, X')$ แทนเคอร์เนลฟังก์ชันของระดับความเชื่อมั่นที่วัดได้สำหรับ $m(X)$

สำหรับในงานวิจัยชิ้นนี้จะเลือกใช้เคอร์เนลฟังก์ชันแบบกำลังสอง (Squared exponential, SE) ซึ่งเป็นหนึ่งในเคอร์เนลฟังก์ชันที่นิยมใช้ของเคอร์เนลฟังก์ชันพื้นฐานแนวรัศมี เคอร์เนลฟังก์ชันแบบกำลังสองที่มีการเพิ่มการรบกวนของเกาส์เซียนในทอมของความแปรปรวนจะแสดงไว้ดังสมการที่ (45)

$$K(X, X') = \sigma_f^2 \exp\left(-\frac{\|X - X'\|^2}{2l^2}\right) + \sigma_n^2 \delta_{X, X'} \quad (45)$$

เมื่อ σ_f^2 แทนสัญญาณความแปรปรวน (Signal variance) ซึ่งแสดงค่าสูงสุดของความแปรปรวนร่วม

l แทนมาตราส่วนความยาวที่ใช้วัดระยะหนึ่งของปัจจัยรับเข้า (Length-scale)

σ_n^2 แทนความแปรปรวนรบกวน (Noise variance) ของการกระจายตัวแบบเกาส์เซียนที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์

$\delta_{X, X'}$ แทนฟังก์ชันเดลต้าของ Kronecker

เคอร์เนลฟังก์ชันนั้นต้องคำนวณฟังก์ชันความแปรปรวนร่วมสำหรับชุดข้อมูลการฝึกที่แตกต่างกันทั้งหมดดังนี้

$$K = [k(X_i, X_j) | i, j = 1, 2, 3, \dots, n] \quad (46)$$

ถ้าเพิ่มปัจจัยรับเข้าใหม่ในเคอร์เนลฟังก์ชัน เคอร์เนลฟังก์ชันจะสามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$K^* = [k(X^*, X_1) \quad k(X^*, X_2) \quad k(X^*, X_n)] \quad (47)$$

สมการที่ (47) สามารถขยายได้สำหรับปัจจัยรับเข้าใหม่ที่สัมพันธ์กับตัวมันเอง

$$K^{**} = [k(X^*, X^*)] \quad (48)$$

ผลลัพธ์การทำนายผลที่ปัจจัยรับเข้า X^* สามารถคำนวณได้ด้วยการอนุมานการกระจายตัวของผลลัพธ์ X^* ให้ชุดข้อมูลฝึกสอนได้ดังนี้

$$p(Y^* | Y) = G(K^* K^{-1} Y, K^{**} - K^* K^{-1} K^{*T}) \quad (49)$$

เมื่อ	Y^*	แทนผลลัพธ์ของปัจจัยรับเข้า Y^*
	G	แทนการกระจายตัวแบบเกาส์เซียน
	$K^* K^{-1} Y$	แทนค่าเฉลี่ยของการกระจายตัวแบบเกาส์เซียน
	$K^{**} - K^* K^{-1} K^{*T}$	แทนความแปรปรวนของการกระจายตัวแบบเกาส์เซียน

สำหรับ Y^* นั้นคือผลลัพธ์ของการทำนายผลด้วยแบบจำลองกระบวนการถดถอยแบบเกาส์เซียนซึ่งสามารถคำนวณได้จาก $K^* K^{-1} Y$ พารามิเตอร์ในเคอร์เนลฟังก์ชัน (สมการที่ (45)) ได้แก่ σ_f, l , และ σ_n สามารถจัดรูปใหม่ได้ตามสมการที่ (50) ซึ่งเป็นไฮเปอร์พารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการทำนายของแบบจำลองที่สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (51)

$$\theta = (\sigma_f, l, \sigma_n) \quad (50)$$

$$-\log P(Y|X, \theta) = \frac{1}{2} Y^T K^{-1} Y + \frac{1}{2} \log |K| + \frac{n}{2} \log 2\pi \quad (51)$$

3.3.3 การปรับค่าไฮเปอร์พารามิเตอร์และการวัดประสิทธิภาพแบบจำลอง

3.3.3.1 การปรับค่าไฮเปอร์พารามิเตอร์ของแบบจำลองปัญญาประดิษฐ์

การปรับค่าไฮเปอร์พารามิเตอร์ของแบบจำลองปัญญาประดิษฐ์ให้มีความเหมาะสม (Hyperparameter optimization) เป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญต่อประสิทธิภาพการทำนายผลของแบบจำลอง สำหรับอัลกอริทึมปัญญาประดิษฐ์แต่ละแบบที่เลือกใช้ในงานวิจัยจะมีไฮเปอร์พารามิเตอร์ที่ต่างกันดังนี้

ตารางที่ 3.6 ไฮเปอร์พารามิเตอร์ของอัลกอริทึมที่เลือกใช้ในงานวิจัย

Algorithms	Hyper-parameters
Artificial neuron networks (ANNs)	Number of hidden layers Number of neurons
Generalized regression neural networks (GRNNs)	Smoothing factor (σ_s)
Gaussian process regression (GPR)	Signal standard deviation (σ_f) Length scale (l) Noise standard deviation (σ_n)

*สำหรับกระบวนการถดถอยแบบเกาส์เซียน (GPR) ไฮเปอร์พารามิเตอร์ในตารางจะถูกคำนวณในรูปแบบของตัวแปรที่ตา (θ) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากค่าลบที่น้อยที่สุดของสมการที่ (51)

สำหรับการปรับค่าที่เหมาะสมของไฮเปอร์พารามิเตอร์ของแบบจำลองปัญหาประดิษฐ์สามารถทำได้ 2 วิธีหลักๆ คือการค้นหาแบบกริด (Grid search) และการค้นหาด้วยอัลกอริทึมปรับค่าที่เหมาะสม (Parameter optimization) ซึ่งในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้การค้นหาด้วยอัลกอริทึมปรับค่าที่เหมาะสมด้วยอัลกอริทึมการเคลื่อนลงตามความชัน (Gradient descent optimization algorithm) และการทำนายผลด้วยวิธีปัญหาประดิษฐ์จะดำเนินการบนโปรแกรม MATLAB

3.3.3.2 การวัดประสิทธิภาพแบบจำลอง

การสร้างแบบจำลองเพื่อนำมาทำนายผลของปัญหาที่สนใจนั้นจำเป็นต้องมีการวัดประสิทธิภาพของแบบจำลองว่าผลการทำนายที่ได้มีความใกล้เคียงกับผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นของเหตุการณ์จริงมากน้อยเพียงใด สำหรับงานวิจัยชิ้นนี้ที่ต้องการทำนายผลความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบผสม 1 และ 2 ของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยใบอ้อยที่ลักษณะเป็นข้อมูลแบบต่อเนื่อง งานวิจัยชิ้นนี้จึงเลือกใช้ตัวชี้วัดประสิทธิภาพของการทำนายแบบถดถอย (Regression performance metrics) ที่นิยมใช้โดยทั่วไปในการวัดประสิทธิภาพของแบบจำลองซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้ [22, 61, 66]

3.3.3.2.1 ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination, R^2) เป็นตัวชี้วัดประสิทธิภาพที่แสดงแนวโน้มของความสัมพันธ์ระหว่างผลลัพธ์จากการทำนายและผลลัพธ์จากเหตุการณ์จริงว่าเป็นไปในทิศทางใด สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (52)

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (52)$$

3.3.3.2.2 รากที่สองของค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสอง (Root mean square error, RMSE) เป็นตัวชี้วัดประสิทธิภาพที่แสดงค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยที่เกิดขึ้นระหว่างผลลัพธ์จากการทำนายและผลลัพธ์จากเหตุการณ์จริงในมาตราส่วนเดียวกันกับผลลัพธ์จากเหตุการณ์จริงของปัญหานั้นๆ

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{N}} \quad (53)$$

3.3.3.2.3 ค่าเฉลี่ยของร้อยละความผิดพลาดสัมบูรณ์ (Mean absolute percentage error, MAPE) เป็นตัวชี้วัดประสิทธิภาพที่แสดงค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยที่เกิดขึ้นระหว่างผลลัพธ์จากการทำนายและผลลัพธ์จากเหตุการณ์จริงในมาตราส่วนร้อยละ

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{Y_i - \hat{Y}_i}{Y_i} \right| \times 100 \quad (54)$$

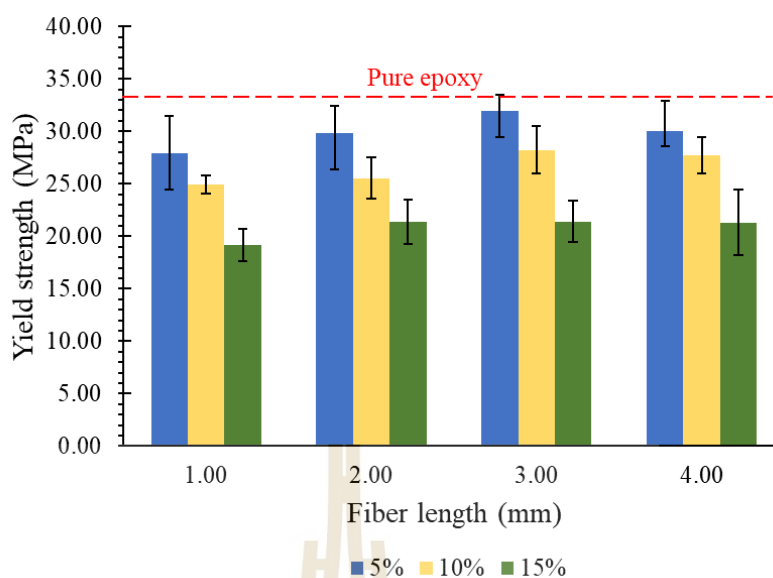
เมื่อ	Y_i	แทนข้อมูลผลลัพธ์จากเหตุการณ์จริงตำแหน่งที่ i
	\hat{Y}_i	แทนข้อมูลผลลัพธ์จากการทำนายตำแหน่งที่ i
	\bar{Y}	แทนค่าเฉลี่ยของข้อมูลผลลัพธ์จากเหตุการณ์จริง
	N	แทนจำนวนของข้อมูล

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

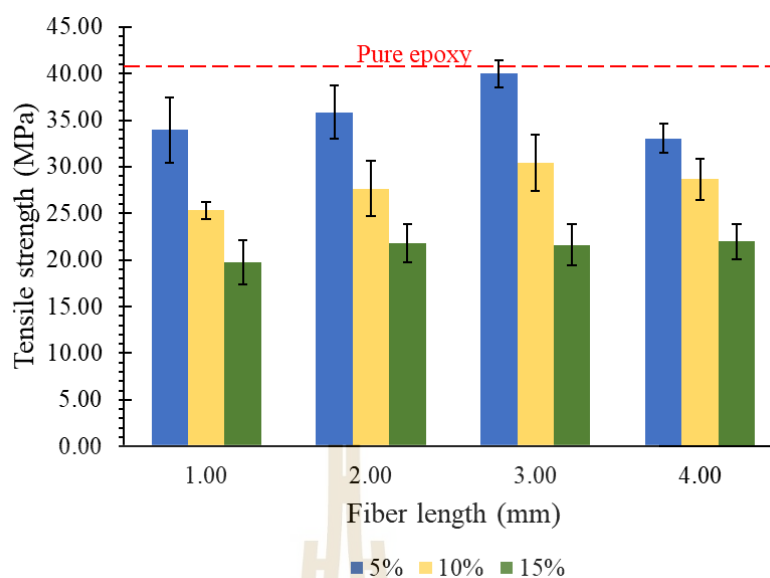
4.1 ผลการทดสอบแรงดึง

สำหรับผลการทดสอบแรงดึงของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยไบอ้อยที่สัดส่วนการผสม (ร้อยละโดยน้ำหนัก) และขนาดของเส้นใยไบอ้อย (มิลลิเมตร) จะแสดงผลการทดสอบไว้ในรูปแบบของความเค้นคราก (Yield strength) ที่แสดงถึงความเค้นสุดท้ายก่อนเกิดการเสียรูปของวัสดุ ความเค้นแรงดึง (Tensile strength) ที่แสดงถึงความเค้นสูงสุดของวัสดุก่อนเกิดการแตกหักแบบฉับพลันและสุดท้ายคือค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of elasticity) ที่แสดงให้เห็นถึงระดับความแข็งแกร่ง (Stiffness) ของวัสดุในช่วงที่ยังมีการเสียรูปแบบยืดหยุ่น ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นครากและขนาดของเส้นใยไบอ้อยที่สัดส่วนการผสมต่างๆ จะแสดงไว้ดังรูปที่ 4.1 เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ดังกล่าวพบว่าความเค้นครากมีแนวโน้มที่จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดของเส้นใยไบอ้อยที่ใช้เป็นวัสดุเสริมแรงให้กับอีพอกซีเรซินมีความยาวมากขึ้น โดยความเค้นครากจะมีค่าเพิ่มขึ้นจนมีค่าสูงสุดที่ความยาวของเส้นใยไบอ้อยเท่ากับ 3 มิลลิเมตร หลังจากนั้นจึงมีค่าลดลง เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของความเค้นครากและสัดส่วนการผสมของเส้นใยไบอ้อยจะพบว่าความเค้นครากจะลดลงอย่างชัดเจนเมื่อสัดส่วนการผสมเพิ่มขึ้นโดยความเค้นครากจะมีค่าสูงสุดที่สัดส่วนการผสมเท่ากับร้อยละ 5 โดยน้ำหนักและจะลดลงตามลำดับซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนที่ทุกขนาดความยาวของเส้นใยไบอ้อยที่เลือกศึกษา พฤติกรรมดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยที่ศึกษาผลกระทบของความยาวเส้นใยธรรมชาติต่อคุณสมบัติการรับแรงของวัสดุผสม ลดลง (เส้นใยมะพร้าวกับอีพอกซีเรซินของคุณ S Biswas [67], เส้นใยปอและกัญชากับสตาร์ชดัดแปรของคุณ Peltola H [68] และเส้นใยกล้วยกับอีพอกซีเรซินของคุณ Venkateshwaran N [69]) ที่คุณสมบัติการรับแรงดึงจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความยาวของเส้นใยมากขึ้นแต่คุณสมบัติยังคงต่ำกว่าเมื่อเทียบกับวัสดุหลักบริสุทธิ์ (Matrix materials) ขณะเดียวกันเมื่อพิจารณาสัดส่วนการผสมเส้นใยธรรมชาติจะพบว่าเมื่อสัดส่วนผสมมากขึ้นคุณสมบัติการรับแรงดึงจะมีค่าลดลง สำหรับความเค้นครากของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยไบอ้อยที่ความยาวเส้นใยไบอ้อย 1, 2, และ 4 มิลลิเมตรนั้นมีค่าต่ำกว่าความเค้นครากของอีพอกซีเรซินบริสุทธิ์ (Pure epoxy) อย่างเห็นได้ชัดและจะมีค่าใกล้เคียงกับอีพอกซีบริสุทธิ์ที่ความยาวของเส้นใยไบอ้อย 3 มิลลิเมตร

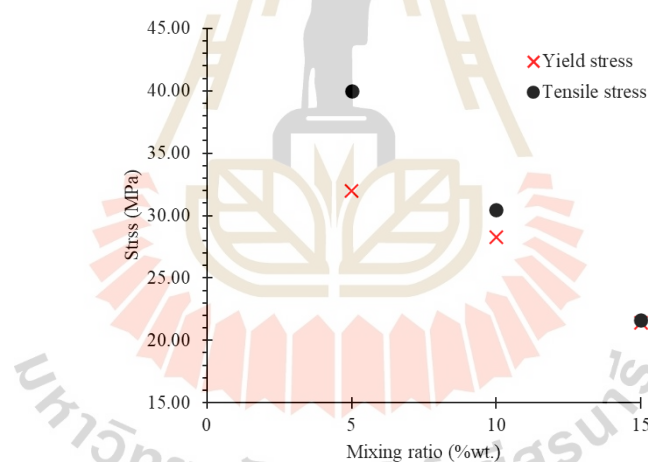


รูปที่ 4.1 ผลความเค้นครากของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยไบอ้อยที่สัดส่วนต่างๆ

สำหรับความสัมพันธ์ของความเค้นแรงดึงของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยไบอ้อยที่ความยาวเส้นใยและสัดส่วนการผสมต่างๆ จะแสดงไว้ดังรูปที่ 4.2 ซึ่งความสัมพันธ์ของความเค้นแรงดึงนั้นจะแสดงพฤติกรรมที่เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับความเค้นคราก กล่าวคือเมื่อสัดส่วนของการผสมเส้นใยไบอ้อยเพิ่มขึ้นความเค้นครากที่เกิดขึ้นกับวัสดุจะมีค่าลดลงและเมื่อความยาวของเส้นใยไบอ้อยที่ใช้เสริมแรงเพิ่มขึ้นความเค้นแรงดึงจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วยจนมีค่าสูงสุดที่ความยาวเส้นใยไบอ้อย 3 มิลลิเมตรจากนั้นจึงมีค่าลดลง เมื่อพิจารณาถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นคราก ความเค้นแรงดึง และสัดส่วนการผสมเส้นใยไบอ้อยของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยไบอ้อยที่ความยาวเส้นใยไบอ้อย 3 มิลลิเมตร (รูปที่ 4.3) ซึ่งเป็นความยาวที่มีค่าความเค้นครากและความเค้นแรงดึงสูงที่สุด พบว่าเมื่อสัดส่วนการผสมมีค่าเพิ่มขึ้นนั้นผลต่างระหว่างความเค้นครากกับความเค้นแรงดึงจะมีค่าลดลงจนมีค่าที่เท่ากันในสัดส่วนการผสมร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก พฤติกรรมของความเค้นคราก ความเค้นแรงดึง และสัดส่วนการผสมเส้นใยไบอ้อยดังกล่าวนี้สะท้อนให้เห็นถึงพฤติกรรมการแตกหักที่เปลี่ยนไปของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยไบอ้อย (สำหรับอีพอกซีเรซินบริสุทธิ์ภายใต้การรับแรงดึง 1 มิลลิเมตร ต่อหน้าที่จะมีพฤติกรรมการแตกหักแบบเหนียว [14]) เมื่อสัดส่วนการผสมเส้นใยไบอ้อยเพิ่มขึ้นจากพฤติกรรมการแตกหักแบบเหนียวที่วัสดุจะสามารถเกิดการยืดตัวก่อนเกิดการแตกหัก ส่งผลให้ความเค้นครากมีค่าน้อยกว่าความเค้นแรงดึงไปเป็นพฤติกรรมการแตกหักแบบเปราะที่วัสดุเกิดการยืดตัวได้เล็กน้อยหรือไม่สามารถเกิดการยืดตัวได้ก่อนเกิดการแตกหัก ส่งผลให้ค่าความเค้นครากและค่าความเค้นแรงดึงซึ่งเป็นความเค้นสูงสุดของวัสดุมีค่าเท่ากัน



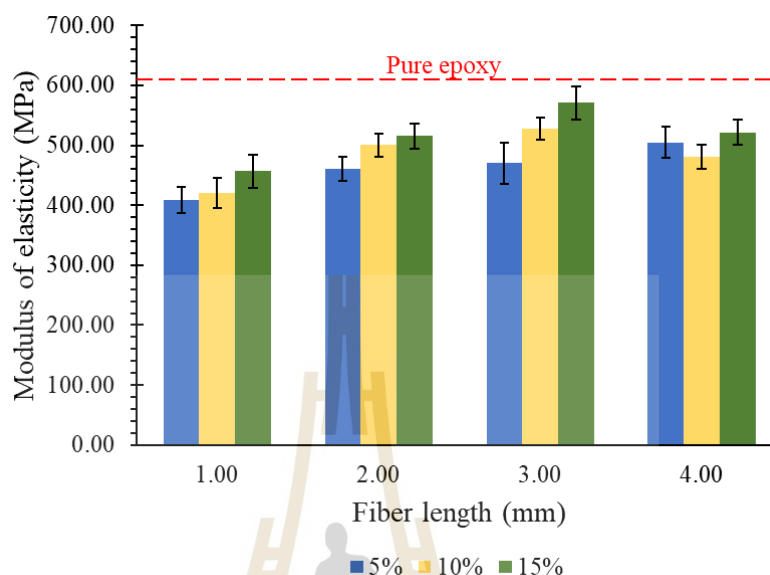
รูปที่ 4.2 ผลความเค้นแรงดึงของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยโพลีเอทิลีนที่สัดส่วนต่างๆ



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นคราก ความเค้นแรงดึงและสัดส่วนการผสมเส้นใยโพลีเอทิลีนที่ขนาดเส้นใยโพลีเอทิลีน 3 มิลลิเมตร

การเปลี่ยนไปของพฤติกรรมการแตกหักของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยโพลีเอทิลีนจากพฤติกรรมการแตกหักแบบเหนียวไปเป็นพฤติกรรมการแตกหักแบบเปราะนั้นสามารถสังเกตได้จากความสัมพันธ์ของค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นเช่นเดียวกัน (รูปที่ 4.4) สำหรับค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นนั้นสามารถคำนวณได้จากความชันในช่วงยืดหยุ่นของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุ กรณีที่วัสดุเกิดพฤติกรรมการแตกหักแบบเหนียวนั้นค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นจะมีค่าต่ำกว่าวัสดุที่มีพฤติกรรมการแตกหักแบบเปราะ สำหรับค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของอีพอกซีเรซิน

เสริมแรงด้วยเส้นใยไบออยมีแนวโน้มจะเพิ่มขึ้นเมื่อความยาวของเส้นใยไบออยและสัดส่วนการผสมเส้นใยไบออยมีค่าเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.4 ผลโมดูลัสความยืดหยุ่นของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยไบออยที่สัดส่วนต่างๆ

เพื่อเป็นการยืนยันว่าการเตรียมชิ้นทดสอบ ไม่ว่าจะตัดชิ้นทดสอบจากบริเวณใดของแม่พิมพ์ไม่ส่งผลต่อคุณสมบัติการรับแรงดึงของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยไบออย ผลของการทดสอบแรงดึงอันได้แก่ ความเค้นคราก ความเค้นแรงดึงและค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น จะถูกนำมาวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance, ANOVA) ที่ระดับนัยสำคัญ (Significance level) เท่ากับ 0.05 ดังรูปที่ 4.5 ถึง 4.7 ตามลำดับ (กำหนดให้ปัจจัย Side หมายถึง บริเวณของชิ้นทดสอบที่ตัดออกจากแม่พิมพ์ตามรูปที่ 3.9 ในวิธีการดำเนินงานวิจัย) ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของความเค้นคราก (รูปที่ 4.5) แสดงให้เห็นถึงปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อความเค้นครากเมื่อพิจารณาจากค่า p-value เท่ากับ 0.05 ได้แก่ความยาวเส้นใยไบออยและสัดส่วนการผสมของเส้นใยไบออย ขณะเดียวกันบริเวณที่ตัดชิ้นทดสอบออกจากแม่พิมพ์นั้นจะไม่ส่งผลต่อความเค้นครากของวัสดุอย่างมีนัยสำคัญ สำหรับผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของความเค้นแรงดึง (รูปที่ 4.6) และค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น (รูปที่ 4.7) จะมีผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับการวิเคราะห์ของความเค้นครากที่ปัจจัยของบริเวณการตัดชิ้นทดสอบแรงดึงนั้นไม่ส่งผลต่อค่าทั้งสองอย่างมีนัยสำคัญ

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	23	1747.45	75.976	17.19	0.000
Linear	6	1693.55	282.259	63.86	0.000
Fiber length (mm)	3	251.84	83.948	18.99	0.000
Mixing ratio (%)	2	1440.29	720.143	162.93	0.000
Side	1	1.42	1.422	0.32	0.572
2-Way Interactions	11	50.83	4.621	1.05	0.417
Fiber length (mm)*Mixing ratio (%)	6	48.18	8.030	1.82	0.108
Fiber length (mm)*Side	3	0.87	0.291	0.07	0.978
Mixing ratio (%)*Side	2	1.78	0.888	0.20	0.818
3-Way Interactions	6	3.06	0.511	0.12	0.994
Fiber length (mm)*Mixing ratio (%)*Side	6	3.06	0.511	0.12	0.994
Error	72	318.23	4.420		
Total	95	2065.68			

รูปที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนความเค้นครากของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยใบอ้อย

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	23	1195.29	51.969	8.52	0.000
Linear	6	1114.86	185.811	30.48	0.000
Fiber length (mm)	3	196.43	65.475	10.74	0.000
Mixing ratio (%)	2	917.62	458.810	75.25	0.000
Side	1	0.82	0.817	0.13	0.715
2-Way Interactions	11	78.90	7.173	1.18	0.319
Fiber length (mm)*Mixing ratio (%)	6	74.90	12.483	2.05	0.070
Fiber length (mm)*Side	3	1.80	0.600	0.10	0.961
Mixing ratio (%)*Side	2	2.20	1.099	0.18	0.835
3-Way Interactions	6	1.53	0.254	0.04	1.000
Fiber length (mm)*Mixing ratio (%)*Side	6	1.53	0.254	0.04	1.000
Error	72	438.99	6.097		
Total	95	1634.27			

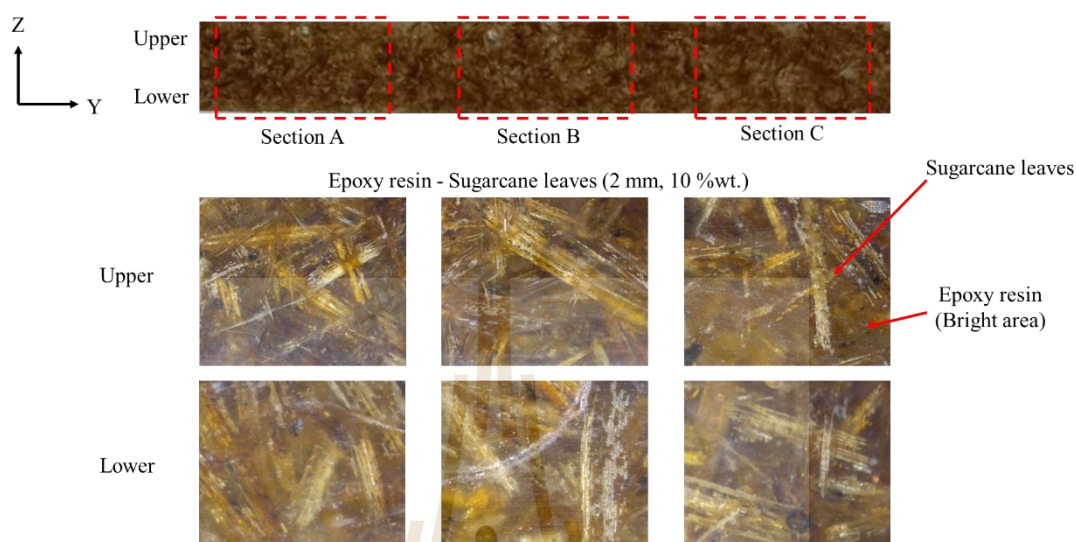
รูปที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนความเค้นแรงดึงของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยใบอ้อย

Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	23	127793	5556.2	6.87	0.000
Linear	6	115348	19224.7	23.78	0.000
Fiber length (mm)	3	92871	30957.0	38.29	0.000
Mixing ratio (%)	2	22472	11236.2	13.90	0.000
Side	1	5	4.5	0.01	0.941
2-Way Interactions	11	11619	1056.3	1.31	0.239
Fiber length (mm)*Mixing ratio (%)	6	10738	1789.6	2.21	0.051
Fiber length (mm)*Side	3	586	195.4	0.24	0.867
Mixing ratio (%)*Side	2	295	147.7	0.18	0.833
3-Way Interactions	6	826	137.6	0.17	0.984
Fiber length (mm)*Mixing ratio (%)*Side	6	826	137.6	0.17	0.984
Error	72	58206	808.4		
Total	95	185999			

รูปที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนโมดูลัสความยืดหยุ่นของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยไบอ้อย

นอกจากปัจจัยของบริเวณที่เตรียมขึ้นทดสอบจากแม่พิมพ์ที่ต้องคำนึงถึงแล้วนั้นอีกหนึ่งปัจจัยที่ต้องคำนึงถึงคือการกระจายตัวของเส้นใยไบอ้อยในการเสริมแรงให้กับอีพอกซีเรซินซึ่งหากเส้นใยไบอ้อยกระจายตัวไม่สม่ำเสมอจะส่งผลให้คุณสมบัติของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยไบอ้อยไม่เท่ากันทั้งแม่พิมพ์ เพื่อยืนยันถึงการกระจายตัวแบบสุ่มและกระจายตัวอย่างทั่วถึงของเส้นใยไบอ้อยในการเสริมแรงให้อีพอกซีเรซินภาพถ่ายตัดขวางในแนวแกนความหนาของแม่พิมพ์ (แกน Z) ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่อธิบายไว้ในรูปที่ 3.6 ของวิธีดำเนินงานวิจัยจะแสดงไว้ดังรูปที่ 4.8 โดยเป็นภาพถ่ายลักษณะการกระจายตัวของเส้นใยไบอ้อยยาว 2 มิลลิเมตรที่สัดส่วนการผสมร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ภาพถ่ายจะถูกแบ่งออกเป็นบริเวณหัว (Section A) กลาง (Section B) และท้ายของแม่พิมพ์ (Section C) โดยแต่ละส่วนจะแบ่งออกเป็นส่วนบน (Upper) และล่าง (Lower) ของแม่พิมพ์อีกทีเพื่อพิจารณาถึงการตกตะกอนของเส้นใยไบอ้อย สำหรับในภาพถ่ายบริเวณที่สว่างคือบริเวณที่เป็นวัสดุอีพอกซีเรซิน (เนื่องจากมีคุณสมบัติโปร่งแสงจึงเห็นเป็นเพียงบริเวณที่สว่างเท่านั้น) และบริเวณที่เป็นเส้นสีน้ำตาลอ่อนหมายถึงบริเวณที่เส้นใยไบอ้อยแทรกเข้าไปเสริมแรงให้กับอีพอกซีเรซิน ภาพถ่ายการกระจายตัวของเส้นใยไบอ้อยแสดงให้เห็นถึงการเรียงตัวที่ไร้รูปแบบของเส้นใยไบอ้อยในอีพอกซีเรซินเสริมแรงอย่างชัดเจนในทุกบริเวณที่ถ่ายภาพ ขณะที่ปริมาณของการกระจายตัวนั้นหากพิจารณาจากภาพถ่ายหน้าตัดอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยไบอ้อย (ภาพบนสุดในรูปที่ 4.8) พบว่าเส้นใยไบอ้อยมีการปริมาณการกระจายตัวที่ค่อนข้างสม่ำเสมออีกทั้งเมื่อพิจารณาภาพถ่ายบริเวณส่วนบนและล่างของบริเวณหัว กลาง ท้ายของแม่พิมพ์จะพบปริมาณของเส้นใยไบอ้อยที่ใกล้เคียงกันในแต่ละส่วน ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการที่เส้นใยไบอ้อยไม่ได้เกิดการตกตะกอนที่บริเวณด้านใดๆ ของแม่พิมพ์ จากหลักฐานภาพถ่ายการกระจายตัวของเส้นใยไบอ้อยและการวิเคราะห์ผลกระทบของบริเวณที่เตรียมขึ้น

ทดสอบจากแม่พิมพ์จึงสามารถสรุปได้ว่าการเตรียมอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยใบอ้อยในแต่ละครั้งนั้นคุณสมบัติของวัสดุมีความใกล้เคียงกัน

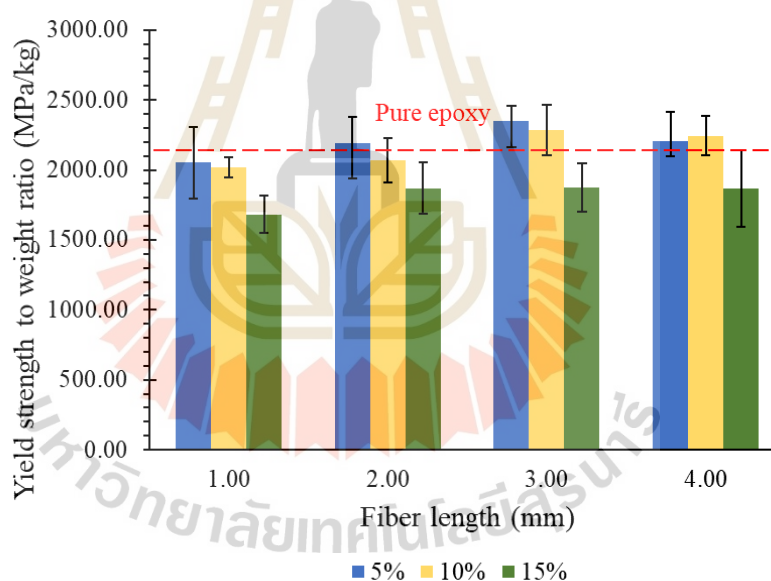


รูปที่ 4.8 ภาพถ่ายการกระจายตัวของเส้นใยใบอ้อยในอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยใบอ้อย

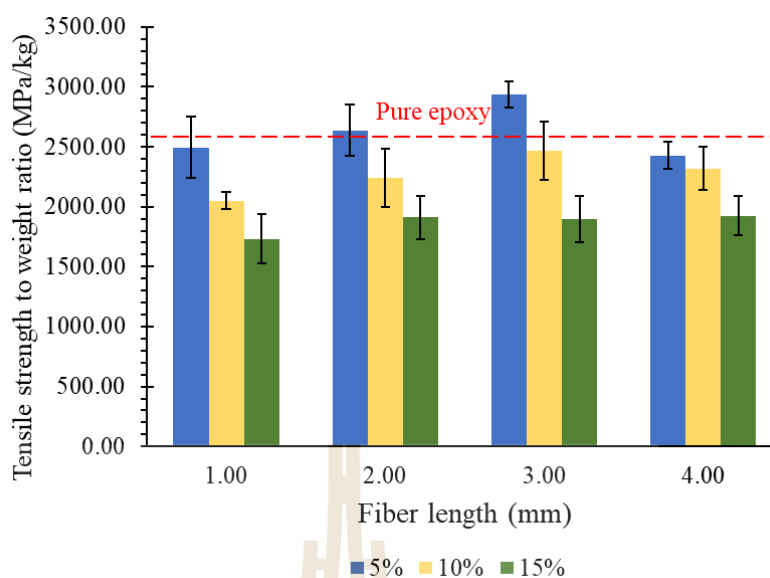
สำหรับผลการทดสอบแรงของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยใบอ้อยที่เงื่อนไขการผสมต่างๆ นั้น แสดงให้เห็นถึงผลกระทบของการเสริมแรงด้วยเส้นใยใบอ้อยให้กับอีพอกซีเรซินอย่างชัดเจน กล่าวคือเมื่อเสริมแรงด้วยเส้นใยใบอ้อยนั้นคุณสมบัติภายใต้การรับแรงดึงของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยใบอ้อยมีแนวโน้มที่จะลดลงหรือใกล้เคียงเมื่อเทียบกับอีพอกซีเรซินบริสุทธิ์ตั้งแต่สัดส่วนการผสมที่น้อยที่สุด การเสริมแรงด้วยเส้นใยใบอ้อยให้กับอีพอกซีเรซินเป็นการเสริมแรงด้วยเส้นใยที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าวัสดุหลักเป็นอย่างมากโดยอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยใบอ้อยจะมีความหนาแน่นภายหลังการเสริมแรงด้วยเส้นใยใบอ้อยเท่ากับ 1.13, 1.03, และ 0.95 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรที่สัดส่วนการผสมร้อยละ 5, 10, และ 15 โดยน้ำหนักตามลำดับ ซึ่งความหนาแน่นทั้งหมดนั้นล้วนแต่น้อยกว่าอีพอกซีเรซินบริสุทธิ์ที่มีความหนาแน่นเท่ากับ 1.30 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร การที่ความหนาแน่นของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยใบอ้อยกับอีพอกซีเรซินบริสุทธิ์มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนนั้นการเปรียบเทียบคุณสมบัติการรับแรงดึงโดยคำนึงถึงความสามารถในการรับภาระเป็นหลักจึงอาจไม่สามารถอธิบายพฤติกรรมของวัสดุได้อย่างชัดเจน เพื่อให้สามารถอธิบายพฤติกรรมที่เกิดขึ้นกับอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยใบอ้อยได้อย่างชัดเจน คุณสมบัติภายใต้การรับแรงดึงของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยใบอ้อยจะถูกลบเลื่อนให้อยู่ในมาตราส่วนของความเค้นต่อน้ำหนัก (Strength to weight ratio) ดังรูปที่ 4.9 ถึง 4.11 ตามลำดับของคุณสมบัติ

สำหรับรูปที่ 4.9 แสดงความเค้นครากต่อน้ำหนักของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยใบอ้อย โดยความเค้นครากต่อน้ำหนักมีแนวโน้มที่จะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อความยาวของเส้นใยใบอ้อยเพิ่มขึ้นและยัง

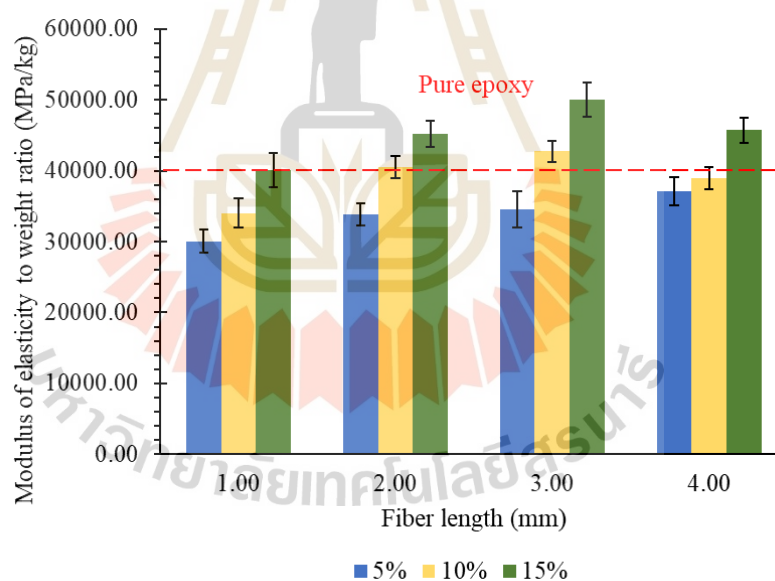
แสดงให้เห็นถึงความเค้นครากที่สูงกว่าความเค้นครากต่อน้ำหนักของอีพอกซีเรซินบริสุทธิ์ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการที่อีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยไบออยนั้นมีความเค้นครากที่ดีขึ้นเมื่อเทียบกับอีพอกซีเรซินบริสุทธิ์ที่น้ำหนักเท่ากัน เมื่อพิจารณาถึงผลกระทบของสัดส่วนการผสมต่อความเค้นครากต่อน้ำหนักนั้นยังคงพบพฤติกรรมเช่นเดียวกับการพิจารณาคุณสมบัติการรับแรงดึงด้วยโดยคำนึงถึงความสามารถในการรับภาระเพียงอย่างเดียว (รูปที่ 4.1) กล่าวคือเมื่อสัดส่วนการผสมเพิ่มมากขึ้นความเค้นครากต่อน้ำหนักมีแนวโน้มที่จะลดลงโดยที่ความยาวของเส้นใยไบออย 3 และ 4 มิลลิเมตร สัดส่วนการผสมร้อยละ 5 และ 10 โดยน้ำหนัก ความเค้นครากต่อน้ำหนักของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยไบออยจะสูงกว่าของอีพอกซีเรซินบริสุทธิ์อย่างชัดเจน พฤติกรรมเหล่านี้ยังแสดงให้เห็นบนความเค้นแรงดึงต่อน้ำหนักและโมดูลัสความยืดหยุ่นต่อน้ำหนักของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยไบออยดังรูปที่ 4.10 และ 4.11 ตามลำดับ พฤติกรรมทั้งหมดนี้แสดงให้เห็นถึงการที่อีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยไบออยนั้นส่งผลให้คุณสมบัติทางกลดีขึ้นเมื่อเทียบกับอีพอกซีเรซินบริสุทธิ์ในบางเงื่อนไขของการผสมหากพิจารณาในแง่มุมมองของคุณสมบัติต่อน้ำหนักของวัสดุ



รูปที่ 4.9 ผลความเค้นครากต่อน้ำหนักของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยไบออยที่สัดส่วนต่างๆ



รูปที่ 4.10 ผลความเค้นแรงดึงต่อน้ำหนักของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยไบอ้อยที่สัดส่วนต่างๆ

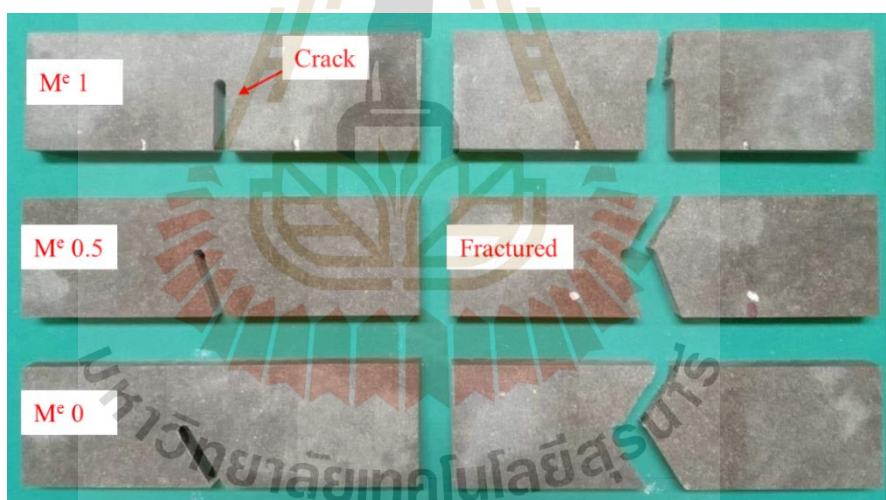


รูปที่ 4.11 ผลโมดูลัสความยืดหยุ่นต่อน้ำหนักของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยไบอ้อยที่สัดส่วนต่างๆ

4.2 ผลการทดสอบความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบผสม 1 และ 2

ความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบผสม 1 และ 2 ของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยไบอ้อยนั้นจะถูกแยกพิจารณาตามรูปแบบของภาระที่กระทำแนวรอยร้าวเป็นความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบที่ 1 หรือ K_I และความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบที่ 2 หรือ K_{II} สำหรับค่าความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบผสม 1 และ 2 นั้นจะเกิดจากการที่รูปแบบของ

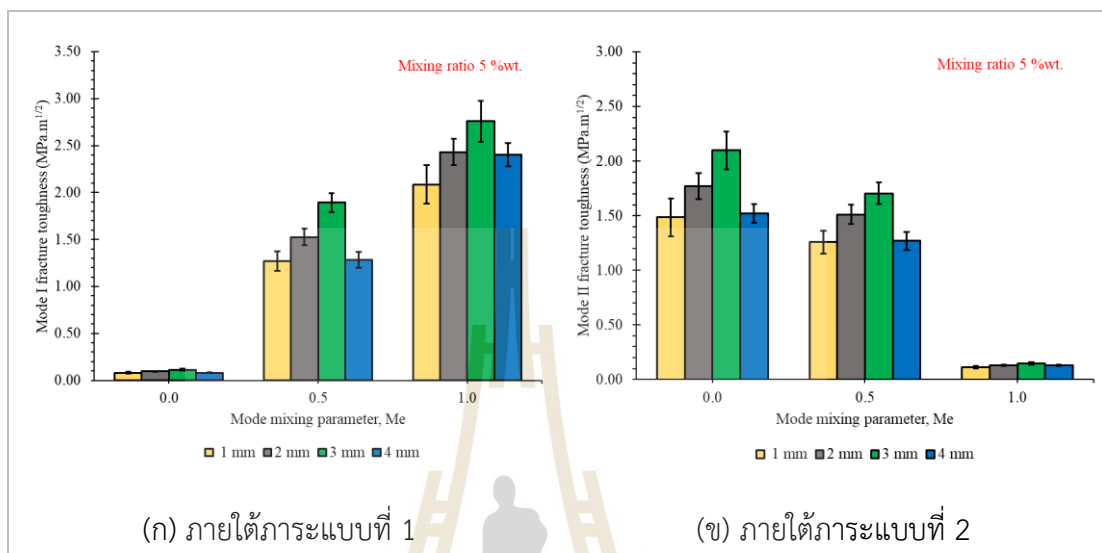
ภาวะที่กระทำกับรอยร้าวเป็นแบบผสมระหว่างแบบที่ 1 (Opening mode) ซึ่งทิศทางของแรงจะกระทำในทิศทางตั้งฉากกับพื้นผิวรอยร้าวและแบบที่ 2 (In-plane shear mode) ซึ่งทิศทางของแรงจะกระทำในลักษณะของการเฉือนพื้นผิวรอยร้าว สำหรับขึ้นทดสอบความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาวะแบบผสมของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยไบอ้อยทั้งที่ผ่านการทดสอบแล้วและยังไม่ผ่านการทดสอบจะแสดงไว้ดังรูปที่ 4.12 เมื่อพิจารณาขึ้นทดสอบที่ผ่านการทดสอบแล้วจะพบว่าลักษณะของการแตกหักจะขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ของการรับภาระแบบผสมหรือค่า M^e ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่บ่งบอกสัดส่วนของรูปแบบการรับภาระ สำหรับขึ้นทดสอบที่ค่า M^e เท่ากับ 1 นั้นลักษณะของการขยายตัวของร้าวเริ่มต้นจนกระทั่งเกิดการแตกหักแบบเฉียบพลันจะเป็นไปในแนวเดียวกันกับแนวรอยร้าวซึ่งเป็นลักษณะของการรับภาระแบบเปิดหรือแบบที่ 1 เมื่อค่า M^e ลดลงจะหมายถึงการที่สัดส่วนของภาระแบบที่ 2 ที่กระทำกับขึ้นทดสอบเพิ่มมากขึ้นลักษณะการขยายตัวของรอยร้าวก่อนเกิดการแตกหักจึงเปลี่ยนไปจากที่เคยขยายตัวอยู่แนวเดียวกับรอยร้าวเริ่มต้นกลายเป็นการขยายตัวแบบทำมุมเฉียงกับรอยร้าวเริ่มต้นแทนอันเนื่องมาจากอิทธิพลของแรงเฉือนซึ่งมุมของการขยายตัวของรอยร้าวเริ่มต้นก่อนเกิดการแตกหักนั้นจะขึ้นอยู่กับสัดส่วนของภาระแบบที่ 2 เป็นหลัก



รูปที่ 4.12 ขึ้นทดสอบความต้านทานการแตกหักของอีพอกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยไบอ้อย

ความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาวะแบบผสม 1 และ 2 ของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยไบอ้อยที่สัดส่วนการผสมต่างๆ จะแสดงไว้ดังรูปที่ 4.13 ถึง 4.15 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาความต้านทานการแตกหักที่สัดส่วนการผสมเส้นใยไบอ้อยร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก (รูปที่ 4.13) พบว่าความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาวะแบบที่ 1 จะลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อค่า M^e เพิ่มขึ้นตรงกันข้ามกับความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาวะแบบที่ 2 ที่จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของค่า M^e และเมื่อพิจารณาถึงผลกระทบของความยาวเส้นใยไบอ้อยจะพบว่าความต้านทานการแตกหักทั้งภาวะแบบที่ 1 และภาวะแบบที่ 2 มีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเมื่อความยาวของเส้นใยไบอ้อยเพิ่มขึ้น พฤติกรรมของ

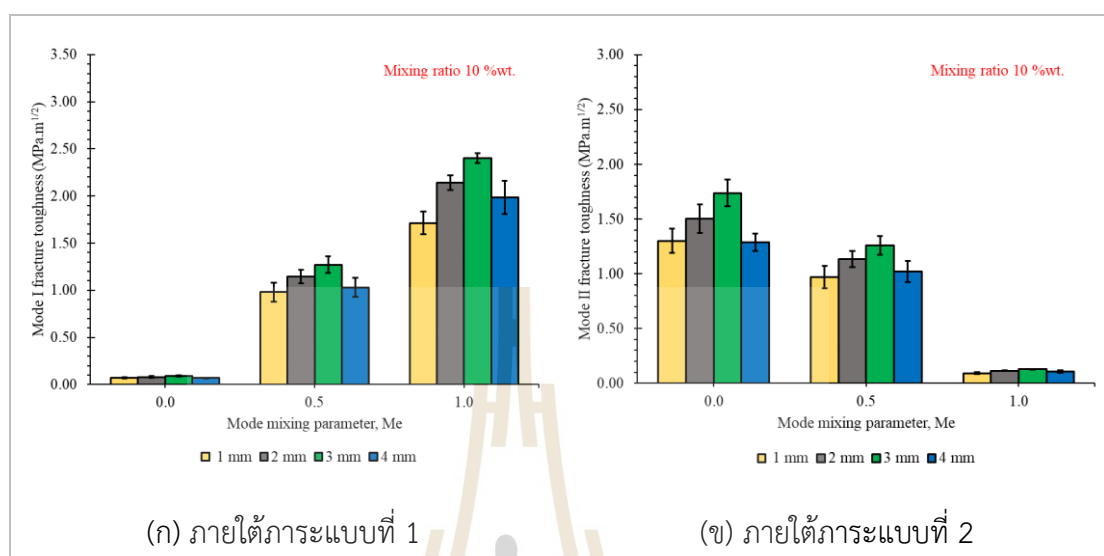
ความต้านทานการแตกหักดังกล่าวนี้สอดคล้องกับพฤติกรรมภายใต้การรับแรงดึงของวัสดุที่มีความยาวเส้นใยใบบ่อย 3 มิลลิเมตรที่มีค่าความเค้นสูงที่สุด (คุณสมบัติการรับแรงดึงโดยคำนึงถึงความสามารถในการรับภาระเป็นหลัก)



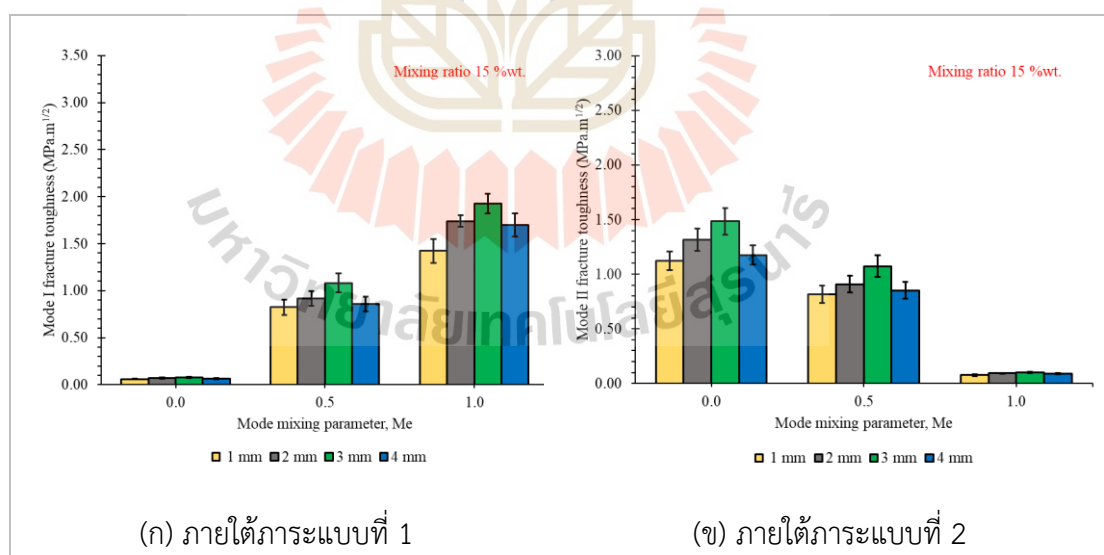
รูปที่ 4.13 ความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบผสม 1 และ 2 ของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยใบบ่อยร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

พฤติกรรมของความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบผสมดังกล่าวยังแสดงให้เห็นได้อย่างชัดเจนที่สัดส่วนการผสมอื่นๆ (รูปที่ 4.14 และ 4.15) เมื่อพิจารณาถึงความต้านทานการแตกหักที่เกิดขึ้นกับทุกสัดส่วนการผสมจะพบว่าที่สัดส่วนการผสมร้อยละ 5 โดยน้ำหนักนั้นยังคงมีความต้านทานการแตกหักที่มากที่สุดเช่นเดียวกับพฤติกรรมที่เกิดขึ้นกับคุณสมบัติการรับแรงดึง การที่ความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบผสม 1 และ 2 ของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยใบบ่อยขนาด 3 มิลลิเมตรมีค่ามากที่สุดนั้น เกิดจากการที่ความยาวของเส้นใยใบบ่อยดังกล่าววัสดุเสริมแรงสามารถรับภาระที่เกิดขึ้นจากแรงภายนอกได้มากที่สุดและจากสาเหตุนี้เองเมื่อพิจารณาจากสมการสำหรับคำนวณค่าความต้านทานการแตกภายใต้ภาระแบบที่ 1 และแบบที่ 2 ดังสมการที่ (18) และ (19) จะพบว่าแท้จริงแล้วความต้านทานการแตกหักของวัสดุขึ้นอยู่กับภาระสูงสุดที่เกิดขึ้นกับวัสดุก่อนเกิดการแตกหัก เมื่อพิจารณารูปความสัมพันธ์ระหว่างภาระและระยะการยึดตัวของชิ้นทดสอบความต้านทานการแตกหักที่ค่า M^e เท่ากับ 0.5 ระหว่างความยาวเส้นใยใบบ่อย 1 มิลลิเมตรเทียบกับความยาวเส้นใยใบบ่อย 3 มิลลิเมตร (รูปที่ 4.16) พบว่าภาระที่เกิดขึ้นกับชิ้นทดสอบกับความยาวเส้นใยใบบ่อย 3 มิลลิเมตรจะมีค่ามากกว่าที่ความยาวเส้นใยใบบ่อย 1 มิลลิเมตร ตรงกันข้ามกับผลของระยะยึดที่ความยาวเส้นใยใบบ่อย 1 มิลลิเมตรจะมีค่ามากกว่าความยาวเส้นใยใบบ่อย 3 มิลลิเมตร ส่งผลให้เมื่อนำ

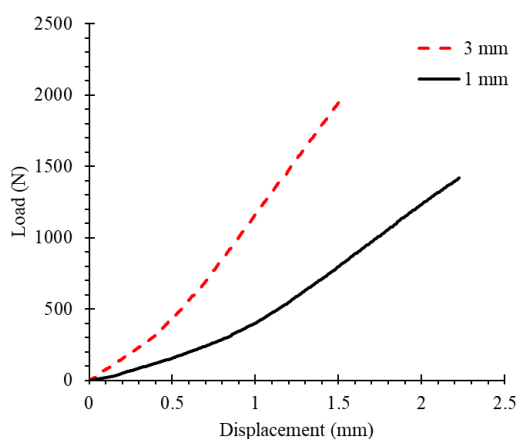
ภาระจากการทดสอบดังกล่าวไปคำนวณความต้านทานการแตกหักจึงทำให้ความยาวเส้นใยใบบ่อยมีค่าความต้านทานการแตกหักมากกว่าความยาวเส้นใยใบบ่อย 1 มิลลิเมตรนั่นเอง



รูปที่ 4.14 ความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบผสม 1 และ 2 ของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยใบบ่อยร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก

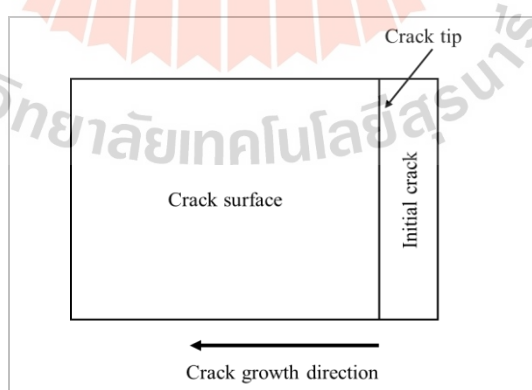


รูปที่ 4.15 ความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบผสม 1 และ 2 ของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยใบบ่อยร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างภาระและระยะยืดของชิ้นทดสอบความต้านทานการแตกหักที่สัดส่วนการผสมร้อยละ 5 โดยน้ำหนักและค่า M^e เท่ากับ 0.5

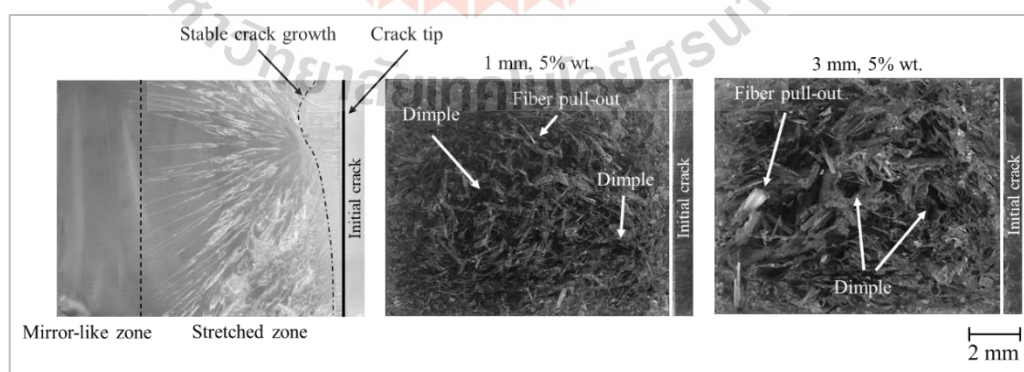
สำหรับพื้นผิวการแตกหักของชิ้นทดสอบความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบผสม 1 และ 2 ของอีพอกซีเรซินบริสุทธิ์และอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยโพลีเอสเตอร์จะแสดงดังรูปที่ 4.18 ถึง 4.20 ตามลำดับ พื้นผิวการแตกหักจะเลือกแสดงเฉพาะที่สัดส่วนการผสมเส้นใยโพลีเอสเตอร์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของความยาวเส้นใยโพลีเอสเตอร์ 1 และ 3 มิลลิเมตร พื้นผิวการแตกหักของชิ้นทดสอบสามารถแบ่งออกเป็นบริเวณต่างๆ ดังรูปที่ 4.17 ได้แก่ บริเวณรอยร้าวเริ่มต้นและบริเวณปลายรอยร้าว ซึ่งบริเวณทั้งสองเกิดขึ้นจากช่วงของการเตรียมชิ้นทดสอบและสุดท้ายบริเวณของพื้นผิวการแตกหักอันเกิดจากการเสีรูปของชิ้นทดสอบ กลไกการขยายตัวของรอยร้าวจะเริ่มจากขวามือไปซ้ายมือ



รูปที่ 4.17 กลไกการแตกหักของชิ้นทดสอบความต้านทานการแตกหัก

พื้นผิวการแตกหักของชิ้นทดสอบความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบที่ 1 ($M^e = 1$) จะแสดงดังรูปที่ 4.18 พื้นผิวการแตกหักของอีพอกซีเรซินบริสุทธิ์จะสามารถแบ่งออกเป็น 3 บริเวณหลักๆ

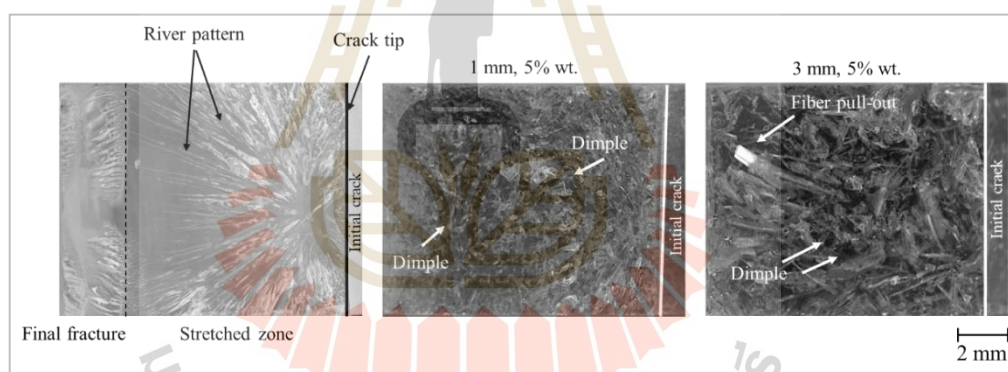
ได้แก่ช่วงที่ขึ้นทดสอบเริ่มได้รับการกระทำกับรอยร้าวเริ่มต้นจนรอยร้าวเกิดการเจริญเติบโต การเติบโตของรอยร้าวในช่วงนี้จะเป็นอย่างคงที่ (Stable crack growth) รูปร่างของรอยร้าวจึงมีลักษณะที่แสดงให้เห็นถึงการแยกตัวที่สม่ำเสมอของเนื้อวัสดุ เมื่อขึ้นทดสอบได้รับการเป็นระยะเวลาหนึ่งลักษณะของผิวรอยร้าวจะเปลี่ยนไปเป็นบริเวณที่เกิดการเสียรูปจากการยืดตัว (Stretched zone) ซึ่งบ่งบอกถึงลักษณะของการเสียรูปแบบเหนียวของวัสดุในการทดสอบที่อัตราภาระต่ำ หลังจากนั้นความสามารถในการรับภาระของขึ้นทดสอบจะลดลงจนขึ้นทดสอบเกิดการแตกหักแบบฉับพลัน ลักษณะของพื้นผิวรอยร้าวในช่วงนี้จะค่อนข้างเรียบซึ่งเรียกว่าพื้นผิวคล้ายกระจก (Mirror-like zone) ในขณะที่พื้นผิวการแตกหักของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยโอบอ้อยนั้นจะแตกต่างจากพื้นผิวการแตกหักของอีพอกซีบริสุทธิ์ กล่าวคือพื้นผิวรอยร้าวจะไม่สามารถแบ่งออกเป็นบริเวณของการเจริญเติบโตได้อย่างชัดเจนเหมือนอีพอกซีเรซินบริสุทธิ์ การที่พื้นผิวของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยโอบอ้อยไม่สามารถแบ่งออกเป็นบริเวณของการเจริญเติบโตของรอยร้าวได้อย่างชัดเจนนั้นเกิดจากการที่พื้นที่การรับภาระของขึ้นทดสอบจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนกระจายอยู่ทั่วพื้นผิวคือบริเวณที่เป็นอีพอกซีเรซินและบริเวณที่เป็นเส้นใยโอบอ้อยซึ่งบริเวณทั้งสองนั้นมีความสามารถในการรับภาระที่แตกต่างกันอีกทั้งยังมีการเสียรูปก่อนเกิดการแตกหักที่ต่างกันทำให้พื้นผิวการแตกหักไม่สามารถแยกเป็นบริเวณต่างๆ ได้แบบอีพอกซีบริสุทธิ์นั่นเอง สำหรับพื้นผิวการแตกหักของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยโอบอ้อยจะแสดงให้เห็นถึงเส้นใยเสริมแรงที่หลุดออกจากเนื้อวัสดุหลัก (Fiber pull-out) และหลุมอันเกิดจากการหลุดออกของเส้นใยเสริมแรง (Dimple) ซึ่งความยาวเส้นใยโอบอ้อย 3 มิลลิเมตรจะเห็นได้ชัดเจนกว่าที่ความยาวเส้นใยโอบอ้อย 1 มิลลิเมตรที่กำลังขยายเดียวกัน เนื่องจากเส้นใยโอบอ้อยมีขนาดที่ต่างกันนั่นเอง การที่เส้นใยเสริมแรงหลุดออกจากเนื้อวัสดุหลักเป็นหนึ่งสาเหตุที่ทำให้ความสามารถในการรับภาระของวัสดุลดลง [70, 71]



รูปที่ 4.18 พื้นผิวการแตกหักของขึ้นทดสอบความต้านทานการแตกหักที่ค่า $M^e=1$

พื้นผิวการแตกหักของขึ้นทดสอบความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบผสม 1 และ 2 ($M^e = 0.5$) จะแสดงดังรูปที่ 4.19 พื้นผิวการแตกหักของอีพอกซีเรซินบริสุทธิ์จะแสดงให้เห็นลักษณะ

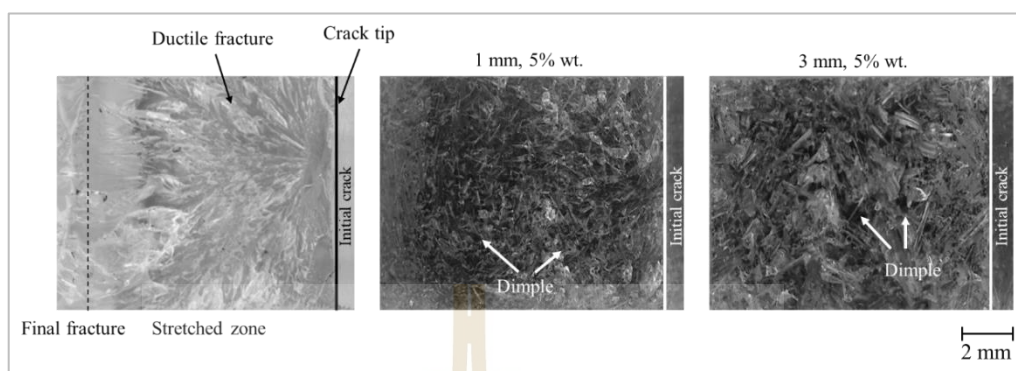
การเติบโตของรอยร้าวที่มีลักษณะการแตกหักแบบเส้น (River pattern) มากขึ้นอันเนื่องมาจากผลกระทบของภาวะแบบเฉือน (Shear) ที่มากขึ้นจากการเพิ่มขึ้นของภาวะแบบที่ 2 ที่กระทำกับชั้นทดสอบ การเติบโตของรอยร้าวในลักษณะดังกล่าวจะเกิดขึ้นจนกระทั่งชั้นทดสอบสูญเสียความสามารถในการรับภาระและเกิดการแตกหักในท้ายที่สุด (Final fracture) การแตกหักในช่วงท้ายของชั้นทดสอบจะแตกต่างจากการแตกหักของชั้นทดสอบที่ค่า $M^e = 1$ ที่มีลักษณะการแตกหักคล้ายกระจกเนื่องจากปริมาณของภาวะแบบที่ 1 ที่ก่อให้เกิดการแตกหักลักษณะดังกล่าวมีน้อยกว่าที่ค่า $M^e = 1$ นั้นเอง เมื่อพิจารณาพื้นผิวการแตกหักของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยโพลีเอทิลีน ลักษณะของพื้นผิวการแตกหักยังคงมีความใกล้เคียงกับชั้นทดสอบที่ค่า $M^e = 1$ ที่ไม่สามารถแบ่งบริเวณการแตกหักออกเป็นกลุ่มได้อย่างชัดเจนแต่พื้นผิวการแตกหักยังแสดงให้เห็นถึงลักษณะการแตกหักที่เกิดการยกตัวหรือนูนตัวของพื้นผิวการแตกหักอันเกิดจากการแตกหักจากภาวะแบบเฉือนที่ไม่แสดงให้เห็นในชั้นทดสอบที่ค่า $M^e = 1$ นอกจากการยกตัวที่มากขึ้นของพื้นผิวการแตกหักนั้น พื้นผิวการแตกหักยังแสดงให้เห็นถึงเส้นใยเสริมแรงที่หลุดออกจากเนื้อวัสดุหลักและหลุมที่เกิดจากการหลุดของเส้นใยอีกด้วย



รูปที่ 4.19 พื้นผิวการแตกหักของชั้นทดสอบความต้านทานการแตกหักที่ค่า $M^e=0.5$

สำหรับรูปที่ 4.20 จะแสดงพื้นผิวการแตกหักของชั้นทดสอบความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาวะแบบที่ 2 ($M^e = 0$) การแตกให้ของชั้นทดสอบที่เงื่อนไขนี้จะเกิดจากภาวะเฉือนเป็นหลัก พื้นผิวการแตกหักจึงมีการเสียรูปที่มากกว่าเมื่อเทียบกับอีพอกซีเรซินบริสุทธิ์ที่ค่า M^e อื่นๆ พื้นผิวการแตกหักของอีพอกซีเรซินบริสุทธิ์จะมีพื้นที่ที่เสียรูปจากการยึดตัวที่ครอบคลุมเกือบทั้งพื้นผิวการแตกหักของชั้นทดสอบ เมื่อพิจารณาลักษณะการเสียรูปที่บริเวณดังกล่าวพบว่าลักษณะการเสียรูปจะเป็นลักษณะการเสียรูปแบบเหนียวส่งผลให้ภาวะที่เกิดขึ้นกับชั้นทดสอบที่ค่า $M^e = 0$ มีค่ามากที่สุด เนื่องจากภาวะที่กระทำกับชั้นทดสอบนอกจากมุ่งไปขยายรอยร้าวแล้วส่วนหนึ่งยังต้องถูกใช้ไปกับการเสียรูปของพื้นผิวการแตกหักด้วย นอกจากนี้พื้นที่การเสียรูปจากการยึดตัวแล้วนั้นพื้นผิวการแตกหักยังแสดงให้เห็นบริเวณที่เกิดการเสียรูปแบบฉับพลันอีกด้วย สำหรับพื้นผิวการแตกหักของอีพอกซีเรซิน

เสริมแรงด้วยเส้นใยใบบัวนั้นยังคงพบลักษณะของหลุมที่เกิดจากการหลุดของเส้นใยแต่จะไม่พบลักษณะของเส้นใยที่หลุดออกจากเนื้อวัสดุ (ฝั่งของเส้นใยดังรูปที่ 4.15 และ 4.16)



รูปที่ 4.20 พื้นผิวการแตกหักของขึ้นทสดความต้านทานการแตกหักที่ค่า $M^e=0$

การวิเคราะห์ความแปรปรวนของความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบที่ 1 และแบบที่ 2 (K_I และ K_{II}) จะแสดงไว้ดังรูปที่ 4.21 และ 4.22 ตามลำดับ การวิเคราะห์ความแปรปรวนนอกจากแสดงให้เห็นถึงผลกระทบของปัจจัยหลักที่เลือกศึกษาได้แก่ ความยาวเส้นใยใบบัว สัดส่วนการผสมและพารามิเตอร์ของการรับภาระแบบผสมแล้วนั้นยังแสดงให้เห็นถึงผลกระทบร่วมหรือปฏิสัมพันธ์อันเกิดจากปัจจัยหลักด้วยไม่ว่าจะเป็นสองปัจจัยหรือสามปัจจัย ผลกระทบร่วมดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงการที่ไม่สามารถใช้เพียงปัจจัยหลักอย่างเดียวในการอธิบายหรือทำนายความต้านทานการแตกหักของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยใบบัวได้ ยกตัวอย่างเช่นไม่สามารถบอกได้ว่ายิ่งสัดส่วนการผสมเส้นใยใบบัวเพียงปัจจัยเดียวมากขึ้นจะทำให้ความต้านทานการแตกหักน้อยลงหรือไม่ต้องทำการดูปัจจัยอื่นร่วมด้วยจึงจะสามารถบอกได้ ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนยังแสดงให้เห็นความจำเป็นในการเลือกปัจจัยรับเข้า (Input) สำหรับแบบจำลองการทำนายผลต่างๆ อีกด้วย (การทำนายผลต้องเลือกทั้งสามปัจจัย)

Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	35	81.8824	2.3395	638.03	0.000
Linear	7	78.9164	11.2738	3074.58	0.000
Mixing ratio	2	3.7357	1.8678	509.39	0.000
Fiber length	3	1.6959	0.5653	154.17	0.000
Me	2	73.4849	36.7424	10020.39	0.000
2-Way Interactions	16	2.8581	0.1786	48.72	0.000
Mixing ratio*Fiber length	6	0.1917	0.0320	8.72	0.000
Mixing ratio*Me	4	1.7952	0.4488	122.40	0.000
Fiber length*Me	6	0.8712	0.1452	39.60	0.000
3-Way Interactions	12	0.1078	0.0090	2.45	0.010
Mixing ratio*Fiber length*Me	12	0.1078	0.0090	2.45	0.010
Error	72	0.2640	0.0037		
Total	107	82.1464			

รูปที่ 4.21 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาวะแบบที่ 1

Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	35	43.0040	1.2287	322.03	0.000
Linear	7	41.0468	5.8638	1536.86	0.000
Mixing ratio	2	2.2114	1.1057	289.79	0.000
Fiber length	3	1.5526	0.5175	135.64	0.000
Me	2	37.2828	18.6414	4885.75	0.000
2-Way Interactions	16	1.8523	0.1158	30.34	0.000
Mixing ratio*Fiber length	6	0.2147	0.0358	9.38	0.000
Mixing ratio*Me	4	0.9415	0.2354	61.69	0.000
Fiber length*Me	6	0.6961	0.1160	30.41	0.000
3-Way Interactions	12	0.1049	0.0087	2.29	0.016
Mixing ratio*Fiber length*Me	12	0.1049	0.0087	2.29	0.016
Error	72	0.2747	0.0038		
Total	107	43.2787			

รูปที่ 4.22 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาวะแบบที่ 2

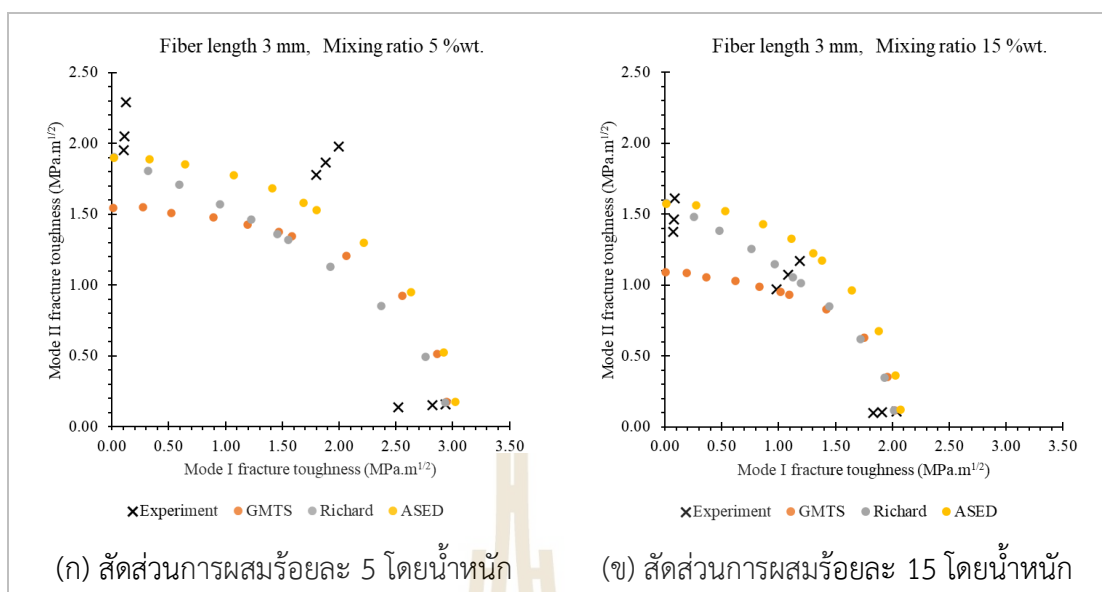
4.3 การทำนายความต้านทานการแตกหัก

4.3.1 การทำนายผลด้วยเกณฑ์การแตกหัก

การทำนายความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาวะแบบผสม 1 และ 2 ของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยใบอ้อยด้วยเกณฑ์การแตกหักนั้นจะกล่าวถึงเฉพาะการทำนายที่ความยาวเส้นใยใบอ้อย 3 มิลลิเมตรที่สัดส่วนการผสมร้อยละ 5 และ 15 โดยน้ำหนักเท่านั้น ส่วนการทำนายด้วยเกณฑ์การแตกหักที่เงื่อนไขของการผสมต่างๆ จะแสดงโดยละเอียดไว้ในภาคผนวก ข (ตารางที่ ข.1 ถึง ข.4) ผลการทำนายความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาวะแบบผสม 1 และ 2 จะแสดงไว้ดัง

รูปที่ 4.23 เภณท์การแตกหักที่เลือกใช้ในงานวิจัยชิ้นนี้เป็นเภณท์การแตกหักที่พิจารณาปัจจัยที่ทำให้วัสดุเกิดการแตกหักต่างกัน สำหรับเภณท์การแตกหักแบบ GMTS รอยร้าวบนวัสดุจะเกิดการขยายตัวเมื่อความเค้นสัมผัสที่ปลายรอยร้าวมีค่ามากกว่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุสามารถรับได้ เภณท์การแตกหักแบบ ASED รอยร้าวบนวัสดุจะเกิดการขยายตัวเมื่อพลังงานความเครียดเฉลี่ยที่เกิดขึ้นบริเวณรอยร้าวของวัสดุมีมากกว่าปริมาตรควบคุมและเภณท์การแตกหักแบบ Richard รอยร้าวบนวัสดุจะเกิดการขยายตัวเมื่อความต้านทานการแตกหักเปรียบเทียบเท่ากับความต้านทานการแตกหักวิกฤติภายใต้การรับภาระแบบที่ 1 เมื่อพิจารณาผลความต้านทานการแตกหักจากการทำนายด้วยเภณท์การแตกหักทั้งสามจะพบว่ามีค่าค่อนข้างคลาดเคลื่อนที่สัดส่วนการผสมเส้นใยใบบ่อยร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก (รูปที่ 4.23 (ก)) ตรงกันข้ามกับผลความต้านทานการแตกหักจากการทำนายด้วยเภณท์การแตกหักทั้งสามที่ค่อนข้างใกล้เคียงกับความต้านทานการแตกหักที่สัดส่วนการผสมเส้นใยใบบ่อยร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก สาเหตุที่พฤติกรรมของผลการทำนายด้วยเภณท์การแตกหักเป็นแบบนี้ขึ้นเกิดจากการที่เภณท์การแตกหักถูกออกแบบมาบนแนวคิดที่ให้น่าเชื่อถือไปประยุกต์ใช้วัสดุที่หลากหลายโดยตั้งอยู่บนทฤษฎีของกลศาสตร์การแตกหักแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น (Linear elastic fracture mechanics) ที่กล่าวว่าวัสดุนั้นๆ เกิดการเสียรูปขึ้นน้อยมากก่อนเกิดการแตกหัก จึงทำให้ผลการทำนายด้วยเภณท์การแตกหักที่สัดส่วนการผสมเส้นใยใบบ่อยร้อยละ 5 โดยน้ำหนักที่ีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยใบบ่อยแสดงพฤติกรรมการแตกหักแบบเหนียวมีค่าน้อยกว่าความต้านทานการแตกหักที่เกิดขึ้นจริง ผลการทำนายด้วยเภณท์การแตกหักดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงการที่บางครั้งเภณท์การแตกหักมีผลการทำนายที่คลาดเคลื่อนสูงแม้จะทำการทำนายบนวัสดุชนิดเดียวกัน (อีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยใบบ่อยปริมาณที่ต่างกัน)

สำหรับผลการทำนายความต้านทานการแตกหักของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยใบบ่อยด้วยเภณท์การแตกหักทั้งสามแบบนี้ถึงแม้จะมีคลาดเคลื่อนค่อนข้างมากเมื่อเทียบกับผลความต้านทานการแตกหักจริงแต่ผลการทำนายดังกล่าวยังคงสามารถนำมาใช้ในการออกแบบชิ้นส่วนหรืออุปกรณ์จากอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยใบบ่อยที่ต้องคำนึงถึงพารามิเตอร์ความต้านทานการแตกหักได้ กล่าวคือสำหรับวัสดุใดๆ ที่มีรอยร้าวเกิดขึ้นกับวัสดุและได้รับภาระกระทำจากภายนอกรอยร้าวจะเริ่มเจริญเติบโตเมื่อความต้านทานการแตกหักที่เกิดขึ้นจากแรงภายนอกมากกว่าหรือเท่ากับความต้านทานการแตกหักวิกฤตของวัสดุตั้งสมการที่ (13) (ในบทที่ 2) เมื่อผลการทำนายความต้านทานการแตกหักด้วยเภณท์การแตกหักมีค่าน้อยกว่าความเป็นจริงนั้น จะส่งผลให้ในการออกแบบชิ้นส่วนหรืออุปกรณ์ย่อมต้องออกแบบให้สามารถรับภาระได้น้อยกว่าภาระที่วัสดุสามารถรับสูงสุดได้จริงหากพิจารณาตามสมการที่ใช้คำนวณความต้านทานการแตกหัก (สมการที่ (18) และ (19) ในบทที่ 3) ซึ่งขึ้นอยู่กับภาระที่เกิดขึ้นกับวัสดุ กรณีที่ความต้านทานการแตกหักมีค่าน้อยกว่าภาระที่เกิดขึ้นกับวัสดุย่อมมีค่าน้อยตามไปด้วย



รูปที่ 4.23 ผลการทำนายความต้านทานการแตกหักด้วยเกณฑ์การแตกหักที่ขนาดเส้นใยใบอ้อย 3 มิลลิเมตร

4.3.2 การทำนายผลด้วยวิธีปัญญาประดิษฐ์

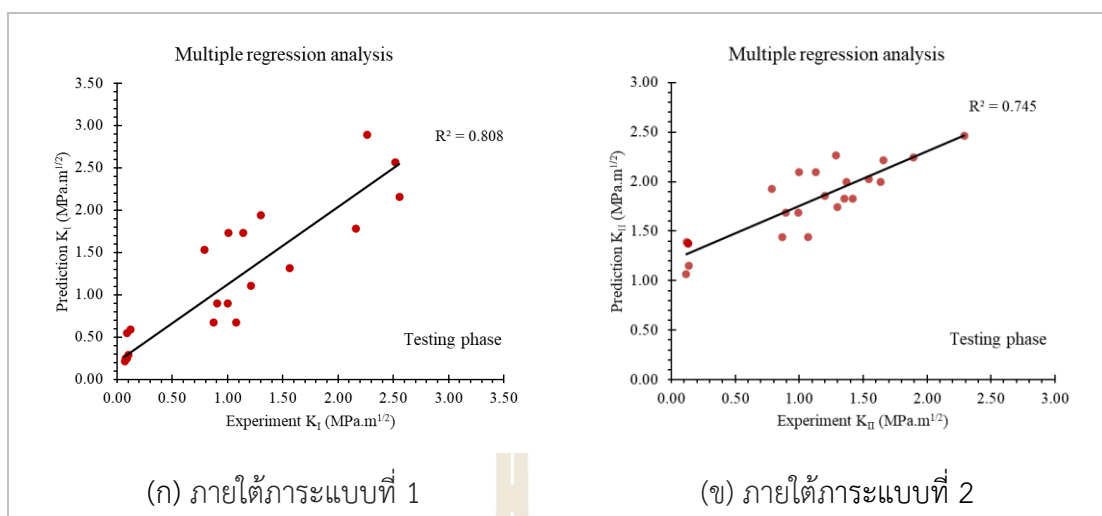
การทำนายผลลัพธ์ของปัญหาด้วยวิธีปัญญาประดิษฐ์ได้รับความนิยมอย่างมากในปัจจุบัน แต่จากการนำวิธีปัญญาประดิษฐ์เข้ามาใช้ในการทำนายนั้นมักตามมาด้วยคำถามที่ว่า “ปัญหาของเราจำเป็นต้องใช้ปัญญาประดิษฐ์ในการทำนายผลจริงหรือไม่” สำหรับงานวิจัยชิ้นนี้เพื่อแสดงให้เห็นถึงความจำเป็นในการนำวิธีปัญญาประดิษฐ์เข้ามาใช้ในการทำนายความต้านทานการแตกหักนั้นก่อนที่จะกล่าวถึงผลลัพธ์จากการทำนายด้วยวิธีปัญญาประดิษฐ์จะกล่าวถึงผลลัพธ์จากการทำนายด้วยวิธีการวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณ (Multiple regression analysis) ก่อน โดยสมการทำนายความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาวะแบบผสม 1 และ 2 จากวิธีการวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณจะแสดงไว้ตามสมการที่ (55) และ (56) ตามลำดับ การสร้างแบบจำลองดังกล่าวจะใช้ชุดข้อมูลฝึกสอนและชุดข้อมูลทดสอบแบบเดียวกับแบบจำลองปัญญาประดิษฐ์ซึ่งจะอธิบายไว้ในส่วนต่อไป

$$K_I = -0.042X_2^2 - 0.400X_3^2 - 0.073X_1X_3 + 0.114X_2X_3 - 0.005X_1 + 0.505X_2 + 2.542X_3 - 0.615 \quad (55)$$

$$K_{II} = -0.101X_2^2 - 1.520X_3^2 + 0.035X_1X_3 - 0.051X_1 + 0.723X_2 + 0.172X_3 + 1.453 \quad (56)$$

เมื่อ	X_1	แทนสัดส่วนการผสมเส้นใยใบอ้อย (Mixing ratio)
	X_2	แทนความยาวเส้นใยใบอ้อย (Fiber length)
	X_3	แทนพารามิเตอร์ของการรับภาระแบบผสม (M^c)

ผลการทำนายความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบผสม 1 และ 2 ของแบบจำลองการวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณจะแสดงดังรูปที่ 4.24 (ในส่วนต่อจากนี้จะเรียกว่าแบบจำลอง MRA) โดยแบบจำลองจะมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination, R^2) เท่ากับ 0.808 และ 0.745 ตามการพิจารณาค่า K_I และ K_{II} ตามลำดับ สำหรับค่า R^2 นั้นเป็นตัวชี้วัดประสิทธิภาพที่แสดงให้เห็นถึงการที่ค่าจากการทำนายสามารถอธิบายค่าความต้านทานการแตกหักจริงได้มากน้อยเพียงใด ผลลัพธ์ของแบบจำลอง MRA นั้นนับว่ามีค่า R^2 ที่สามารถอธิบายความต้านทานการแตกหักจริงได้ค่อนข้างมากในการรับภาระแบบที่ 1 สำหรับตัวชี้วัดประสิทธิภาพนั้น การเลือกใช้เพียงตัวชี้วัดเดียวอาจไม่สามารถตีความประสิทธิภาพในการทำนายผลได้ทั้งหมด สำหรับผลลัพธ์ของแบบจำลอง MRA นั้นจะมีค่าเฉลี่ยของร้อยละความผิดพลาดสัมบูรณ์ (Mean absolute percentage error, MAPE) และรากที่สองของค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสอง (Root mean square error, RMSE) เท่ากับ (118.340%, 0.394) และ (205.464%, 0.776) ตามการพิจารณาค่า K_I และ K_{II} ตามลำดับ โดยผลของตัวชี้วัด MAPE แสดงให้เห็นว่าผลการทำนายจากแบบจำลอง MRA มีความคลาดเคลื่อนเป็นอย่างมากเมื่อเทียบกับผลการทดสอบจริงในหน่วยร้อยละและหากแปลความหมายของค่า MAPE ตามงานวิจัยของคุณ Lewis [72] จะพบว่าการทำนายด้วยแบบจำลองนี้ไม่มีความแม่นยำ อีกทั้งหากพิจารณาตัวชี้วัด RMSE ที่เป็นการแสดงความคลาดเคลื่อนของผลการทำนายเทียบกับผลการทดสอบจริงในหน่วยของความต้านทานการแตกหัก (หน่วย $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) จะพบความคลาดเคลื่อนที่ค่อนข้างสูงของแบบจำลองในการทำนายผล ผลลัพธ์ของการทำนายผลเมื่อวิเคราะห์ด้วยตัวชี้วัดต่างๆ จึงสามารถสรุปได้ว่าแบบจำลอง MRA นั้นไม่แม่นยำเท่าที่ควรจึงเป็นเหตุผลให้ต้องมีการนำวิธีปัญญาประดิษฐ์เข้ามาใช้ทำนายความต้านทานการแตกหัก



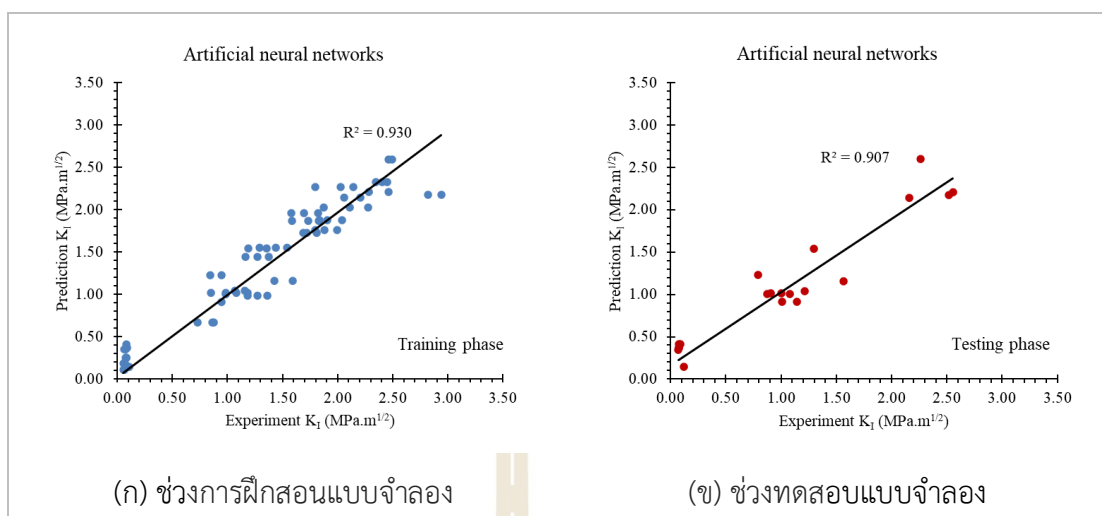
รูปที่ 4.24 ผลการทำนายความต้านทานการแตกหักด้วยวิธีการวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณ

การทำนายด้วยวิธีปัญญาประดิษฐ์นั้นประสิทธิภาพของการทำนายผลจะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยด้วยกันหนึ่งในนั้นคือชุดข้อมูลฝึกสอนและทดสอบแบบจำลอง สำหรับงานวิจัยชิ้นนี้จะเลือกใช้การเลือกชุดข้อมูลด้วยวิธีการสอบทวนไขว้แบบ K-Fold (K-Fold cross validation) ด้วยการแบ่งชุดข้อมูลออกเป็นจำนวน 5 กลุ่ม ($K = 5$) หลังจากนั้นทำการสลับการฝึกสอนและการทดสอบแบบจำลองจากข้อมูลของกลุ่มที่ทำการแบ่ง สำหรับชุดข้อมูลฝึกสอนและชุดข้อมูลทดสอบแบบจำลองสำหรับวิธีปัญญาประดิษฐ์ (รวมถึงแบบจำลอง MRA ที่กล่าวถึงก่อนหน้านี้) ที่ผ่านกระบวนการคัดเลือกด้วยวิธีการสอบทวนไขว้แบบ K-Fold จะแสดงไว้โดยละเอียดในภาคผนวก ข (ตารางที่ ข.5 และ ข.6) ซึ่งสัดส่วนของชุดข้อมูลฝึกสอนและทดสอบจะมีค่าประมาณ 80% และ 20% ของข้อมูลการทดสอบความต้านทานการแตกหักทั้งหมดตามลำดับ นอกจากการเลือกชุดข้อมูลฝึกสอนและทดสอบแล้วอีกหนึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำนายของอัลกอริทึมปัญญาประดิษฐ์แต่ละแบบคือการกำหนดค่าของไฮเปอร์พารามิเตอร์ (Hyper-parameters) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับช่วงการเรียนรู้ของแบบจำลอง สำหรับงานวิจัยชิ้นนี้จะใช้วิธีการหาค่าไฮเปอร์พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของอัลกอริทึมแต่ละแบบด้วยวิธีการปรับค่าที่เหมาะสมแบบการเคลื่อนที่ลงตามความชัน (Gradient descent optimization) ด้วยไลบรารีสำเร็จรูปในภาษาไพทอน (Python) โดยผลของไฮเปอร์พารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละอัลกอริทึมจะแสดงไว้ดังตารางที่ 4.1

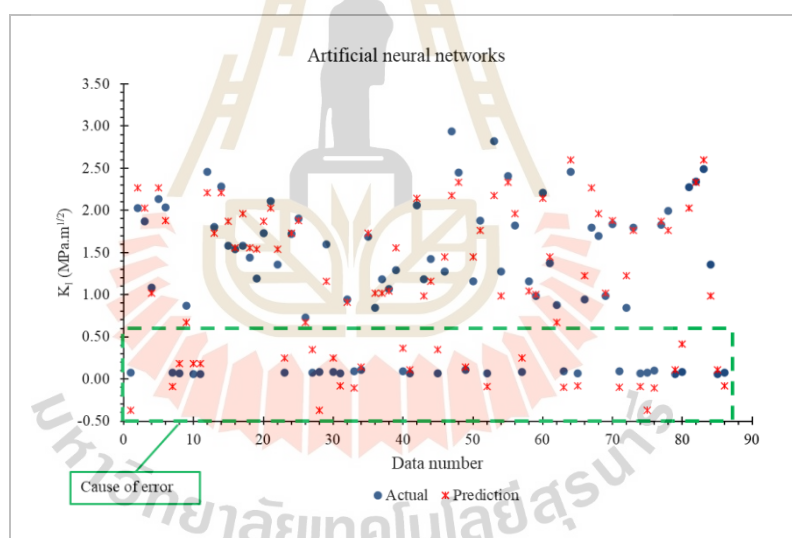
ตารางที่ 4.1 ตารางการปรับค่าที่เหมาะสมของไฮเปอร์พารามิเตอร์

Model	Hyper-parameter	Initial	Step	Optimized value
ANNs	Number of hidden layers	1	1	2
	Number of neurons	1	1	13
GRNNs	Smoothing factor (σ_s)	0.01	0.001	0.144
GPR	Signal standard deviation (σ_f)	0	0.001	1.789
	Length scale (l)	0	0.001	1.422
	Noise standard deviation (σ_n)	1	0.001	0.086

ผลการทำนายความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบผสม 1 และ 2 ของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยโพลีเอทิลีนจากวิธีปัญญาประดิษฐ์จะถูกแสดงไว้ทั้งในช่วงการฝึกสอนแบบจำลอง และช่วงการทดสอบแบบจำลอง รูปที่ 4.25 แสดงผลการทำนายความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบที่ 1 ของแบบจำลองวิธีโครงข่ายประสาทเทียม (ANNs) โดยช่วงการฝึกสอนนั้นแบบจำลองจะมีค่า R^2 เท่ากับ 0.930 ซึ่งถือว่ามีประสิทธิภาพในการทำนายที่ค่อนข้างสูงเมื่อพิจารณาจากค่า R^2 เพียงอย่างเดียว แต่เมื่อทำการวัดประสิทธิภาพด้วยตัวชี้วัด MAPE และ RMSE กลับพบว่าตัวชี้วัด MAPE บ่งชี้ว่าแบบจำลอง ANNs นั้นไม่มีความแม่นยำ โดยมีค่า MAPE เท่ากับ 89.375% และค่า RMSE เท่ากับ 0.233 การที่ค่า MAPE ของแบบจำลอง ANNs มีค่าสูงนั้นหากพิจารณาถึงผลการทำนายในช่วงการฝึกสอนแบบจำลองเทียบกับข้อมูลความต้านทานการแตกหักแต่ละข้อมูลใช้ในการฝึกสอนดังรูปที่ 4.26 จะพบว่าผลการทำนายเทียบกับผลการทดลองจริงส่วนใหญ่จะเกิดการคลาดเคลื่อนในช่วงที่ค่า K_I มีค่าเข้าใกล้ศูนย์เป็นส่วนใหญ่ สำหรับผลการทำนายในช่วงดังกล่าวจนถึงแม้จะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์เช่นเดียวกันแต่เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงจะพบว่าค่าทั้งสองนั้นมีความแตกต่างกันเป็นอย่างมาก เช่น ค่าความความต้านทานการแตกหักจริงคือ $0.086 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ส่วนค่าที่ทำนายได้คือ $0.251 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ส่งผลให้เมื่อคำนวณความคลาดเคลื่อนออกมาในหน่วยของร้อยละค่าความคลาดเคลื่อนจึงมีค่าที่สูงดังที่นำเสนอข้างต้น เมื่อพิจารณาผลการทำนายของแบบจำลอง ANNs ในช่วงการทดสอบพบว่าประสิทธิภาพของการทำนายลดลงเมื่อเทียบกับช่วงฝึกสอนแบบจำลอง การลดลงของประสิทธิภาพการทำนายดังกล่าวถือเป็นพฤติกรรมปกติของวิธีปัญญาประดิษฐ์หรือแบบจำลองสำหรับการทำนายผลทั่วไปที่ประสิทธิภาพการทำนายจะลดลงเมื่อนำแบบจำลองไปใช้กับข้อมูลที่ไม่เคยเห็นมาก่อน สำหรับช่วงทดสอบของแบบจำลอง ANNs จะมีค่า R^2 เท่ากับ 0.907 ค่า MAPE และ RMSE เท่ากับ 121.992% และ 0.256 ตามลำดับ หากเปรียบเทียบตัวชี้วัดประสิทธิภาพดังกล่าวกับแบบจำลอง MRA จะพบว่าประสิทธิภาพของแบบจำลอง ANNs นั้นสูงกว่า



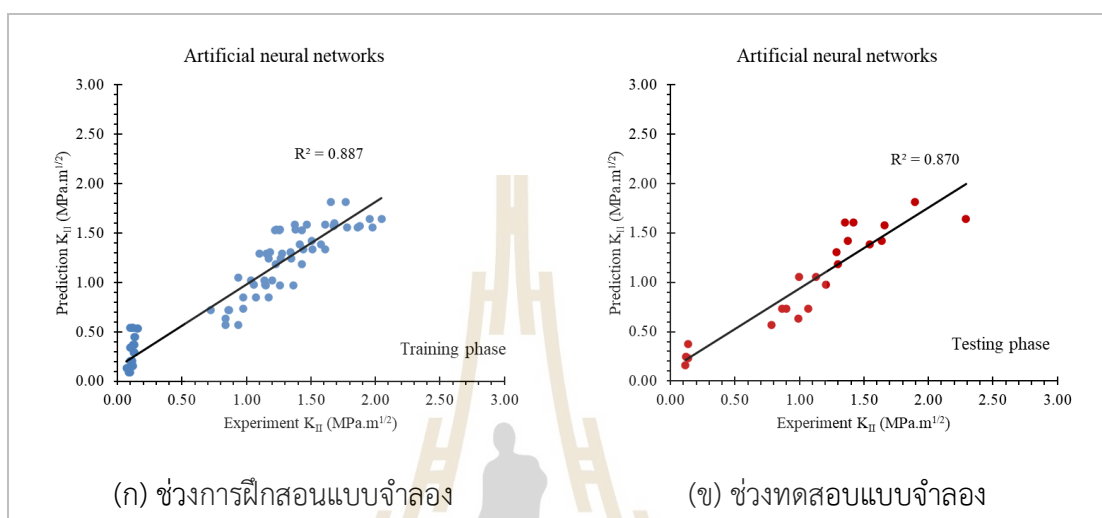
รูปที่ 4.25 ผลการทำนายความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบที่ 1 ด้วยแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม



รูปที่ 4.26 ผลการทำนายความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบที่ 1 ของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมในช่วงการฝึกสอนเทียบกับผลการทดลองจริง

รูปที่ 4.27 แสดงประสิทธิภาพการทำนายความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบที่ 2 ของแบบจำลอง ANNs ผลการทำนายแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการทำนาย (R^2) ที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับการทำนายผลของความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบที่ 1 ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวสอดคล้องกับประสิทธิภาพการทำนายของแบบจำลอง MRA ที่การทำนายผลความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบที่ 1 มีประสิทธิภาพดีกว่า สำหรับการทำนายความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบที่ 2 ในช่วงการฝึกสอนแบบจำลองจะมีค่า R^2 เท่ากับ 0.887 ค่า MAPE และ RMSE

เท่ากับ 70.957% และ 0.218 ตามลำดับ ซึ่งหากพิจารณาที่ตัวชี้วัดทั้งสอง (MAPE และ RMSE) จะพบว่าประสิทธิภาพในการทำนายที่ดีกว่าความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระรูปแบบที่ 1 สำหรับประสิทธิภาพการทำนายช่วงทดสอบแบบจำลองของความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบที่ 2 จะมีค่า R^2 เท่ากับ 0.870 ค่า MAPE และ RMSE เท่ากับ 29.455% และ 0.223 ตามลำดับ

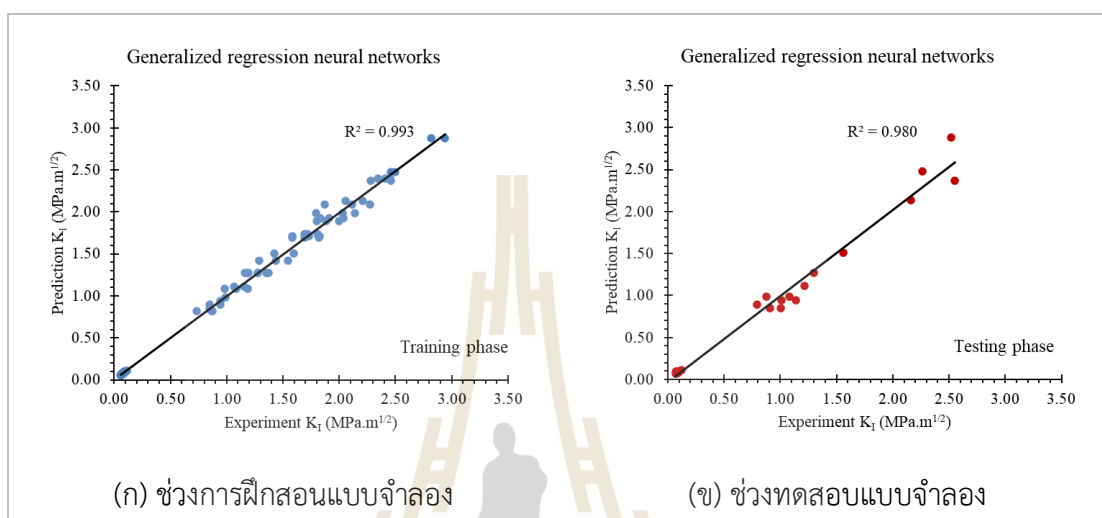


รูปที่ 4.27 ผลการทำนายความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบที่ 2 ด้วยแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม

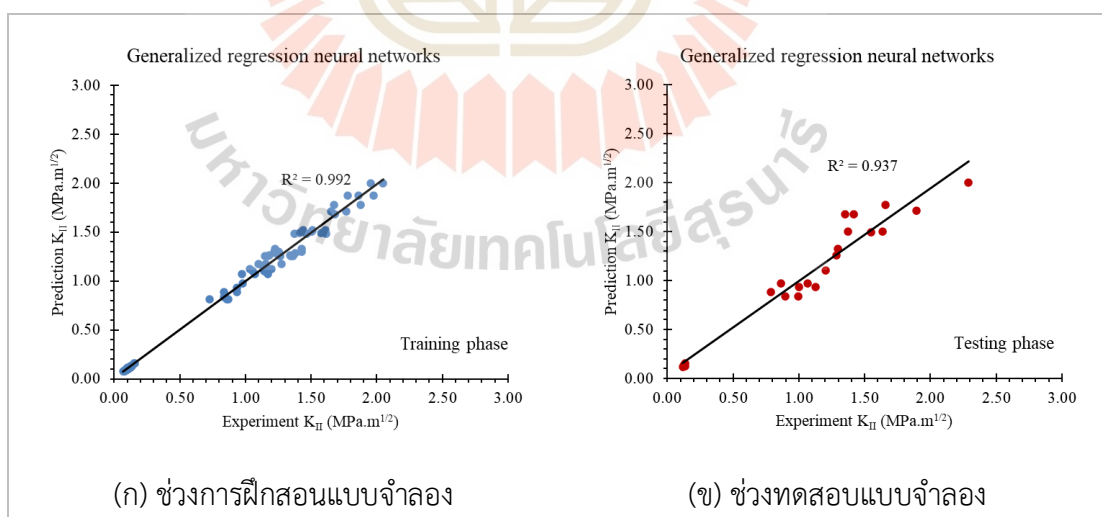
ประสิทธิภาพการทำนายผลความต้านทานการแตกหักของแบบจำลองโครงข่ายประสาทแบบถดถอยทั่วไป (GRNNs) จะแสดงไว้ดังรูปที่ 4.28 และ 4.29 ตามรูปแบบของการรับภาระตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพ (R^2) ของแบบจำลอง GRNNs กับแบบจำลอง ANNs จะพบว่าแบบจำลอง GRNNs มีประสิทธิภาพที่สูงกว่าแบบจำลอง ANNs การที่แบบจำลอง GRNNs มีประสิทธิภาพสูงกว่าเนื่องมาจากการที่แบบจำลองดังกล่าวถูกออกแบบมาให้เหมาะกับกลุ่มข้อมูลขนาดเล็ก การเรียนรู้ของแบบจำลองเป็นการอาศัยการหาระยะทางแบบยูคลิด (Euclidean distance) [16] ของข้อมูลที่ต้องการทำนายเทียบกับข้อมูลที่ใช้ฝึกสอนแบบจำลองซึ่งเป็นการเรียนรู้ที่ไม่ค่อยซับซ้อนต่างจากการเรียนรู้ของแบบจำลอง ANNs ที่อาศัยการหาความสัมพันธ์แบบถ่วงน้ำหนักในแต่ละเซลล์ประสาท (neurons) ก่อนส่งข้อมูลไปให้กับเซลล์ประสาทอื่นๆ ต่อไปซึ่งมีความซับซ้อนสูงและต้องอาศัยข้อมูลที่มากพอในการหาความสัมพันธ์ดังกล่าว

สำหรับประสิทธิภาพการทำนายความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบที่ 1 ของแบบจำลอง GRNNs (รูปที่ 4.28) จะมีค่า R^2 เท่ากับ 0.993 ขณะที่ค่า MAPE และ RMSE เท่ากับ 4.664% และ 0.071 ตามลำดับ เมื่อเปลี่ยนเข้าสู่ช่วงการทดสอบแบบจำลองประสิทธิภาพการทำนายจะลดลงเช่นเดียวกับแบบจำลองอื่นๆ โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.980 ค่า MAPE และ RMSE

เท่ากับ 10.122% และ 0.122 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการทำนายความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบที่ 2 (รูปที่ 4.29) ช่วงการฝึกสอนแบบจำลองเทียบกับช่วงทดสอบจะมีค่า R^2 เท่ากับ 0.992 และ 0.937 ค่า MAPE เท่ากับ 4.598% และ 9.934% ค่า RMSE เท่ากับ 0.058 และ 0.144 ตามลำดับ

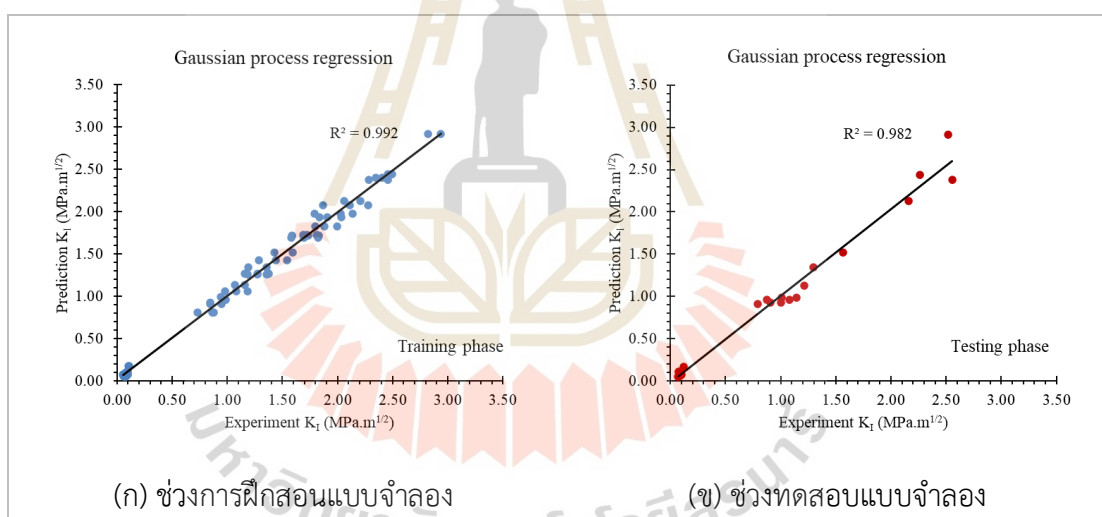


รูปที่ 4.28 ผลการทำนายความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบที่ 1 ด้วยแบบจำลองโครงข่ายประสาทแบบถดถอยทั่วไป

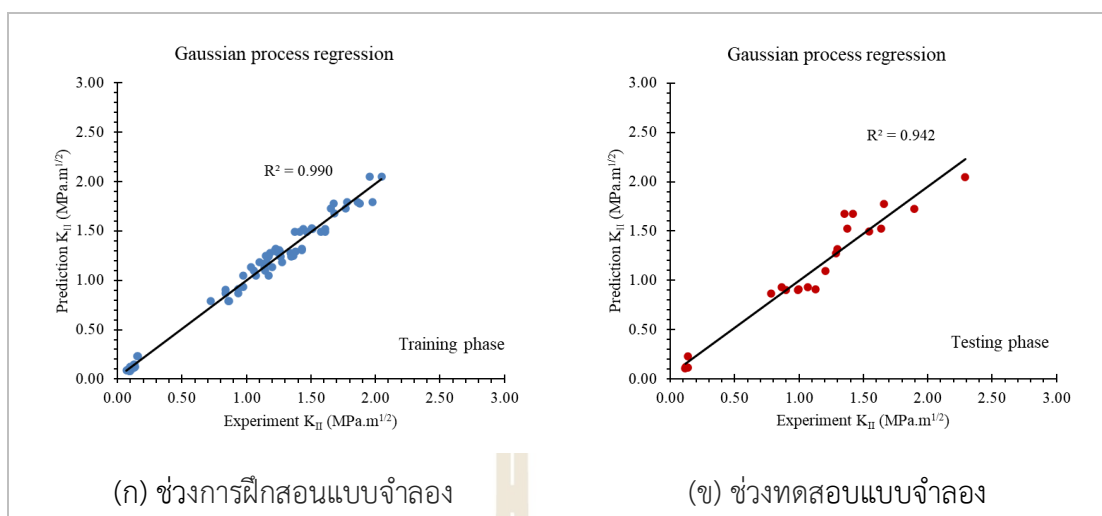


รูปที่ 4.29 ผลการทำนายความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบที่ 2 ด้วยแบบจำลองโครงข่ายประสาทแบบถดถอยทั่วไป

สำหรับประสิทธิภาพการทำนายความต้านทานการแตกหักของแบบจำลองกระบวนการถดถอยแบบเกาส์เซียน (GPR) จะแสดงดังรูปที่ 4.30 และ 4.31 ตามรูปแบบของการรับภาระตามลำดับ แบบจำลอง GPR นั้นเป็นแบบจำลองที่อาศัยข้อมูลที่มีอยู่ในการอนุมานข้อมูลหรือทำนายข้อมูลในอนาคตโดยอาศัยการกระจายตัวแบบเกาส์เซียนเข้ามาเกี่ยวข้อง [73, 74] ซึ่งวิธีการเรียนรู้จะมีความซับซ้อนที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับแบบจำลอง ANNs อีกทั้งยังถูกออกแบบมาให้เหมาะสมกับกลุ่มข้อมูลขนาดเล็กอีกด้วยจึงทำให้แบบจำลองมีประสิทธิภาพที่สูงกว่าแบบจำลอง ANNs ประสิทธิภาพการทำนายความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบที่ 1 แบบจำลอง GPR ในช่วงฝึกสอนและทดสอบแบบจำลอง (รูปที่ 4.30) จะมีค่า R^2 เท่ากับ 0.992 และ 0.982 ขณะที่ค่า MAPE เท่ากับ 9.836% และ 16.399% และค่า RMSE เท่ากับ 0.076 และ 0.117 ตามลำดับ สำหรับประสิทธิภาพการทำนายความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบที่ 2 แบบจำลอง GPR ในช่วงฝึกสอนและทดสอบ (รูปที่ 4.31) จะมีค่า R^2 เท่ากับ 0.990 และ 0.942 ขณะที่ค่า MAPE เท่ากับ 8.451% และ 11.799% และค่า RMSE เท่ากับ 0.063 และ 0.138 ตามลำดับ



รูปที่ 4.30 ผลการทำนายความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบที่ 1 ด้วยแบบจำลองกระบวนการถดถอยแบบเกาส์เซียน



รูปที่ 4.31 ผลการทำนายความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบที่ 2 ด้วยแบบจำลองกระบวนการถดถอยแบบเกาส์เซียน

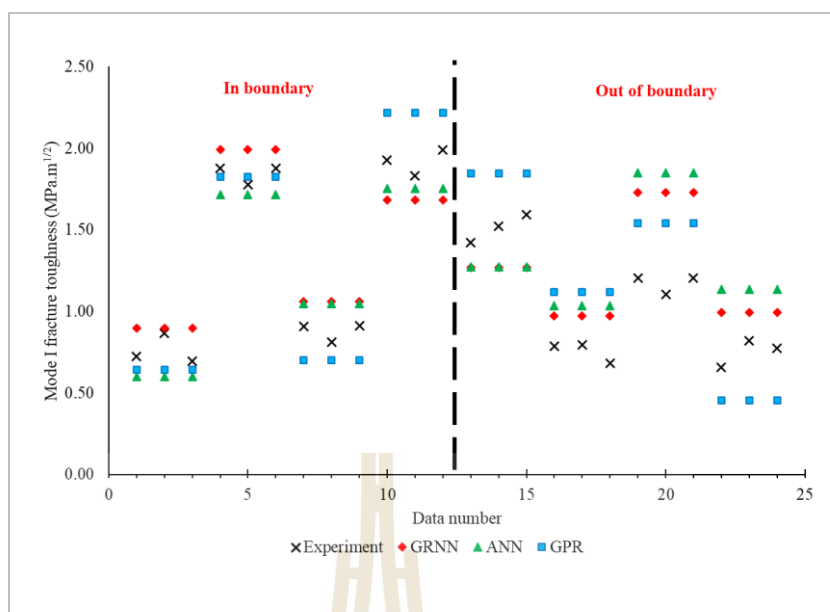
การสร้างแบบจำลองเพื่อทำนายผลลัพธ์ของปัญหาใดๆ ประสิทธิภาพของแบบจำลองมักจะสูงเมื่ออยู่ในขอบเขตของปัจจัยที่ใช้สร้างแบบจำลองและลดลงเมื่ออยู่นอกเหนือปัจจัยที่ใช้สร้างแบบจำลอง สำหรับงานวิจัยชิ้นนี้เพื่อให้การวัดประสิทธิภาพแบบจำลองครอบคลุมมากขึ้น แบบจำลองจากวิธีปัญญาประดิษฐ์จะถูกนำไปใช้ทำนายความต้านทานการแตกหักของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยไบบ์อ้อยที่เกิดจากเงื่อนไขการทดสอบที่แตกต่างจากการทดสอบในช่วงการสร้างแบบจำลอง โดยเงื่อนไขของการทดสอบดังกล่าวจะแสดงไว้ในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 เงื่อนไขการทดลองสำหรับการทำนายนอกเหนือจากปัจจัยที่ใช้สร้างแบบจำลอง

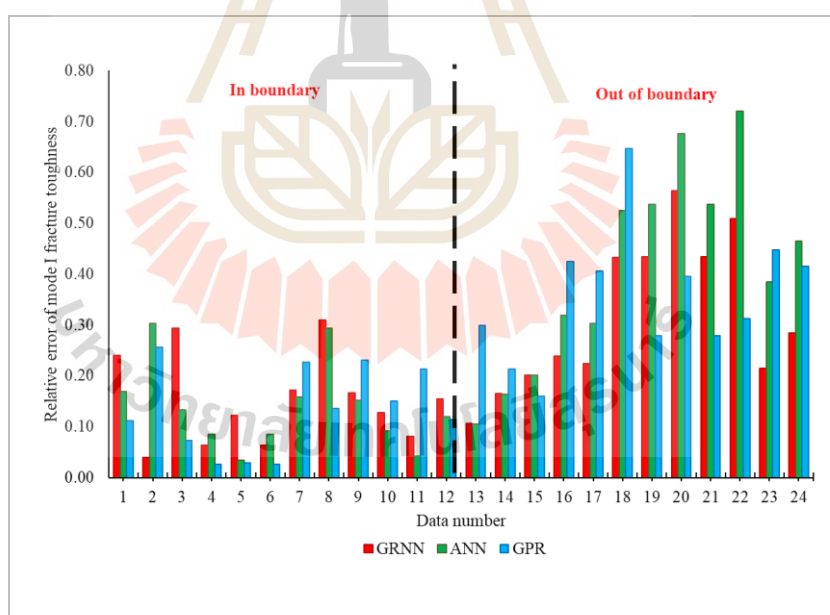
Fiber length (mm)	Mixing ratio (%wt.)	M ^e	Remark
2.0	7.50	0.3	In boundary
2.0	12.50	0.7	In boundary
3.0	7.50	0.3	In boundary
3.0	12.50	0.7	In boundary
0.5	3.00	0.5*	Out of boundary
0.5	18.00	0.5*	Out of boundary
5.0	3.00	0.5*	Out of boundary
5.0	18.00	0.5*	Out of boundary

*สำหรับตัวแปร M^e เป็นพารามิเตอร์ที่แสดงสัดส่วนการรับภาระระหว่างแบบที่ 1 และ 2 ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 1 จึงไม่สามารถทำนายนอกขอบเขตสำหรับพารามิเตอร์ดังกล่าวได้เนื่องจากนอกขอบเขตจะไม่ใช้การรับภาระแบบผสม 1 และ 2 ที่เป็นหัวข้อศึกษาของงานวิจัยชิ้นนี้

ความสัมพันธ์ระหว่างผลการทำนายความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบที่ 1 ของแบบจำลองปัญญาประดิษฐ์เทียบกับผลความต้านทานการแตกหักจากการทดลองจะแสดงดังรูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์จะแบ่งเป็นช่วงของการทำนายผลจากปัจจัยที่อยู่ในช่วงของการสร้างแบบจำลอง แต่ต่างระดับปัจจัยและการทำนายผลจากปัจจัยที่อยู่นอกเหนือขอบเขตของปัจจัยที่ใช้สร้างแบบจำลอง สำหรับการทำนายผลความต้านทานการแตกหักจากปัจจัยที่อยู่ในขอบเขตของการสร้างแบบจำลองจะพบความคลาดเคลื่อนที่ชัดเจนในช่วงของการทำนายผล โดยแบบจำลอง ANNs จะมีค่า MAPE และค่า RMSE เท่ากับ 13.895% และ 0.168 ตามลำดับ แบบจำลอง GRNNs จะมีค่า MAPE และ RMSE เท่ากับ 15.280% และ 0.191 ตามลำดับ ส่วนแบบจำลอง GPR จะมีค่า MAPE และ RMSE เท่ากับ 13.257% และ 0.194 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาความต้านทานการแตกหักจากช่วงนอกเหนือปัจจัยที่ใช้สร้างแบบจำลองจะพบว่าความคลาดเคลื่อนระหว่างผลการทำนายกับผลการทดสอบจริงเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเจน โดยแบบจำลอง ANNs จะมีค่า MAPE และค่า RMSE เท่ากับ 41.140 % และ 0.436 ตามลำดับ แบบจำลอง GRNNs จะมีค่า MAPE และ RMSE เท่ากับ 31.737% และ 0.350 ตามลำดับ ส่วนแบบจำลอง GPR จะมีค่า MAPE และ RMSE เท่ากับ 35.629% และ 0.348 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาถึงความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นกับผลการทำนายแต่ละข้อมูลดังรูปที่ 4.33 ซึ่งนำเสนอในรูปแบบของความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (Relative error) จะพบว่าความคลาดเคลื่อนส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นในช่วงของการทำนายผลนอกช่วงปัจจัยที่ใช้สร้างแบบจำลองเป็นหลัก



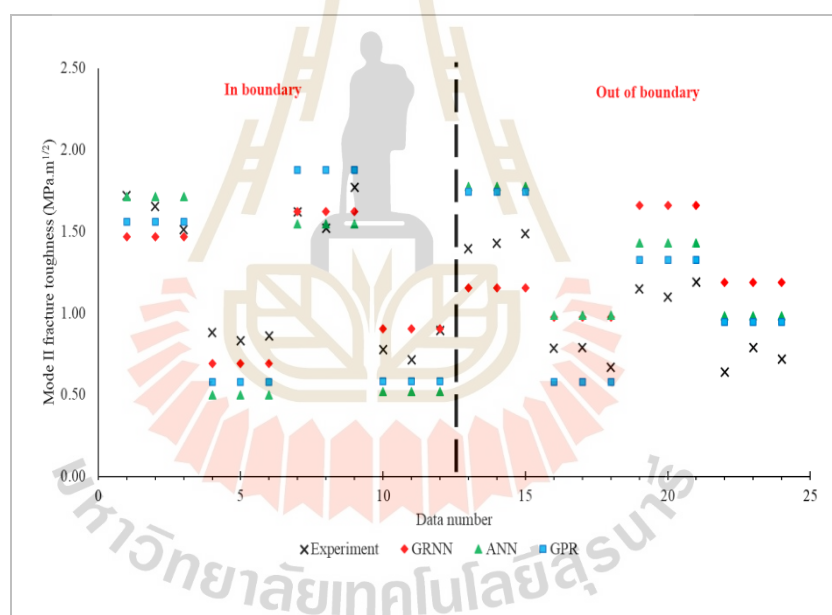
รูปที่ 4.32 ผลการทำนายความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบที่ 1 นอกเหนือปัจจัยที่ใช้สร้างแบบจำลอง



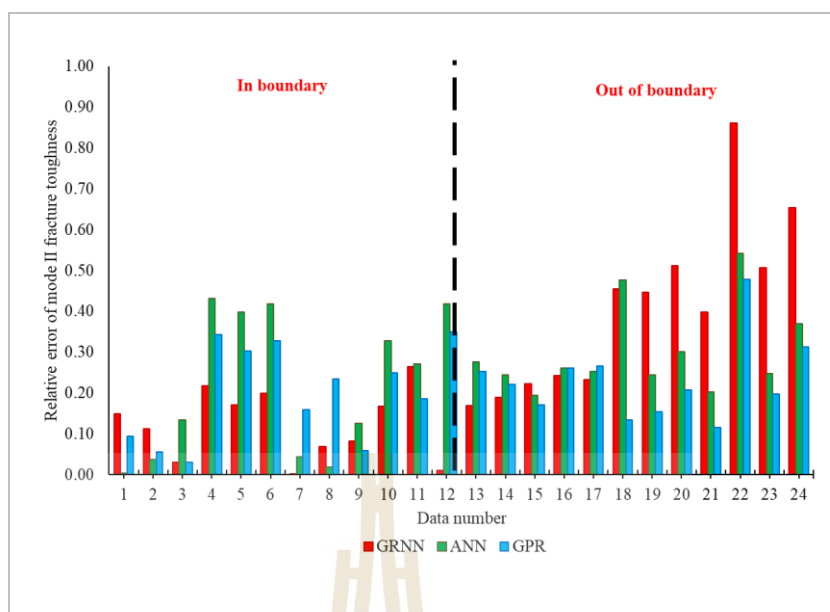
รูปที่ 4.33 ผลความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ระหว่างค่าทำนายกับค่าทดสอบจริงของความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบที่ 1

สำหรับผลการทำนายความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบที่ 2 นอกเหนือจากปัจจัยที่ใช้สร้างแบบจำลอง (รูปที่ 4.34) จะมีแนวโน้มเช่นเดียวกับการทำนายความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบที่ 1 ที่ประสิทธิภาพในการทำนายผลจะลดลงอย่างเห็นได้ชัด

และประสิทธิภาพการทำนายผลในช่วงของการสร้างแบบจำลองแต่ต่างระดับปัจจัยจะสูงกว่าการทำนายนอกเหนือช่วงปัจจัยที่ใช้สร้างแบบจำลอง ประสิทธิภาพการทำนายผลในช่วงของการสร้างแบบจำลองของแบบจำลอง ANNs จะมีค่า MAPE และ RMSE เท่ากับ 22.607% และ 0.255 ตามลำดับ แบบจำลอง GRNNs จะมีค่า MAPE และ RMSE เท่ากับ 12.382 % และ 0.151 ตามลำดับ และแบบจำลอง GPR จะมีค่า MAPE และ RMSE เท่ากับ 20.561% และ 0.233 ตามลำดับ ส่วนประสิทธิภาพการทำนายผลนอกเหนือช่วงปัจจัยที่ใช้สร้างแบบจำลองของแบบจำลอง ANNs จะมีค่า MAPE และ RMSE เท่ากับ 30.128% และ 0.290 ตามลำดับ แบบจำลอง GRNNs จะมีค่า MAPE และ RMSE เท่ากับ 40.748% และ 0.397 ตามลำดับและแบบจำลอง GPR จะมีค่า MAPE และ RMSE เท่ากับ 23.113% และ 0.233 โดยเมื่อพิจารณาความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ดังรูปที่ 4.35 จะพบว่าความคลาดเคลื่อนส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นในช่วงการทำนายนอกเหนือขอบเขตเช่นเดียวกับที่ผลการทำนายความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบที่ 1



รูปที่ 4.34 ผลการทำนายความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบที่ 2 นอกเหนือปัจจัยที่ใช้สร้างแบบจำลอง



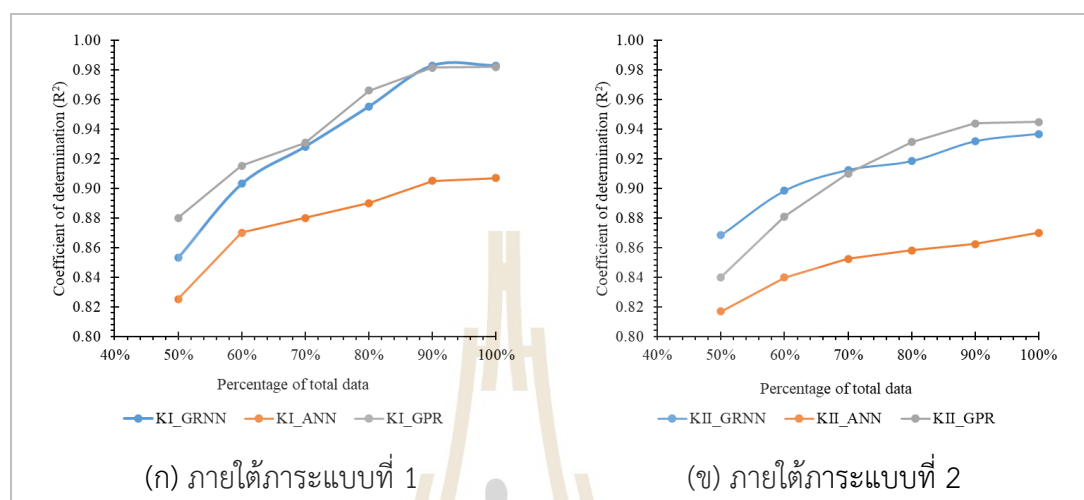
รูปที่ 4.35 ผลความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ระหว่างค่าทำนายกับค่าทดสอบจริงของความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาวะแบบที่ 2

4.3.3 การปรับปรุงประสิทธิภาพการทำนายผลของแบบจำลองปัญญาประดิษฐ์

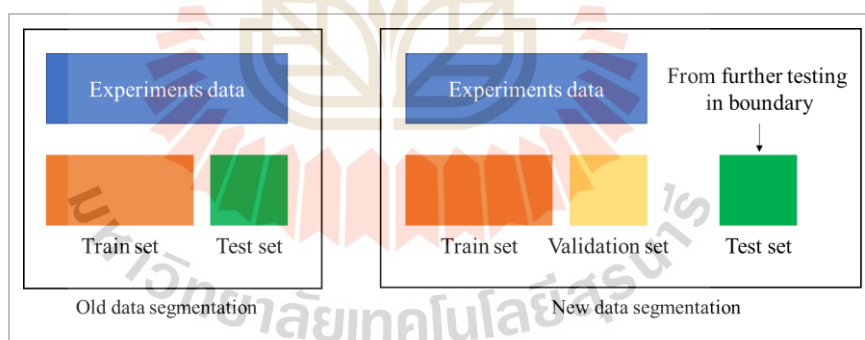
สำหรับการสร้างแบบจำลองปัญญาประดิษฐ์ด้วยการเรียนรู้แบบมีผู้ฝึกสอนนั้นถือเป็นวิธีการสร้างแบบจำลองที่ต้องการข้อมูลอย่างน้อย 10 ของระดับความอิสระของตัวแปรรับเข้าของแบบจำลอง [75] เพื่อให้แบบจำลองสามารถเกิดการเรียนรู้จากตัวอย่างของปัญหาและคำตอบของปัญหาได้ การมีข้อมูลอย่างเพียงพอจึงถือเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการสร้างแบบจำลองปัญญาประดิษฐ์สำหรับงานวิจัยขึ้นนี้ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณข้อมูลที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองปัญญาประดิษฐ์ต่อประสิทธิภาพการทำนายผลจะแสดงดังรูปที่ 4.36 ความสัมพันธ์ดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการทำนายผลที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของข้อมูลที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองมีค่ามากขึ้น การที่ประสิทธิภาพการทำนายผลแสดงพฤติกรรมดังกล่าวนี้เกิดจากการที่ข้อมูลในการสร้างแบบจำลองเพิ่มขึ้นจะช่วยให้แบบจำลองเกิดการเรียนรู้จากข้อมูลที่หลากหลายมากขึ้นนั่นเอง นอกจากนี้พฤติกรรมของประสิทธิภาพการทำนายผลยังแสดงให้เห็นถึงภาวะการลู่เข้าของประสิทธิภาพการทำนายผลที่ปริมาณข้อมูลการสร้างแบบจำลองเท่ากับร้อยละ 90 ของข้อมูลทั้งหมดเป็นต้นไป

สำหรับการทำนายผลของแบบจำลองปัญญาประดิษฐ์ทั้งสามในช่วงของการทำนายผลภายในขอบเขตของการสร้างแบบจำลองแต่ต่างระดับปัจจัยนั้นแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการทำนายผลที่ลดลงอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับการทำนายผลในระดับปัจจัยที่ใช้สร้างแบบจำลอง เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการทำนายผลในช่วงระดับปัจจัยดังกล่าวซึ่งอยู่ในขอบเขตของระดับปัจจัยที่

ค่านิ่งด้านประสิทธิภาพการทำนายผลการแบ่งข้อมูลเพื่อใช้ฝึกสอนและทดสอบจะถูกแบ่งใหม่ตามรูปที่ 4.37 โดยมีการเพิ่มชุดข้อมูลทดสอบเบื้องต้น (Validation data set) เพื่อให้แบบจำลองสามารถเกิดการเรียนรู้ได้ดียิ่งขึ้น



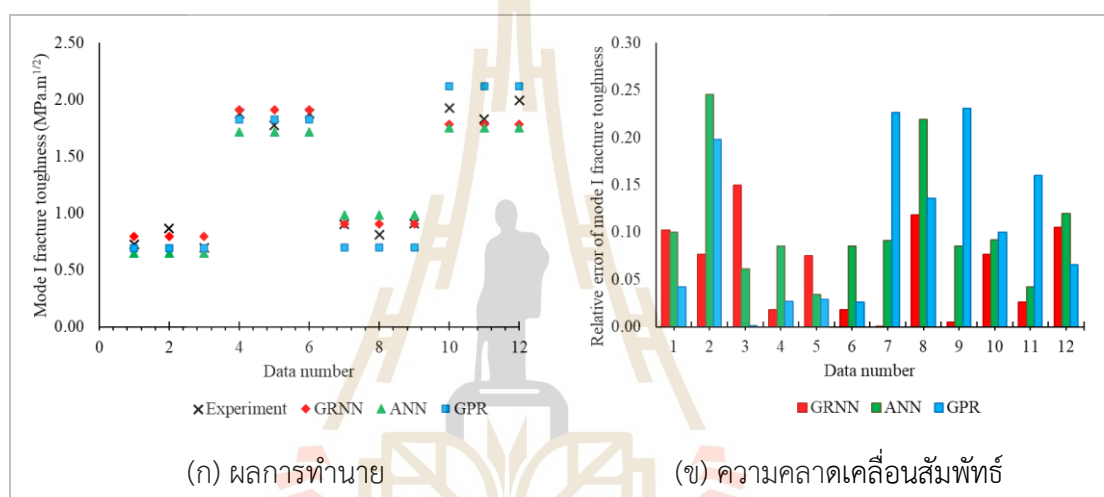
รูปที่ 4.36 ความสัมพันธ์ของจำนวนข้อมูลกับประสิทธิภาพการทำนายผลของแบบจำลองปัญหาประติษฐ์



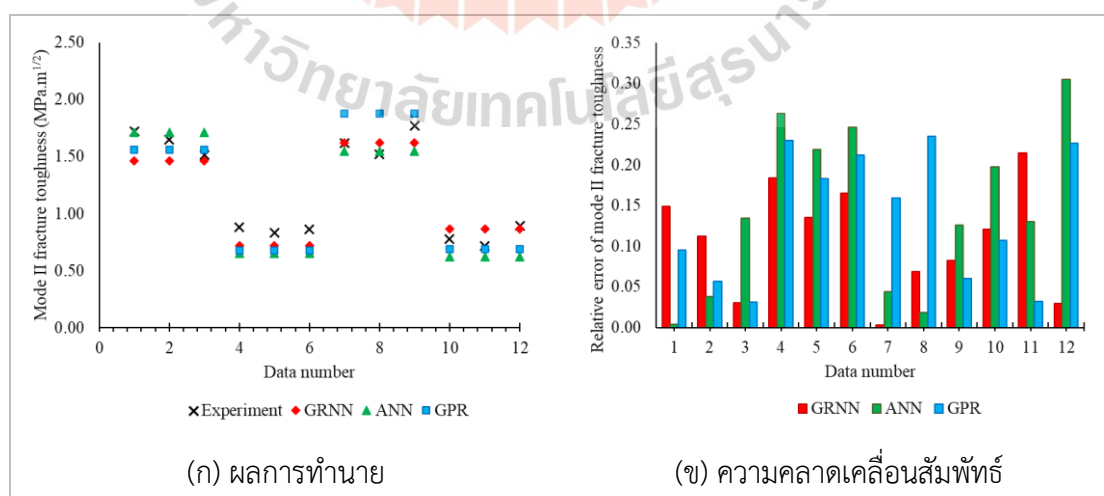
รูปที่ 4.37 การแบ่งกลุ่มข้อมูลสำหรับการปรับปรุงประสิทธิภาพแบบจำลองปัญหาประติษฐ์

การเพิ่มประสิทธิภาพการทำนายผลของแบบจำลองโดยการแบ่งกลุ่มข้อมูลใหม่ตามรูปที่ 4.37 นั้นจะวัดประสิทธิภาพในการทำนายผลของแบบจำลองทั้งสามภายในขอบเขตของการสร้างแบบจำลองแต่ต่างระดับปัจจัยเท่านั้น สำหรับผลการทำนายของแบบจำลองทั้งสามจะแสดงโดยแยกพิจารณาตามรูปแบบของการรับภาระดังรูปที่ 4.38 และ 4.39 ตามรูปแบบของการรับภาระ การทำนายผลความต้านทานการแตกหักภายใต้การรับภาระแบบที่ 1 นั้น (รูปที่ 4.38) ประสิทธิภาพการทำนายผลของแบบจำลองจะเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับประสิทธิภาพการทำนายผลก่อนการปรับปรุงประสิทธิภาพโดยแบบจำลอง ANNs จะมีค่า MAPE และ RMSE เท่ากับ 10.506% และ

0.143 ตามลำดับ แบบจำลอง GRNNs จะมีค่า MAPE และ RMSE เท่ากับ 6.413% และ 0.099 ตามลำดับ ส่วนแบบจำลอง GPR จะมีค่า MAPE และ RMSE เท่ากับ 10.336% และ 0.152 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาการทำนายผลความต้านทานการแตกหักภายใต้การรับภาระแบบที่ 2 (รูปที่ 4.39) ประสิทธิภาพการทำนายผลยังคงเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับก่อนการปรับปรุงประสิทธิภาพเช่นเดียวกับการทำนายผลความต้านทานการแตกหักภายใต้การรับภาระแบบที่ 1 โดยแบบจำลอง ANNs จะมีค่า MAPE และ RMSE เท่ากับ 14.386% และ 0.168 ตามลำดับ แบบจำลอง GRNNs จะมีค่า MAPE และ RMSE เท่ากับ 10.792% และ 0.137 ตามลำดับ ส่วนแบบจำลอง GPR จะมีค่า MAPE และ RMSE เท่ากับ 13.552% และ 0.180 ตามลำดับ



รูปที่ 4.38 ผลการทำนายความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบที่ 1 หลังการปรับปรุง



รูปที่ 4.39 ผลการทำนายความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบที่ 2 หลังการปรับปรุง

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

สำหรับงานวิจัยเรื่องการใช้ปัญญาประดิษฐ์ทำนายความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบผสม 1 และ 2 ของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยใบบัวอ้อย สามารถสรุปผลเป็นหัวข้อหลักได้ดังต่อไปนี้

5.1.1 คุณสมบัติทางกลของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยใบบัวอ้อย

อีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยใบบัวอ้อยในงานวิจัยนี้จะถูกทดสอบคุณสมบัติสองชนิดคือคุณสมบัติการรับแรงดึงและความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบผสม 1 และ 2 ผลการศึกษาคุณสมบัติการรับแรงดึงแสดงให้เห็นว่าการเสริมแรงด้วยเส้นใยใบบัวอ้อยทุกขนาดความยาวเส้นใยและสัดส่วนการผสมนั้นไม่ได้ส่งผลให้คุณสมบัติการรับแรงดึงของอีพอกซีเรซินสูงขึ้นมีเพียงขนาดความยาวเส้นใยใบบัวอ้อย 3 มิลลิเมตรที่สัดส่วนการผสมร้อยละ 5 โดยน้ำหนักเท่านั้นที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับอีพอกซีเรซินบริสุทธิ์หากพิจารณาคุณสมบัติจากการรับภาระเป็นหลัก เมื่อพิจารณาคุณสมบัติการรับแรงดึงต่อน้ำหนักของวัสดุจะพบพฤติกรรมที่ตรงกันข้ามกล่าวคือคุณสมบัติการรับแรงดึงของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยใบบัวอ้อยจะเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนในบางเงื่อนไขของการผสม (ความยาวเส้นใยใบบัวอ้อย 2 ถึง 4 มิลลิเมตรที่สัดส่วนการผสมร้อยละ 5 และ 10 โดยน้ำหนัก) เมื่อเทียบอีพอกซีเรซินบริสุทธิ์ คุณสมบัติการรับแรงดึงจะสามารถสังเกตผลกระทบที่เกิดขึ้นจากความยาวเส้นใยและสัดส่วนการผสมได้อย่างชัดเจน คุณสมบัติการรับแรงดึงจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อความยาวเส้นใยใบบัวอ้อยที่ใช้เสริมแรงเพิ่มมากขึ้นตรงกันข้ามกับพฤติกรรมของสัดส่วนการผสมที่เมื่อเพิ่มสัดส่วนการผสมมากขึ้นคุณสมบัติการรับแรงดึงจะมีค่าลดลง

สำหรับความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบผสม 1 และ 2 ของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยใบบัวอ้อยจะแสดงพฤติกรรมที่สอดคล้องกับคุณสมบัติการรับแรงดึงกล่าวคือความต้านทานการแตกหักจะมีค่ามากขึ้นเมื่อความยาวเส้นใยใบบัวอ้อยเพิ่มมากขึ้นและความต้านทานการแตกหักจะมีค่าลดลงเมื่อสัดส่วนการผสมเพิ่มขึ้น การที่คุณสมบัติทั้งสองมีพฤติกรรมต่อสัดส่วนการผสมดังกล่าวมาจากการที่เมื่อสัดส่วนการผสมมากขึ้นพฤติกรรมของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยใบบัวอ้อยมีแนวโน้มที่จะเปลี่ยนจากการแตกหักแบบเหนียวมาเป็นการแตกหักแบบเปราะนั่นเอง นอกเหนือจากผลกระทบของความยาวเส้นใยใบบัวอ้อยและสัดส่วนการผสมต่อความต้านทานการแตกหักนั้นยังมีอีกหนึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อความต้านทานการแตกหักคือพารามิเตอร์ของการรับภาระแบบผสมที่เป็นสัดส่วนของการรับภาระแบบที่ 1 และแบบที่ 2 โดยเมื่อพารามิเตอร์ของการรับภาระ

แบบผสมลดภาระที่เกิดขึ้นกับขั้นตอนสอบก่อนเกิดการแตกหักจะมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของภาระแบบเฉือนบนขั้นตอนสอบ การเสริมแรงเส้นใยใบบ่อยให้กับอีพอกซีเรซินนั้นอาจไม่ได้ทำให้คุณสมบัติดีขึ้นในทุกเงื่อนไขการผสมหากพิจารณาคุณสมบัติจากความสามารถในการรับภาระเป็นหลักแต่จะมีบางเงื่อนไขที่คุณสมบัติใกล้เคียงกับอีพอกซีเรซินบริสุทธิ์แต่หากพิจารณาในมุมของคุณสมบัติต่อน้ำหนักนั้นการเสริมแรงด้วยเส้นใยใบบ่อยมีแนวโน้มที่จะทำให้คุณสมบัติของอีพอกซีเรซินดีขึ้น การนำใบบ่อยเข้ามาใช้เสริมแรงให้กับอีพอกซีเรซินนั้นนอกจากเป็นการนำเศษเหลือทางการเกษตรมาใช้ให้เกิดประโยชน์แล้วยังเป็นการลดค่าใช้จ่ายจากการใช้เพียงอีพอกซีเรซินในการทำชิ้นส่วนหรืออุปกรณ์อีกด้วย เมื่อลองวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายที่ลดลงเมื่อผสมอีพอกซีเรซิน 1 กิโลกรัม เมื่อไม่เติมวัสดุเสริมแรงจะมีราคาเท่ากับ 780 บาท (อ้างอิงตามราคาวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย) เมื่อผสมเส้นใยใบบ่อยในสัดส่วนร้อยละ 15 โดยน้ำหนักจะสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายด้านอีพอกซีเรซินประมาณ 117 บาท สำหรับการนำใบบ่อยเข้ามาเสริมแรงให้กับอีพอกซีเรซินนั้นนับเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่น่าสนใจในกรณีที่ชิ้นส่วนหรืออุปกรณ์ที่สร้างจากวัสดุดังกล่าวไม่ได้รับภาระมากนัก

5.1.2 การทำนายความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบผสม 1 และ 2 ของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยใบบ่อย

การทำนายผลความต้านทานการแตกหักด้วยเกณฑ์การแตกหักทั้งสามแบบแสดงให้เห็นถึงผลการทำนายที่ค่อนข้างคลาดเคลื่อนเมื่อเทียบกับผลความต้านทานการแตกหักจริงที่บางเงื่อนไขการผสมของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยใบบ่อยแต่ผลการทำนายดังกล่าวยังคงสามารถใช้สำหรับการออกแบบชิ้นส่วนที่ต้องคำนึงถึงความต้านทานการแตกหักได้ ขณะที่ผลจากการทำนายด้วยวิธีปัญญาประดิษฐ์นั้นค่อนข้างมีความแม่นยำเมื่อเทียบกับผลการทำนายด้วยเกณฑ์การแตกหักในช่วงของปัจจัยที่ใช้สร้างแบบจำลอง ประสิทธิภาพของแบบจำลองปัญญาประดิษฐ์ทั้งหมดจะลดลงเล็กน้อยเมื่อใช้ทำนายความต้านทานการแตกหักที่ระดับปัจจัยแตกต่างจากที่ใช้สร้างแบบจำลองและลดลงอย่างชัดเจนเมื่อใช้ทำนายนอกเหนือช่วงของปัจจัยที่ใช้สร้างแบบจำลอง สำหรับแบบจำลองปัญญาประดิษฐ์ทั้งสามแบบที่เลือกศึกษานั้นหากเปรียบเทียบตามตัวชี้วัดประสิทธิภาพจะสามารถเรียงลำดับความสามารถในการทำนายผลจากน้อยไปมากได้ดังนี้คือ แบบจำลองโครงข่ายประสาทแบบถดถอยทั่วไป (GRNNs) แบบจำลองกระบวนการถดถอยแบบเกาส์เซียน (GPR) และแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม (ANNs) ตามลำดับ

5.2 ข้อเสนอแนะ

สำหรับคุณสมบัติภายใต้การรับแรงดึงและความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบผสม 1 และ 2 ของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยใบบ่อยในงานวิจัยชิ้นนี้จะใช้วิธีการขึ้นรูปด้วยการเทอีพอกซีเรซินใส่ในเส้นใยใบบ่อยที่เตรียมไว้โน้มน้ำแล้ว การเตรียมวัสดุเสริมแรงด้วยวิธีอื่นเช่น การกวนผสม กระบวนการที่ทำด้วยมือ (Hand lay-up) เป็นต้น อาจทำให้คุณสมบัติทั้งสองและปริมาณ

ของไปอ้อยสูงสุดที่สามารถเสริมแรงให้กับอีพอกซีเรซินได้นั้นเปลี่ยนไป สำหรับการทำนายด้วยวิธี
ปัญหาประติศาสตร์ที่มีข้อมูลสำหรับการสร้างและทดสอบแบบจำลองน้อยกว่าหรือมากกว่านี้อาจ
ส่งผลให้ประสิทธิภาพที่วัดได้ของแบบจำลองเปลี่ยนไปจากที่รายงานในงานวิจัยฉบับนี้



รายการอ้างอิง

- [1] Coelho, R.D., et al., Effect of water stress on renewable energy from sugarcane biomass, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 103 (2019) 399-407.
- [2] Battle, E.A.O., et al., Energy, economic, and environmental assessment of the integrated production of palm oil biodiesel and sugarcane ethanol, *Journal of Cleaner Production*. (2021) 127638.
- [3] Ribeiro Filho, S.L.M., et al., Impact of hybrid composites based on rubber tyres particles and sugarcane bagasse fibres, *Composites Part B: Engineering*. 159 (2019) 157-164.
- [4] Madhoushi, M., et al., Influence of spherical-shaped carbon nanoparticles on the mechanical properties of a foamed sugarcane bagasse/polypropylene composite, *Industrial Crops and Products*. 172 (2021) 114041.
- [5] Bartos, A., et al., Effect of fiber attrition, particle characteristics and interfacial adhesion on the properties of PP/sugarcane bagasse fiber composites, *Polymer Testing*. 98 (2021) 107189.
- [6] Mulinari, D.R., et al., Sugarcane bagasse cellulose/HDPE composites obtained by extrusion, *Composites Science and Technology*. 69 (2009) 214-219.
- [7] Yadav, S.K.J., A. Vedrtnam, and D. Gunwant, Experimental and numerical study on mechanical behavior and resistance to natural weathering of sugarcane leave reinforced polymer composite, *Construction and Building Materials*. 262 (2020) 120785.
- [8] Bartos, A., et al., Biobased PLA/sugarcane bagasse fiber composites: Effect of fiber characteristics and interfacial adhesion on properties, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 143 (2021) 106273.
- [9] Anderson, T.L., *Fracture mechanics: fundamentals and applications*. 2017: CRC press.
- [10] Libos, I.L.S. and L. Cui, Effects of curing time, cement content, and saturation state on mode-I fracture toughness of cemented paste backfill, *Engineering Fracture Mechanics*. 235 (2020) 107174.

- [11] León, N., A. Martínez, and M. Maspocho, Notch effect on the linear elastic fracture mechanics values of a polysulfone thermoplastic polymer, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 114 (2021) 102995.
- [12] Rabczuk, T. and T. Belytschko, Cracking particles: a simplified meshfree method for arbitrary evolving cracks, *International journal for numerical methods in engineering*. 61 (2004) 2316-2343.
- [13] Areias, P., et al., Effective 2D and 3D crack propagation with local mesh refinement and the screened Poisson equation, *Engineering Fracture Mechanics*. 189 (2018) 339-360.
- [14] Poapongsakorn, P., et al., Time-dependent fracture of epoxy resin under mixed-mode I/III loading, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 106 (2020) 102445.
- [15] Hamdia, K.M., et al., Predicting the fracture toughness of PNCs: A stochastic approach based on ANN and ANFIS, *Computational Materials Science*. 102 (2015) 304-313.
- [16] Qiao, L., Y. Liu, and J. Zhu, Application of generalized regression neural network optimized by fruit fly optimization algorithm for fracture toughness in a pearlitic steel, *Engineering Fracture Mechanics*. 235 (2020) 107105.
- [17] Wiangkham, A., A. Ariyarat, and P. Aengchuan, Prediction of the mixed mode I/II fracture toughness of PMMA by an artificial intelligence approach, *Theor. Appl. Fract. Mech*. 112 (2021) 102910.
- [18] Hsu, Y.-C., C.-H. Yu, and M.J. Buehler, Using deep learning to predict fracture patterns in crystalline solids, *Matter*. 3 (2020) 197-211.
- [19] Alipour, M., et al., Characterizing fracture toughness using machine learning, *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 200 (2021) 108202.
- [20] Jones, K., Barnabas Gikonyo (Ed.): *Sugarcane as Biofuel Feedstock: Advances Towards a Sustainable Energy Solution*, (2015), Springer.
- [21] O'Hara, I. and S. Mundree, *Sugarcane-based biofuels and bioproducts*. 2016: John Wiley & Sons.
- [22] Neapolitan, R.E. and X. Jiang, *Artificial intelligence: With an introduction to machine learning*. 2018: CRC Press.
- [23] สวางนस्थ्य, ป., *Artificial Intelligence with Machine Learning*, (2019).

- [24] El-Tayeb, N., A study on the potential of sugarcane fibers/polyester composite for tribological applications, *Wear*. 265 (2008) 223-235.
- [25] Candido, V.S., et al., Toughness of polyester matrix composites reinforced with sugarcane bagasse fibers evaluated by Charpy impact tests, *Journal of Materials Research and Technology*. 6 (2017) 334-338.
- [26] Ramlee, N.A., J. Naveen, and M. Jawaid, Potential of oil palm empty fruit bunch (OPEFB) and sugarcane bagasse fibers for thermal insulation application–A review, *Construction and Building Materials*. (2020) 121519.
- [27] Sangnark, A. and A. Noomhorm, Effect of particle sizes on functional properties of dietary fibre prepared from sugarcane bagasse, *Food chemistry*. 80 (2003) 221-229.
- [28] Wirawan, R. and S. Sapuan, Sugarcane Bagasse-Filled Poly (Vinyl Chloride) Composites: A Review, *Natural Fibre Reinforced Vinyl Ester and Vinyl Polymer Composites*. (2018) 157-168.
- [29] Vigneshwaran, S., et al., Recent advancement in the natural fiber polymer composites: A comprehensive review, *Journal of Cleaner Production*. (2020) 124109.
- [30] ASTM D6683-19, Standard Test Method for Measuring Bulk Density Values of Powders and Other Bulk Solids as Function of Compressive Stress, *ASTM International*, West Conshohocken, PA. (2019). 10.1520/D6683-19.
- [31] Ugochukwu, S., et al., Influence of distilled water and alkaline solution on the scratch resistance properties of Napier fibre filled epoxy (NFFE) composites, *Journal of Materials Research and Technology*. 9 (2020) 14412-14424.
- [32] Ridzuan, M., et al., Effect of pineapple leaf (PALF), napier, and hemp fibres as filler on the scratch resistance of epoxy composites, *Journal of Materials Research and Technology*. 8 (2019) 5384-5395.
- [33] Marques, B., et al., Vibro-acoustic behaviour of polymer-based composite materials produced with rice husk and recycled rubber granules, *Construction and Building Materials*. 264 (2020) 120221.
- [34] JA, M.H., et al., Mechanical properties of Napier grass fibre/polyester composites, *Composite Structures*. 136 (2016) 1-10.

- [35] Chauhan, S.S., N.K. Maurya, and S.P. Dwivedi, Effect of particle size and weight percent of different wood dust on the tensile strength of glass fiber Epoxy/Saw dust composite using RSM, *Materials Today: Proceedings*. (2021).
- [36] Yeh, S.-K., et al., Effect of fiber size, cyclic moisture absorption and fungal decay on the durability of natural fiber composites, *Construction and Building Materials*. 286 (2021) 122819.
- [37] Naguib, H.M., et al., Effect of fiber loading on the mechanical and physical properties of “green” bagasse–polyester composite, *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*. 8 (2015) 544-548.
- [38] Panaitescu, D.M., et al., Effect of hemp fiber length on the mechanical and thermal properties of polypropylene/SEBS/hemp fiber composites, *Journal of Materials Research and Technology*. 9 (2020) 10768-10781.
- [39] Ariawan, D., et al., Micromechanical analysis on tensile properties prediction of discontinuous randomized zalacca fibre/high-density polyethylene composites under critical fibre length, *Theoretical and Applied Mechanics Letters*. 10 (2020) 57-65.
- [40] Tang, Q., L. Fang, and W. Guo, Effects of bamboo fiber length and loading on mechanical, thermal and pulverization properties of phenolic foam composites, *Journal of Bioresources and Bioproducts*. 4 (2019) 51-59.
- [41] Kumar, K.S., et al., Synergy of fiber length and content on free vibration and damping behavior of natural fiber reinforced polyester composite beams, *Materials & Design (1980-2015)*. 56 (2014) 379-386.
- [42] Zappalorto, M., M. Salviato, and M. Quaresimin, Mixed mode (I+ II) fracture toughness of polymer nanoclay nanocomposites, *Engineering Fracture Mechanics*. 111 (2013) 50-64.
- [43] Mousavi, A., M. Aliha, and D. Imani, Effects of biocompatible Nanofillers on mixed-mode I and II fracture toughness of PMMA base dentures, *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*. 103 (2020) 103566.
- [44] Mousavi, S., M. Aliha, and D. Imani, On the use of edge cracked short bend beam specimen for PMMA fracture toughness testing under mixed-mode I/II, *Polymer Testing*. 81 (2020) 106199.

- [45] Aliha, M., S. Shaker, and M. Keymanesh, Low temperature fracture toughness study for bitumen under mixed mode I+ II loading condition, *Engineering Fracture Mechanics*. 206 (2019) 297-309.
- [46] Roy, D.G., T. Singh, and J. Kodikara, Predicting mode-I fracture toughness of rocks using soft computing and multiple regression, *Measurement*. 126 (2018) 231-241.
- [47] Balcioğlu, H.E. and A.Ç. Seçkin, Comparison of machine learning methods and finite element analysis on the fracture behavior of polymer composites, *Archive of Applied Mechanics*. 91 (2021) 223-239.
- [48] Cabral, M.R., et al., Evaluation of pre-treatment efficiency on sugarcane bagasse fibers for the production of cement composites, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 18 (2018) 1092-1102.
- [49] Helaili, S., M. Chafra, and Y. Chevalier. Natural fiber alfa/epoxy randomly reinforced composite mechanical properties identification. in *Structures*. 2021. Elsevier.
- [50] ASTM D3039/D3039M-17, Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA. (2017).
- [51] Chougan, M., et al., Wheat straw pre-treatments using eco-friendly strategies for enhancing the tensile properties of bio-based polylactic acid composites, *Industrial Crops and Products*. 155 (2020) 112836.
- [52] ASTM D5045, Standard Test Methods for Plane-Strain Fracture Toughness and Strain Energy Release Rate of Plastic Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA. (2014).
- [53] Wei, M. and F. Dai, Laboratory-scale mixed-mode I/II fracture tests on columnar saline ice, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 114 (2021) 102982.
- [54] Lazzarin, P. and R. Zambardi, A finite-volume-energy based approach to predict the static and fatigue behavior of components with sharp V-shaped notches, *International journal of fracture*. 112 (2001) 275-298.
- [55] Lazzarin, P. and F. Berto, Some expressions for the strain energy in a finite volume surrounding the root of blunt V-notches, *International journal of fracture*. 135 (2005) 161-185.

- [56] Aliha, M., et al., Mixed mode I/II fracture investigation of Perspex based on the averaged strain energy density criterion, *Physical Mesomechanics*. 20 (2017) 149-156.
- [57] Foti, P., M.R. Ayatollahi, and F. Berto, Rapid strain energy density evaluation for V-notches under mode I loading conditions, *Engineering Failure Analysis*. 110 (2020) 104361.
- [58] Richard, H., Safety estimation for construction units with cracks under complex loading, *International Journal of Materials and Product Technology*. 3 (1988) 326-338.
- [59] Richard, H., M. Fulland, and M. Sander, Theoretical crack path prediction, *Fatigue & fracture of engineering materials & structures*. 28 (2005) 3-12.
- [60] Richard, H., B. Schramm, and N.-H. Schirmeisen, Cracks on mixed mode loading—theories, experiments, simulations, *International Journal of Fatigue*. 62 (2014) 93-103.
- [61] Marr, B., *Artificial intelligence in practice: how 50 successful companies used AI and machine learning to solve problems*. 2019: John Wiley & Sons.
- [62] Marquardt, D., An algorithm for least square estimation of parameters, *J. Soc. Ind. Appl. Math*. 11 (1963) 431-441.
- [63] Yu, H. and B.M. Wilamowski, Levenberg–marquardt training, in *Intelligent systems*. 2018, CRC Press. p. 12-11-12-16.
- [64] Specht, D.F., A general regression neural network, *IEEE transactions on neural networks*. 2 (1991) 568-576.
- [65] Wiangkham, A., A. Ariyarit, and P. Aengchuan, Prediction of the influence of loading rate and sugarcane leaves concentration on fracture toughness of sugarcane leaves and epoxy composite using artificial intelligence, *Theor. Appl. Fract. Mech*. 117 (2022) 103188.
- [66] Lu, Y.-Z., et al., Extremal optimization: Fundamentals, algorithms, and applications, *Journal of Process Control*. 16 (2016) 795-808.
- [67] Biswas, S., S. Kindo, and A. Patnaik, Effect of fiber length on mechanical behavior of coir fiber reinforced epoxy composites, *Fibers and Polymers*. 12 (2011) 73-78.

- [68] Peltola, H., et al., Experimental study of fiber length and orientation in injection molded natural fiber/starch acetate composites, *Advances in materials science and engineering*. 2011 (2011).
- [69] Venkateshwaran, N., A. ElayaPerumal, and M. Jagatheeshwaran, Effect of fiber length and fiber content on mechanical properties of banana fiber/epoxy composite, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 30 (2011) 1621-1627.
- [70] Lamon, J., *Properties of Characteristics of SiC and SiC/SiC Composites*, (2019), Elsevier.
- [71] Geboes, Y., et al., The translaminar fracture toughness of high-performance polymer fibre composites and their carbon fibre hybrids, *Composites Science and Technology*. 221 (2022) 109307.
- [72] Lewis, C.D., *Industrial and business forecasting methods: A practical guide to exponential smoothing and curve fitting*. 1982: Butterworth-Heinemann.
- [73] Ma, X., F. Xu, and B. Chen, Interpolation of wind pressures using Gaussian process regression, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 188 (2019) 30-42.
- [74] Pensoneault, A., X. Yang, and X. Zhu, Nonnegativity-enforced Gaussian process regression, *Theoretical and Applied Mechanics Letters*. 10 (2020) 182-187.
- [75] Dorfman, E. *How Much Data Is Required for Machine Learning?* 2022; Available from: <https://postindustria.com/how-much-data-is-required-for-machine-learning/#:~:text=The%20most%20common%20way%20to,of%20freedom%20a%20model%20has>.



ภาคผนวก ก

ผลการทดสอบคุณสมบัติของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยใบบัว

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ก.1 ผลการทดสอบแรงดึงของอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยไบอ้อย

Fiber length (mm)	Mixing ratio (%)	Yield strength (MPa)		Tensile strength (MPa)		Modulus of elasticity (MPa)	
		Mean	SD.	Mean	SD.	Mean	SD.
1.00	5.00	27.94	3.49	33.94	3.49	408.76	22.33
1.00	10.00	24.94	0.87	25.30	0.87	420.55	25.11
1.00	15.00	19.20	1.54	19.76	2.33	457.32	27.67
2.00	5.00	29.86	2.55	35.86	2.90	460.67	20.45
2.00	10.00	25.55	1.96	27.67	2.99	500.45	19.76
2.00	15.00	21.33	2.11	21.80	2.08	515.77	21.22
3.00	5.00	31.97	1.49	39.97	1.49	470.11	34.68
3.00	10.00	28.24	2.26	30.47	3.02	528.23	18.72
3.00	15.00	21.40	1.95	21.63	2.23	570.78	27.84
4.00	5.00	30.06	2.86	33.02	1.56	505.00	26.45
4.00	10.00	27.72	1.76	28.66	2.22	481.00	19.86
4.00	15.00	21.30	3.11	21.96	1.89	521.61	21.01

ตารางที่ ก.2 ผลการทดสอบความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบผสมที่ขนาด 1 มิลลิเมตร

Fiber length (mm)	Mixing ratio (%wt.)	M^e	K_I (MPa.m ^{1/2})		K_{II} (MPa.m ^{1/2})	
			Mean	SD.	Mean	SD.
1	5	0.0	0.079	0.009	1.484	0.173
		0.5	1.270	0.107	1.257	0.106
		1.0	2.086	0.203	0.111	0.011
	10	0.0	0.070	0.006	1.300	0.111
		0.5	0.980	0.102	0.970	0.101
		1.0	1.714	0.122	0.092	0.007
	15	0.0	0.060	0.004	1.123	0.082
		0.5	0.824	0.080	0.816	0.080
		1.0	1.423	0.128	0.076	0.007

ตารางที่ ก.3 ผลการทดสอบความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาวะแบบผสมที่ขนาด 2 มิลลิเมตร

Fiber length (mm)	Mixing ratio (%wt.)	M ^e	K _I (MPa.m ^{1/2})		K _{II} (MPa.m ^{1/2})	
			Mean	SD.	Mean	SD.
2	5	0.0	0.095	0.006	1.773	0.120
		0.5	1.527	0.090	1.512	0.089
		1.0	2.431	0.137	0.130	0.007
	10	0.0	0.080	0.007	1.504	0.132
		0.5	1.146	0.073	1.135	0.073
		1.0	2.142	0.077	0.114	0.004
	15	0.0	0.071	0.005	1.318	0.103
		0.5	0.918	0.079	0.909	0.078
		1.0	1.739	0.062	0.093	0.003

ตารางที่ ก.4 ผลการทดสอบความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาวะแบบผสมที่ขนาด 3 มิลลิเมตร

Fiber length (mm)	Mixing ratio (%wt.)	M ^e	K _I (MPa.m ^{1/2})		K _{II} (MPa.m ^{1/2})	
			Mean	SD.	Mean	SD.
3	5	0.0	0.112	0.009	2.097	0.174
		0.5	1.893	0.100	1.704	0.099
		1.0	2.759	0.217	0.147	0.012
	10	0.0	0.093	0.007	1.737	0.122
		0.5	1.272	0.088	1.259	0.088
		1.0	2.401	0.053	0.128	0.003
	15	0.0	0.079	0.006	1.484	0.120
		0.5	1.083	0.101	1.072	0.100
		1.0	1.926	0.103	0.103	0.006

ตารางที่ ก.5 ผลการทดสอบความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาวะแบบผสมที่ขนาด 4 มิลลิเมตร

Fiber length (mm)	Mixing ratio (%wt.)	M ^e	K _I (MPa.m ^{1/2})		K _{II} (MPa.m ^{1/2})	
			Mean	SD.	Mean	SD.
4	5	0.0	0.081	0.005	1.520	0.086
		0.5	1.282	0.083	1.269	0.082
		1.0	2.406	0.124	0.129	0.007
	10	0.0	0.069	0.004	1.288	0.078
		0.5	1.030	0.100	1.020	0.099
		1.0	1.988	0.176	0.106	0.009
	15	0.0	0.063	0.005	1.176	0.090
		0.5	0.861	0.078	0.853	0.077
		1.0	1.698	0.121	0.091	0.006

ภาคผนวก ข

ผลการทำนายความต้านทานการแตกหักภายใต้ภาระแบบผสม 1 และ 2

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ข.1 ผลการทำนายด้วยเกณฑ์การแตกหักของเส้นใยไป้อยขนาด 1 มิลลิเมตร

Fiber length 1 mm, Mixing ratio 5 %wt.												
	M ^e	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0.0
GMTS	K _I	2.18	2.11	1.89	1.54	1.20	1.11	0.91	0.69	0.41	0.21	0.01
	K _{II}	0.13	0.38	0.68	0.90	1.02	1.04	1.09	1.13	1.17	1.21	1.22
Richard	K _I	2.17	2.07	1.81	1.51	1.23	1.16	0.98	0.77	0.49	0.26	0.01
	K _{II}	0.13	0.37	0.65	0.88	1.05	1.09	1.17	1.27	1.40	1.49	1.58
ASED	K _I	2.24	2.17	2.00	1.72	1.43	1.34	1.14	0.88	0.53	0.27	0.01
	K _{II}	0.13	0.39	0.72	1.01	1.21	1.26	1.36	1.45	1.53	1.56	1.57
Fiber length 1 mm, Mixing ratio 10 %wt.												
	M ^e	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0.0
GMTS	K _I	1.81	0.11	1.80	0.11	1.86	0.11	1.81	0.11	1.80	0.11	1.86
	K _{II}	1.75	0.31	1.73	0.31	1.81	0.32	1.75	0.31	1.73	0.31	1.81
Richard	K _I	1.57	0.56	1.53	0.55	1.68	0.60	1.57	0.56	1.53	0.55	1.68
	K _{II}	1.28	0.75	1.29	0.75	1.47	0.86	1.28	0.75	1.29	0.75	1.47
ASED	K _I	1.00	0.85	1.06	0.90	1.23	1.04	1.00	0.85	1.06	0.90	1.23
	K _{II}	0.94	0.88	1.00	0.94	1.16	1.09	0.94	0.88	1.00	0.94	1.16
Fiber length 1 mm, Mixing ratio 15 %wt.												
	M ^e	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0.0
GMTS	K _I	1.52	0.09	1.52	0.09	1.56	0.09	1.52	0.09	1.52	0.09	1.56
	K _{II}	1.47	0.26	1.45	0.26	1.52	0.27	1.47	0.26	1.45	0.26	1.52
Richard	K _I	1.31	0.47	1.30	0.47	1.42	0.51	1.31	0.47	1.30	0.47	1.42
	K _{II}	1.08	0.63	1.10	0.64	1.25	0.73	1.08	0.63	1.10	0.64	1.25
ASED	K _I	0.86	0.73	0.91	0.77	1.06	0.90	0.86	0.73	0.91	0.77	1.06
	K _{II}	0.80	0.75	0.86	0.81	1.00	0.94	0.80	0.75	0.86	0.81	1.00

ตารางที่ ข.2 ผลการทำนายด้วยเกณฑ์การแตกหักของเส้นใยไป้อยขนาด 2 มิลลิเมตร

Fiber length 2 mm, Mixing ratio 5 %wt.												
	M ^e	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0.0
GMTS	K _I	2.52	2.44	2.19	1.77	1.37	1.27	1.04	0.78	0.46	0.24	0.01
	K _{II}	0.15	0.44	0.79	1.04	1.16	1.19	1.24	1.29	1.32	1.36	1.37
Richard	K _I	2.52	2.40	2.11	1.76	1.44	1.36	1.16	0.91	0.57	0.31	0.02
	K _{II}	0.15	0.43	0.76	1.03	1.23	1.27	1.38	1.50	1.65	1.76	1.87
ASED	K _I	2.59	2.52	2.32	2.01	1.67	1.58	1.34	1.03	0.63	0.32	0.02
	K _{II}	0.15	0.45	0.84	1.18	1.42	1.48	1.60	1.71	1.81	1.85	1.86

ตารางที่ ข.3 ผลการทำนายด้วยเกณฑ์การแตกหักของเส้นใยไป้อยขนาด 2 มิลลิเมตร (ต่อ)

Fiber length 2 mm, Mixing ratio 10 %wt.												
	M ^e	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0.0
GMTS	K _I	2.23	2.17	1.94	1.57	1.21	1.12	0.92	0.69	0.40	0.21	0.01
	K _{II}	0.13	0.39	0.70	0.92	1.03	1.05	1.09	1.13	1.16	1.20	1.20
Richard	K _I	2.23	2.12	1.85	1.54	1.25	1.18	1.00	0.78	0.49	0.26	0.01
	K _{II}	0.13	0.38	0.67	0.90	1.06	1.10	1.19	1.29	1.42	1.51	1.60
ASED	K _I	2.29	2.23	2.04	1.76	1.45	1.37	1.16	0.89	0.54	0.28	0.01
	K _{II}	0.13	0.40	0.74	1.03	1.24	1.28	1.38	1.47	1.55	1.58	1.59

Fiber length 2 mm, Mixing ratio 15 %wt.												
	M ^e	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0.0
GMTS	K _I	1.93	1.87	1.68	1.36	1.06	0.98	0.80	0.60	0.36	0.18	0.01
	K _{II}	0.11	0.34	0.60	0.80	0.90	0.92	0.96	1.00	1.03	1.06	1.06
Richard	K _I	1.93	1.82	1.58	1.30	1.05	0.99	0.83	0.65	0.41	0.22	0.01
	K _{II}	0.11	0.33	0.57	0.76	0.89	0.92	0.99	1.07	1.17	1.24	1.31
ASED	K _I	1.98	1.92	1.75	1.49	1.22	1.14	0.96	0.74	0.44	0.23	0.01
	K _{II}	0.12	0.34	0.63	0.87	1.04	1.07	1.15	1.22	1.28	1.30	1.31

ตารางที่ ข.4 ผลการทำนายด้วยเกณฑ์การแตกหักของเส้นใยไป้อยขนาด 3 มิลลิเมตร

Fiber length 3 mm, Mixing ratio 5 %wt.												
	M ^e	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0.0
GMTS	K _I	2.95	2.86	2.56	2.06	1.59	1.47	1.20	0.89	0.52	0.27	0.01
	K _{II}	0.17	0.51	0.92	1.21	1.35	1.38	1.43	1.48	1.51	1.55	1.55
Richard	K _I	2.93	2.76	2.37	1.93	1.55	1.45	1.23	0.95	0.59	0.32	0.02
	K _{II}	0.17	0.49	0.85	1.13	1.32	1.36	1.46	1.57	1.71	1.81	1.90
ASED	K _I	3.02	2.92	2.63	2.22	1.80	1.68	1.41	1.07	0.64	0.33	0.02
	K _{II}	0.18	0.52	0.95	1.30	1.53	1.58	1.68	1.78	1.85	1.89	1.90

Fiber length 3 mm, Mixing ratio 10 %wt.												
	M ^e	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0.0
GMTS	K _I	2.49	0.15	2.48	0.15	2.56	0.15	2.49	0.15	2.48	0.15	2.56
	K _{II}	2.41	0.43	2.37	0.42	2.49	0.45	2.41	0.43	2.37	0.42	2.49
Richard	K _I	2.16	0.78	2.08	0.75	2.29	0.83	2.16	0.78	2.08	0.75	2.29
	K _{II}	1.75	1.03	1.73	1.02	1.98	1.16	1.75	1.03	1.73	1.02	1.98
ASED	K _I	1.36	1.15	1.42	1.21	1.65	1.40	1.36	1.15	1.42	1.21	1.65
	K _{II}	1.26	1.18	1.34	1.25	1.55	1.45	1.26	1.18	1.34	1.25	1.55

ตารางที่ ข.5 ผลการทำนายด้วยเกณฑ์การแตกหักของเส้นใยไป้อยขนาด 3 มิลลิเมตร (ต่อ)

Fiber length 3 mm, Mixing ratio 15 %wt.												
	M^e	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0.0
GMTS	K_I	2.02	1.96	1.75	1.42	1.10	1.02	0.83	0.62	0.37	0.19	0.01
	K_{II}	0.12	0.35	0.63	0.83	0.93	0.95	0.99	1.03	1.06	1.09	1.09
Richard	K_I	2.01	1.93	1.72	1.45	1.19	1.13	0.96	0.76	0.48	0.26	0.01
	K_{II}	0.12	0.35	0.62	0.85	1.01	1.06	1.15	1.25	1.38	1.48	1.58
ASED	K_I	2.07	2.02	1.88	1.64	1.38	1.31	1.11	0.87	0.53	0.27	0.01
	K_{II}	0.12	0.36	0.68	0.96	1.18	1.22	1.33	1.43	1.52	1.56	1.57

ตารางที่ ข.6 ผลการทำนายด้วยเกณฑ์การแตกหักของเส้นใยไป้อยขนาด 4 มิลลิเมตร

Fiber length 4 mm, Mixing ratio 5 %wt.												
	M^e	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0.0
GMTS	K_I	2.50	2.42	2.16	1.75	1.36	1.26	1.03	0.78	0.46	0.24	0.01
	K_{II}	0.15	0.43	0.78	1.03	1.16	1.18	1.23	1.28	1.32	1.36	1.36
Richard	K_I	2.49	2.34	2.01	1.63	1.31	1.23	1.04	0.81	0.50	0.27	0.01
	K_{II}	0.15	0.42	0.72	0.96	1.12	1.15	1.24	1.33	1.45	1.53	1.62
ASED	K_I	2.56	2.47	2.23	1.88	1.53	1.43	1.20	0.91	0.55	0.28	0.01
	K_{II}	0.15	0.44	0.80	1.10	1.30	1.34	1.43	1.51	1.57	1.60	1.61

Fiber length 4 mm, Mixing ratio 10 %wt.												
	M^e	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0.0
GMTS	K_I	2.08	2.01	1.80	1.47	1.15	1.07	0.88	0.66	0.40	0.21	0.01
	K_{II}	0.12	0.36	0.65	0.86	0.98	1.00	1.05	1.10	1.14	1.18	1.19
Richard	K_I	2.07	1.95	1.69	1.38	1.12	1.05	0.88	0.69	0.43	0.23	0.01
	K_{II}	0.12	0.35	0.61	0.81	0.95	0.98	1.05	1.14	1.24	1.31	1.38
ASED	K_I	2.13	2.06	1.87	1.58	1.29	1.21	1.02	0.78	0.47	0.24	0.01
	K_{II}	0.13	0.37	0.67	0.93	1.10	1.14	1.21	1.29	1.35	1.37	1.38

Fiber length 4 mm, Mixing ratio 15 %wt.												
	M^e	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0.0
GMTS	K_I	1.79	1.73	1.55	1.27	0.99	0.92	0.75	0.57	0.34	0.18	0.01
	K_{II}	0.11	0.31	0.56	0.74	0.84	0.86	0.90	0.94	0.97	1.01	1.02
Richard	K_I	1.79	1.70	1.48	1.23	1.00	0.94	0.80	0.62	0.39	0.21	0.01
	K_{II}	0.10	0.30	0.53	0.72	0.85	0.88	0.95	1.03	1.13	1.20	1.27
ASED	K_I	1.84	1.79	1.63	1.40	1.16	1.09	0.92	0.71	0.43	0.22	0.01
	K_{II}	0.11	0.32	0.59	0.82	0.99	1.02	1.10	1.17	1.23	1.26	1.27

ตารางที่ ข.7 ชุดข้อมูลสำหรับการฝึกสอนแบบจำลองปัญญาประดิษฐ์

Ratio (%wt.)	Length (mm)	M^e	K_I (MPa.m ^{1/2})	K_{II} (MPa.m ^{1/2})	Ratio (%wt.)	Length (mm)	M^e	K_I (MPa.m ^{1/2})	K_{II} (MPa.m ^{1/2})
15.0	3.0	0.0	0.08	1.46	5.0	2.0	0.5	1.42	1.41
10.0	4.0	1.0	2.03	0.11	15.0	2.0	0.0	0.07	1.23
5.0	1.0	1.0	1.87	0.10	5.0	1.0	0.5	1.27	1.26
15.0	3.0	0.5	1.08	1.07	5.0	3.0	1.0	2.94	0.16
10.0	4.0	1.0	2.14	0.11	10.0	3.0	1.0	2.45	0.13
15.0	3.0	1.0	2.04	0.11	5.0	3.0	0.0	0.11	2.05
10.0	4.0	0.0	0.07	1.38	5.0	1.0	0.5	1.16	1.15
15.0	4.0	0.0	0.07	1.27	5.0	3.0	0.5	1.88	1.86
15.0	1.0	0.5	0.87	0.86	10.0	4.0	0.0	0.07	1.23
15.0	4.0	0.0	0.06	1.16	5.0	3.0	1.0	2.82	0.15
15.0	4.0	0.0	0.06	1.10	10.0	3.0	0.5	1.27	1.26
5.0	2.0	1.0	2.46	0.13	10.0	3.0	1.0	2.41	0.13
15.0	2.0	1.0	1.81	0.10	15.0	4.0	1.0	1.82	0.10
5.0	2.0	1.0	2.28	0.12	5.0	4.0	0.0	0.09	1.61
10.0	1.0	1.0	1.58	0.08	10.0	2.0	0.5	1.16	1.15
15.0	1.0	1.0	1.54	0.08	10.0	1.0	0.5	0.99	0.98
15.0	4.0	1.0	1.58	0.08	10.0	2.0	1.0	2.21	0.12
15.0	1.0	1.0	1.44	0.08	5.0	1.0	0.5	1.37	1.36
5.0	4.0	0.5	1.19	1.18	15.0	1.0	0.5	0.88	0.87
10.0	1.0	1.0	1.73	0.09	5.0	2.0	0.0	0.09	1.77
5.0	1.0	1.0	2.11	0.11	5.0	4.0	1.0	2.46	0.13
5.0	4.0	0.5	1.36	1.34	10.0	1.0	0.0	0.07	1.25
5.0	4.0	0.0	0.08	1.44	15.0	4.0	0.5	0.95	0.94
15.0	2.0	1.0	1.72	0.09	10.0	4.0	1.0	1.79	0.10
15.0	3.0	1.0	1.91	0.10	15.0	4.0	1.0	1.69	0.09
15.0	1.0	0.5	0.73	0.72	15.0	3.0	0.5	0.98	0.97
15.0	2.0	0.0	0.08	1.43	15.0	3.0	1.0	1.83	0.10
15.0	3.0	0.0	0.09	1.61	5.0	2.0	0.0	0.09	1.65
5.0	2.0	0.5	1.59	1.58	15.0	4.0	0.5	0.85	0.84
5.0	4.0	0.0	0.08	1.51	5.0	3.0	0.5	1.80	1.78
10.0	1.0	0.0	0.07	1.22	10.0	4.0	0.0	0.07	1.26
10.0	4.0	0.5	0.94	0.93	15.0	3.0	0.0	0.07	1.37
10.0	3.0	0.0	0.09	1.68	10.0	3.0	0.0	0.10	1.88
5.0	3.0	0.0	0.10	1.95	10.0	1.0	1.0	1.83	0.10
15.0	2.0	1.0	1.69	0.09	5.0	3.0	0.5	2.00	1.98
15.0	2.0	0.5	0.85	0.84	15.0	1.0	0.0	0.06	1.03

ตารางที่ ข.8 ชุดข้อมูลสำหรับการฝึกสอนแบบจำลองปัญญาประดิษฐ์ (ต่อ)

Ratio (%wt.)	Length (mm)	M ^e	K _I (MPa.m ^{1/2})	K _{II} (MPa.m ^{1/2})	Ratio (%wt.)	Length (mm)	M ^e	K _I (MPa.m ^{1/2})	K _{II} (MPa.m ^{1/2})
15.0	3.0	0.5	1.18	1.17	10.0	2.0	0.0	0.08	1.50
10.0	2.0	0.5	1.07	1.06	5.0	1.0	1.0	2.27	0.12
15.0	1.0	1.0	1.29	0.07	10.0	3.0	1.0	2.35	0.13
5.0	1.0	0.0	0.09	1.68	5.0	4.0	1.0	2.49	0.13
15.0	1.0	0.0	0.06	1.20	10.0	3.0	0.5	1.36	1.35
10.0	2.0	1.0	2.06	0.11	15.0	1.0	0.0	0.06	1.14
10.0	3.0	0.5	1.18	1.17	10.0	1.0	0.0	0.08	1.43

ตารางที่ ข.9 ชุดข้อมูลสำหรับการทดสอบแบบจำลองปัญญาประดิษฐ์

Ratio (%wt.)	Length (mm)	M ^e	K _I (MPa.m ^{1/2})	K _{II} (MPa.m ^{1/2})	Ratio (%wt.)	Length (mm)	M ^e	K _I (MPa.m ^{1/2})	K _{II} (MPa.m ^{1/2})
5.0	2.0	0.0	0.10	1.89	5.0	1.0	0.0	0.08	1.42
10.0	2.0	1.0	2.16	0.12	15.0	2.0	0.5	1.00	0.99
15.0	2.0	0.0	0.07	1.30	5.0	2.0	0.5	1.56	1.55
5.0	1.0	0.0	0.07	1.35	5.0	4.0	1.0	2.26	0.12
10.0	1.0	0.5	1.08	1.07	10.0	2.0	0.0	0.07	1.37
10.0	2.0	0.0	0.09	1.64	10.0	3.0	0.0	0.09	1.66
10.0	4.0	0.5	1.14	1.13	10.0	1.0	0.5	0.87	0.87
15.0	2.0	0.5	0.91	0.90	5.0	4.0	0.5	1.30	1.29
5.0	2.0	1.0	2.55	0.14	10.0	2.0	0.5	1.21	1.20
15.0	4.0	0.5	0.79	0.78	5.0	3.0	0.0	0.12	2.29
10.0	4.0	0.5	1.01	1.00	5.0	3.0	1.0	2.52	0.13

ตารางที่ ข.10 ผลการทำนายด้วยแบบจำลอง Multiple regression analysis

Ratio (%wt.)	Length (mm)	M ^e	K _I (MPa.m ^{1/2})	K _{II} (MPa.m ^{1/2})	Ratio (%wt.)	Length (mm)	M ^e	K _I (MPa.m ^{1/2})	K _{II} (MPa.m ^{1/2})
5.0	2.0	0.0	0.29	2.25	5.0	1.0	0.0	-0.10	1.83
10.0	2.0	1.0	1.78	1.06	15.0	2.0	0.5	0.90	1.69
15.0	2.0	0.0	0.21	1.74	5.0	2.0	0.5	1.31	2.03
5.0	1.0	0.0	-0.10	1.83	5.0	4.0	1.0	2.89	1.39
10.0	1.0	0.5	0.67	1.44	10.0	2.0	0.0	0.25	2.00
10.0	2.0	0.0	0.25	2.00	10.0	3.0	0.0	0.55	2.21
10.0	4.0	0.5	1.73	2.09	10.0	1.0	0.5	0.67	1.44
15.0	2.0	0.5	0.90	1.69	5.0	4.0	0.5	1.94	2.26
5.0	2.0	1.0	2.16	1.15	10.0	2.0	0.5	1.11	1.86

ตารางที่ ข.11 ผลการทำนายด้วยแบบจำลอง Multiple regression analysis (ต่อ)

Ratio (%wt.)	Length (mm)	M ^e	K _I (MPa.m ^{1/2})	K _{II} (MPa.m ^{1/2})	Ratio (%wt.)	Length (mm)	M ^e	K _I (MPa.m ^{1/2})	K _{II} (MPa.m ^{1/2})
15.0	4.0	0.5	1.53	1.92	5.0	3.0	0.0	0.59	2.46
10.0	4.0	0.5	1.73	2.09	5.0	3.0	1.0	2.56	1.37

ตารางที่ ข.12 ผลการทำนายด้วยแบบจำลอง Artificial neural networks

Ratio (%wt.)	Length (mm)	M ^e	K _I (MPa.m ^{1/2})	K _{II} (MPa.m ^{1/2})	Ratio (%wt.)	Length (mm)	M ^e	K _I (MPa.m ^{1/2})	K _{II} (MPa.m ^{1/2})
5.0	2.0	0.0	-0.10	1.82	5.0	1.0	0.0	0.37	1.60
10.0	2.0	1.0	2.14	0.16	15.0	2.0	0.5	1.01	0.63
15.0	2.0	0.0	0.35	1.19	5.0	2.0	0.5	1.16	1.38
5.0	1.0	0.0	0.37	1.60	5.0	4.0	1.0	2.60	0.24
10.0	1.0	0.5	1.00	0.73	10.0	2.0	0.0	0.41	1.42
10.0	2.0	0.0	0.41	1.42	10.0	3.0	0.0	-0.11	1.57
10.0	4.0	0.5	0.91	1.05	10.0	1.0	0.5	1.00	0.73
15.0	2.0	0.5	1.01	0.73	5.0	4.0	0.5	1.54	1.31
5.0	2.0	1.0	2.21	0.37	10.0	2.0	0.5	1.04	0.98
15.0	4.0	0.5	1.23	0.57	5.0	3.0	0.0	0.14	1.64
10.0	4.0	0.5	0.91	1.05	5.0	3.0	1.0	2.17	0.23

ตารางที่ ข.13 ผลการทำนายด้วยแบบจำลอง Generalized regression neural networks

Ratio (%wt.)	Length (mm)	M ^e	K _I (MPa.m ^{1/2})	K _{II} (MPa.m ^{1/2})	Ratio (%wt.)	Length (mm)	M ^e	K _I (MPa.m ^{1/2})	K _{II} (MPa.m ^{1/2})
5.0	2.0	0.0	0.10	1.89	5.0	1.0	0.0	0.08	1.42
10.0	2.0	1.0	2.16	0.12	15.0	2.0	0.5	1.00	0.99
15.0	2.0	0.0	0.07	1.30	5.0	2.0	0.5	1.56	1.55
5.0	1.0	0.0	0.07	1.35	5.0	4.0	1.0	2.26	0.12
10.0	1.0	0.5	1.08	1.07	10.0	2.0	0.0	0.07	1.37
10.0	2.0	0.0	0.09	1.64	10.0	3.0	0.0	0.09	1.66
10.0	4.0	0.5	1.14	1.13	10.0	1.0	0.5	0.87	0.87
15.0	2.0	0.5	0.91	0.90	5.0	4.0	0.5	1.30	1.29
5.0	2.0	1.0	2.55	0.14	10.0	2.0	0.5	1.21	1.20
15.0	4.0	0.5	0.79	0.78	5.0	3.0	0.0	0.12	2.29
10.0	4.0	0.5	1.01	1.00	5.0	3.0	1.0	2.52	0.13

ตารางที่ ข.14 ผลการทำนายด้วยแบบจำลอง Gaussian process regression

Ratio (%wt.)	Length (mm)	M^e	K_I (MPa.m ^{1/2})	K_{II} (MPa.m ^{1/2})	Ratio (%wt.)	Length (mm)	M^e	K_I (MPa.m ^{1/2})	K_{II} (MPa.m ^{1/2})
5.0	2.0	0.0	0.10	1.89	5.0	1.0	0.0	0.08	1.42
10.0	2.0	1.0	2.16	0.12	15.0	2.0	0.5	1.00	0.99
15.0	2.0	0.0	0.07	1.30	5.0	2.0	0.5	1.56	1.55
5.0	1.0	0.0	0.07	1.35	5.0	4.0	1.0	2.26	0.12
10.0	1.0	0.5	1.08	1.07	10.0	2.0	0.0	0.07	1.37
10.0	2.0	0.0	0.09	1.64	10.0	3.0	0.0	0.09	1.66
10.0	4.0	0.5	1.14	1.13	10.0	1.0	0.5	0.87	0.87
15.0	2.0	0.5	0.91	0.90	5.0	4.0	0.5	1.30	1.29
5.0	2.0	1.0	2.55	0.14	10.0	2.0	0.5	1.21	1.20
15.0	4.0	0.5	0.79	0.78	5.0	3.0	0.0	0.12	2.29
10.0	4.0	0.5	1.01	1.00	5.0	3.0	1.0	2.52	0.13





ภาคผนวก ค

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา

Attasit Wiangkham, Atthaphon Ariyarat, Prasert Aengchuan. (2021). **Prediction of the mixed mode I/II fracture toughness of PMMA by an artificial intelligence approach.** Theoretical and Applied Fracture Mechanics. Volume 112. April 2021. Article number 102910. 10 Pages.

Attasit Wiangkham, Atthaphon Ariyarat, Prasert Aengchuan. (2022). **Prediction of the influence of loading rate and sugarcane leaves concentration on fracture toughness of sugarcane leaves and epoxy composite using artificial intelligence.** Theoretical and Applied Fracture Mechanics. Volume 117. February 2022. Article number 103188. 11 Pages.

Attasit Wiangkham, Prasert Aengchuan., Atthaphon Ariyarat. (2022). **Artificial intelligence predictions effect of loading rate, crack width and crack length ratio on mode I fracture toughness of PMMA.** The 5th International Conference on Material Engineering Research. Incheon National University, Incheon, South Korea during April 15-17, 2022.



Contents lists available at ScienceDirect

Theoretical and Applied Fracture Mechanics

journal homepage: www.elsevier.com/locate/tafmec

Prediction of the mixed mode I/II fracture toughness of PMMA by an artificial intelligence approach

Attasit Wiangkham^a, Athaphon Ariyakit^b, Prasert Aengchuan^{a,*}

^a School of Manufacturing Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Muang, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand

^b School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Muang, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand

ARTICLE INFO

Keywords:
Mixed mode I/II
Artificial intelligence
Fracture toughness

ABSTRACT

Artificial intelligence is playing an increasing role in materials testing, whether it is in a new material design, designing new testing methods, or creating a model to predict materials properties. In this research, the artificial intelligence was from an artificial neural network (ANN) and an adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS), which was applied to predict mixed mode I/II fracture toughness of polymethyl methacrylate material (PMMA). The predictive modeling was based on the factors of thickness, width, crack length to width ratio of the specimen, and mode mixity angle. The training, validation, and testing process of the model used a total of 96 data points per factor. The efficiency of the ANN model in the modeling process, R^2 , MSE and MAPE, was 0.9905, 0.0859, and 4.7911 for mode I fracture toughness and 0.9848, 0.0161 and 4.1994 for mode II fracture toughness. The efficiency of the ANFIS model in the modeling process, R^2 , MSE and MAPE, for mode I fracture toughness was 0.9953, 0.0415, and 3.2601, while for mode II fracture toughness was 0.9894, 0.0112, and 3.0894. The model application is used to predict the fracture toughness at different levels of factors from the modeling process, with results showing that the fracture toughness from the prediction model is slightly different from the experimental values.

1. Introduction

Nowadays, polymer materials have an increasing role in human life, whether in terms of daily life, the industrial sector, the medical sector, the construction sector, the agricultural sector, or even in the food sector. Polymer materials play a greater role due to their easy formability, light weight, abrasion and corrosion resistance, while some polymers can even be used to replace human body parts. Polymethyl methacrylate (PMMA) is one of the most popular polymer materials. Due to its relatively good mechanical properties, clear appearance, and light weight, it can be applied in a wide variety of applications. Hence, PMMA is often used as a component of engineering tools, at the laboratory testing scale, etc.

PMMA materials for engineering applications are sometimes found to be damaged before the design load for use through forming difficulties, cracks or inhomogeneity occurring in the part. For engineering parts where cracks are likely to occur during use, fracture mechanics is one field to be considered during the design process. Fracture mechanics is the field of mechanics concerned with crack propagation in the material. The fracture mechanics indicates the severity of the crack on the

material during load with several parameters for instance, stress intensity factor (K), strain energy release rate (G), crack tip opening distance (CTOD), or the direction/behavior of the crack growth on materials, etc. The above parameters all represent the fracture toughness of the material. The fracture toughness is divided according to the direction of the load acting on the crack i.e. mode I (opening mode) load was applied in the normal direction to the crack plane, mode II (shearing mode) load was applied in-plane shear direction to the crack plane and mode III (tearing mode) load was applied in the out-of-plane shear direction to the crack plane [1]. In actual use, there is a high probability that parts will suffer mixed mode loads. For the determination of the fracture toughness, various methods can be used, depending on the type of loading direction on the crack plane. In the case of pure mode I loading, fracture parameters can be calculated by the standard equation, while, in the cases of mixed mode loading i.e. mixed mode I/II, I/III, and II/III [2–9], fracture toughness may be calculated by a classical computational method (pure mathematics or the finite element method). The fracture toughness was calculated by classical computational methods [10,11], and requires advanced mathematical skill. It also takes a lot of computation time and is based on limited computing

* Corresponding author.

E-mail address: prasert.a@sut.ac.th (P. Aengchuan).

<https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2021.102910>

Received 8 October 2020; Received in revised form 14 December 2020; Accepted 12 January 2021

Available online 18 January 2021

0167-8442/© 2021 Elsevier Ltd. All rights reserved.



Contents lists available at ScienceDirect

Theoretical and Applied Fracture Mechanics

journal homepage: www.elsevier.com/locate/tafmec

Prediction of the influence of loading rate and sugarcane leaves concentration on fracture toughness of sugarcane leaves and epoxy composite using artificial intelligence

Attasit Wiangkham^a, Atthaphon Ariyari^b, Prasert Aengchuan^{a,*}^a School of Manufacturing Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Muang, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand^b School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Muang, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand

ARTICLE INFO

Keywords:

Sugarcane leaves
Fracture toughness
Artificial neural network
Generalized regression neural network
Gaussian process regression

ABSTRACT

Nowadays, agricultural waste is one of the most common types of waste in the world. In Thailand, one of the most popular types of agriculture is sugarcane farming. Sugarcane farming produces waste from harvesting or processing such as bagasse, leaves, etc. Many researchers have tried to make waste from the agricultural sector become useful, whether using it as a renewable fuel or mixed into new material. To use mixed agricultural waste to make new composite materials for advanced engineering, one factor to consider is the fracture toughness of the composite. The fracture toughness of a material can be calculated in many ways, whether by testing a real material, finite element analysis, or prediction with predictive equations. This research uses the artificial intelligence methods that have become popular over the years to create a model to predict the fracture toughness of sugarcane leaves composites, one of the wastes generated from sugarcane farming. The model was used to predict the fracture toughness of sugarcane leaves and epoxy composite influenced by leaf concentration (%wt.) and loading rate (mm/min). The modeling uses three different artificial intelligence models i.e., Artificial neural network, Generalized regression neural network and Gaussian process regression using data from a limited number of 27 data. The prediction result in the testing period showed the ANN model had an R^2 of 0.8818, a MAPE of 3.40%, and an RMSE of 0.0876. The GRNN model had an R^2 of 0.9192, a MAPE of 2.81%, and an RMSE of 0.0738. The GPR model had an R^2 of 0.9085, a MAPE of 3.41 and an RMSE of 0.0773. As for the confirmation of the prediction model, it was found that the performance of the three models declined as the level of the predictive factors changed, but the performance remained within the acceptable range.

1. Introduction

Nowadays, the world has reached an era of more advanced technological developments. There are many industrial factories in many countries around the world. However, although the proportion of the industrial sector is high in many countries, most countries still have a relatively large share of agricultural operations compared to the proportion of domestic industries. In today's society, people are starting to pay more attention to environmental protection. Various methods have been tried to ensure that our planet is the least polluted it can be, so that humans can continue to live comfortably on it. As a majority of the population has become more interested in the environment, this has resulted in more systematic waste management in the world, whether it is industrial waste that responds to more advanced human technology or

agricultural waste that meets human resource needs. Systematic waste management consists of several methods such as optimizing production or cultivation to reduce waste that will occur at the beginning of the process, reprocessing waste from production or cultivation processes to make them more valuable than conventional disposal, etc. In the next part of this research, only the waste generated from the agricultural sector will be discussed.

As for the agricultural sector, it occupies some portion of each country's GDP, and each country has a different type of farming with diverse purposes, whether it is to be used as food, making fuel, or making clothing, etc. In 2020, Thailand's agricultural sector is estimated at 8% of the country's GDP, according to data from the Ministry of Agriculture and Cooperatives of Thailand. The types of the agricultural sectors are diverse, with sugarcane farming being one of the popular

* Corresponding authors.

E-mail address: prasert.a@sut.ac.th (P. Aengchuan).<https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2021.103188>

Received 19 July 2021; Received in revised form 14 October 2021; Accepted 17 November 2021

Available online 20 November 2021

0167-8442/© 2021 Elsevier Ltd. All rights reserved.

Artificial intelligence predictions effect of loading rate, crack width and crack length ratio on mode I fracture toughness of PMMA

ATTASIT WIANGKHAM^{1, a}, PRASERT AENGCHUAN^{1, b*}, ATTHAPHON ARIYARIT^{2, c}

^{1, 2}School of Manufacturing Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Muang, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand

³School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Muang, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand

^aattasitwk@gmail.com, ^bprasert.a@sut.ac.th, ^cariyarit@sut.ac.th

Abstract. Present, artificial intelligence methods play a huge role in solving complex engineering problems such as the fracture toughness of materials, which is one of the parameters to be considered for engineering design. Fracture toughness tests can be prepared materials and test configured in a variety of ways, resulting in different fracture toughness depending on the preparation method. In this study, fracture toughness of PMMA under the effect of loading rate is one of the testing configs that can be adjusted according to the actual load characteristics of the material and the crack geometry (crack width and crack length ratio) according to crack preparation to test specimens and the effect of these factors was predicted with generalized regression neural network (GRNN) and Gaussian processes regression (GPR) models which are one of the artificial intelligence models, compared to traditional fracture toughness predictions. The results showed that artificial intelligence prediction was able to more accurately predict the effect of the factors studied on the fracture toughness of PMMA compared to the traditional fracture toughness prediction.

Keyword: Crack width, Fracture toughness, ASED, GRNN, GPR

1. Introduction

Present, artificial intelligence methods play a huge role in solving complex engineering problems, such the fracture toughness of materials, which is one of the parameters to be considered for engineering design. Fracture toughness is a parameter in fracture mechanics that studies the behavior of a material where cracks or discontinuities occur and are subjected to external loads. It is commonly known that the fracture toughness values of materials depends on the type of material, loading characteristics, and geometry of the testing specimen [1]. To know how the above factors affect fracture toughness most of the general methods have to be tested on real materials which will cause quite a lot of expenses. For this reason, this study aims to create an equation that can be used to predict the effect of such factors on the fracture toughness of materials using artificial intelligence methods (AI) that are popular in the materials field today [2]. The widely used AI algorithm such as generalized regression neural network [3] and Gaussian processes regression [4] were selected to a created a prediction model based on actual fracture toughness obtained from experiments. The fracture toughness testing, AI prediction modeling, and results of AI model prediction performance compared to traditional prediction were described in the next section of this study.

2. Mode I fracture toughness testing

In this study, the effect of loading rate and crack geometry (crack width and ratio of crack length to specimen width) on mode I fracture toughness of poly(methyl methacrylate) sheet or PMMA sheet which is widely used in lab-scale experiments was investigated. The single edge notch with a three-point bending specimen was used to tests mode I fracture toughness (Fig. 1). To determine the effect of crack geometry, the crack width of the specimen is defined as 1, 3, and 5 mm respectively, and the ratio of crack length to specimen width is defined as 0.3, 0.5, and 0.7 respectively. The specimens are prepared by laser cutting. Fracture toughness testing was performed on Lloyd universal testing machine LD series (100 kN) at loading rates 0.1, 0.5, and 1.0 mm/min. The testing sequence was generated using a general full factorial experiment design with 3 replicates for each condition. After testing the mode I fracture toughness can be calculated according to Eq. (1)

ประวัติผู้เขียน

นายอรรถสิทธิ์ เวียงคำ (อาร์ม) เกิดเมื่อวันที่ 15 มิถุนายน พ.ศ. 2536 ณ อำเภอเมืองสุรินทร์ จังหวัดสุรินทร์ เริ่มต้นการศึกษาในระดับประถมศึกษาปีที่ 1 ถึง 6 ณ โรงเรียนหนองโตงสุรวิทยาคม จังหวัดสุรินทร์ หลังจากนั้นจึงเข้าศึกษาระดับมัธยมศึกษาปีที่ 1 ถึง 6 ในสายวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์ ณ โรงเรียนสุรวิทยาคาร จังหวัดสุรินทร์ และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีและปริญญาโท ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ในสาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต (เกียรตินิยมอันดับ 1) และสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและระบบกระบวนการ เมื่อปีพ.ศ. 2558 และ 2562 ตามลำดับ จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาเอกสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและระบบกระบวนการ ณ สถาบันเดิม

ประสบการณ์ด้านการสอนนั้นในระหว่างการศึกษาผู้เขียนได้ปฏิบัติงานในตำแหน่งผู้ช่วยสอนและวิจัย หลักสูตรวิศวกรรมการผลิตอัตโนมัติและหุ่นยนต์ สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ซึ่งสอนปฏิบัติการทางด้านวิศวกรรมต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิต สำหรับประสบการณ์ด้านการวิจัยนั้นผู้เขียนได้นำความรู้ด้านกลศาสตร์การแตกหักและด้านปัญญาประดิษฐ์มาประยุกต์ใช้ในการศึกษาพฤติกรรมของวัสดุและเขียนเป็นบทความทางวิชาการเพื่อเผยแพร่ดังแสดงในภาคผนวก ข

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี