การศึกษาสมบัติวัสดุเชิงประกอบจากพอลิเอไมด์12 ใช้แล้ว/เส้นใยกัญชง/เซอร์โคเนียมออกไซด์

นางสาวศิรินทิพย์ สมศรี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ปีการศึกษา 2568

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

การศึกษาสมบัติวัสดุเชิงประกอบจากพอลิเอไมด์12 ใช้แล้ว/เส้นใยกัญชง/เซอร์โคเนียมออกไซด์

นางสาวศิรินทิพย์ สมศรี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ปีการศึกษา 2568

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

เรื่อง การศึกษาสมบัติวัสดุเชิงประกอบจากพอลิเอไมด์12 ใช้แล้ว/เส้นใยกัญชง/เซอร์โคเนียมออกไซด์

โดย นางสาวศิรินทิพย์ สมศรี

ได้รับอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล

---------- คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย / หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ จันทร์วิพัฒน์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

---------- ประธาน

(รองศาสตราจารย์ ดร.ระพีพันธ์ แดงตันกี)

---------- อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ ดร.จิรัฐติ เต็งสุทธิวัฒน์)

---------- อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(ศาสตราจารย์ ดร.สุชาติ เชี่ยงฉิน)

---------- กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.นัฐพงษ์ สุขวิพัฒน์)

ชื่อ : นางสาวศิรินทิพย์ สมศรี
ชื่อวิทยานิพนธ์ : การศึกษาสมบัติวัสดุเชิงประกอบจากพอลิเอไมด์12 ใช้แล้ว/เส้นใยกัญชง/เซอร์โคเนียมออกไซด์
สาขาวิชา : เทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : : รองศาสตราจารย์ ดร.จิรัฐติ เต็งสุทธิวัฒน์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม : ศาสตราจารย์ ดร.สุชาติ เชี่ยงฉิน
ปีการศึกษา : 2568

บทคัดย่อ

การศึกษานี้ศึกษาสมบัติเชิงกลและแรงกระแทกความเร็วต่ำ (Low-velocity impact) ของวัสดุผสมที่ทำจากพอลิเอไมด์ 12 (PA 12) เกรดสำหรับการพิมพ์สามมิติที่ไม่ใช้งานแล้ว เสริมด้วยเส้นใยกัญชงที่เรียงตัวแบบสุ่ม งานวิจัยนี้ได้หาปริมาณเส้นใยกัญชงที่เหมาะสมและเลือกใช้เส้นใยกัญชงที่ 10wt% มาทำการพัฒนาต่อ โดยใส่สารเติมแต่งนาโนเซอร์โคเนียมออกไซด์ นาโนเซอร์โคเนียมออกไซด์ถูกผสมลงในเมทริกซ์ PA 12 ที่แตกต่างกันคือ 0%, 3%, 6%, 9% และ 12% โดยน้ำหนัก ตัวอย่างวัสดุผสมถูกขึ้นรูปโดยการอัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 185°C และ 4000 psi ได้ทำการวิเคราะห์แรงดึง แรงดัด และแรงกระแทกแบบ Drop Weight การวัดความแข็ง การวิเคราะห์ Differential Scanning Calorimetry (DSC) การวิเคราะห์เชิงกลแบบไดนามิก (DMA) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) จากผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าการผสมเส้นใยกัญชงช่วยเพิ่มสมบัติแรงดึงของเมทริกซ์ PA 12 อย่างมีนัยสำคัญ วัสดุผสมที่มีนาโนเซอร์โคเนียมออกไซด์ 6% โดยน้ำหนัก แสดงให้เห็นถึงมอดูลัสของแรงดึงสูงสุด โดยเพิ่มขึ้น 6.81% เมื่อเทียบกับ PA 12 วัสดุเชิงประกอบนาโนเซอร์โคเนียมออกไซด์ 6% โดยน้ำหนักยังแสดงให้เห็นถึงความแข็งแรงดัดสูงสุด โดยเพิ่มขึ้น 45.38% เมื่อเทียบกับ PA 12 ธรรมดา ในการทดสอบแรงกระแทกแบบน้ำหนักตกกระทบ พบว่า PA 12 ธรรมดาดูดซับแรงและพลังงานได้ดีที่สุดเนื่องจากความยืดหยุ่นตามธรรมชาติ อย่างไรก็ตามวัสดุเชิงประกอบนาโนเซอร์โคเนียมออกไซด์ 6% แสดงให้เห็นถึงความสมดุลของคุณสมบัติที่ดีที่สุดเมื่อเทียบกับการทดสอบน้ำหนักตกกระทบ โดย ทนต่อแรงสูงสุดที่ 962 นิวตัน ผลการวิจัยเหล่านี้เน้นย้ำถึงศักยภาพของการใช้นาโนเซอร์โคเนียมออกไซด์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบ PA 12 ที่ไม่ใช้แล้ว

(มีจำนวนทั้งสิ้น 97 หน้า)

คำสำคัญ : พอลิเอไมด์12, เส้นใยกัญชง, นาโนเซอร์โคเนียมออกไซด์, วัสดุเชิงประกอบ, การทดสอบสมบัติเชิงกล

_____ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Name : Miss Sirinthip Somsri
Thesis Title : Properties study of waste PA12/Hemp fiber/ZrO_2 composite.
Major Field : Mechanical Engineering Technology
King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Thesis Advisor : : Associate Professor Dr. Jiratti Tengsuthiwat
Co-Advisor : Professor Dr. Suchart Siengchin
Academic Year : 2025

ABSTRACT

This research examines the mechanical properties and low-velocity impact behavior of composites produced from waste Polyamide 12 (PA 12) intended for 3D printing, reinforced with randomly oriented hemp fibers. The optimal hemp fiber content was determined to be 10 wt%, which was subsequently used to develop composites containing nano-zirconium oxide (nano-ZrO_2) at 0, 3, 6, 9, and 12 (wt%). The samples were fabricated via compression molding at 185 °C and 4000 psi, and evaluated through tensile, flexural, and drop-weight impact tests, as well as hardness measurements, Differential Scanning Calorimetry (DSC), Dynamic Mechanical Analysis (DMA), and Scanning Electron Microscopy (SEM).

The incorporation of hemp fibers significantly improved the tensile properties of the PA 12 matrix. The composite containing 6 wt% nano-ZrO_2 exhibited the highest tensile modulus, increasing by 6.81% compared to neat PA 12, and achieved the highest flexural strength, with a 45.38% improvement. Although neat PA 12 demonstrated the greatest energy absorption under drop-weight impact due to its inherent elasticity, the 6 wt% nano-ZrO_2 composite provided the best overall property balance, withstanding a maximum impact force of 962 N.

These results demonstrate the potential of nano-zirconium oxide as an effective additive for enhancing the mechanical performance of waste PA12-based composites.

(Total 97 Pages)

Keywords: Polyamide 12, Hemp fiber, Nano-zirconium oxide, Composite, Mechanical test

_____ Advisor



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เรื่อง การศึกษาสมบัติวัสดุเชิงประกอบจากพอลิเอไมด์12 เหลือใช้/เส้นใยกัญชง/เซอร์โคเนียมออกไซด์ เพื่อการสำเร็จการศึกษาของนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา สามารถดำเนินการจนประสบความสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์และสนับสนุนเป็นอย่างดียิ่งจาก ศาสตราจารย์ ดร.สุชาติ เชี่ยงฉิน และ รองศาสตราจารย์ ดร.จิรัฐติ เต็งสุทธิวัฒน์ ที่ได้กรุณาให้ความรู้ ข้อคิดและคำแนะนำปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆระหว่าการดำเนินงานวิจัยจนกระทั่งสำเร็จเรียบร้อยด้วยดี รวมถึงอาจารย์ Vinod Ayyappan ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการให้ข้อมูลความรู้เอกสารและให้ช่วยเหลือในการดำเนินงานวิจัย อีกทั้งขอขอบคุณเพื่อนร่วมงานทุกคนที่อำนวยความสะดวกและช่วยเหลือในการทำวิจัยครั้งนี้ และงานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากวิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ตามสัญญาเลขที่ CIT-2022-GRAD-14 จึงขอขอบคุณ ณ ที่นี้ด้วย สุดท้ายนี้ผู้วิจัยหวังว่างานวิจัยฉบับนี้จะเป็นประโยชน์สำหรับผู้ศึกษาและผู้อ่านทุกท่านต่อไป

ศิรินทิพย์ สมศรี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... ฉ

กิตติกรรมประกาศ ..... ซ

สารบัญ ..... ฌ

บทที่ 1 บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญ 1

วัตถุประสงค์ของงานวิจัย 5

สมมุติฐานของงานวิจัย 5

ขอบเขตของงานวิจัย 5

นิยามศัพท์เฉพาะ 5

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 6

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

พอลิเอไมด์ 7

เส้นใยกัญชง 10

นาโนเซอร์โคเนียมออกไซด์ (ZrO_2) 14

การขึ้นรูปพลาสติกด้วยการอัด (Compress molding) 17

กระบวนการขึ้นรูป 3มิติ ชนิดผง (3D printing powder) 18

วัสดุเชิงประกอบ (Composite material) 20

สารเติมแต่ง (Additive) 23

ทฤษฎีการทดสอบที่ใช้ในงานวิจัย 24

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 35

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

สารเคมี 47

เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย 49

วิธการวิจัย 50
สมบัติเชิงกล 51
การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน (Differential scanning calorimetry, DSC) 52
การทดสอบสัณฐาน 52
การวิเคราะห์ธาตุและองประกอบด้วยวิธี Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDX) 52

บทที่ 4 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

การศึกษาปริมาณของเส้นใยกัญชง

การทดสอบแรงดึง (Tensile testing) 54
การทดสอบแรงดัดงอ (Flexural testing) 55
การทดสอบแรงกระแทก (Drop weight test) 57
การทดสอบความแข็ง (Hardness test) 59
การวิเคราะห์ความร้อน (Differential scanning calorimetry, DSC) 60
การทดสอบการวิเคราะห์สมบัติเชิงกลแบบไดนามิก (Dynamic Mechanical Analysis : DMA) 62
การทดสอบ Scanning Electron Microscope (SEM) 64

การศึกษาปริมาณของนาโนเซอร์โคเนียมออกไซด์

การทดสอบแรงดึง (Tensile testing) 66
การทดสอบแรงดัดงอ (Flexural testing) 67
การทดสอบแรงกระแทก (Drop weight test) 69
การทดสอบความแข็ง (Hardness test) 72
การทดสอบความล้า (Fatigue testing) 73
การวิเคราะห์ความร้อน (Differential scanning calorimetry, DSC) 74
การทดสอบการวิเคราะห์สมบัติเชิงกลแบบไดนามิก (Dynamic Mechanical Analysis : DMA) 76
การทดสอบ Scanning Electron Microscope (SEM) 78
การวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) - Mapping analysis 80

บทที่ 5 สรุป อภิปรายและข้อเสนอแนะ

สรุป 83

อภิปรายผล 84

ข้อเสนอแนะ 86

สารบัญตาราง ..... ฎ

สารบัญรูปภาพ ..... ฑ

บรรณานุกรม 92

ประวัติผู้เขียน 97

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 1-1	สมบัติทางเคมีและสมบัติเชิงกลของเส้นใยธรรมชาติ	3
ตารางที่ 2-1	สมบัติความทนแรงดึงและความทนแรงดดังอของเม็ด PLA ผสมใยกัญชงที่อัตราส่วน 1%, 2.5%, 5% และ 10%wt	12
ตารางที่ 2-2	ข้อมูลแสดงปริมาณการผสม PLA/Hemp/Nanoclay	36
ตารางที่ 2-3	ข้อมูลในการผสมสารเคมีของแต่ละตัวอย่างชิ้นงาน polyester/jute fiber	38
ตารางที่ 2-4	ผลการทดสอบแรงดึงและแรงดัดงอ polyester/jute fiber	42
ตารางที่ 2-5	ข้อมูลแสดงองค์ประกอบของ zirconium oxide (ZrO_2) and coconut shell ash (CSA)	43
ตารางที่ 3-1	ตารางแสดงข้อมูลสมบัติของพอลิเอไมด์12	50
ตางรางที่ 3-2	ตารางแสดงข้อมูลสมบัติของเส้นใยกัญชง	50
ตางรางที่ 3-3	ตารางแสดงข้อมูลสมบัติของเซอร์โคเนียมออกไซด์	51
ตารางที่ 3-5	การศึกษาปริมาณเส้นใยกัญชงที่เหมาะสม	53
ตารางที่ 3-6	การศึกษาปริมาณนาโนเซอร์โคเนียมที่เหมาะสม	53
ตารางที่ 3-7	กระบวนการทดสอบ DSC	54
การศึกษาปริมาณของเส้นใยกัญชง		
ตารางที่ 4-1	ผลทดสอบแรงดึงและแรงดัดงอ	59
ตารางที่ 4-2	ผลการทดสอบแรงกระแทก	61
ตารางที่ 4-3	ผลอุณหภูมิการทดสอบ DMA และ DSC จากการศึกษาปริมาณเส้นใยที่เหมาะสม	66
ตารางที่ 4-4	ภาพการทดสอบ SEM จากหน้าตัดการทดสอบการดึง (200×)	68
การศึกษาปริมาณของนาโนเซอร์โคเนียมออกไซด์		
ตารางที่ 4-5	ข้อมูลทดสอบแรงดึงและแรงดัดงอของวัสดุเชิงประกอบที่เติมนาโนเซอร์โคเนียมออกไซด์	72
ตารางที่ 4-6	ผลการทดสอบ Drop weight	77
ตารางที่ 4-7	ผลอุณหภูมิการทดสอบ DMA และ DSC จากการศึกษาปริมาณนาโนเซอร์โคเนียมออกไซด์ที่เหมาะสม	83
ตารางที่ 4-8	ภาพการทดสอบ SEM จากหน้าตัดการทดสอบการดึง (200×)	85

ตารางที่ 4-9 ภาพการทดสอบ EDS ของกระจายตัวของนาโนเซอร์โคเนียม 87

สารบัญรูปภาพ

หน้า

ภาพที่ 1-1	ประเภทของพอลิเอไมด์	2
ภาพที่ 1-2	การพิมพ์ขึ้นรูป 3 มิติชนิดผง	2
ภาพที่ 1-3	พอลิเอไมด์ 12 ที่เหลือใช้	2
ภาพที่ 2-1	โครงสร้างทางเคมีของกลุ่มเอไมด์	10
ภาพที่ 2-2	โครงสร้างทางเคมีของพอลิเอไมด์ 12	10
ภาพที่ 2-3	โครงสร้างทางเคมีของเส้นใยกัญชง	12
ภาพที่ 2-4	โครงสร้างผลึกของเซอร์โคเนียมออกไซด์	15
ภาพที่ 2-5	การขึ้นรูปพลาสติกด้วยการอัด	18
ภาพที่ 2-6	การพิมพ์ขึ้นรูป 3 มิติ แบบ SLS (Selective Laser Sintering)	19
ภาพที่ 2-7	แบบจำลองโครงสร้างของไม้	20
ภาพที่ 2-8	สารเสริมแรงในวัสดุเชิงประกอบ	21
ภาพที่ 2-9	กราฟความสัมพันธ์ Stress-Strain ของการทดสอบแรงดึง	24
ภาพที่ 2-10	ตัวอย่างกราฟแสดงค่า Flexural Stress	25
ภาพที่ 2-11	กราฟ S-N จากการทดสอบความล้า	30
ภาพที่ 2-12	ตัวอย่างเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบความแข็ง	31
ภาพที่ 2-13	ตัวอย่างกราฟแสดงผลการทดสอบ DMA	32
ภาพที่ 2-14	กราฟของเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC)	33
ภาพที่ 2-15	ตัวอย่างกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	34
ภาพที่ 2-16	ตัวอย่างรูปที่ได้จากการทดสอบ SEM	35
ภาพที่ 2-17	กราฟแสดงผล Tensile strength และ Tensile modulus (PLA/Hemp/Nanoclay)	38
ภาพที่ 2-18	กราฟแสดงผล Flexural strength และ Flexural modulus (PLA/Hemp/Nanoclay)	39
ภาพที่ 2-19(a)	กราฟแสดง Tensile stress-strain Hop, Hemp and Wood Fiber	40
ภาพที่ 2-19(b)	ข้อมูลความแข็งแรงแรงดึงและการดัดงอ (Hop, Hemp andWood Fiber)	41
ภาพที่ 2-19(c)	ข้อมูลโมดูลัสการดัดงอของ Young	

	(Hop, Hemp and Wood Fiber)	41
ภาพที่ 2-20	ผลการทดสอบแรงดึง [zirconium oxide (ZrO_2)/coconut shell ash (CSA)]	46
ภาพที่ 2-21	ผลการทดสอบแรงดัดงอ [zirconium oxide (ZrO_2)/coconut shell ash (CSA)]	47
ภาพที่ 3-1	ผงพอลิเอไมด์	48
ภาพที่ 3-2	โครงสร้างทางเคมีของพอลิเอไมด์ 12	48
ภาพที่ 3-3	เส้นใยกัญชง	49
ภาพที่ 3-4	ผงนาโนเซอร์โครเนียมออกไซด์	49
ภาพที่ 3-5	โครงสร้างทางเคมีของเซอร์โครเนียมออกไซด์	50
ภาพที่ 3-6	เส้นใยกัญชงที่ทำการตัดแล้ว	52
ภาพที่ 3-7	การคัดแยกเส้นใยกัญชงด้วยเครื่อง	52
การศึกษาปริมาณของเส้นใยกัญชง		
ภาพที่ 4-1	กราฟแสดงความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดของการทดสอบแรงดึง	57
ภาพที่ 4-2	กราฟแสดงค่า Tensile Modulus	57
ภาพที่ 4-3	กราฟแสดงความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดของการทดสอบแรงดัดงอ	58
ภาพที่ 4-4	กราฟแสดงค่า Flexural Modulus	58
ภาพที่ 4-5(a)	ความสัมพันธ์ร แรง – ระยะยืด	60
ภาพที่ 4-5(b)	ความสัมพันธ์ แรง - เวลาทดสอบ	60
ภาพที่ 4-5(c)	ความสัมพันธ์ พลังงาน - ระยะยืด	60
ภาพที่ 4-5(d)	ความสัมพันธ์ พลังงาน - เวลาทดสอบ	60
ภาพที่ 4-5(e)	ความสัมพันธ์ ความเร็ว - ระยะยืด	60
ภาพที่ 4-5(f)	ความสัมพันธ์ ความเร็ว - เวลาทดสอบ	60
ภาพที่ 4-6	ผลการทดสอบความแข็งของวัสดุเชิงประกอบ	61
ภาพที่ 4-7(a)	การให้ความร้อนครั้งที่ 1	63
ภาพที่ 4-7(b)	การให้ความร้อนครั้งที่ 2	63
ภาพที่ 4-7(c)	การให้ความเย็นครั้งที่ 1	63
ภาพที่ 4-7(d)	การให้ความเย็นครั้งที่ 2	63
ภาพที่ 4-8(a)	Storage Modulus-Temperature	65

ภาพที่ 4-8(b)	Loss Modulus-Temperature	65
ภาพที่ 4-8(c)	Damping Factor-Temperature	65
ภาพที่ 4-9	ผงพอลิเอไมด์12 เหลือใช้ (5000×)	67
ภาพที่ 4-10	พื้นผิวเส้นใยกัญชง (200× zoom in)	67
การศึกษาปริมาณของนาโนเซอร์โคเนียมออกไซด์		
ภาพที่ 4-11	กราฟแสดงความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดของการทดสอบแรงดึง	70
ภาพที่ 4-12	กราฟแสดงผล Tensile modulus	70
ภาพที่ 4-13	กราฟแสดงความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดของการทดสอบแรงดัดงอ	71
ภาพที่ 4-14	กราฟแสดงผล Flexural modulus	72
ภาพที่ 4-15(a)	กราฟแรงเทียบกับเวลา	73
ภาพที่ 4-15(b)	กราฟแรงเทียบกับระยะเคลื่อนที่	74
ภาพที่ 4-15(c)	กราฟพลังงานเทียบกับเวลา	75
ภาพที่ 4-15(d)	กราฟพลังงานเทียบกับระยะเคลื่อนที่	75
ภาพที่ 4-15(e)	กราฟความเร็วเทียบกับระยะเคลื่อนที่	76
ภาพที่ 4-15(f)	ความเร็วเทียบกับเวลา	76
ภาพที่ 4-16	ผลการทดสอบความแข็งเมื่อใส่ ZrO_2	78
ภาพที่ 4-17	กราฟการทดสอบความล้าของวัสดุเชิงประกอบนาโนเซอร์โคเนียม	79
ภาพที่ 4-18(a)	การให้ความร้อนครั้งที่ 1	80
ภาพที่ 4-18(b)	การให้ความร้อนครั้งที่ 2	80
ภาพที่ 4-18(c)	การให้ความเย็นครั้งที่ 1	81
ภาพที่ 4-18(d)	การให้ความเย็นครั้งที่ 2	81
ภาพที่ 4-19(a)	Storage Modulus-Temperature	82
ภาพที่ 4-19(b)	Loss Modulus-Temperature	82
ภาพที่ 4-19(c)	Damping factor-Temperature	83
ภาพที่ 4-20	ผงนาโนเซอร์โคเนียมออกไซด์ ขนาด 1000× และ 5000×	84

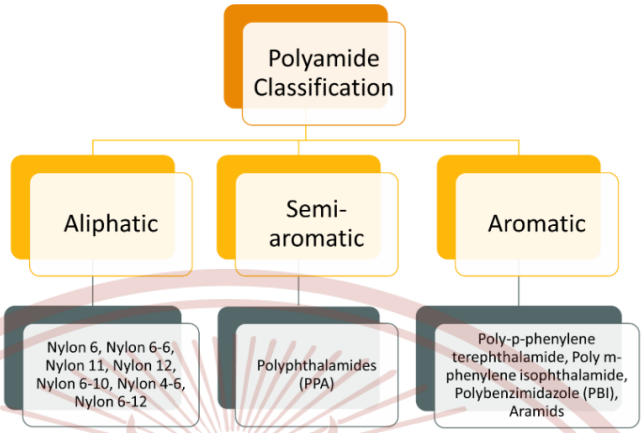
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

พลาสติกซึ่งพบได้ทั่วไปในชีวิตประจำวันในปัจจุบัน ถูกนำมาใช้ในหลากหลายรูปแบบ ตั้งแต่สิ่งของในชีวิตประจำวัน เช่น ภาชนะ โต๊ะ เก้าอี้ ไปจนถึงอุตสาหกรรมเฉพาะทาง เช่น อุตสาหกรรมโรงงานหรืออุตสาหกรรมยานยนต์[5],[10] แม้ว่าพลาสติกจะมีข้อดีหลายประการแต่การใช้งานอย่างแพร่หลายทำให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมอย่างมาก โดยเฉพาะเกี่ยวกับขยะพลาสติก พลาสติกสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ เทอร์โมเซ็ต เป็นพลาสติกที่มีความแข็งแรง ทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและปฏิกิริยาเคมี แต่จะไม่อ่อนตัวเมื่อโดนความร้อน และไม่สามารถหลอมเพื่อขึ้นรูปใหม่ได้ พลาสติกอีกหนึ่งประเภท คือ เทอร์โมพลาสติก พลาสติกชนิดนี้เมื่อโดนความร้อนจะอ่อนตัวและสามารถเปลี่ยนรูปร่างได้ เมื่อเย็นลงจะแข็งตัว พลาสติกประเภทนี้จึงเป็นพลาสติกที่สามารถขึ้นรูปใหม่ได้หรือเปลี่ยนรูปร่างได้หลายครั้งโดยไม่ทำโครงสร้างเดิมเสียหาย และมีโครงสร้างทางเคมีของพลาสติกชนิดนี้เป็นแบบเส้นตรงจึงง่ายต่อการขึ้นรูปใหม่ ซึ่งหากต้องการนำพลาสติกกลับมาใช้ใหม่ อาจจำเป็นต้องปรับปรุงคุณสมบัติของพลาสติกเสียก่อน เนื่องจากสมบัติของพลาสติกอาจลดลงจากเดิมซึ่งอาจเป็นเพราะความร้อนหรือแรงทางกล อีกทั้งเมื่อกล่าวถึงปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลแล้ว การเลือกใช้วัสดุจากธรรมชาติจะทำให้ชิ้นงานเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากขึ้น และง่ายต่อการย่อยสลายมากกว่าพลาสติกทั่วไปอีกด้วย

พอลิเอไมด์ (PA) หรือที่เรียกกันทั่วไปว่าไนลอน (Nylon) เป็นพอลิเมอร์ที่มีการใช้งานในอุปกรณ์ไฟฟ้า บรรจุภัณฑ์ และสิ่งทอ พอลิเอไมด์แบ่งออกเป็น 3 ประเภทหลัก[25] ได้แก่ พอลิเอไมด์อะลิฟาติก ซึ่งมีความยืดหยุ่น เหนียว และขึ้นรูปง่าย แต่ทนความร้อนและสารเคมีได้ต่ำกว่าอีกสองประเภท พอลิเอไมด์กึ่งอะโรมาติกมีความทนทานต่อความร้อนและสารเคมี ในระดับปานกลาง โดยมีความยืดหยุ่นและทนต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับอะลิฟาติก และสุดท้ายคือพอลิเอไมด์อะโรมาติกประกอบด้วยวงแหวนอะโรมาติกจำนวนมากในโครงสร้างโมเลกุล ซึ่งทำให้มีเสถียรภาพทางความร้อนและทนต่อสารเคมีสูง



ภาพที่ 1-1 ประเภทของพอลิเอไมด์

โดยงานวิจัยนี้จะศึกษาพอลิเอไมด์ประเภทอะลิฟาติก และเลือกใช้เป็นพอลิเอไมด์ 12 (PA12) เนื่องจากเป็นพอลิเอไมด์ที่มักผลิตขึ้นสำหรับผลิตภัณฑ์การพิมพ์ 3 มิติ การพิมพ์ 3 มิติมีใช้งานในรูปแบบเส้นและผง แต่ผงพอลิเอไมด์ 12 มักถูกทิ้งเนื่องจากอาจเสื่อมสภาพ เมื่อนำกลับมาใช้ใหม่โดยปกติแล้วผงที่เหลือจากกระบวนการขึ้นรูปจะถูกนำมาผสมกับผงพอลิเอไมด์ใหม่ในอัตราส่วน 50 : 50 แต่นั่นก็ไม่ได้ทำให้ผงพอลิเอไมด์เหลือใช้ลดลงไปมาก อีกทั้งยังมีราคาค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับพอลิเอไมด์ชนิดอื่นๆ เพื่อการใช้งานที่คุ้มค่างานวิจัยนี้จึงนำพอลิเอไมด์ 12 ที่เหลือใช้จากกระบวนการขึ้นรูป 3 มิติชนิดผงกลับมาใช้งานให้คุ้มค่าที่สุด งานวิจัยนี้จึงศึกษาการเสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติโดยจะทำการขึ้นรูปเป็นวัสดุเชิงประกอบ (Composite materials)



ภาพที่ 1-2 การพิมพ์ขึ้นรูป 3 มิติชนิดผง



ภาพที่ 1-3 พอลิเอไมด์ 12 ที่เหลือใช้

วัสดุเสริมแรง[1] คือ วัสดุที่กระจายตัวอยู่ภายในวัสดุวัสดุเนื้อพื้น (Matrix Material) ซึ่งอาจจะมีลักษณะรูปร่างเป็นอนุภาค (Particle) หรือ เป็นเส้นใย (Reinforcement) โดยเส้นใยก็จะมีทั้งเส้นใยสังเคราะห์และเส้นใยจากธรรมชาติ เนื่องจากเส้นใยธรรมชาติเป็นวัสดุที่ผลิตขึ้นใหม่ได้และมีปริมาณมากในธรรมชาติ อีกทั้งการสึกหรอของเส้นใยธรรมชาติน้อยกว่าเส้นใยแก้ว ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบต่อการนำวัสดุมาทำการรีไซเคิลหรือการขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบ และการใช้เส้นใยธรรมชาติ

เสริมแรงในพอลิเมอร์วัสดุเชิงประกอบที่ใช้วัสดุประเภท biodegradable polymer เป็นเมทริกซ์นั้น ทำให้ได้วัสดุเชิงประกอบประเภทเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ซึ่งไม่ส่งผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมเมื่อสิ้นสุดอายุการใช้งาน ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้เป็นเส้นใยเสริมแรงธรรมชาติ (Natural fiber) จากกัญชง เนื่องจากในประเทศไทยสามารถหาได้ง่าย ข้อดีของกัญชงมีมากมาย อาทิ เปลือก สามารถนำมาแปรรูปเป็นเส้นใย ทอเสื้อผ้ามีคุณสมบัติเด่นด้านต้านแบคทีเรีย หรือผ่านกระบวนการแปรรูปให้เป็นเส้นใยไฟเบอร์ที่มีความบริสุทธิ์ อีกทั้งยังมีความเด่นด้านความแข็งแรงกว่าเหล็กและทนความร้อนได้สูง หากนำมาบดละเอียดในรูปผงผลิตเป็นคอนกรีตมีความแข็งแรงและทนไฟ ทนความร้อนได้ดี อีกทั้งโครงสร้างเซลลูโลสภายในของเส้นใยกัญชงนั้นก็มีค่อนข้างสูง นั่นหมายถึงความสามารถในสมบัติเชิงกลที่ดีอีกด้วย[32] ดังตารางที่ 1-1 การนำพลาสติกเหลือใช้มาใช้กับเส้นใยเสริมแรงธรรมชาติอาจจะมีสมบัติเชิงกลที่ค่อนข้างดี แต่ในงานวิจัยนี้มีแนวคิดที่จะศึกษาเกี่ยวกับอนุภาคสารที่จะมาช่วยปรับปรุงสมบัติด้านเชิงกลร่วมกับเส้นใยธรรมชาติ โดยเลือกใช้เป็นอนุภาคขนาดเล็ก เพื่อสามารถแทรกอยู่ในช่องว่างระหว่างเมทริกซ์และเส้นใย

ตารางที่ 1-1 สมบัติทางเคมีและสมบัติเชิงกลของเส้นใยธรรมชาติ[14]

Type of fiber	Cellulose (wt%)	Moisture (wt%)	Tensile Strength (MPa)	Modulus of Elasticity (GPa)
Sisal	67 -78	11	247 - 855	9 - 38
Kenaf	31 - 39	-	930 - 1500	23 - 53
Bamboo	48.2 – 73.8	11.7	262	9.8
Banana	63 – 67.6	8.7	355 - 754	7.7 – 33.8
Coir/husk	36 - 43	8	95 - 593	4 - 6
Hemp	55 – 80.2	6.5	690	70

สารเติมแต่งพลาสติก ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อให้สามารถปรับปรุง เปลี่ยนแปลงสมบัติด้อยของวัสดุประเภทต่างๆให้ดีขึ้น เหมาะสมกับการใช้งาน ฟิลเลอร์เป็นสารเติมแต่งอีกสิ่งหนึ่งที่นิยมนำมาใช้งาน การใส่ฟิลเลอร์ส่วนใหญ่จะส่งผลให้คุณสมบัติของเทอร์โมพลาสติกมีการเปลี่ยนแปลง มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น เช่น ทนแรงกระแทก แรงอัด ทนแรงดัดโค้งเพิ่มขึ้น และมีความแข็ง โดยทั่วไป ฟิลเลอร์แบ่งได้ 2 กลุ่ม คือเอ็กซ์เทนเดอร์ฟิลเลอร์ (extender หรือ inert fillers) การใส่ฟิลเลอร์ในกลุ่มนี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อใช้เป็นสารเพิ่มเนื้อ ลดต้นทุนพลาสติก อย่างไรก็ตามการเติมฟิลเลอร์กลุ่มนี้จะ

ช่วยปรับปรุงสมบัติของพลาสติกได้ด้วย เช่น ปรับปรุงสมบัติความยืดหยุ่น แต่ส่วนใหญ่ไม่ช่วยปรับปรุงสมบัติความทนแรงดึงให้พลาสติก และฟังก์ชันแนลฟิลเลอร์ (functional fillers) หรือแอคทีฟฟิลเลอร์ (active fillers) ฟิลเลอร์กลุ่มนี้เติมในพลาสติกโดยมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อปรับปรุงสมบัติกายภาพ สมบัติเชิงกลของพลาสติกหรือสมบัติอื่นๆ[35] ซึ่งฟิลเลอร์อนุภาคนาโน (Nanoparticles) ที่นิยมใช้ในการปรับปรุงสมบัติของวัสดุเชิงประกอบมีหลายประเภท โดยสามารถแบ่งได้ตามลักษณะของวัสดุและสมบัติที่ต้องการปรับปรุง เช่น ความแข็งแรงเชิงกล การนำไฟฟ้า ความต้านทานการสึกหรอ หรือคุณสมบัติทางแสง ตัวอย่างของสารอนุภาคนาโนที่นิยมใช้ ได้แก่ นาโนคาร์บอน (Carbon-Based Nanoparticles), อนุภาคนาโนโลหะ (Metallic Nanoparticles), พอลิเมอร์นาโน (Polymer-Based Nanoparticles) เช่นนาโนซิลิโคน และอนุภาคนาโนเซรามิก (Ceramic Nanoparticles) ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้อนุภาคนาโนเซรามิกเพราะมีความแข็งแรงสูง น้ำหนักเบา และทนทานต่อการสึกหรอ โดยเลือกใช้นาโนเซอร์โคเนียมออกไซด์ (ZrO_2) หรือที่เรียกว่าเซอร์โคเนียจัดอยู่ในกลุ่มของ functional fillers เป็นวัสดุนาโนขั้นสูงที่มีความสามารถหลากหลายสูง โดยมีข้อดีที่สำคัญหลายประการเช่น

เสถียรภาพต่ออุณหภูมิสูง : นาโนเซอร์โคเนียมออกไซด์มีความเสถียรทางความร้อนเป็นพิเศษ จึงเหมาะสำหรับการใช้งานในสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิสูง สามารถทนต่ออุณหภูมิที่รุนแรงได้โดยไม่สูญเสียความสมบูรณ์ของโครงสร้างหรือคุณสมบัติที่ต้องการ

ฉนวนไฟฟ้า : นาโนเซอร์โคเนียมออกไซด์เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดีคุณสมบัตินี้มีค่าสูงในการใช้งานด้านอิเล็กทรอนิกส์และไฟฟ้าที่ต้องการฉนวนไฟฟ้า

ความแข็งแรงเชิงกลสูง : มีสมบัติด้านความแข็งแรงเชิงกลและความแข็งเป็นพิเศษ อีกทั้งยังมีความทนทานสูงและทนทานต่อการสึกหรอ จึงเหมาะสำหรับใช้ในเซรามิกขั้นสูง เครื่องมือตัด และส่วนประกอบโครงสร้างที่ต้องการคุณสมบัติเชิงกลที่ดีเยี่ยม

ความโปร่งใสของแสง : สามารถสังเคราะห์นาโนเซอร์โคเนียมออกไซด์ในรูปแบบโปร่งใสซึ่งแสดงคุณสมบัติทางแสงที่ยอดเยี่ยม ทำให้มีประโยชน์ในการใช้งานด้านออปติกต่างๆ เช่น เลนส์ หน้าต่าง และการเคลือบแบบใส

ในงานวิจัยนี้ได้นำผงพลาสติกที่เหลือใช้จากการพิมพ์ขึ้นรูป 3 มิติ ซึ่งเป็นผงพลาสติกพอลิเอไมด์ 12 ทำการปรับปรุงสมบัติเชิงกลโดยทำการเติมวัสดุเสริมแรงที่เป็นเส้นใยธรรมชาติ นั่นคือเส้นใยกัญชง อีกทั้งยังมีแนวคิดที่จะศึกษาเกี่ยวกับอนุภาคสารที่จะช่วยปรับปรุงสมบัติด้านเชิงกลร่วมกับเส้นใยธรรมชาติ คือฟิลเลอร์อนุภาคระดับนาโนโดยการเติมนาโนเซอร์โคเนียมออกไซด์

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 ลดปริมาณการเหลือใช้พลาสติกพอลิเอไมด์ 12 จากกระบวนการพิมพ์ขึ้นรูป 3 มิติ

1.2.2 ศึกษาการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของพลาสติกพอลิเอไมด์ 12 ที่ได้จากกระบวนการพิมพ์ขึ้นรูป 3 มิติ

1.2.3 ศึกษาอิทธิพลของอนุภาคนาโนซอร์โคเนียมออกไซด์

1.3 สมมติฐานของการวิจัย

1.3.1 สามารถนำพลาสติกพอลิเอไมด์ 12 จากกระบวนการพิมพ์ขึ้นรูป 3 มิติกลับมาปรับปรุงสมบัติเพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานต่อได้

1.3.2 การใส่เส้นใช้เสริมแรงกัญชง จะช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลของพลาสติกพอลิเอไมด์ 12 เหลือใช้จากกระบวนการพิมพ์ขึ้นรูป 3 มิติ

1.3.3 อนุภาคนาโนเซอร์โคเนียมออกไซด์ สามารถช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลของพลาสติกพอลิเอไมด์ 12 เหลือใช้ร่วมกับเส้นใยกัญชง

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 ขึ้นรูปทดสอบด้วยการอัดขึ้นรูปพลาสติก

1.4.2 หาปริมาณของเส้นใยกัญชงที่เหมาะสมต่อการนำไปศึกษาต่อ โดยใส่ที่ปริมาณ 0 wt%, 4 wt%, 6 wt%, 8 wt% 10 wt% และ 12 wt%

1.4.3 หาปริมาณของอนุภาคเซอร์โคเนียมออกไซด์ที่เหมาะสมต่อการใช้งาน โดยกำหนดการใส่ที่ 0 wt%, 3 wt%, 6 wt%, 9 wt% และ 12 wt%

1.5 นิยามศัพท์เฉพาะ

Composite	วัสดุเชิงประกอบ
Reinforcement	วัสดุเสริมแรง
Filler	สารเติมแต่งพลาสติก
PA 12, Polyamide 12	ผงพลาสติกพอลิเอไมด์ 12
Hemp	เส้นใยเสริมแรงกัญชง
(nano) ZrO_2	(นาโน) เซอร์โคเนียมออกไซด์
Compression molding	การขึ้นรูปพลาสติกด้วยการกดอัด

wt% (Percent of wight)	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
Matrix material	วัสดุเนื้อพื้น
Natural fiber	เส้นใยธรรมชาติ
Particle	อนุภาค
ASTM	มาตรฐานการทดสอบ
ISO	มาตรฐานการทดสอบ
Stress(**σ**)	ความเค้น
Strain (**ε**)	ความเครียด
Young's Modulus (E)	ค่ามอดูลัสของยัง
Force (F)	แรงที่กระทำ [หน่วย : นิวตัน (N)]
Area (A)	พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงาน [หน่วย : ตารางเมตร(mm^2)]
Dislocation	การที่รอยต่อของโครงสร้างผลึก เคลื่อนที่ไปมาภายในวัสดุภายใต้แรงกระทำ
Tg	อุณหภูมิคล้ายแก้ว
Tm	อุณหภูมิหลอมเหลว

1.6 ประโยน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 สามารถลดขยะพลาสติกจากกระบวนการขึ้นรูป 3 มิติชนิดผงได้โดยการนำพลาสติกพอลิเอไมด์ 12 ที่เหลือจากกระบวนการพิมพ์ขึ้นรูป 3 มิตินำกลับมาใช้ใหม่

1.6.2 สามารถขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบจากพอลิเอไมด์ 12 ที่เสริมแรงด้วยเส้นใยกัญชงและอนุภาคของนาโนเซอร์โคเนียมออกไซด์

1.6.3 เมื่อใช้อนุภาคช่วยเสริมแรงร่วมกับเส้นใยแล้ว สมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบจะดีขึ้นจากการใส่เส้นใยกัญชงเพียงอย่างเดียว

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พอลิเอไมด์ (Polyamide)

พลาสติกชนิด Polyamide (PA) หรือ ไนล่อน (Nylon) เป็นพลาสติกที่ได้ค้นพบมาตั้งแต่ในปี ค.ศ. 1927 และได้รับการพัฒนาจนมาเป็นไนล่อนชิ้นแรกในปี ค.ศ.1935 โดย Wallace Hume Carothers ที่ Dupont's research facility และการนำไนล่อนมาใช้ในทางการค้าเกิดขึ้นในปี ค.ศ. 1938 โดยผลิตมาเป็นแปรงสีฟัน ซึ่งในปัจจุบัน ไนล่อนก็ได้รับการพัฒนาในหลากหลายประเภท ที่ใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ มากมาย เช่น อุตสาหกรรมสิ่งทอ ยานยนต์ ไฟฟ้า อุปกรณ์กีฬา เครื่องพิมพ์ 3D และอื่นๆ[29], [33]

2.1.1 ประเภทของพลาสติก Polyamide PA (Nylon) ในส่วน Aliphatic Classification

2.1.1.1 Polyamide 6 (Nylon 6) และ Polyamide 66 (PA66)

พลาสติกชนิดนี้เป็นพลาสติกที่สามารถพบเห็นได้มาก มักในการใช้งานในอุตสาหกรรมทั่วไป ตัวคุณสมบัติของเนื้อพลาสติกที่มีความทนทาน ขึ้นรูปได้ง่ายและราคาไม่สูง คุณสมบัติของพลาสติก PA6 และ PA66 มีดังนี้

- แข็งแรงทนทาน และทนอุณหภูมิได้สูง
- ทนต่อแรงกระแทก ถึงแม้จะอยู่ในอุณหภูมิต่ำ
- ขึ้นรูปได้ง่าย
- ทนต่อการสึกหรอ และรอยขีดข่วน
- ทนทานต่อน้ำมัน
- เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี
- ไม่ติดไฟ และไม่ลามไฟ

ด้วยคุณสมบัติดังกล่าว พลาสติกชนิด PA6/PA66 จึงเป็นพลาสติกชนิดที่ใช้งานในหลากหลายประเภทอุตสาหกรรม สามารถใช้แทนชิ้นส่วนบางชิ้นที่ทำจากโลหะได้ เนื่องจากมีความทนทานต่ออุณหภูมิและความทนทานต่อสารเคมี นอกจากนี้ยังนิยมไปใช้ในอุปกรณ์ไฟฟ้า เคเบิ้ลแกลน แพคเกจสำหรับอาหาร เฟอร์นิเจอร์ อุปกรณ์กีฬา เป็นต้น

2.1.1.2 พลาสติก Polyamide 6-10 (Nylon 6-10)

Polyamide 6-10 (PA6-10) เป็นพลาสติกมีดครงสร้างแบบผสม (Semi-crystalline polyamide) มีความแข็งแรงมาก และมีคุณสมบัติสำคัญดังนี้

- มีอัตราการดูดซึมน้ำต่ำกว่า PA6 และ PA66
- ทนทานต่อการเสียดสีและทนต่อสารเคมีได้ดี
- มีความแข็งแรงแต่ก็ยังน้อยกว่าพลาสติก PA6 หรือ PA66 แต่แข็งแรงกว่า PA 11, PA 12, PA6-12
- จำเป็นต้องทำให้แห้งก่อนนำมาขึ้นรูป
- เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี
- ทนต่อรังสีพลังงานสูง เช่น รังสีแกมมา และรังสีเอ็กซ์

2.1.1.3 พลาสติก Polyamide 11 (PA 11)

พลาสติกชนิดนี้เป็น วิศวกรรมชีวภาพ ที่อยู่ในตระกูลพลาสติก Polyamide โดยมีน้ำมันระหุ่งเป็นส่วนประกอบในการผลิต มีคุณสมบัติที่ใกล้เคียงกับพลาสติกชนิด PA 12

จุดเด่น	ข้อจำกัด
เป็นพลาสติกที่ดูดซับน้ำได้น้อยที่สุดของพลาสติกชนิด PA	มีราคาที่สูง
มีความทนทานต่อแรงกดทับ ถึงแม้จะอยู่ในอุณหภูมิที่ต่ำ หรือต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง	สามารถทนความร้อนได้น้อยกว่า และจุดหลอมเหลวต่ำกว่า พลาสติก PA ชนิดอื่นๆ
ทนต่อสารเคมี น้ำมัน ตัวทำละลาย และสารละลายเกลือ	ทนต่อแสงแดด รังสียูวี และน้ำเดือด ได้น้อย
ทนต่อรอยขีดข่วนและแตกร้าวได้ดีเยี่ยม	จำเป็นต้องทำให้แห้งก่อนขึ้นรูป
ต้านทานคลื่นรังสีไฟฟ้าได้ดี	ไม่ทนต่อกรดแร่ กรดอซิติก และฟีนอล
ทนต่อสภาวะการใช้งานที่มีความถี่สูง ๆ ได้ดี	ความสามารถในการนำไฟฟ้าขึ้นอยู่กับความชื้น

2.1.1.4 พลาสติก Polyamide46 (PA46) / Nylon 46

เป็นพลาสติกชนิดที่สามารถทนอุณหภูมิได้ดีที่สุดของ พลาสติกชนิด PA สามารถพบได้บ่อยในอุตสาหกรรมยานยนต์ และนำไปใช้แทนชิ้นส่วนโลหะบางชนิด

จุดเด่น	ข้อจำกัด
มีความทนทานที่สูงมาก	มีความสามารถในการดูดซึมน้ำได้สูง
ทนต่อการเสียดสีได้ดี	ต้องใช้อุณหภูมิที่สูงในการผลิต เพราะมีจุดหลอมเหลวที่สูง
ใช้เวลาในการฉีดต่ำ เพราะมีอัตราตกผลึกสูง	วัสดุมีความเสถียรต่ำ
ทนต่อน้ำมัน และแรงกระแทก	ไม่ทนต่อกรด และดูดซับตัวทำละลาย
ต้านทานกระแสไฟฟ้าได้ดี	จำเป็นต้องทำให้แห้งก่อนขึ้นรูป
มีความต้านทานรังสีได้ (แกมม่า/เอ็กซ์)	สีคล้ำขึ้นเมื่อสัมผัสกับความร้อนสูง

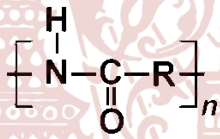
2.1.1.5 พลาสติกชนิด Polyamide 12 (PA 12)

พลาสติกชนิด Polyamide 12 / PA 12 / Nylon12 เป็นพลาสติกที่มีโครงสร้างเป็นแบบผสม (Semi-Crystalline) มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับ Polyamide 11 แต่มีราคาที่สูงเมื่อเทียบกับพลาสติก Polyamide ตัวอื่น

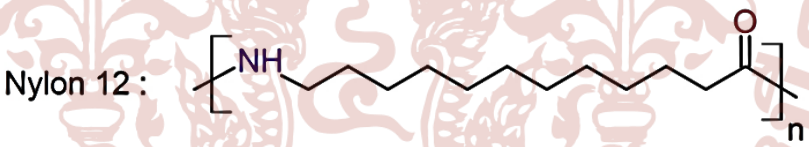
จุดเด่น	ข้อจำกัด
เป็นพลาสติกที่ดูดซับน้ำได้น้อยที่สุดของพลาสติกชนิด PA	มีราคาที่สูงมากเมื่อเทียบกับพลาสติก PA ตัวอื่น
มีความทนทานต่อแรงกดทับ ถึงแม้จะอยู่ในอุณหภูมิที่ต่ำ	มีความแข็ง และความสามารถในการทนความร้อนต่ำกว่า พลาสติก PA ชนิดอื่นๆ
ทนต่อสารเคมี น้ำมัน ตัวทำละลาย และสารละลายเกลือได้ดี	ทนต่อแสงแดด รังสียูวีได้น้อย
ทนต่อการเสียดสีการแตกร้าวได้ดีเยี่ยม	จำเป็นต้องทำให้แห้งก่อนขึ้นรูป
ต้านทานคลื่นรังสีไฟฟ้าและทนต่อสภาวะการใช้งานที่มีความถี่สูง ๆ ได้ดี	ความสามารถในการนำไฟฟ้าขึ้นอยู่กับความชื้น

ด้วยคุณสมบัติของพลาสติกชนิด PA11 และ PA12 จึงเป็นวัสดุที่นิยมใช้ในงานหลายๆ ด้าน อาทิเช่น อุปกรณ์กีฬา รองเท้ากีฬา ท่อน้ำ ท่อลม อุตสาหกรรมยานยนต์ และรวมถึงเครื่องพิมพ์ 3D[28]

พอลิเอไมด์ 12 เป็นพอลิเมอร์ชนิดเทอร์โมพลาสติกที่อยู่ในตระกูลพอลิเอไมด์ พอลิเอไมด์เป็นวัสดุที่มีองค์ประกอบทางเคมีเฉพาะตัว ทำให้มีคุณสมบัติเฉพาะตัวและเหมาะกับการใช้งานที่หลากหลาย PA 12 ประกอบด้วยหน่วยซ้ำของกลุ่มเอไมด์ (-CO-NH-) ที่เชื่อมต่อกันด้วยอะตอมคาร์บอน[34] โครงสร้างนี้ทำให้วัสดุมีความแข็งแรง ทนทานและต้านทานการสึกหรอได้ นอกจากนี้การมีกลุ่มเอไมด์ยังช่วยให้ PA 12 มีเสถียรภาพทางความร้อนสูง ทำให้ทนต่ออุณหภูมิสูงได้โดยไม่สูญเสียคุณสมบัติเชิงกล โครงสร้างโมเลกุลของ PA 12 มีส่วนช่วยในคุณสมบัติที่เป็นประโยชน์ โซ่ยาวของอะตอมคาร์บอนทำให้วัสดุมีความยืดหยุ่นและเหนียว จึงทนต่อแรงกระแทกและการเสียรูปได้ นอกจากนี้ กลุ่มเอไมด์ยังมีปฏิสัมพันธ์ระหว่างโมเลกุลที่แข็งแกร่ง ส่งผลให้มีความแข็งแรงในการดึงสูงและต้านทานสารเคมีได้



ภาพที่ 2-1 โครงสร้างทางเคมีของกลุ่มเอไมด์



ภาพที่ 2-2 โครงสร้างทางเคมีของพอลิเอไมด์ 12

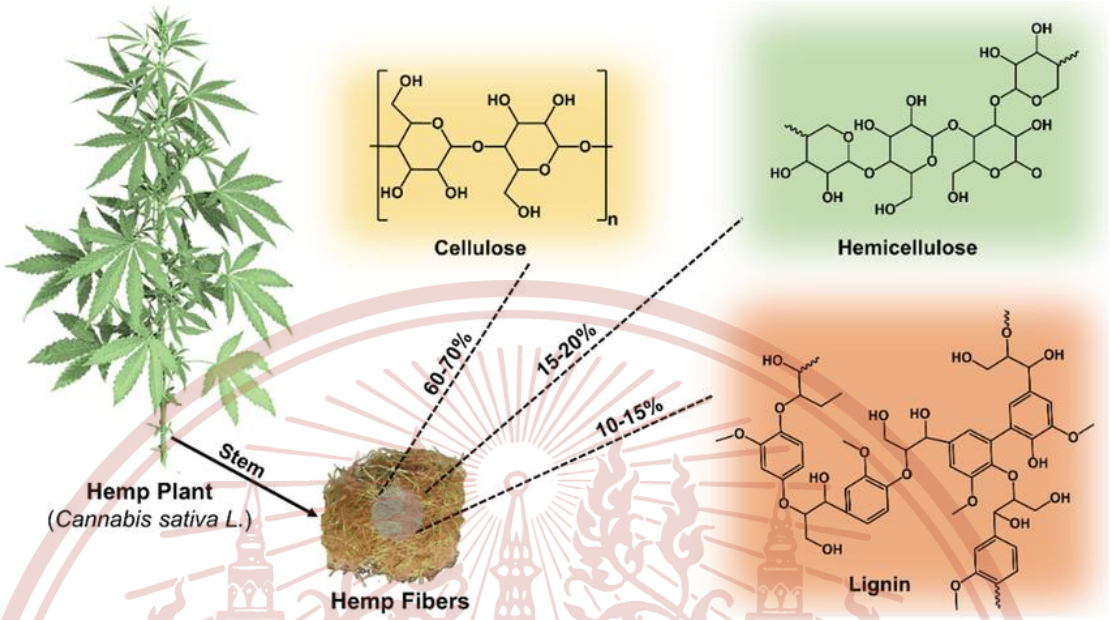
พอลิเอไมด์ 12 สังเคราะห์ขึ้นโดยผ่านกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน โดยโมโนเมอร์ของพอลิเอไมด์ 12 จะถูกยึดติดทางเคมีเพื่อสร้างสายโซ่ยาว กระบวนการนี้สามารถควบคุมได้เพื่อให้ได้น้ำหนักโมเลกุลที่เฉพาะเจาะจงและคุณสมบัติของวัสดุที่ต้องการ เนื่องด้วยองค์ประกอบที่เป็นเอกลักษณ์ PA 12 จึงแสดงคุณสมบัติที่ดี เช่น ความเสถียรของมิติที่ยอดเยี่ยม การดูดซับความชื้นต่ำ และคุณสมบัติการเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี คุณสมบัติเหล่านี้ทำให้ PA12 เป็นตัวเลือกที่ต้องการสำหรับการใช้งานในอุตสาหกรรมต่างๆ ที่ต้องมีความแข็งแรง ความทนทาน

2.2 เส้นใยกัญชง

กัญชงเป็นพืชในวงศ์ Cannabidaceae ใช้ประโยชน์ด้านเส้นมีชื่อวิทยาศาสตร์ ว่า Cannabis sativa L var. sativa ส่วนกัญชา ใช้ประโยชน์ด้านสารเสพติดและระงับปวดมีชื่อวิทยาศาสตร์ ว่า

Cannabis sativa L subsp. indica (Lam.) E. Small&Cronq อย่างไรก็ตามในปัจจุบันยังมีข้อถกเถียงในการจำแนกพืชทั้งสองชนิดนี้อยู่ กัญชงจะมีสาร tetrahydrocannabinol (THC) ต่ำกว่า 0.3% ซึ่งในทางกฎหมายสากลไม่ถือว่าเป็นพืชเสพติด มีการใช้กัญชงเป็นพืชเศรษฐกิจในอุตสาหกรรมเส้นใยและการทำเยื่อกระดาษ เช่น แคนนาดา และจีน สำหรับประเทศไทยกัญชงยังจัดเป็นพืชห้ามปลูกตามกฎหมาย ยกเว้นเพื่อการศึกษาวิจัย ต้องขออนุญาตจากกระทรวงสาธารณะสุข เนื่องจากประเทศไทยมีการใช้วัตถุดิบด้านเส้นใยและเยื่อกระดาษเป็นจำนวนมาก ดังนั้นกัญชงอาจเป็นพืชทางเลือกหนึ่งที่ให้เส้นใยคุณภาพสูง มีอายุการเก็บเกี่ยวสั้น ปลูกได้หลายครั้งต่อปี และ เมล็ดยังมีโปรตีนและน้ำมันที่มีคุณภาพในการบริโภค[31] เส้นใยกัญชง เป็นเส้นใยที่มีคุณภาพและมีความยืดหยุ่น รวมทั้งมีความแข็งแรง และทนทานสูง สามารถใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์จากเส้นใยได้หลากหลายมากกว่า 5,000 ชนิด แต่ในประเทศไทยยังมีข้อจำกัดที่ไม่สามารถใช้ประโยชน์จากการปั่นเส้นด้ายเชิงอุตสาหกรรมแบบเส้นใยยาวได้ จึ่งต้องนำเส้นใยยาวเหล่านั้นมาตัดให้สั้นลง โดยเฉลี่ยแล้วเส้นใยกัญชงจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ที่ 10-50 ไมโครเมตร มีลักษณะเป็นปล้อง ระยะห่างปล้องที่ 1-2 มิลลิเมตร ลักษณะพื้นผิวขรุขระ และหยาบ แต่มีการเรียงตัวในแนวยาวต่อเนื่องสม่ำเสมอ

ส่วนประกอบทางเคมี สัดส่วนและปริมาณของธาตุในเส้นใยกัญชง พบว่ามีปริมาณของธาตุซิลิคอน (Silicon; Si) ในปริมาณสูงถึงร้อยละ 71.19 โดยน้ำหนัก หรือคิดเป็นร้อยละ 76.77 โดยอะตอม และมีปริมาณของธาตุออกซิเจน (Oxygen; O) ในปริมาณที่ร้อยละ 28.55 โดยน้ำหนัก หรือคิดเป็นร้อยละ 23.11 โดยอะตอม ส่วนคาร์บอน (Carbon; C) และคลอรีน (Chlorine; Cl) มีปริมาณน้อยมาก คาร์บอน มีปริมาณร้อยละ 0.10 โดยน้ำหนัก หรือคิดเป็นร้อยละ 0.03 โดยอะตอม ส่วนคลอรีนมีปริมาณร้อยละ 0.17 โดยน้ำหนัก หรือคิดเป็นร้อยละ 0.09 โดยอะตอม คุณสมบัติในการต้านทานแรงดึงของเส้นใย พบว่าการทดสอบในรูปแบบเส้นใยเดี่ยวของเส้นใยกัญชง ความต้านทานแรงดึงเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 0.62 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร แต่หากทำการทดสอบในรูปแบบของเส้นใยกลุ่มเทียบตามน้ำหนักของเส้นใยที่ 10 20 และ 30 กรัม จะพบว่าจะให้ค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ยอยู่ที่ 1.45 1.75 และ 1.95 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตรตามลำดับ[15]



ภาพที่ 2-3 โครงสร้างทางเคมีของเส้นใยกัญชง (Avinash Kumar Both et al., 2023)

ตารางที่ 2-1 สมบัติทางเคมีและสมบัติเชิงกลของเส้นใยธรรมชาติ[14]

Type of fiber	Cellulose (wt%)	Moisture (wt%)	Tensile Strength (MPa)	Modulus of Elasticity (GPa)
Sisal	67 -78	11	247 - 855	9 - 38
Kenaf	31 - 39	-	930 - 1500	23 - 53
Bamboo	48.2 – 73.8	11.7	262	9.8
Banana	63 – 67.6	8.7	355 - 754	7.7 – 33.8
Coir/husk	36 - 43	8	95 - 593	4 - 6
Hemp	55 – 80.2	6.5	690	70

กัญชงให้ผลผลิตมากกว่าปลูกฝ้าย มีคุณภาพมากกว่า และใช้แรงงานในการปลูกน้อยกว่า เพราะไม่ต้องพรวนดินหรือให้ปุ๋ย ไม่ต้องใช้สารป้องกันกำจัดศัตรูพืช ซึ่งเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม การเก็บต้นกัญชงมาใช้ประโยชน์ในการผลิตเส้นใยนั้นจะเก็บในระยะที่ต้นเจริญเติบโตเต็มที่แต่ยังไม่ออกดอก แปลงส่วนที่เหลือจะปล่อยไว้ให้ออกดอกและเมล็ดเพื่อใช้ในการทำพันธุ์ต่อไป และเนื่องจากเป็นพืชอายุสั้น จึงสามารถปลูกได้ตลอดทั้งปี ประโยชน์ของกัญชงมีดังนี้[15]

1. เปลือกจากลำต้นให้เส้นใยเพื่อนำไปใช้ทำเป็นเส้นด้ายและเชือก ใช้สำหรับการทอผ้า ทำเครื่องนุ่งห่ม ฯลฯ

2. เนื้อของลำต้นที่ลอกเปลือกออกแล้วสามารถนำมาผลิตเป็นกระดาษได้

3. แกนของต้นกัญชงจะมีคุณสมบัติในการดูดซับกลิ่น น้ำ หรือน้ำมันได้ดี ในต่างประเทศนิยมนำไปผลิตเป็นพลังงานชีวมวลในรูปแบบต่าง ๆ เช่น ถ่านไม้, Alcohol, Ethanol, Methanol นอกจากนี้ แกนกัญชงยังถูกนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์เพื่อการตกแต่งอาคารและเฟอร์นิเจอร์อีกด้วย

4. เมล็ดใช้เป็นอาหารของคนและนก เมล็ดกัญชงที่เก็บได้สามารถนำมาสกัดเอาน้ำมันมาใช้ในการปรุงอาหารได้ ซึ่งจากการศึกษาก็พบว่า ในน้ำมันจากเมล็ดนั้นมีโอเมก้า 3 สูงมาก นอกจากนี้ยังมีโอเมก้า 6, โอเมก้า 9, linoleic acid, alpha- และ gamma-linolenic acid และสารในกลุ่มวิตามิน เช่น วิตามินอี ซึ่งเมื่อบริโภคแล้วจะมีประโยชน์ต่อการป้องกันโรคหัวใจและหลอดเลือด และช่วยลดการเกิดโรคมะเร็งในร่างกายได้อีกด้วย

5. น้ำมันจากเมล็ดสามารถไปผลิตเป็นน้ำมันซักแห้ง ทำสบู่ เครื่องสำอาง ครีมกันแดด แชมพู สบู่ โลชั่นบำรุงผิว ลิปสติก ลิปบาล์ม แผ่นมาส์กหน้า หรือแม้กระทั่งเป็นน้ำมันเชื้อเพลิง และถูกพัฒนาเป็นตำรับครีมน้ำมันกัญชงที่ให้ความชุ่มชื้นและช่วยบำรุงผิวแห้งเพื่อรักษาโรคผิวแห้งคันและสะเก็ดเงินที่ได้ผลเป็นอย่างดี

6. เมล็ดนอกจากจะให้น้ำมันแล้ว ยังพบว่ามีโปรตีนสูงมากอีกด้วย โดยสามารถนำมาใช้ในการทำผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ได้มากมาย เช่น เนย ชีส เต้าหู้ โปรตีนเกษตร นม ไอศกรีม น้ำมันสลัด อาหารเสริม ฯลฯ หรือผลิตเป็นแป้งทดแทนถั่วเหลืองได้เป็นอย่างดี ซึ่งในอนาคตอาจใช้เป็นทางเลือกในการบริโภคแทนถั่วเหลืองซึ่งเป็นพืช GMOs ก็เป็นได้

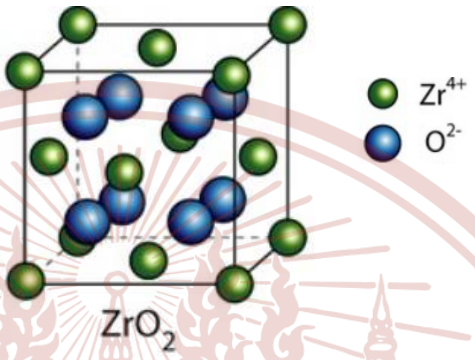
7. ในส่วนของใบก็สามารถนำไปใช้ทำประโยชน์ได้หลายอย่าง ตั้งแต่เป็นอาหาร ยารักษาโรค เครื่องสำอาง รวมไปถึงการนำใบมาเป็นชาเพื่อสุขภาพ, นำมาเป็นผงผสมกับสารอาหารอื่น ๆ เพื่อผลิตเป็นอาหารเสริม, ผลิตเป็นอาหารโดยตรงอย่างเส้นพาสต้า คุกกี้ หรือขนมปัง, ใช้ทำเบียร์, ไวน์, ซอสจิ้มอาหาร ฯลฯ และยังใช้ประโยชน์โดยนำมาสกัดเป็นน้ำมันหอมระเหยเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง ที่มีคุณสมบัติช่วยดูแลผิวพรรณ ทำให้ผิวชุ่มชื้น เหมาะกับผิวแพ้ง่าย ผิวบอบบาง

2.3 นาโนเซอร์โคเนียมออกไซด์

นาโนเทคโนโลยี เป็นเทคโนโลยีของวิทยาศาสตร์ประยุกต์ ที่เอาไปใช้ประโยชน์ในการออกแบบเพื่อประดิษฐ์วัสดุหรือผลิตภัณฑ์ใหม่ๆ การสังเคราะห์วัสดุที่มีข้อด้อยลดลง การตรวจวิเคราะห์และวินิจฉัยที่มีความละเอียดแม่นยำยิ่งขึ้นสำหรับวัสดุหรือสิ่งของที่เล็กมากอยู่ในระดับนาโนเมตร ซึ่งนาโนเทคโนโลยีจะให้ความสำคัญแก่กระบวนการเตรียมหรือการใช้เทคโนโลยีในช่วงแรก โดยเริ่มจากการควบคุมแต่ละโมเลกุล หรือ อะตอม ที่ส่งผลต่อการประกอบหรือการรวมตัวกันทำให้เกิดเป็นสารที่มีขนาดใหญ่ ทำให้นาโนเทคโนโลยีมีความพิเศษ คือ มีความเฉพาะเจาะจง สามารถควบคุมการทำงานของสารที่สร้างขึ้นได้ทั้งในด้านเคมีและฟิสิกส์อย่างมีประสิทธิภาพ โดยหน่วยนาโนเมตร (nanometer) ที่ใช้สัญลักษณ์ตัวย่อ nm เป็นหน่วยของระบบ SI ระดับเซนติเมตรและเมตร ซึ่ง 1 นาโนเมตร คือความยาว 1 ในสิบล้านของเซนติเมตร (10-7 cm) หรือ ในพันล้านของเมตร (10-9 m) เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนประกอบในร่างกายที่มีขนาดเล็ก เช่น โมเลกุลของดีเอ็นเอ มีความกว้าง 2.5 นาโนเมตร ซึ่งขนาด 1 นาโนเมตร คือ ขนาดของอะตอมที่มีความเล็กกว่าเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นผมมนุษย์ถึงแปดหมื่นเท่า โดยสิ่งที่มีขนาดในช่วง 1-100 nm จัดว่าเป็นนาโนเทคโนโลยีเกือบทั้งสิ้น

เซอร์โคเนียม (สัญลักษณ์อะตอม: Zr, เลขอะตอม: 40) เป็นธาตุในบล็อก D, กลุ่ม 4, คาบ 5 ที่มีมวลอะตอม 91.224 แบบจำลองของเซอร์โคเนียมโบร์ จำนวนอิเล็กตรอนในเปลือกของเซอร์โคเนียมแต่ละอันคือ 2, 8, 18, 10, 2 และการกำหนดค่าอิเล็กตรอนคือ [Kr] 4d2 5s2 อะตอมของเซอร์โคเนียมมีรัศมี 160 pm และรัศมีแวนเดอร์วาลส์ 186 pm เซอร์โคเนียมถูกค้นพบโดยมาร์ติน ไฮน์ริช คลาพรอธในปี พ.ศ. 2332 และแยกได้เป็นครั้งแรกโดยเยินส์ จาคอบ เบอร์เซลิอุส ในปี พ.ศ. 2367 ในรูปแบบธาตุ เซอร์โคเนียมมีลักษณะสีขาวเงินคล้ายกับไททาเนียม แร่หลักของเซอร์โคเนียมคือเซอร์โคเนียม (เซอร์โคเนียมซิลิเกต) เซอร์โคเนียมธาตุ เซอร์โคเนียมผลิตขึ้นในเชิงพาณิชย์เป็นผลพลอยได้จากการขุดไททาเนียมและดีบุก และมีการนำไปใช้งานหลายอย่างเป็นตัวทำให้ทึบแสงและวัสดุทนไฟ เซอร์โคเนียมไม่พบในธรรมชาติในฐานะธาตุอิสระ ชื่อของเซอร์โคเนียมมาจากแร่เซอร์โคเนียม ซึ่งเป็นแหล่งเซอร์โคเนียมที่สำคัญที่สุด และมาจากคำว่า zargun ในภาษาเปอร์เซีย ซึ่งแปลว่าคล้ายทองคำอนุภาคเซอร์โคเนียมออกไซด์ในระดับนาโนยังมีจำหน่ายในรูปแบบความบริสุทธิ์สูงมากและความบริสุทธิ์สูง รวมถึงแบบเคลือบและแบบกระจายตัว นอกจากนี้ยังมีจำหน่ายในรูปแบบกระจายตัวผ่านกลุ่มการผลิต AE Nanofluid โดยทั่วไปแล้ว นาโนฟลูอิดจะถูกกำหนดให้เป็นอนุภาคนาโนที่แขวนลอยอยู่ในสารละลายโดยใช้สารลดแรงตึงผิวหรือเทคโนโลยีประจุ

พื้นผิว นอกจากนี้ยังมีคำแนะนำทางเทคนิคเกี่ยวกับการกระจายตัวและการเลือกเคลือบของนาโนฟลูอิดอีกด้วย อนุภาคนาโนที่มีฟังก์ชันบนพื้นผิวทำให้สามารถดูดซับอนุภาคที่อินเทอร์เฟสพื้นผิวได้โดยเฉพาะโดยใช้พอลิเมอร์ที่ยึดด้วยสารเคมี



ภาพที่ 2-4 โครงสร้างผลึกของเซอร์โคเนียมออกไซด์

อะตอมของ เซอร์โคเนียม (Zr) จะจับกับอะตอมของ ออกซิเจน (O) ในอัตราส่วน 1:2 และการจัดเรียงของอะตอมจะแตกต่างกันไปตามโครงสร้างผลึกที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ โครงสร้างผลึกของเซอร์โคเนียมออกไซด์แบ่งออกเป็น 3 แบบ[4], [13]

1. Monoclinic (โครงสร้างที่เสถียรที่อุณหภูมิ <1170°C) อะตอมของ Zr ถูกล้อมรอบด้วยออกซิเจนในรูปแบบที่ไม่สมมาตร เป็นโครงสร้างที่พบได้ทั่วไปที่อุณหภูมิห้อง

2. Tetragonal (โครงสร้างที่เสถียรที่อุณหภูมิ 1,170–2,370°C) มีสมมาตรมากขึ้นและช่วยเพิ่มความแข็งแรงของวัสดุ

3. Cubic (โครงสร้างที่เสถียรที่อุณหภูมิ > 2,370°C) มีการจัดเรียงแบบสมมาตรสูงและใช้ในวัสดุเซรามิกขั้นสูง เช่น วัสดุทนไฟ

เซอร์โคเนียมออกไซด์ (ZrO_2) หรือเรียกว่าเซอร์โคเนีย เป็นผงสีขาวไม่มีกลิ่น มีเสถียรภาพทางเคมีความร้อนที่ดี ทนต่อการกัดกร่อนของกรดและด่าง และการนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิสูง การนำไฟฟ้าที่ยอดเยี่ยมที่อุณหภูมิสูง ลักษณะเฉพาะเหล่านี้ทำให้นาโนเซอร์โคเนียมถูกใช้กันอย่างแพร่หลายในสาขาอุตสาหกรรมและเทคโนโลยีต่างๆ เซอร์โคเนียมออกไซด์หรือผงนาโนเซอร์โคเนียหรืออนุภาคนาโน (ZrO_2) เป็นอนุภาคพื้นที่ผิวสูงสีขาวที่มีจำหน่ายในรูปแบบโมโนคลินิกหรือแบบคงตัวหรือเจือด้วยอิตเทรีย (อิตเทรียมออกไซด์) แคลเซีย (แคลเซียมออกไซด์) หรือแมกนีเซีย (แมกนีเซียมออกไซด์) หรือเซอร์โคเนียฟอสฟอไรซ์ อนุภาคนาโนเซอร์โคเนียมออกไซด์ในระดับนาโนโดยทั่วไปมีขนาด

5 – 100 nm โดยมีพื้นที่ผิวจำเพาะ (SSA) ในช่วง 25 - 50 m^2/g ซึ่งคุณสมบัติและประโยชน์ของเซอร์โคเนียมออกไซด์คือมีความแข็งแรงและความเหนียวสูง ต้านทานการสึกหรอและการกัดกร่อน รวมถึงการทนต่อแรงกระแทก การประยุกต์ใช้นาโนเซอร์โคเนียมออกไซด์ มีดังนี้

การเร่งปฏิกิริยา : นาโนเซอร์โคเนียมออกไซด์เป็นเลิศในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาเคมีต่างๆ เช่น การคายน้ำของแอลกอฮอล์ เอสเทอริฟิเคชัน และไฮโดรจิเนชัน เนื่องจากมีพื้นผิวที่มีพื้นที่มากและลักษณะพื้นผิวที่โดดเด่น

เซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็ง (SOFCs) : ใช้เป็นอิเล็กโทรไลต์เนื่องจากมีสภาพนำไอออนิกที่เหนือกว่าที่อุณหภูมิสูง ผงเซอร์โคเนียมออกไซด์ขนาดนาโนจึงมีบทบาทสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพและประสิทธิผลของ SOFC

อุตสาหกรรมเซรามิก : นาโนเซอร์โคเนียมออกไซด์เป็นส่วนสำคัญของเซรามิกขั้นสูง มีส่วนช่วยในเรื่องความแข็งแรง ความทนทาน และความต้านทานต่อการสึกหรอและการกัดกร่อนสูง โดยสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการเคลือบเซรามิก เครื่องมือตัด และวัสดุทนไฟ

วัสดุทางทันตกรรม : นาโนอนุภาคเซอร์โคเนียมออกไซด์ซึ่งใช้ในเซรามิกทางทันตกรรม เช่น รากฟันเทียมและครอบฟัน ให้ความแข็งแกร่งและความสวยงามที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับวัสดุแบบเดิม

ตัวดูดซับรังสี UV : นาโนอนุภาคเหล่านี้สามารถดูดซับรังสี UV ได้ และถูกนำไปใช้ในครีมกันแดด สารเคลือบ และสี เพื่อการปกป้องรังสี UV ที่มีประสิทธิภาพ เซ็นเซอร์ออกซิเจน: ฟิล์มนาโนเซอร์โคเนียมออกไซด์ถูกนำมาใช้ในเซ็นเซอร์ออกซิเจนเนื่องจากมีคุณสมบัติในการนำไอออนออกซิเจนได้ดีเยี่ยม ซึ่งจำเป็นสำหรับการวัดระดับออกซิเจนในโรงงานอุตสาหกรรมและสิ่งแวดล้อมต่างๆ

การเคลือบด้วยแสง : ด้วยดัชนีการหักเหแสงและความโปร่งใสที่สูง อนุภาคนาโนเหล่านี้จึงถูกนำมาใช้ในการเคลือบด้วยแสงสำหรับพื้นผิวป้องกันแสงสะท้อน การเคลือบกระจก และ ท่อนำคลื่น

การใช้งานทางชีวการแพทย์ : ความเข้ากันได้ทางชีวภาพ ความเสถียร และพื้นที่ผิวที่กว้างขวางของนาโนเซอร์โคเนียมออกไซด์ถือเป็นความหวังสำหรับการแพทย์ชีวภาพ รวมถึงในระบบส่งยา วิศวกรรมเนื้อเยื่อ และการถ่ายภาพทางการแพทย์

2.4 การขึ้นรูปพลาสติกด้วยการอัด (Compress Molding)

การขึ้นรูปเป็นกระบวนการสำคัญในการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ เป็นเทคนิคที่ใช้ในการขึ้นรูปวัสดุให้อยู่ในรูปแบบเฉพาะที่สามารถนำไปใช้งานได้หลากหลาย การปั้นมีหลายวิธีและหนึ่งในนั้นคือการขึ้นรูปแบบอัดขึ้นรูป เทคนิคนี้ใช้เพื่อสร้างวัตถุที่มีหน้าตัดคงที่ การขึ้นรูปแบบอัดรีดใช้ในอุตสาหกรรมหลายประเภท ได้แก่

การก่อสร้าง : การขึ้นรูปแบบอัดรีดใช้เพื่อสร้างโปรไฟล์สำหรับประตู หน้าต่าง และผนัง

ยานยนต์ : การขึ้นรูปแบบอัดรีดใช้เพื่อสร้างแถบกันฝน ซีล และขอบตกแต่งสำหรับยานยนต์

อุตสาหกรรมอาหาร : การขึ้นรูปแบบอัดรีดใช้ในการผลิตบรรจุภัณฑ์อาหาร เช่น หลอดยาสีฟันและหลอด

อุตสาหกรรมการแพทย์ : การขึ้นรูปแบบอัดรีดใช้เพื่อสร้างท่อสำหรับสายสวนและอุปกรณ์ทางการแพทย์อื่นๆ

อุตสาหกรรมการบินและอวกาศ : การอัดขึ้นรูปใช้เพื่อสร้างชิ้นส่วนสำหรับเครื่องบินและยานอวกาศ

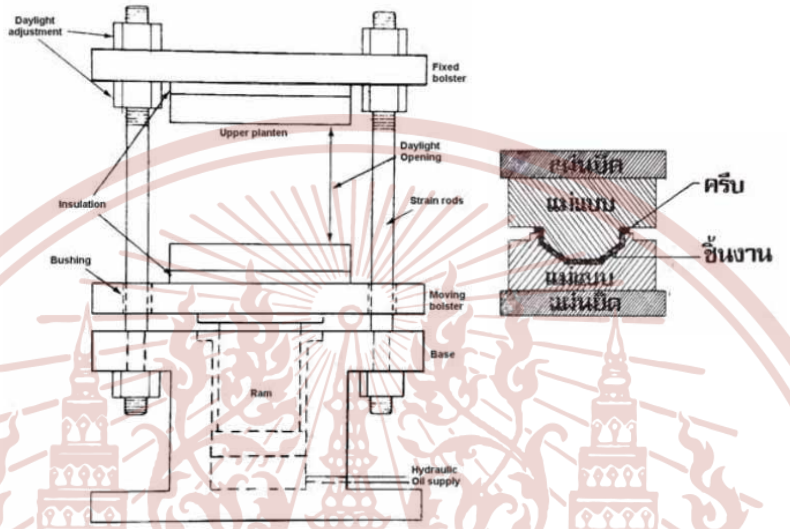
การขึ้นรูปพลาสติกด้วยวิธีการอัด เป็นการขึ้นรูปโดยการนำผงพลาสติกที่แข็งตัวมาอัดในแม่พิมพ์ภายใต้ความดันและอุณหภูมิที่เหมาะสม ขั้นตอนการผลิตทำโดย เริ่มจากนำผงพลาสติกมาชั่งให้ได้น้ำหนักตามที่ต้องการ จากนั้นนำไปอบไล่ความชื้นและเป็นการอุ่นวัตถุดิบก่อนเข้าแม่พิมพ์ จากนั้นนำไปใส่แม่พิมพ์ พอเริ่มปิดแม่พิมพ์อัดให้พลาสติกแพร่ตัวไปตามช่องว่างของแม่พิมพ์จะเริ่มชะลอช้าลง เพื่อให้พลาสติกได้รับความร้อนจากแม่พิมพ์ได้ทั่วถึงยิ่งขึ้น เมื่อถึงตำแหน่งสุด จะถึงช่วงเวลาแข็งตัวของพลาสติกเองโดยไม่ต้องใช้น้ำเย็น จากนั้นก็เปิดแม่พิมพ์นำชิ้นงานออกได้ ข้อดีของการอัดขึ้นรูปมีดังนี้

อัตราการผลิตสูง : การขึ้นรูปแบบอัดรีดสามารถผลิตสินค้าได้ในอัตราที่สูง ทำให้เหมาะสำหรับการผลิตขนาดใหญ่

ความสม่ำเสมอ : ผลิตภัณฑ์ที่อัดขึ้นรูปจะมีหน้าตัดที่สม่ำเสมอ ทำให้มีความสม่ำเสมอมากกว่าผลิตภัณฑ์ที่ผลิตโดยวิธีการขึ้นรูปแบบอื่นๆ

ต้นทุนเครื่องมือต่ำ : ต้นทุนในการผลิตแม่พิมพ์ที่ใช้ในการขึ้นรูปแบบอัดขึ้นรูปค่อนข้างต่ำ ทำให้เป็นกระบวนการที่คุ้มค่า

วัสดุที่หลากหลาย : การขึ้นรูปแบบอัดขึ้นรูปสามารถทำได้กับวัสดุหลายประเภท รวมถึงพลาสติก โลหะ และเซรามิก



ภาพที่ 2-5 การขึ้นรูปพลาสติกด้วยการอัด

แม้จะมีข้อดี แต่การอัดขึ้นรูปก็มีข้อเสีย เช่น

รูปร่างที่จำกัด : การขึ้นรูปแบบอัดรีดนั้นจำกัดอยู่ที่รูปร่างที่มีหน้าตัดที่สม่ำเสมอ ไม่สามารถสร้างรูปทรงหรือชิ้นส่วนที่ซับซ้อนซึ่งมีรายละเอียดที่ซับซ้อนได้

ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสูง : แม้ว่าต้นทุนเครื่องมือจะต่ำ แต่ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสำหรับการขึ้นรูปแบบอัดขึ้นรูปก็อาจสูงได้

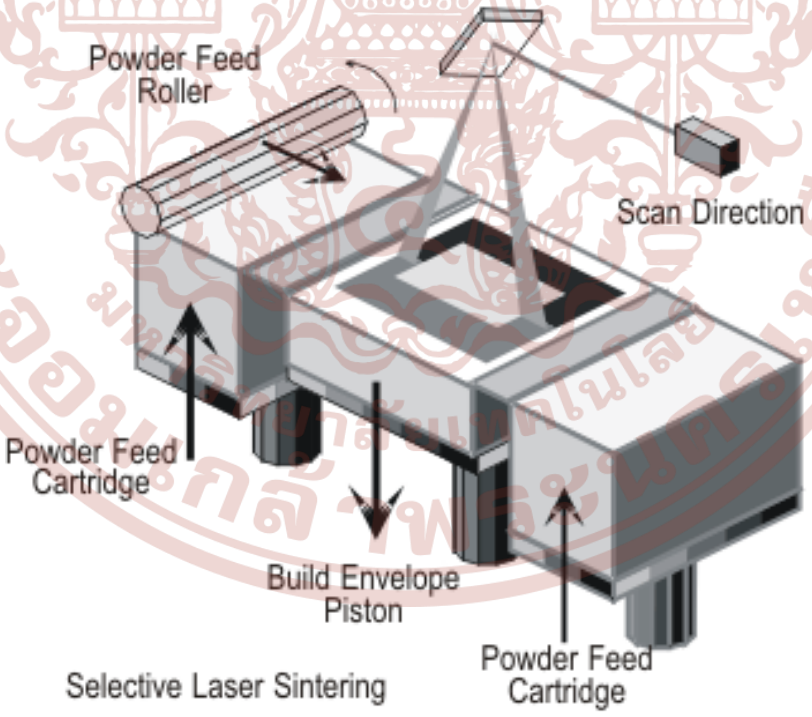
ของเสียสูง : การอัดขึ้นรูปทำให้เกิดวัสดุเหลือใช้จำนวนมากเนื่องจากการตัดแต่งที่จำเป็นในผลิตภัณฑ์ขั้นสุดท้าย

2.5 กระบวนการขึ้นรูป 3มิติ ชนิดผง (3D printing powder)

3D printer คือเครื่องจักรที่ใช้กระบวนการเติมเนื้อวัสดุ เพื่อทำให้เกิดเป็นรูปร่างที่สามารถจับต้องได้ตามที่ต้องการ โดยอาศัยข้อมูลในรูปแบบดิจิตอลซึ่งการเติมเนื้อหรือพิมพ์วัสดุลงไปนั้นเรียกว่า Additive Process ซึ่งการพิมพ์นั้นจะค่อยเป็นไปทีละ Layer หรือทีละชั้น สำหรับการใช้งาน 3D printer นั้น ขั้นตอนแรกต้องมีไฟล์ 3 มิติ ซึ่งไฟล์นั้นจะสามารถเขียนภาพขึ้นมาจากโปรแกรมออกแบบ 3 มิติหรือใช้เครื่องสแกนเนอร์ 3 มิติ ทำการแปลงวัตถุในโลกจริงให้กลายเป็นไฟล์ดิจิตอล

เมื่อใช้วัสดุเป็นแบบผง ก็จะใช้ความร้อนยิงลงไปที่ผง เพื่อให้ผงหลอมละลายติดกันซึ่งความร้อนที่ยิงออกมาจะมาจากเลเซอร์กำลังสูง[30]

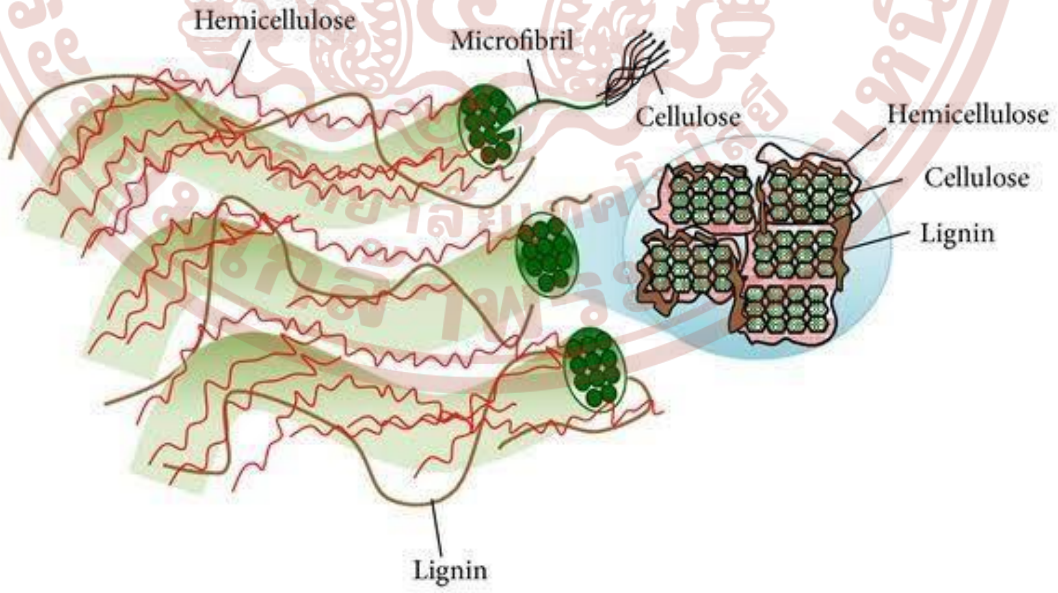
เทคโนโลยีนี้ เรียกได้ว่าเป็นเทคโนโลยีสำหรับใช้ในอุตสาหกรรมเป็นหลัก เพราะเน้นงานพิมพ์จำนวนมาก และวัสดุที่ใช้พิมพ์จะเน้นใช้งานได้จริง ซึ่งหมึกหรือวัสดุที่ใช้จะอยู่ในรูปของผง ซึ่งผงก็จะมีทั้งผงที่เป็นพลาสติกประเภทไนลอน หรือผงที่เป็นโลหะ เช่น สแตนเลส, ไทเทเนียม รวมไปถึงผงที่เป็นทองคำ เทคโนโลยีนี้ถูกแบ่งออกมาจาก Power Bed Fusion และเป็นที่นิยมในตอนนี้ก็คือ SLS (Selective Laser Sintering) และ MJF (Multi Jet Fusion) ซึ่ง SLS เป็นการใช้แสงเลเซอร์ยิงลงบนพื้นผิววัสดุให้วัสดุเกิดการหลอมเหลวเป็นเนื้อเดียวกัน โดยจะเลือกยิงเฉพาะจุด เมื่อพิมพ์เสร็จหนึ่งชั้นตัวเครื่อง ก็จะเติมผงใหม่ลงไปและเกลี่ยปิดทับผงที่พิมพ์เสร็จแล้ว จากนั้นเลเซอร์ก็จะยิงลงไปอีกซึ่งกระบวนการก็จะซ้ำไปซ้ำมาแบบนี้ จนได้โมเดลงาน 3 มิติ ข้อดีของเทคนิคนี้คือ ชิ้นงานที่ได้มีความแข็งแรงคงทนแต่ราคาของเครื่องพิมพ์ยังค่อนข้างสูง และวัสดุที่ใช้กับเครื่องพิมพ์แบบนี้ได้มีค่อนข้างจำกัดเมื่อเทียบกับเครื่องพิมพ์แบบอื่นๆ



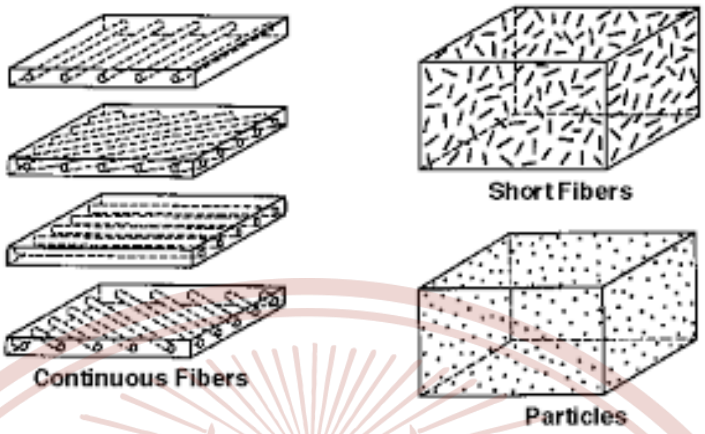
ภาพที่ 2-6 การพิมพ์ขึ้นรูป 3 มิติ แบบ SLS (Selective Laser Sintering)

2.6 วัสดุเชิงประกอบ (Composite material)

วัสดุเชิงประกอบ (Composite materials) คือวัสดุที่เกิดจากการรวมตัวของวัสดุมากกว่าหนึ่งชนิดขึ้นไปแล้วทำให้สมบัติของวัสดุรวมดีขึ้น ความหมายเชิงวิศวกรรมของวัสดุเชิงประกอบหมายถึง วัสดุที่ประกอบขึ้นจากวัสดุที่มีสมบัติแตกต่างกันตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปโดยไม่เกิดการรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกัน ทำให้สมบัติของวัสดุเชิงประกอบที่เกิดขึ้นมีสมบัติร่วมกันของวัสดุที่เป็นองค์ประกอบ ดังนั้นคาดคะเนสมบัติของวัสดุเชิงประกอบจึงไม่สามารถทำนายได้จากวัสดุที่เป็นองค์ประกอบชนิดใดเพียงชนิดเดียว องค์ประกอบของวัสดุเชิงประกอบ ได้แก่ วัสดุที่เป็นเนื้อหลักและเป็นเฟสต่อเนื่อง เรียกว่า วัสดุเนื้อพื้น (Matrix) และวัสดุส่วนเหลือที่กระจายตัวอยู่ในวัสดุเนื้อพื้น เรียกว่า สารเสริมแรง (Reinforcement) โดยเมทริกซ์ทำหน้าที่ปกป้องสารเสริมแรงจากความเสียหายที่อาจจะเกิดจากสภาพแวดล้อมและแรงที่กระทำกับวัสดุ รวมถึงใช้เป็นตัวยึดสารเสริมแรงให้อยู่ด้วยกัน สารเสริมแรงส่วนมากมักเป็นเส้นใย (Fiber) หรือเป็นอนุภาค (Particle) โดยมีหน้าที่ในการเสริมความแข็งแรงให้กับวัสดุเนื้อพื้นเพื่อป้องกันไม่ให้วัสดุเชิงประกอบเกิดการแตกหัก ในธรรมชาติก็มีวัสดุเชิงประกอบอยู่ด้วย นั่นก็คือ ไม้ ซึ่งประกอบด้วยเซลลูโลส (Cellulose) ที่ทำหน้าที่เป็นสารเสรมแรง และ lignin ทำหน้าที่เป็นเมทริกซ์ โดยเส้นใยของ Cellulose มีหน้าที่เพิ่มความแข็งแรงให้กับไม้ ส่วน lignin จะมีหน้าที่ยึด cellulose ให้อยู่ด้วยกัน



ภาพที่ 2-7 แบบจำลองโครงสร้างของไม้



ภาพที่ 2-8 สารเสริมแรงในวัสดุเชิงประกอบ

ตัวเสริมแรงจะช่วยทำให้สมบัติทางกลโดยรวมของเนื้อพื้นดีเนื่องจากวัสดุแต่ละชนิดจะมีทั้งข้อดีข้อเสีย เช่น โลหะจะมีความแข็งแรง และความเหนียวสูงแต่เป็นสนิมง่ายและหนัก พอลิเมอร์จะมีน้ำหนักเบา แต่มีความแข็งแรงต่ำ ทนความร้อนไม่ได้ นำไฟฟ้าไม่ได้ เซรามิกมีความแข็งสูง ทนต่อการสึกหรอและการผุกร่อนได้ดี ทนความร้อนได้ดี แต่เปราะ มีความเหนียวต่ำ เป็นต้น ด้วยเหตุนี้จึงมีการนำเอาวัสดุต่างชนิดมาผสมกันเพื่อจะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสมบัติพิเศษที่ได้จากข้อดีของวัสดุแต่ละชนิด เช่น คอนกรีตเสริมเหล็กเป็นวัสดุผสมที่จะให้ทั้งความแข็งและความเหนียว หรือไฟเบอร์กลาสเป็นวัสดุผสมที่มีน้ำหนักเบาและมีความแข็งแรง เป็นต้น ประเภทวัสดุเชิงประกอบ แบ่งได้ตามเนื้อพื้นได้เป็น 3 กลุ่มคือ

1.พอลิเมอร์ (Fiber-reinforced polymers, FRP) พอลิเมอร์เป็นวัสดุที่นิยมนำมาใช้เป็นวัสดุเนื้อพื้นของวัสดุผสม ทั้งกลุ่มที่เป็น Thermosetting และ Thermoplastic วัสดุผสมที่นิยมใช้พอลิเมอร์เป็นวัสดุเนื้อพื้นมากที่สุด คือ วัสดุพอลิเมอร์ เสริมแรงด้วยเส้นใยแก้ว ข้อจำกัดของการใช้พอลิเมอร์เป็นวัสดุเนื้อพื้น คือ ใช้งานที่อุณหภูมิต่ำเท่านั้น ถึงแม้ว่าพอลิเมอร์บางชนิดสามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงได้ แต่ยังมีข้อจำกัดเมื่อเทียบกับวัสดุกลุ่มเหล็กและเซรามิก

2. โลหะ (Metal-Matrix Composites, MMC) โลหะที่ใช้เป็นวัสดุเนื้อพื้นประกอบด้วย อลูมิเนียม แมกนีเซียม ทองแดง นิกเกิล และโลหะผสมประเภทสารประกอบ โดยใช้เสริมแรงร่วมกับเส้นใยที่เป็นโลหะและเซรามิก นิยมนำไปประยุกต์ใช้ทำชิ้นส่วนยานอวกาศและชิ้นส่วนยานยนต์ที่รู้จักกันในนามของวัสดุผสมวัสดุเนื้อพื้นโลหะ ข้อดี คือ สามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงๆได้ดี แต่มีข้อจำกัดในด้านการผลิตและการขึ้นรูปที่ค่อนข้างยากและต้นทุนการผลิตที่สูงเมื่อเทียบกับวัสดุผสมชนิดอื่นๆ

3. เซรามิก (Ceramic-matrix composite, CMC) เป็นวัสดุที่มีความทนทานต่อการใช้งานที่อุณหภูมิสูง ไม่นำความร้อน ทนทานต่อการกัดกร่อน และอัตราการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง มีน้ำหนักเบากว่าโลหะ แต่มีข้อจำกัดคือมีความเปราะสูง

2.7 สารเติมแต่ง (Additive)

สารเติมแต่งจะถูกเติมลงไปในวัสดุด้วยปริมาณที่น้อยกว่าเพื่อปรับเปลี่ยนสมบัติให้เหมาะสม โดยปกติสารเติมแต่งนี้จะเข้าไปกระจายอยู่ในเนื้อของพลาสติกโดยทางกายภาพ และไม่เปลี่ยนแปลงโครงสร้างสำคัญๆ ของพอลิเมอร์ โดยทั่วไป สารเติมแต่งควรมีสมบัติ ดังนี้

1. ทำหน้าที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และต้องไม่ทำให้สมบัติของพอลิเมอร์เสียไป

2. ต้องเสถียร (stable) ภายใต้สภาวะของกระบวนการผลิตต่างๆ และเสถียรภายใต้สภาวะของการใช้งาน

3. ไม่เกิดการตกสี (bleeding) และblooming

4. ไม่เป็นพิษ (non-toxic) และไม่ทำให้เกิดรสหรือกลิ่นและมีราคาถูก

สารเติมแต่งสารมารถแบ่งตามประเภทของการใช้งานได้ดังนี้[22]

- สารดัดแปรสมบัติเชิงกล (Mechanical properties modifiers)

1. สารเสริมแรง (reinforcing agents)

2. Interfacing agents ทำให้สารเติมแต่งและพลาสติกเข้ารวมกันได้ดี

3. Toughening agents

4. Plasticizers

5. Blowing agents

6. Particulate fillers

- สารดัดแปรสมบัติทางเคมี(Chemical properties modifiers)

ประเภทของสาร หน้าที่

Antioxidant	ป้องกันการสลายตัวจากออกซิเจน
UV stabilizer	ป้องกันการสลายตัวจากแสงยูวี
Flame retardant	เพิ่มความทนไฟ
Biocides	ป้องกันการทำลายจากจุลินทรีย์และเชื้อรา

- สารดัดแปรเพื่อความสวยงาม (Aesthetic properties modifiers)

ประเภทของสาร	หน้าที่
Colorants	ช่วยให้มีสีสันสวยงาม
Odorants	เพิ่มกลิ่นหอมหรือดับกลิ่นเหม็น
Nucleating agents	ช่วยให้แสงผ่านพอลิเมอร์ได้มากขึ้น
Biocides	ป้องกันการเกิดกลิ่นจากเชื้อรา

- สารดัดแปรสมบัติที่พื้นผิว (Surface properties modifiers)

ประเภท	หน้าที่
Anti-blocking agents	ป้องกันไม่ให้แผนฟิล์มหรือชีทติดกัน
Antistatic agents	ลดหรือจำกัดการสะสมของประจุไฟฟ้าสถิตที่พื้นผิว
Coupling agents	เพิ่มแรงยึดระหว่างพอลิเมอร์กับเส้นใยเสริมแรงหรือฟิลเลอร์
Release agents	ลดสัมประสิทธิ์การเสียดทานที่พื้นผิว

- สารดัดแปรสำหรับกระบวนการผลิต(Processing modifiers)

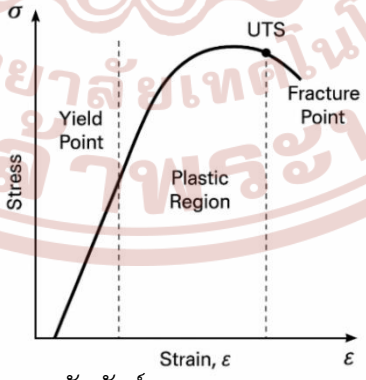
ประเภท	หน้าที่
Blowing agents	ทำให้เกิดแก๊สเพื่อใช้ในการผลิตโฟม
Crosslinking agents	ทำให้เกิดการเชื่อมขวาง
Heat stabilzers	ป้องกันการสลายตัวจากความร้อน

Plasticizers	ลดความหนืดของพอลิเมอร์หลอมเหลว
Relesas agents	ป้องกันการติดกันกับเครื่องมือขึ้นรูป
Lubricants	ลดแรงเสียดทานระหว่างพอลิเมอร์หลอมเหลวกับเครื่องจักรและแม่แบบขณะขึ้นรูป
Processing aids	ช่วยทำให้การขึ้นรูปทำได้ง่ายขึ้น

2.8 ทฤษฎีการทดสอบที่ใช้ในงานวิจัย

2.8.1 การทดสอบแรงดึง (Tensile test)

การทดสอบแรงดึง หรือเรียกอีกอย่างว่าการทดสอบแรงดึง เป็นการทดสอบวัสดุศาสตร์และวิศวกรรมพื้นฐาน ซึ่งตัวอย่างจะต้องอยู่ภายใต้แรงดึงที่ควบคุมไว้จนกว่าจะเกิดการแตกหัก คุณสมบัติที่วัดได้โดยตรงผ่านการทดสอบแรงดึง ได้แก่ ความแข็งแรงแรงดึงสูงสุด ความแข็งแรงในการแตกหัก การยืดตัวสูงสุดและการลดลงของพื้นที่จากการวัดเหล่านี้ สามารถกำหนดคุณสมบัติต่อไปนี้ได้ มอดูลัสของยัง อัตราส่วนของปัวซอง ความแข็งแรงผลผลิต และลักษณะการแข็งตัวจากความเครียดการทดสอบแรงดึงแกนเดียวเป็นวิธีที่ใช้กันทั่วไปในการหาลักษณะทางกลของวัสดุไอโซทรอปิก วัสดุ บางชนิดใช้การทดสอบแรงดึงแกนคู่ ความแตกต่างหลักระหว่างเครื่องทดสอบเหล่านี้คือวิธีการใช้แรงกับวัสดุ โดยจะใช้ค่าความชันของกราฟช่วงแรก (Elastic) มาคำนวณ ซึ่งเป็นคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุที่บอกว่าวัสดุนั้นความแข็งเกร็ง (stiffness)



ภาพที่ 2-9 กราฟความสัมพันธ์ Stress-Strain ของการทดสอบแรงดึง

สูตรในการคำนวณมีดังนี้

$$\text{Stress}(\boldsymbol{\sigma}) = \frac{F}{A} \qquad (2\text{-}1)$$

$$\text{Strain } (\boldsymbol{\varepsilon}) = \frac{\Delta L}{L_0} \qquad (2\text{-}2)$$

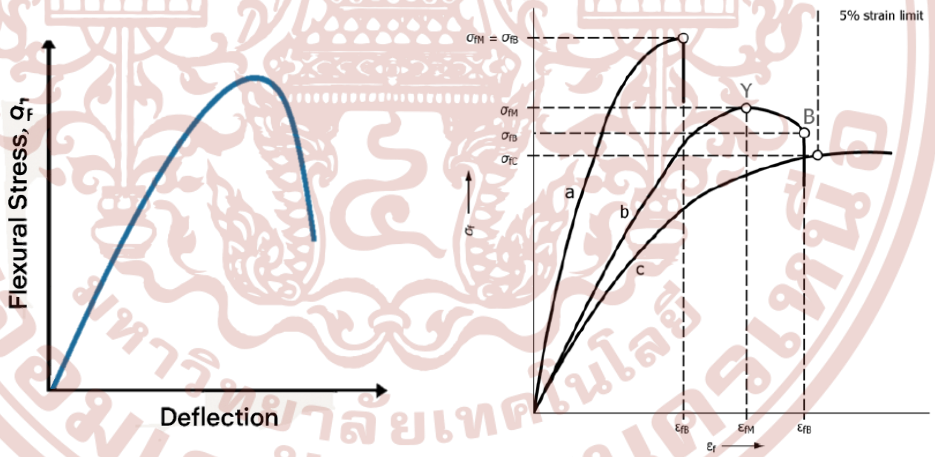
$$\text{Young's Modulus (E)} = \frac{\sigma}{\varepsilon} \qquad (2\text{-}3)$$

ΔL = การเปลี่ยนแปลงความยาว

L_0 = ความยาวเริ่มต้น

2.8.2 การทดสอบแรงดัดงอ (Flexural test)

การทดสอบแรงดัดงอ (Flexural test) เป็นการทดสอบที่ใช้ในการประเมินความแข็งแรงและความทนทานของวัสดุที่มีลักษณะเป็นแท่งหรือแผ่น เช่น โลหะ, คอนกรีต หรือพลาสติก โดยการทดสอบจะทำการบังคับให้วัสดุที่ทดสอบเกิดการดัดงอจนกระทั่งวัสดุแตกหรือยุบตัว เพื่อหาค่าความต้านทานต่อการดัดงอ ซึ่งจะมีการวัดค่าต่าง ๆ เช่น มอดูลัสความยืดหยุ่น (modulus of elasticity) หรือค่าความต้านทานแรงดัดงอ (flexural strength)



ภาพที่ 2-10 ตัวอย่างกราฟแสดงค่า Flexural Stress

หมายเหตุ —เส้นโค้ง a: ชิ้นงานที่ขาดก่อนจะยืดหยุ่น เส้นโค้ง b: ชิ้นงานที่ยืดหยุ่นแล้วขาดก่อนถึงขีดจำกัดความเครียด 5% เส้นโค้ง c: ชิ้นงานที่ไม่ยืดหยุ่นหรือขาดก่อนถึงขีดจำกัดความเครียด 5%

สูตรในการคำนวณค่าความต้านทานแรงดัดงอ

$$\text{(Flexural Strength) คือ : } \sigma_f = \frac{3FL}{2bd^2} \qquad (2\text{-}4)$$

σ_f = ความต้านทานแรงดัดงอ (Flexural Strength)

F = แรงที่กระทำที่จุดกลาง

L = ระยะห่างระหว่างจุดรองรับ

b = ความกว้างของตัวอย่าง

d = ความหนาของตัวอย่าง

Flexural Stress (σf): $\sigma_f = 3PL/2bd^2$ (2-5)

โดยที่:

σ = แรงดึงในเส้นใยด้านนอกที่จุดกึ่งกลาง *MPa (psi)*

P = แรงที่จุดที่กำหนดบนเส้นโค้งแรง-การเบี่ยงเบน *N (lbf)*

L = ช่วงรับน้ำหนัก มม. (นิ้ว)

b = ความกว้างของคานที่ทดสอบ มม. (นิ้ว)

d = ความลึกของคานที่ทดสอบ มม. (นิ้ว)

หมายเหตุ —Eq3 จะใช้ไม่ได้หากชิ้นงานเลื่อนไปมาระหว่างตัวรองรับมากเกินไป

Flexural Strain ε_f—การเปลี่ยนแปลงเศษส่วนที่กำหนดในความยาวขององค์ประกอบบนพื้นผิวด้านนอกของชิ้นงานทดสอบที่ช่วงกลางซึ่งเป็นจุดที่ความเครียดสูงสุดเกิดขึ้น สามารถคำนวณได้สำหรับการเบี่ยงเบนใดๆ โดยใช้ *Eq* 5

$$\varepsilon_f = 6Dd/L^2 \quad (2\text{-}6)$$

โดยที่:

εf = ความเครียดในพื้นผิวด้านนอก, มม./มม. (นิ้ว/นิ้ว)

D = การเบี่ยงเบนสูงสุดของจุดศูนย์กลางของคาน, มม. (นิ้ว)

L = ช่วงรับน้ำหนัก, มม. (นิ้ว) และ

d = ความลึก, มม. (นิ้ว) ของคานที่ทดสอบ

2.8.3 การทดสอบแรงกระแทก (Drop weight test)

การทดสอบนี้ใช้ประเมินพฤติกรรมของวัสดุภายใต้แรงกระแทกความเร็วสูง เช่น การชนและการตก การตั้งค่าการทดสอบประกอบด้วยหอคอยตก น้ำหนักหรือตัวกระแทก และที่ยึดตัวอย่าง น้ำหนักจะถูกทิ้งจากความสูงที่กำหนดไว้ลงบนตัวอย่าง และเซ็นเซอร์จะบันทึกแรง ความเร็ว และพลังงานระหว่างการกระแทก การใช้งานการทดสอบนี้ยังใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมยานยนต์และอุปกรณ์กีฬา การทดสอบแรงกระแทกเพื่อความปลอดภัยของยานยนต์ช่วยประเมินความทนทานต่อการชนของส่วนประกอบยานยนต์ ในอุปกรณ์กีฬา การทดสอบนี้จะตรวจสอบความต้านทานแรงกระแทกของหมวกกันน็อคและอุปกรณ์ป้องกัน

การทดสอบนี้ดำเนินการโดยการปล่อยน้ำหนักที่มีมวลและรูปร่างเฉพาะ (เรียกว่า "หัวกระแทก") จากความสูงที่กำหนดให้ตกลงบนตัวอย่างวัสดุ ซึ่งอาจอยู่ในรูปของแผ่น ฟิล์ม หรือชิ้นงานจริง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อวัดระดับพลังงานที่วัสดุสามารถดูดซับได้ก่อนที่จะเกิดความเสียหาย เช่น การแตกหัก ฉีกขาด หรือผิดรูป การทดสอบนี้จึงสามารถนำไปใช้ทั้งในการเปรียบเทียบคุณสมบัติของวัสดุต่างชนิด และเพื่อควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ในกระบวนการผลิตเครื่องทดสอบแรงกระแทกแบบ Drop Weight ประกอบด้วยส่วนประกอบหลัก ดังนี้

1. หัวกระแทก (Impact Head): เป็นน้ำหนักที่มีค่ามวลและรูปร่างแน่นอน ซึ่งถูกปล่อยจากความสูงที่กำหนด เพื่อสร้างแรงกระแทกที่แม่นยำและสามารถคำนวณได้

2. แท่นวางตัวอย่าง (Sample Holder): ใช้สำหรับยึดชิ้นงานทดสอบให้อยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสม และป้องกันการเคลื่อนที่ระหว่างการทดสอบ

3. ระบบปล่อยน้ำหนัก (Drop Mechanism): ควบคุมการปล่อยหัวกระแทกจากความสูงที่กำหนดอย่างแม่นยำ เพื่อให้ได้ค่าพลังงานกระแทกตามที่ต้องการ

โดยใช้ Sensor หรือ High-Speed Camera สำหรับบันทึกพฤติกรรมของวัสดุในขณะเกิดแรงกระแทก เช่น การเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ตำแหน่งการแตกร้าว หรือค่าแรงที่เกิดขึ้น แสดงแรงที่เกิดขึ้นขณะหัวกระแทกตกกระทบวัสดุเพื่อใช้เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมการดูดซับแรงของวัสดุและแสดงพลังงานที่วัสดุดูดซับก่อนแตกหัก

การทดสอบแรงกระแทก (Drop Weight Test) เป็นการศึกษาพฤติกรรมของวัสดุเมื่อได้รับแรงกระแทกในช่วงเวลาสั้น ๆ เพื่อประเมินความสามารถในการรับแรง ความเหนียว และความทนต่อ

การเสียหายของวัสดุ ผลการทดสอบมักแสดงในรูปของกราฟหลายประเภท ซึ่งแต่ละกราฟให้ข้อมูลด้านต่าง ๆ ของพฤติกรรมวัสดุ ดังนี้

1. กราฟแรงกระแทก (Force vs Time)

กราฟนี้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่หัวกระแทกกระทำต่อวัสดุในช่วงเวลาที่เกิดการกระแทก ใช้เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมของวัสดุ โดยเฉพาะค่าแรงสูงสุดที่วัสดุสามารถรับได้ก่อนเกิดการแตกหัก (Maximum Impact Force) ลักษณะของกราฟมักเป็นยอดแหลม แสดงให้เห็นค่าของแรงสูงสุดในช่วงเวลาสั้น ณ จุดที่เกิดการกระแทก ซึ่งบ่งชี้ถึงความแข็งแรงเชิงกลของวัสดุ

2. กราฟพลังงานกระแทก (Energy vs Time)

กราฟนี้แสดงค่าพลังงานที่วัสดุดูดซับจากแรงกระแทกตลอดช่วงเวลา ใช้เพื่อประเมินความเหนียว (Toughness) และความสามารถในการดูดซับพลังงานของวัสดุ โดยทั่วไปพลังงานจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึงจุดที่วัสดุแตก ซึ่งค่าพลังงานสูงสุด ณ จุดนี้สะท้อนถึงปริมาณพลังงานที่วัสดุสามารถดูดซับได้ก่อนเสียหาย

3. กราฟความสูงของการตกกับความเสียหาย (Drop Height vs Damage)

กราฟนี้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงที่ปล่อยหัวกระแทกตกลงมากับผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นกับวัสดุ เช่น วัสดุแตกหรือไม่แตก ใช้เพื่อหาค่าความสูงวิกฤต (Critical Height) ที่ทำให้วัสดุเกิดการแตกหักอย่างถาวร ลักษณะของกราฟมักเป็นแบบขั้นบันได หรือแสดงเส้นแบ่งระหว่างช่วงที่วัสดุยังไม่เสียหายกับช่วงที่เริ่มเกิดความเสียหาย

4. กราฟความเร็วของหัวกระแทกกับผลกระทบ (Velocity vs Damage)

กราฟนี้แสดงผลของความเร็วของหัวกระแทกที่ตกกระทบต่อระดับความเสียหายของวัสดุ โดยใช้เพื่อวิเคราะห์อิทธิพลของแรงเฉื่อย (Inertial Effect) และอัตราการกระแทก (Impact Rate) ต่อการแตกหักของวัสดุ โดยทั่วไปจะพบว่าความเร็วที่เพิ่มขึ้นมักทำให้ระดับความเสียหายของวัสดุเพิ่มขึ้นตาม ซึ่งแสดงถึงความไวต่ออัตราการกระแทกของวัสดุนั้น

5. กราฟแรงกระแทกกับความหนาของวัสดุ (Impact Force vs Specimen Thickness)

กราฟนี้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของวัสดุกับแรงกระแทกสูงสุดที่วัสดุสามารถรับได้ก่อนแตก ใช้เพื่อหาความหนาที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบผลิตภัณฑ์ให้มีความแข็งแรงเพียงพอ

โดยทั่วไปกราฟจะมีแนวโน้มเป็นเส้นตรงหรือเส้นโค้งเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าความหนาที่มากขึ้นช่วยเพิ่มความสามารถในการรับแรงกระแทกของวัสดุ

สูตรการคำนวณพลังงานกระแทก

$$E = mgh \quad (2\text{-}7)$$

โดยที่: E = พลังงานกระแทก (Joules, J)

m = มวลของหัวกระแทก (กิโลกรัม, kg)

g = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (9.81 m/s^2)

h = ความสูงที่ปล่อยหัวกระแทก (เมตร, m)

2.8.4 การทดสอบความล้า (Fatigue test)

การทดสอบความล้า (Fatigue test) คือ การทดสอบเพื่อหาความสามารถในการทนทานของวัสดุต่อแรงที่ทำให้เกิดการแตกหักเมื่อวัสดุถูกโหลดและปล่อยโหลดซ้ำๆ กันในช่วงระยะเวลานาน ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้เพื่อประเมินอายุการใช้งานของวัสดุภายใต้สภาวะที่ได้รับแรงซ้ำๆ ที่ไม่จำเป็นต้องถึงระดับที่ทำให้วัสดุแตกหักในครั้งเดียว เหมาะสำหรับการออกแบบและการเลือกใช้วัสดุในผลิตภัณฑ์ที่มีการใช้งานภายใต้แรงสั่นสะเทือนหรือโหลดที่เปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง สูตรสำหรับคำนวณความแข็งแรงของความล้าโดยทั่วไปจะแสดงเป็นเส้นโค้งความเค้น-อายุการใช้งาน (เส้นโค้ง SN) ซึ่งแสดงแอมพลิจูดของความเค้นเทียบกับจำนวนรอบจนถึงการสูญเสียความสามารถในการรับแรง

$$\sigma f = Fmax / A \quad (2\text{-}8)$$

โดยที่ : Fmax = แรงสูงสุดที่วัสดุสามารถรับมือได้เป็นรอบ

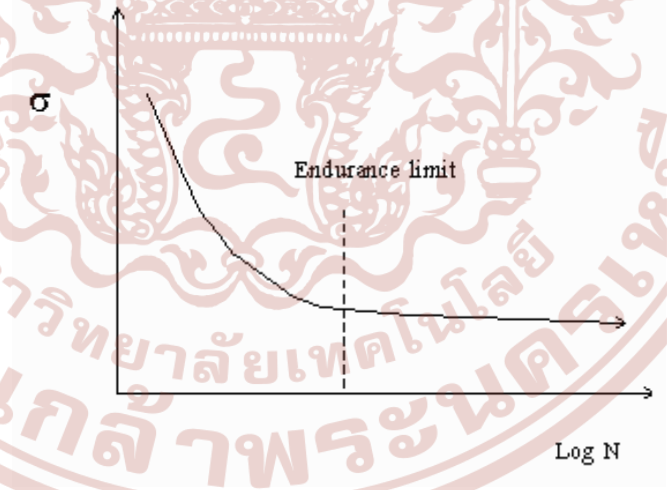
A = พื้นที่

ในการทดสอบความล้านั้นโดยทั่วไปแล้วจะเป็นการนำเอาชิ้นงานซึ่งกำหนดรูปร่างเฉพาะสำหรับการทดสอบหาสมบัติทางความล้ามารับภาระตามที่กำหนดที่มีการเปลี่ยนแปลงเป็นคาบและมีการกำหนดพารามิเตอร์ ในการทดสอบต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

- ความถี่ในการทดสอบ (frequency) ได้แก่ จำนวนของรอบการทดสอบระยะเวลาโดยส่วนใหญ่จะใช้ จำนวนรอบต่อ 1 วินาที ซึ่งจะมีหน่วยเป็นเฮิร์ทซ (Hz)

- แอมพลิจูด (amplitude) ได้แก่ ปริมาณของภาระที่กระทำต่อชิ้นงานซึ่งเป็นไปได้ทั้งความเค้น หรือความเครียด
- รูปแบบของคาบ (wave form) ได้แก่ ลักษณะของคาบในการให้ภาระแก่วัสดุ ซึ่งอาจจะเป็นแบบไซน์ (sine) แบบสี่เหลี่ยม (square) หรือแบบฟันเลื่อย (sawtooth) เป็นต้น
- รูปแบบของการให้ภาระ (mode) ได้แก่ลักษณะของทิศทางการให้ภาระแก่ชิ้นงานทดสอบ ซึ่งอาจจะเป็น การดึง การกด การเฉือน การดัดงอ เป็นต้น

ทั้งนี้จะการทดสอบจนกระทั่งเกิดการแตกหักของวัสดุหรือครบจำนวนรอบของการทดสอบที่กำหนดไว้ เช่น หนึ่งล้านรอบ เป็นต้น โดยการแสดงผลของการทดสอบจะนิยมแสดงในรูปกราฟที่เรียกว่า กราฟ S-N ซึ่งได้แก่ ความสัมพันธ์ระหว่างค่าของความเค้นและจำนวนรอบที่เกิดการแตกหัก ณ ค่าความเค้นนั้นๆ แสดงในภาพที่ 14 ซึ่งจากกราฟจะสามารถหาอายุของความล้าได้ (fatigue life หรือ endurance limit) อย่างไรก็ตามวัสดุบางประเภท เช่น อะลูมิเนียมผสม อาจจะไม่แสดงถึงอายุความล้านี้คือไม่ปรากฏเส้นขนานในแนวนอน นอกจากนี้พอลิเมอร์ยังแสดงถึงจุดเปลี่ยนแปลงของการแตกหักแบบเหนียวและแข็งเปราะ (ductile-brittle fracture transition) อีกด้วย



ภาพที่ 2-11 กราฟ S-N จากการทดสอบความล้า

2.8.5 การทดสอบความแข็ง (Hardness test)

ความแข็งคือคุณสมบัติของวัสดุที่ทำให้วัสดุสามารถต้านทานการเสียรูปถาวรในบริเวณเฉพาะได้ โดยปกติแล้วจะเกิดจากการกดทับ ซึ่งกำหนดโดยการวัดความลึกถาวรของการกดทับ เมื่อได้รับแรงกดคงที่และหัวกดเฉพาะ ก็จะวัดความลึกหรือขนาดของการกดทับที่เกิดขึ้น ซึ่งสัมพันธ์กับความ

แข็งของวัสดุ วัสดุที่อ่อนกว่า รอยกดจะยิ่งใหญ่และลึกกว่า และค่าดัชนีความแข็งก็จะต่ำลง (Harry Chandler, 1999) ความแข็งเกี่ยวข้องโดยตรงกับคุณสมบัติทางกลของวัสดุ ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความแข็ง ได้แก่ โครงสร้างจุลภาค ขนาดเกรน การแข็งตัวจากความเครียด เป็นต้น เป็นหนึ่งในเครื่องมือวัดความแข็งของวัสดุ โดยการทดสอบความแข็งนี้ถูกคิดค้นโดย Albert F. Shore ในปี 1920 ความแข็งอาจจะกำหนดเป็นต้านทานของวัสดุเป็น Shore มักจะใช้ในการอ้างถึงการวัดเช่นเดียวกับที่ใช้ในตัวของมันเอง โดยปกติจะใช้เป็นมาตรการของความแข็งในพอลลิเมอร์, ยาง



ภาพที่ 2-12 ตัวอย่างเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบความแข็ง

การวัดค่าความแข็งของ Durometer จะเป็นการวัดความลึกของรอยหยักในวัสดุที่สร้างขึ้นโดยได้รับแรงบนมาตรฐาน Presser foots ความลึกนี้จะขึ้นอยู่กับความแข็งของวัสดุที่มันมีคุณสมบัติความหนืดและระยะเวลาในการทดสอบ โดยทดสอบภายใต้มาตรฐานของ ASTM D2240 จะแบ่ง type ในการทดสอบความแข็งของแต่ละวัสดุออกเป็น 11 type แต่ที่ใช้กันส่วนมากจะมีคือ type A, D, C คำนวณได้จากสูตร Brinell Hardness Test (HB)

$$HB = \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \qquad (2\text{-}9)$$

โดยที่ : F = แรงที่กดลงไป (kg.f หรือ N)

D = เส้นผ่านศูนย์กลางของลูกบอล (mm)

d = เส้นผ่านศูนย์กลางรอยบุ๋ม (mm)

2.8.6 การทดสอบสมบัติเชิงกลแบบไดนามิก (Dynamic mechanical analysis : DMA)

การวิเคราะห์สมบัติเชิงกลแบบไดนามิก (DMA) คือหนึ่งในเทคนิคที่มีความสำคัญที่สุดสำหรับการวิเคราะห์เชิงความร้อน ซึ่งสามารถใช้เพื่อศึกษาสมบัติความหยุ่นหนืดและพฤติกรรมของวัสดุได้กว้างขวางด้วยฟังก์ชันของอุณหภูมิหรือความถี่ ซึ่งจะช่วยให้มั่นใจในการใช้วัสดุที่เหมาะสมและมีสมบัติเชิงกลที่ถูกต้อง ชนิดของวัสดุที่สามารถนำมาวิเคราะห์ได้ ได้แก่ เทอร์โมพลาสติก, เทอร์โมเซ็ต, อีลาสโตเมอร์, สารยึดติด, สีและแลคเกอร์, ฟิล์มและเส้นใย, วัสดุ เชิงประกอบ, อาหาร, ยา, ไขมันและน้ำมัน, เซรามิก, วัสดุก่อสร้าง และเหล็ก

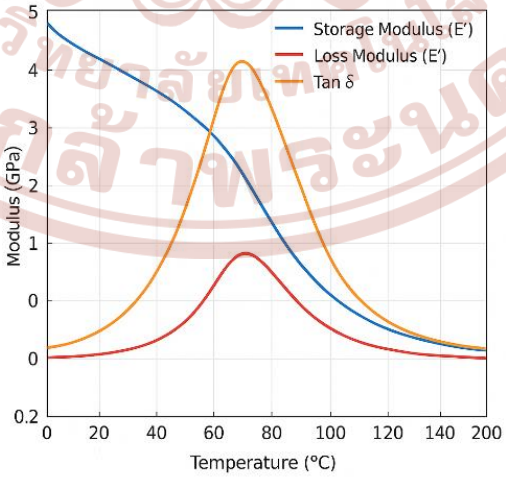
ASTM D4065 เป็นมาตรฐานสำหรับการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลแบบไดนามิกของพลาสติก ซึ่งกำหนดวิธีการทดสอบ Dynamic Mechanical Properties (DMA) ของพลาสติก การทดสอบนี้จะช่วยให้เราทราบถึงโมดูลัส (Modulus) ที่สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ความถี่ และความเครียด Storage Modulus (E′) แสดงถึงส่วนของความเค้นที่วัสดุเก็บไว้ ซึ่งแสดงถึงพฤติกรรมที่เป็นแบบแข็ง (Elastic behavior)

$$E\prime = \frac{\sigma_0}{\epsilon_0} \times \cos(\delta) \qquad (2\text{-}10)$$

โดยที่ : σ_0 คือ ความเค้นสูงสุด (Maximum stress)

ϵ_0 คือ ความเครียดสูงสุด (Maximum strain)

δ คือ มุมดีเลย์ (Phase angle)

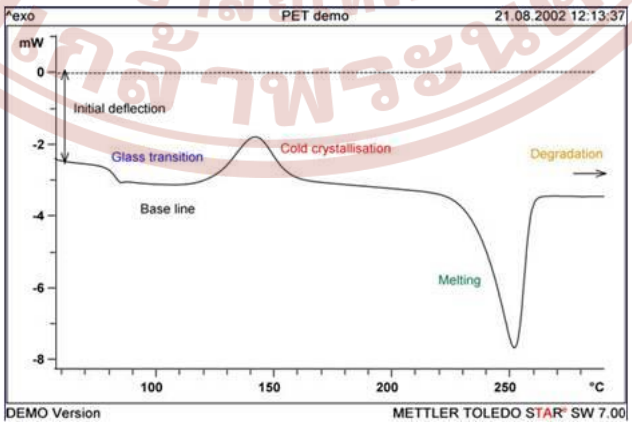


ภาพที่ 2-13 ตัวอย่างกราฟแสดงผลการทดสอบ DMA

2.8.7 การทดสอบการเปลี่ยนแปลงความร้อนของสาร (Differential scanning calorimetry : DSC)

Differential scanning calorimetry (DSC) เป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน (Thermal analysis) ซึ่งสามารถวัดสมบัติทางกายภาพและเคมีของอาหารได้วิเคราะห์ด้วยเครื่อง differential scanning calorimeter โดยวัดความแตกต่างระหว่างการถ่ายเทความร้อน (Heat flow) ไปยังตัวอย่างหรือออกจากตัวอย่างเทียบกับ reference pan วัดเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิหรือเวลา เครื่อง DSC มักบันทึกการถ่ายเทความร้อนซึ่งเป็นการถ่ายเทพลังงาน (ความร้อน) ต่อหน่วยเวลา มีหน่วยเป็น mJ/s หรือ mW (แกน y) กับเวลาหรืออุณหภูมิ(แกน x) บน DSC heating curve ในกรณีที่ตัวอย่างดูดพลังงานความร้อน การเปลี่ยนแปลงของเอนทาลปี (enthalpy transition) เรียกว่า ‘endothermic’ ได้แก่ การหลอมละลาย (melting) ถ้าตัวอย่างปล่อยความร้อนออกมา การเปลี่ยนแปลงของเอนทาลปีเรียกว่า ‘exothermic’ ได้แก่ การเกิดผลึก (crystallisation) นอกจากนี้ DSC สามารถวัดการเปลี่ยนแปลงพลังงานเมื่อให้ความร้อน ทำให้เย็นหรือคงอุณหภูมิของตัวอย่างเป็น isothermal และอุณหภูมิจะถูกบันทึกในขณะที่วิเคราะห์

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแกน X เป็นค่าของอุณหภูมิ และแกน Y เป็นค่าของความแตกต่างของปริมาณความร้อนของ furnace ทั้งสอง ณ อุณหภูมิใดอุณหภูมิหนึ่ง ซึ่งมีค่าสอดคล้องกับพลังงานที่ให้สารตัวอย่าง และถูกวัดในหน่วยมิลลิวัตต์ (Milliwatts, mW) พลังงานที่ให้สารตัวอย่างมีค่าสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปี (Enthalpy) ของสารตัวอย่าง เมื่อสารตัวอย่างดูดพลังงานเราเรียกว่า Enthalpy มีการเปลี่ยนแปลงแบบ Endothermic และเมื่อสารตัวอย่างคายพลังงานเรียกว่า Enthalpy มีการเปลี่ยนแปลงแบบ Exothermic



ภาพที่ 2-14 กราฟของเครื่อง Differential scanning calorimetery (DSC)

สูตร การทดสอบการเปลี่ยนแปลงความร้อนของสาร (Differential scanning calorimetry : DSC)

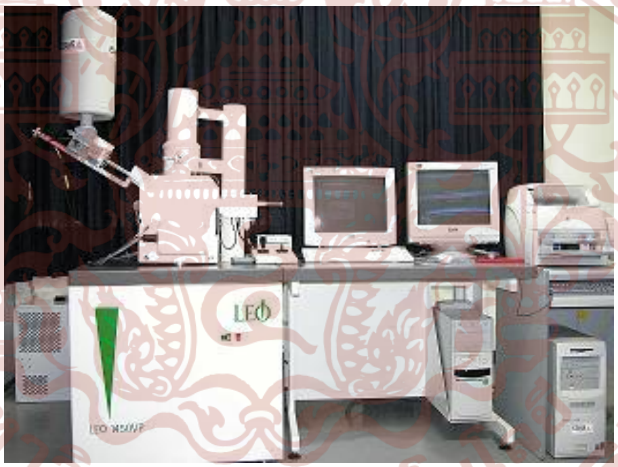
$$\text{Heat Flow} = \frac{dQ}{dt} \qquad (2\text{-}10)$$

dQ = ปริมาณพลังงานความร้อนที่ดูดหรือคาย

dt = ช่วงเวลาที่ให้ความร้อน

2.8.8 การทดสอบสัณฐาน (Scanning Electron Microscope : SEM)

เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ศึกษาพื้นผิวของตัวอย่าง โดยเฉพาะศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา เช่น ลักษณะรูปร่าง ลวดลายเป็นผิวตัวอย่างตลอดจนขนาดของตัวอย่าง โดยลำอิเล็กตรอนจะส่องกราดไปบนผิวของวัตถุ และสามารถศึกษาทั้งตัวอย่างทางชีวภาพและวัสดุศาสตร์อีกด้วย ได้ภาพมีลักษณะเป็นภาพ 3 มิติ



ภาพที่ 2-15 ตัวอย่างกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

หลักการทำงานของ SEM

1. แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (Electron Gun): ปล่อยลำแสงอิเล็กตรอนพลังงานสูงไปยังตัวอย่าง

2. เลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Lenses): ใช้ควบคุมและโฟกัสลำแสงอิเล็กตรอนให้ตกกระทบบริเวณที่ต้องการ

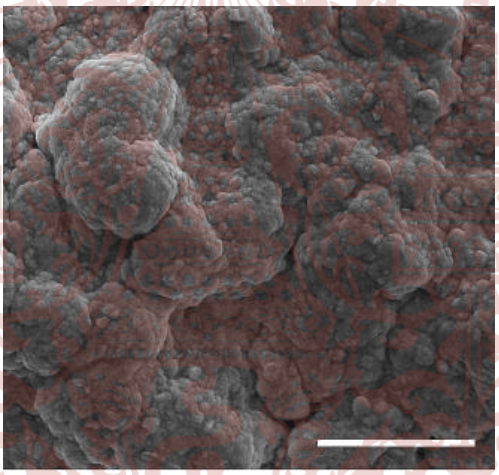
3. ลำแสงอิเล็กตรอนกระทบพื้นผิวตัวอย่าง: ทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electrons), อิเล็กตรอนสะท้อนกลับ (Backscattered Electrons), และสัญญาณอื่นๆ ตัวตรวจจับ (Detectors): ตรวจจับสัญญาณที่ปล่อยออกมา และแปลงเป็นภาพ

ข้อมูลที่ได้จาก SEM ได้แก่

ภาพพื้นผิว : รายละเอียดของสัณฐานวิทยา (morphology) เช่น ความขรุขระ ขนาด รูปร่างของอนุภาค หรือรอยแตก

โครงสร้างระดับนาโน : สามารถเห็นโครงสร้างขนาดเล็ก เช่น เส้นใยนาโน, ชั้นบาง, และพอลิเมอร์ผสม

องค์ประกอบธาตุ (เมื่อใช้ร่วมกับ EDS หรือ EDX) : วิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุในบริเวณที่สนใจ



ภาพที่ 2-16 ตัวอย่างรูปที่ได้จากการทดสอบ SEM

2.8.9 การวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDX)

EDX เป็นการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยสเปกโทรเมตรีรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงานที่ใช้ร่วมกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยหลักการของ EDX เมื่อตัวอย่างที่ต้องการศึกษาถูกชนด้วยลำอิเล็กตรอนทำให้สามารถเกิดการแตกตัวเป็นไอออน (Ionization) ด้วยการผลักให้อิเล็กตรอนของตัวอย่างให้หลุดออกจากอะตอม ดังนั้นเพื่อเป็นการรักษาเสถียรภาพอิเล็กตรอนที่อยู่วงโคจรชั้นถัดไปจะลงเข้ามาแทนที่ และปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปรังสีเอกซ์ (X-ray) ซึ่งเรียกว่ารังสีเอกซ์แบบแคแรกเทอริสติก (Characteristic X-ray) โดยพลังงานของรังสีเอกซ์ชนิดนี้มีค่าเฉพาะตามชนิดของธาตุ จากนั้นเมื่อรังสีเอกซ์เข้าสู่หัววัดชนิด Silicon drift detectors (SSD)หัววัดจะสร้างสัญญาณไฟฟ้าซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพลังงานของรังสีที่ตกกระทบ และจะนำ

สัญญาณที่ได้มาวิเคราะห์หาความสูงของสัญญาณ ส่งไปยังระบบคอมพิวเตอร์เพื่อประเมินและรายงานผลเป็นค่าสเปกตรัมรังสีเอกซ์ต่อไปสำหรับการวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอกซ์แบบ EDX สามารถวิเคราะห์ได้ 3 วิธี ดังนี้

1. Point analysis เป็นการวิเคราะห์ที่ให้ลำของอิเล็กตรอนกระทบอยู่นิ่งบนพื้นผิวของตัวอย่างตรงจุดที่ต้องการวิเคราะห์เพื่อวัดค่าปริมาณรังสีเอกซ์เฉพาะจุดที่ต้องการ

2. Line scan analysis เป็นการวิเคราะห์โดยใช้ลำอิเล็กตรอนส่องกราดตามแนวบนตัวอย่างตรงตำแหน่งที่สนใจ ซึ่งนิยมใช้ในกรณีหาของเขตของรอยต่อหรือเฟสของโครงสร้าง

3. Mapping analysis ซึ่งเป็นการวิเคราะห์โดยใช้ลำอิเล็กตรอนส่องกราดบนพื้นผิวตัวอย่าง ภาพที่ได้จากการวิเคราะห์จะเป็นภาพแสดงลักษณะการกระจายของธาตุบนพื้นที่นั้นๆ

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.9.1 การพัฒนาเส้นพิมพ์ชีวภาพจากเส้นใยกัญชงสำหรับเครื่องพิมพ์สามมิติ (Development of bio-filament using hemp fiber for 3D-printer) [21]

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาพื้นฐานในการนำเส้นใยกัญชงมาใช้เป็นสารเสริมแรงในพลาสติกชีวภาพ คือ โพลิแลคติค แอซิด (Polylactic acid, PLA) และนำวัสดุเชิงประกอบที่ได้มาใช้ในงานพิมพ์สามมิติด้วยเทคนิค Fused Deposition Modeling (FDM) ทั้งนี้ เส้นใยกัญชง (ความยาวเฉลี่ย 150 ไมครอน) ได้ถูกนำมาคอมพาวด์ใน PLA 2003D ด้วยเทคนิคการหลอมผสมที่อัตราส่วนต่างกัน (1, 2.5, 5 และ 10 wt%) โดยพบว่าค่าความทนแรงดึงเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้น แต่ก็มีความเปราะเพิ่มขึ้นด้วย อัตราส่วน PLA/1 wt% เส้นใยกัญชง ถูกเลือกใช้ในการศึกษาปริมาณพลาสติกไซเซอร์ที่เหมาะสม เพื่อแก้ปัญหาความเปราะ ได้มีการปรับสมบัติความยืดหยุ่นของวัสดุ โดยทำการเติมพลาสติไซเซอร์พอลิเอทิลีน ไกลคอล (Polyethylene glycol, PEG) ในอัตราส่วน 2.5 และ 5 wt% ตามลำดับ ซึ่งพบว่าวัสดุมีค่าความยืดหยุ่นตัวที่จุดขาดเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่จำเป็นในการนำขึ้นรูปเป็นเส้นพิมพ์สำหรับงานพิมพ์สามมิติ

ตารางที่ 2-2 สมบัติความทนแรงดึงและความทนแรงดดังอของเม็ด PLA ผสมใยกัญชงที่อัตราส่วน 1%, 2.5%, 5% และ 10%wt

Sample	Tensile Strength		Flexural Strength	
	Tensile Strength (MPa)	Elongation at break (%)	Flexural Strength (MPa)	Flexural Modulus (GPa)
Pure PLA	53 ± 3.10	2.50 ± 0.18	65 ± 4.55	3.45 ± 0.295
PLA + 1%wt Hemp	95 ± 2.80	2.15 ± 0.14	79 ± 3.65	3.65 ± 0.180
PLA + 2.5%wt Hemp	115 ± 3.55	1.50 ± 0.18	75 ± 4.20	3.88 ± 0.240
PLA + 5%wt Hemp	135 ± 2.50	1.35 ± 0.15	71 ± 2.85	4.04 ± 0.225
PLA + 10%wt Hemp	130 ± 2.22	0.90 ± 0.13	74 ± 2.56	4.25 ± 0.255

จากผลทดสอบพบว่าชิ้นงานที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยกัญชงมีความแข็งเพิ่มขึ้นในขณะที่ความยืดหยุ่นลดลง ความเปราะเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sawpan และคณะ (2009) ที่ทำการเสริมแรงเส้นใยกัญชงใน PLA และพบว่าค่าความทนแรงดึงเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้น แต่ความยืดหยุ่นลดลง ในส่วนของสมบัติความทนแรงดัดงอพบว่าสอดคล้องกับงานวิจัยของ Shibata และคณะ (2003) ซึ่งรายงานสมบัติความทนแรงดัดงอของวัสดุเส้นใยธรรมชาติที่เสริมแรง PLA ว่าค่าความทนแรงดัดงอที่ได้ไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อทำการเพิ่มปริมาณเส้นใยธรรมชาติ ในขณะที่โมดูลัสแรงดัดงอเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นไปในทางเดียวกันกับ Shin และ Masatoshi (2006) และ Huda และคณะ (2005a) ที่พบว่าค่าเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยธรรมชาติใน PLA ทำให้ความทนแรงดัดงอของวัสดุเชิงประกอบลดลง ในขณะที่โมดูลัสแรงดัดงอเพิ่มขึ้น

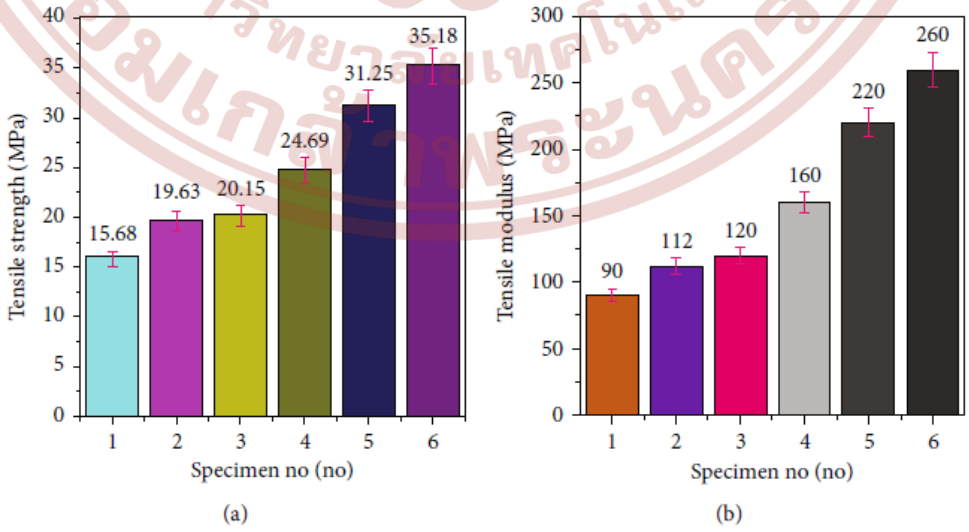
2.9.2 Effect of Fiber Mixing and Nanoclay on the Mechanical Properties of Biodegradable Natural Fiber-Based Nanocomposites [2]

งานวิจัยนี้เป็นการรวมเส้นใยสองประเภทเข้าด้วยกันอาจช่วยปรับปรุงคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุพอลิเมอร์ไฮบริดที่เสริมด้วยเส้นใยอินทรีย์ วัสดุชีวภาพที่สร้างจากวัตถุดิบกำลังได้รับความนิยมใน

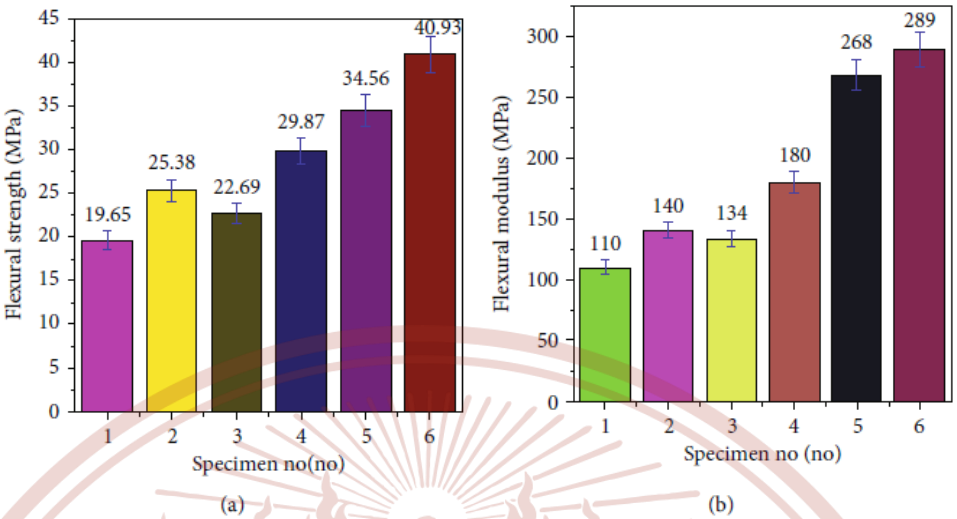
ภาคอุตสาหกรรมเนื่องจากคุณภาพสูง ตลอดจนความยั่งยืนและคำนึงถึงสิ่งแวดล้อม งานวิจัยนี้ได้สร้างนาโนคอมโพสิตไฮบริดที่เสริมด้วยเส้นใยธรรมชาติโดยใช้เทคนิคการขึ้นรูปด้วยแรงอัดกับอนุภาคไม้ เส้นใยกัญชง พอลิโพรพิลีน และนาโนเคลย์มอนต์มอริลโลไนต์ จากนั้นจึงมีการศึกษาผลกระทบของส่วนผสมของเส้นใยและเวอร์มิคูไลต์ต่อคุณสมบัติเชิงกลและคุณสมบัติที่ย่อยสลายได้ ทั้งใยมะพร้าวและเส้นใยกัญชงได้รับการบำบัดด้วยด่างเพื่อลดคุณสมบัติชอบน้ำให้เหลือน้อยที่สุดก่อนจะนำไปใช้งาน โดยใช้เครื่องมือทดสอบแรงดึงอเนกประสงค์ คุณลักษณะเชิงกลของคอมโพสิตที่เตรียมไว้ได้รับการตรวจสอบและพบว่าได้รับการปรับปรุงหลังจากผสมเส้นใยและการรวมอนุภาคระดับนาโน ความแข็งแรงสูงสุดเกิดขึ้นที่ส่วนผสม เช่น 10wt% ของอนุภาคไม้ กัญชง นาโนเคลย์ และเมทริกซ์พอลิโพรพิลีน 70% กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงให้เห็นว่านาโนเคลย์ช่วยเพิ่มการยึดเกาะและการทำงานร่วมกันระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์พอลิเมอร์ได้อย่างมีนัยสำคัญ ความสามารถในการเข้ากันได้ทางชีวภาพและการดูดซึมน้ำที่ดีของนาโนคอมโพสิตเพิ่มขึ้นจากการผสมเส้นใย

ตารางที่ 2-3 ข้อมูลแสดงปริมาณการผสม PLA/Hemp/Nanoclay

Sample No.	Wood particle (wt. %)	Hemp (wt. %)	Nanoclay (wt. %)	Polypropylene matrix (wt. %)
1	30	0	0	70
2	0	30	0	70
3	15	15	0	70
4	15	0	15	70
5	0	15	15	70
6	10	10	10	70



ภาพที่ 2-17 กราฟแสดงผล Tensile strength และ Tensile modulus



ภาพที่ 2-18 กราฟแสดงผล Flexural strength และ Flexural modulus

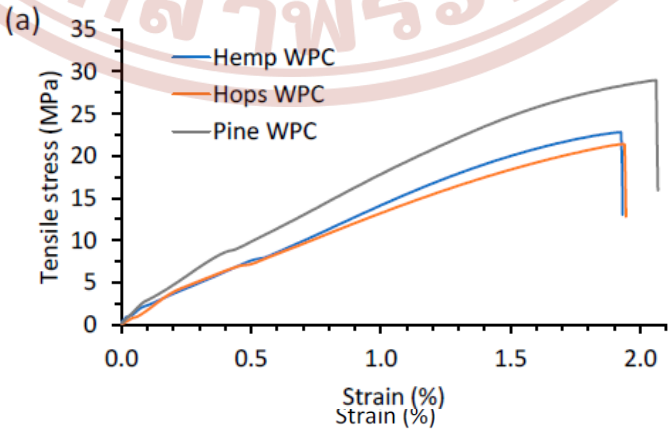
สมบัติแรงดึงและมอดูลัสแรงดึงของนาโนคอมโพสิตที่แตกต่างกันแสดงอยู่ในรูปที่ 20 ดังที่แสดงในรูป ความแข็งแรงแรงดึงและโมดูลัสแรงดึงของคอมโพสิตกัญชงและพอลิโพรพิลีนและคอมโพสิตไม้และพอลิโพรพิลีนแทบจะเหมือนกัน ซึ่งอาจเกี่ยวข้องกับความจริงที่ว่าเส้นใยไม้และกัญชงมีปริมาณเซลลูโลสที่ใกล้เคียงกันเนื่องมาจากความเข้มข้นของเฮมิเซลลูโลสที่เพิ่มขึ้น เส้นใยกัญชงจึงมีคุณสมบัติชอบน้ำมากกว่าเส้นใยไม้มาก ในขณะที่พอลิโพรพิลีนมีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำโดยธรรมชาติ เป็นผลให้กัญชง/ไม้ที่มีคุณสมบัติชอบน้ำและพอลิโพรพิลีนที่มีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำไม่ยึดเกาะอย่างเหมาะสม ส่งผลให้ความแข็งแรงแรงดึงและโมดูลัสแรงดึงลดลง เมื่อนำเส้นใยกัญชงมาผสมกับเส้นใยไม้ใน PP และเติมนาโนเคลย์ลงไป คอมโพสิตไฮบริดจะมีประสิทธิภาพเหนือกว่าคอมโพสิตไม้/PP และกัญชง/PP ในแง่ของความแข็งแรงและโมดูลัสแรงดึง เนื่องมาจากการยึดติดระหว่างเส้นใย/เมทริกซ์ ส่งผลให้มีการกระจายแรงดึงที่สม่ำเสมอและมีประสิทธิภาพทั่วทั้งเส้นใย นอกจากนี้ เมื่อเติมนาโนเคลย์ลงไปแล้ว คอมโพสิตไฮบริดจะมีความแข็งแรงและโมดูลัสแรงดึงสูงสุด นาโนเคลย์ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตโดยเพิ่มการสัมผัสระหว่างส่วนต่อประสานและการยึดเกาะระหว่างทั้งเส้นใยและเมทริกซ์พอลิเมอร์ การศึกษาก่อนหน้านี้ได้แสดงผลลัพธ์ที่คล้ายกัน

การรับแรงดัดงอเป็นอัตราการใช้เทคนิคการเสียรูปที่นิยมใช้มากที่สุด ซึ่งเกี่ยวข้องกับการยึดชิ้นงานสี่เหลี่ยมจนแตกหักหรือการใช้เทคนิคการประเมินการดัดงอหลายจุด ความเครียดสูงสุดภายในสารที่จุดยึดหยุ่นจะสะท้อนให้เห็นในความแข็งแรงในการดัดงอ และแสดงไว้ในรูปที่ 21 โดยแสดงให้เห็นคอมโพสิตไม้/PP และคอมโพสิตกัญชง/PP แสดงให้เห็นความแข็งแรงในการดัดงอสูงสุด ผลลัพธ์นี้แสดงให้เห็นว่าการยึดเกาะของเส้นใยกัญชงนั้นดีเมื่อเทียบกับไม้ ความแข็งแรงในการดัดงอสามจุดของคอมโพสิตพอลิโพรพีลีนเพิ่มขึ้นเมื่อเติมนาโนเคลย์ การเติมนาโนเคลย์จะเพิ่มคุณสมบัติความ

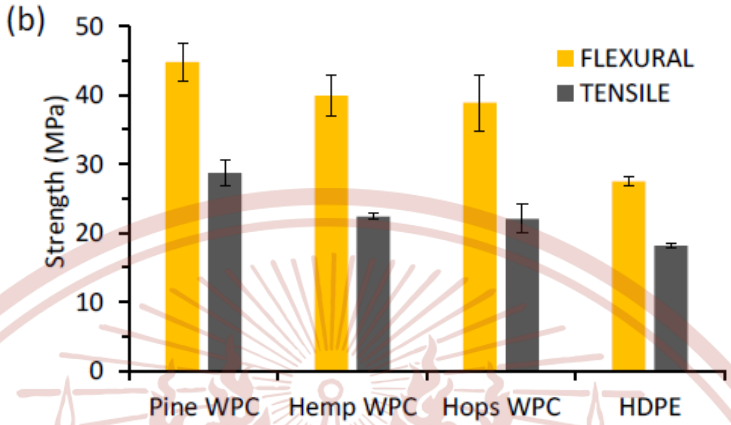
แข็งแรงของวัสดุคอมโพสิต โดยการผสมผสานระหว่างไม้/กัญชง/นาโนเคลย์/PP มีค่าความแข็งแรงในการดัดงอสูงสุด แนวโน้มที่สังเกตพบในความแข็งแรงในการดัดของวัสดุผสมแสดงให้เห็นพื้นที่ผิวสูงที่แสดงโดยอนุภาคตัวเติมขนาดเล็ก ซึ่งช่วยปรับปรุงการกระจายตัวระหว่างวัสดุผสมและเมทริกซ์ และช่วยปรับปรุงพันธะระหว่างส่วนต่อประสานพอลิโพรพีลีนมีความสามารถในการยึดเกาะที่ยอดเยี่ยมกับวัสดุต่างๆ

2.9.3 Evaluation of the Mechanical, Thermal and Rheological Properties of Hop, Hemp and Wood Fiber Plastic Composites [27]

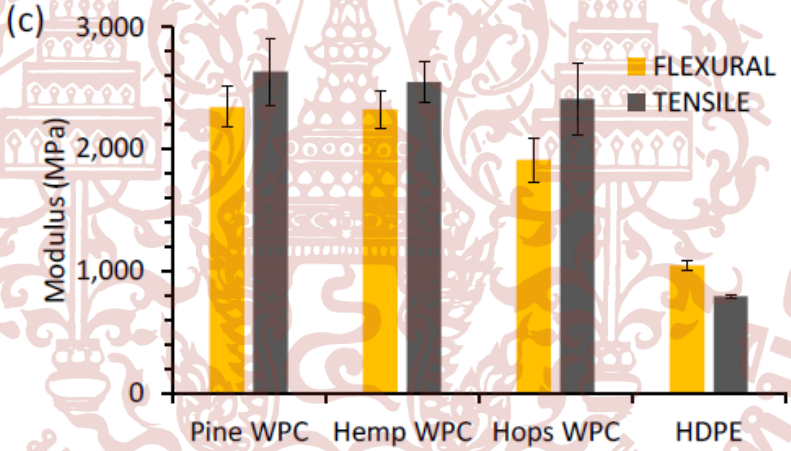
วัตถุประสงค์ของการศึกษานี้คือการประเมินการใช้เส้นใยธรรมชาติที่เหลือจากก้านฮอปส์และลำต้นกัญชงที่บดแล้วโดยไม่ใช้สารเคมี และเปรียบเทียบกับเส้นใยไม้เชิงพาณิชย์ สำหรับใช้ในวัสดุเชิงประกอบไม้-พลาสติก (WPC) เส้นใยได้รับการกำหนดลักษณะ (ความหนาแน่น ขนาดของเส้นใย และองค์ประกอบทางเคมี) WPC ผลิตขึ้นโดยการอัดรีดเส้นใยผสม (50%) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) และตัวแทนเชื่อมต่อ (2%) WPC ได้รับการกำหนดลักษณะตามคุณสมบัติเชิงกล การไหลความร้อน ความหนืด และความต้านทานน้ำ เส้นใยสนมีขนาดประมาณครึ่งหนึ่งของเส้นใยกัญชงและฮ็อป จึงมีพื้นผิวที่ใหญ่กว่า เส้นใยสน WPC ที่หลอมละลายมีความหนืดสูงกว่า WPC อีกสองชนิด นอกจากนี้ ความแข็งแรงในการดึงและดัดของ WPC สนยังสูงกว่าของ WPC ฮ็อปและกัญชง นอกจากนี้ WPC จากสนยังแสดงให้เห็นด้วยว่ามีการดูดซึมน้ำน้อยที่สุด รองลงมาคือ WPC จากฮ็อปและกัญชง การศึกษาครั้งนี้เน้นย้ำว่าเส้นใยลิกโนเซลลูโลสที่แตกต่างกันมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของ WPC คุณสมบัติของ WPC จากฮ็อปและกัญชงนั้นเทียบได้กับ WPC เชิงพาณิชย์ และสามารถปรับปรุงได้โดยการบด/คัดแยกเส้นใยเพิ่มเติมให้มีขนาดอนุภาคเล็กลง (ค่าเฉลี่ยปริมาตรคือ ~88 ไมโครเมตร) เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิว ปฏิสัมพันธ์ระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์ และปรับปรุงการถ่ายเทความเค้น



ภาพที่ 2-19 (a) กราฟแสดง Tensile stress-strain Hop, Hemp and Wood Fiber



ภาพที่ 2-19 (b) ข้อมูลความแข็งแรงแรงดึงและการดัด



ภาพที่ 2-19 (c) ข้อมูล modulus แรงดึงและการดัดงอ

ค่าความแข็งแรงในการดึงอาจเกิดจากการที่มีเส้นใยขนาดเล็กกว่าและพื้นที่ผิว/ปริมาตรที่ใหญ่กว่า เส้นใยฮ็อปและกัญชง จึงทำให้ถ่ายเทความเค้นได้ดีและค่าความแข็งแรงในการดึงสูงกว่า มอดูลัส แรงดึง (Young's) สำหรับคอมโพสิตเส้นใยสำหรับไม้สนคือ 2.63 GPa รองลงมาคือเส้นใยกัญชง (2.55 GPa) และฮ็อป (2.41 GPa) แต่ค่าเหล่านี้ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ สำหรับคอมโพสิตเส้นใยฮ็อป–พอลิโพรพีลีน ความแข็งแรงในการดัดงอสำหรับคอมโพสิต เส้นใยฮ็อป กัญชง ไม้ และ HDPE คือ 38.9, 39.8, 44.8 และ 27.4 MPa ตามลำดับ ค่าความแข็งแรงในการดัดงอของวัสดุผสมเหล่านี้สูงกว่าวัสดุ WPC ที่ทำจากไม้ชนิดต่างๆ ที่มี HDPE (21–25 MPa) วัสดุผสมเส้นใยฮ็อป (6–13 MPa) และวัสดุผสมกัญชง–HDPE 30% (17.4 MPa) ความแข็งแรงในการดัดงอของวัสดุผสมเหล่านี้สูงกว่าวัสดุ WPC ที่ใช้ PE เชิงพาณิชย์อย่างน้อย 50% ความแข็งแรงในการดัดงอที่สูงของวัสดุ

WPC จากไม้สนเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุ WPC จากไม้ฮ็อปและกัญชงอาจเกิดจากการที่มีเส้นใยขนาดเล็กกว่าและปฏิสัมพันธ์ที่ดีกว่ากับเมทริกซ์ HDPE มอดูลัสในการดัดงอของวัสดุผสมจากไม้สนและกัญชงคือ 2.34 GPa และแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญจากวัสดุผสมจากไม้ฮ็อป (1.91 GPa) และ HDPE (1.05 GPa) มอดูลัสการดัดงอมีค่าเทียบได้ (1.5–2.6 GPa) ผลลัพธ์เหล่านี้แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าเส้นใยจากพืชเหล่านี้เหมาะสำหรับการใช้งาน WPC

2.9.4 Synergistic effect of aluminum trihydrate and zirconium hydroxide nanoparticles on mechanical properties, flammability, and thermal degradation of polyester/jute fiber composite [6]

การศึกษาครั้งนี้มุ่งเน้นไปที่ผลการทำงานร่วมกันของอนุภาคนาโนที่มีส่วนประกอบเป็นไฮดรอกไซด์ เช่น อะลูมิเนียมไตรไฮเดรต (ATH) และเซอร์โคเนียมไฮดรอกไซด์ (ZHO) ต่อลักษณะเชิงกล ความเสถียรทางความร้อน และการติดไฟของวัสดุคเชิงประกอบพอลิเอสเตอร์/ปอ ผลิตขึ้นโดยผสมอนุภาคนาโน ATH และ ZHO ในความเข้มข้นที่แตกต่างกัน (2, 3 และ 4% ตามน้ำหนัก) โดยรักษาน้ำหนักของผ้าปอในวัสดุเชิงประกอบทั้งหมดไว้ที่ 40%

ตารางที่ 2-4 ข้อมูลในการผสมสารเคมีของแต่ละตัวอย่างชิ้นงาน polyester/jute fiber

Sr. no.	Polyester (wt%)	Jute (wt%)	ATH (wt%)	ZHO (wt%)	Nomenclature
1	60	40	0	0	PJ
2	58	40	2	0	PJA2
3	57	40	3	0	PJA3
4	56	40	4	0	PJA4
5	58	40	0	2	PJZ2
6	57	40	0	3	PJZ3
7	56	40	0	4	PJZ4
8	57	40	2	1	PJA2Z1
9	57	40	1	2	PJA1Z2
10	57	40	1.5	1.5	PJA1.5Z1.5

ผลการศึกษาแสดงให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญในคุณสมบัติแรงดึง การดัดงอ และการกระแทกของควัสดุเชิงประกอบพอลิเอสเตอร์/ปอหลังจากผสมอนุภาคนาโนทั้งสองประเภท (3% ตามน้ำหนัก) การปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลนั้นเกิดจากการมีปฏิกิริยาระหว่าง OH ระหว่าง ATH, ZHO และผ้าปอ ซึ่งได้รับการยืนยันแล้วด้วยสเปกโตรสโคปี FTIR ความเข้ากันได้ของอนุภาคนาโนยังนำไปสู่การเชื่อมต่อระหว่างส่วนต่อประสานที่ดีขึ้น ซึ่งได้มีการหารือกันหลังจากการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพื้นผิวที่แตก นอกจากนี้ ยังสังเกตเห็นการเพิ่มขึ้นของเสถียรภาพทางความร้อนของวัสดุผสมผ่านการวิเคราะห์น้ำหนักเทอร์โมกราวิเมทริกอีกด้วย การทดสอบแคลอรีมิเตอร์แบบกรวยและการเผาไหม้ในแนวนอนแสดงให้เห็นการปรับปรุงอย่างมีนัยสำคัญในคุณสมบัติการหน่วงไฟของวัสดุผสมที่พัฒนาขึ้นเนื่องมาจากการสลายตัวแบบดูดความร้อนของ อนุภาคนาโน ATH และ ZHO ในชั้นถ่านและโมเลกุลของน้ำในระหว่างการเผาไหม้ ซึ่งช่วยให้ทนทานต่อความร้อนออกซิเจน และก๊าซที่ติดไฟได้ดี ผลการทำงานร่วมกันของอนุภาค ATH และ ZHO ช่วยเพิ่มคุณสมบัติทางกล ความร้อน และหน่วงไฟของวัสดุผสมพอลิเอสเตอร์/ปอ

ตารางที่ 2-5 ผลการทดสอบแรงดึงและแรงดัดงอ polyester/jute fiber

Samples	Tensile strength (MPa)	Tensile modulus (GPa)	Elongation at break (%)	Flexural strength (MPa)	Flexural modulus (GPa)
PJ	44.4 ± 3.64	1.326 ± 0.20	2.94	3.5 ± 0.43	1.22 ± 1.96
PJA2	53.8 ± 2.26	1.704 ± 0.08	3.06	7.5 ± 1.3	1.68 ± 0.10
PJA3	56.2 ± 4.75	2.053 ± 0.07	3.15	15.25 ± 1.56	2.12 ± 0.04
PJA4	48.1 ± 4.01	2.204 ± 0.23	3.11	9 ± 1.30	2.24 ± 0.29
PJZ2	54.6 ± 3.29	1.926 ± 0.27	2.88	10.25 ± 2.41	1.83 ± 0.24
PJZ3	62.5 ± 4.67	2.06 ± 0.23	3.17	12.25 ± 1.56	2.03 ± 0.28
PJZ4	49.3 ± 3.90	2.486 ± 0.24	2.90	10.75 ± 3.18	2.34 ± 0.22
PJA2Z1	52.4 ± 3.49	1.926 ± 0.19	2.73	9.5 ± 1.98	1.86 ± 0.21
PJA1Z2	55 ± 5.0	2.408 ± 0.24	2.97	11.25 ± 2.65	2.28 ± 0.26
PJA1.5Z1.5	53.8 ± 3.36	2.05 ± 0.22	2.81	14.25 ± 2.41	2.06 ± 1.99

พบว่าความแข็งแรงดึงและโมดูลัสแรงดึงของวัสดุผสมพอลิเอสเตอร์/ปอกระเจาเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญหลังจากผสม ATH, ZHO และสารประกอบทั้งสองเข้าด้วยกัน ชี้ให้เห็นว่าการผสม

อนุภาคนาโน ATH และ ZHO ในปริมาณ 3% โดยน้ำหนักในวัสดุผสมพอลิเอสเตอร์/ปอกระเจา ส่งผลให้มีความแข็งแรงดึงและการยืดตัวสูงสุด วัสดุผสมที่มีอนุภาค ATH และ ZHO ในปริมาณ 3% โดยน้ำหนัก ความแข็งแรงดึงของวัสดุผสม PJ (44.4 MPa) เพิ่มขึ้น 26.5% (56.2 MPa), 40.7% (62.5 MPa) และ 23.8% (55 MPa) สำหรับวัสดุผสมนาโน PJA3, PJZ3 และ PJA1Z2 ตามลำดับ ZHO มีจำนวนหมู่ OH สูงกว่าเมื่อเทียบกับ ATH ดังนั้นสมบัติแรงดึงของวัสดุผสม ZHO จึงสูงกว่าวัสดุผสมพอลิเอสเตอร์/ปอกระเจาที่มี ATH สมบัติแรงดึงที่เพิ่มขึ้นของวัสดุผสมนี้เกิดจากการกระจายตัวที่ดีเยี่ยมของอนุภาคนาโนในเรซินโพลีเอสเตอร์ และพันธะที่แข็งแรงระหว่างผ้าปอกระเจาและอนุภาคนาโนทั้งสอง ซึ่งได้รับการยืนยันแล้วด้วยการวิเคราะห์ FTIR การผสมอนุภาคนาโนในวัสดุผสมเกิน 3% โดยน้ำหนัก ส่งผลให้ความแข็งแรงแรงดึงลดลง ความเข้มข้นของอนุภาคนาโนที่สูงขึ้นมีส่วนทำให้อันตรกิริยาระหว่างอนุภาคมีมากขึ้นเนื่องจากแรงแวนเดอร์วาลส์ ส่งผลให้เกิดการเกาะกลุ่มกันของอนุภาค ซึ่งนำไปสู่การกระจายตัวที่ไม่ดีของอนุภาคนาโนในเมทริกซ์ (Nayak และ Ray 2017) แนวโน้มที่คล้ายกันนี้พบได้จากการเติมอนุภาคนาโน TiO_2 ลงในวัสดุผสมอีพอกซี/ปอ (Prasad et al. 2018) การผสมอนุภาคนาโนยังช่วยเพิ่มโมดูลัสแรงดึงของวัสดุผสมพอลิเอสเตอร์/ปอ ลำดับค่าสูงสุดของมอดูลัสแรงดึงของวัสดุผสมแต่ละประเภทคือ: PJZ4 (2.486GPa) > PJA2Z1, (2.408GPa) > PJA4, (2.204GPa) > PJ (1.326 GPa) แนวโน้มที่คล้ายกันนี้พบในงานวิจัยเกี่ยวกับมอดูลัสแรงดึงของวัสดุผสมพอลิเมอร์ที่ผสมอนุภาคนาโน (Sharma et al. 2017; Prabhakar et al. 2017) ค่าคุณสมบัติแรงดึงทั้งหมดแสดงไว้โดยละเอียดในตารางที่ 2-5

ผลทดสอบแรงดัดงอ ตารางที่ 2-5 แสดงให้เห็นถึงความแข็งแรงดัดและโมดูลัสดัดของวัสดุผสมทั้งหมด การผสมนาโน ATH และ ZHO ลงในวัสดุผสมพอลิเอสเตอร์/ปอกระเจาช่วยเพิ่มความแข็งแรงดัดและโมดูลัสดัด เหตุผลในการเพิ่มความแข็งแรงดัดและมอดูลัสดัดของวัสดุผสมนี้เหมือนกับการเพิ่มความแข็งแรงดึงและโมดูลัสดัด การกระจายตัวของอนุภาคนาโนในเมทริกซ์พอลิเอสเตอร์และปฏิกิริยาระหว่าง ATH และ ZHO กับเส้นใยปอกระเจาส่งผลให้คุณสมบัติการดัดของวัสดุผสม PJ ดีขึ้น นอกจากนี้อนุภาคนาโนยังจำกัดการเคลื่อนที่ของโมเลกุลพอลิเมอร์ ทำให้เกิดการประสานกันและส่งผลให้คุณสมบัติการดัดเพิ่มขึ้น (Prasad et al. 2018) พบว่าความแข็งแรงดัดของ PJA3, PJZ3 และ PJA1Z2 เพิ่มขึ้น 250% (12.25 MPa), 335% (15.25 MPa) และ 306% (14.24 MPa) ตามลำดับ เมื่อเทียบกับความแข็งแรงดัดของคอมโพสิต PJ (3.5 MPa) การเพิ่มอนุภาคนาโนยังช่วยเพิ่มโมดูลัสดัดของคอมโพสิต PJ อีกด้วย โมดูลัสแรงดึงสูงสุดของคอมโพสิตแต่ละประเภทอยู่ที่ 2.24 GPa (PJA3), 2.34 GPa (PJZ3) และ 2.28 GPa (PJA1Z2) ผลการศึกษาที่คล้ายคลึงกันสำหรับ

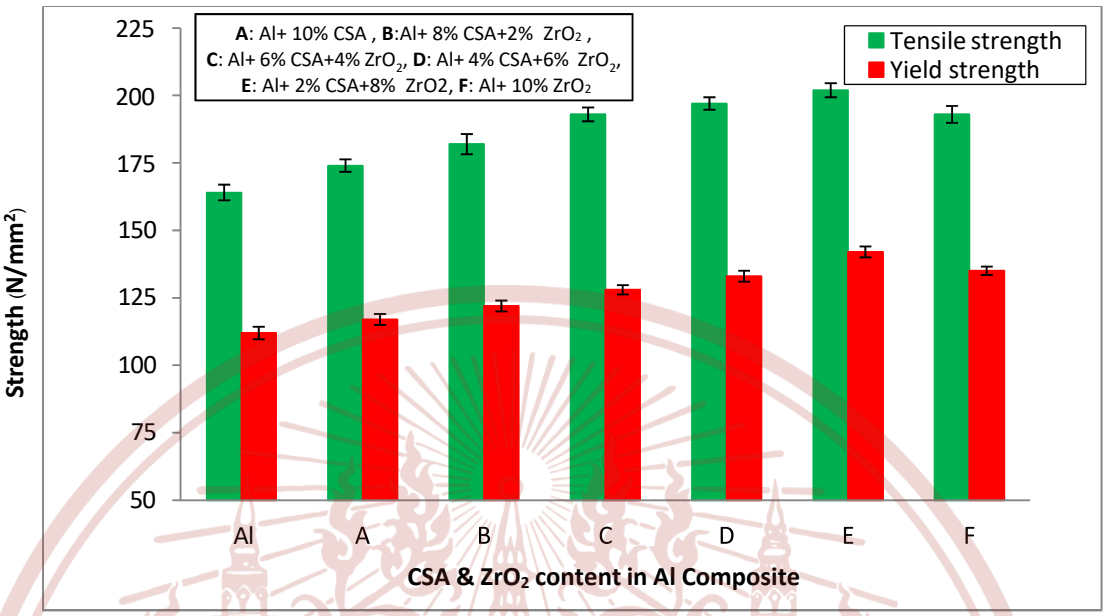
ความแข็งแรงดัดและโมดูลัสดัดจากการผสมนาโนเพลตเล็ตกราฟีนในคอมโพสิตพอลิโพรพิลีน/แฟลกซ์ (Ali et al. 2021)

2.9.5 Mechanical properties and characterization of zirconium oxide (ZrO_2) and coconut shell ash (CSA) reinforced aluminium (Al 6082) matrix hybrid [12]

การศึกษานี้มุ่งเน้นไปที่โครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลในขณะที่ผสมอนุภาคเซอร์โคเนียมออกไซด์และเถ้าเปลือกมะพร้าวในวัสดุผสมเมทริกซ์ Al 6082 อนุภาคเซอร์โคเนียมออกไซด์และเถ้าเปลือกมะพร้าวถูกปรับค่าตั้งแต่ 0 ถึง 10% และขึ้นรูปด้วยกระบวนการหล่อแบบกวน คอมโพสิตที่ขึ้นรูปได้จะถูกนำไปทดสอบด้วยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเพื่อยืนยันการมีอยู่ของอนุภาคเซอร์โคเนียมออกไซด์และเถ้าเปลือกมะพร้าว คอมโพสิตไฮบริดที่พัฒนาขึ้นได้วิเคราะห์ความแข็ง ความหนาแน่น ความแข็งแรงต่อแรงกระแทก ความแข็งแรงแรงดึง ความเหนียว และความแข็งแรงดัด เพื่อศึกษาสมบัติเชิงกลของคอมโพสิต ศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกับชิ้นงานทดสอบแรงดึงและแรงกระแทกที่แตกหัก เพื่อวิเคราะห์กลไกการแตกหัก

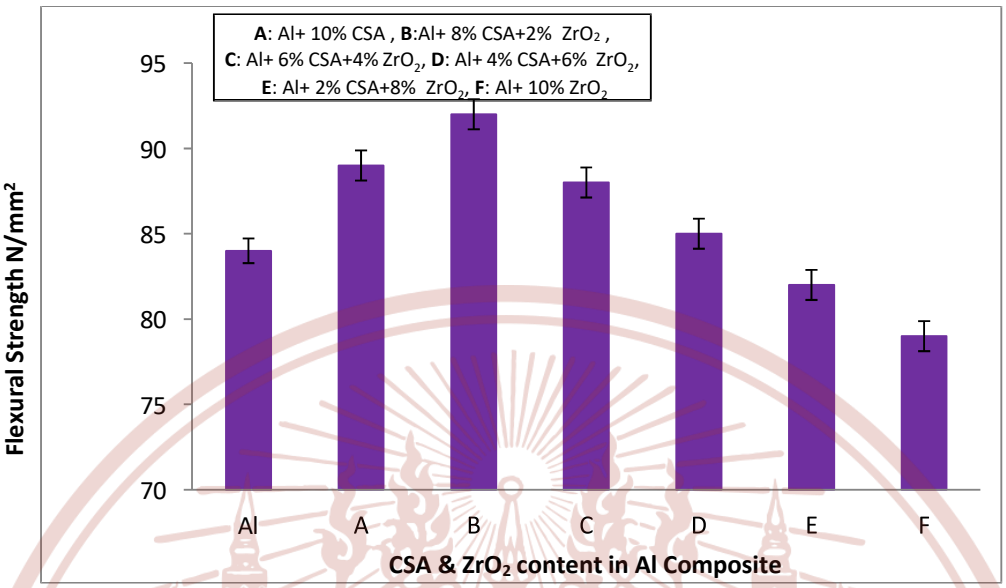
ตารางที่ 2-6 ข้อมูลแสดงองค์ประกอบของ zirconium oxide (ZrO_2) and coconut shell ash (CSA)

Sl.No.	Code	Al (Wt%)	ZrO_2 (Wt%)	CSA (Wt%)
1	A	90	0	10
2	B	90	2	8
3	C	90	4	6
4	D	90	6	4
5	E	90	8	2
6	F	90	10	0



ภาพที่ 2-20 ผลการทดสอบแรงดึง

อิทธิพลของ ZrO_2 และเถ้ากะลามะพร้าวต่อความแข็งแรงแรงดึงและการยืดตัวแสดงในรูปที่ 5 และรูปที่ 6 ตามลำดับ แถบค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานที่แสดงเป็นสัญญาณที่ดีที่บ่งชี้ว่าค่าความเหนียวเบี่ยงเบนอยู่ในระดับที่น่าพอใจ สังเกตได้ว่าความแข็งแรงแรงดึงของวัสดุผสมสูงกว่าความแข็งแรงแรงดึงของโลหะผสมอะลูมิเนียม การเพิ่มอนุภาค ZrO_2 จะเพิ่มความแข็งแรงของวัสดุผสม ซึ่งอาจเป็นผลมาจากความเปราะของวัสดุผสมที่เพิ่มขึ้นในขณะที่เพิ่มอนุภาค ZrO_2 อย่างไรก็ตาม การเติม ZrO_2 10% กลับทำให้ความแข็งแรงของวัสดุผสมลดลง การเติม ZrO_2 และเถ้ากะลามะพร้าวเพิ่มความแข็งแรงแรงดึงของวัสดุผสมขึ้น 23.17% ในขณะที่ความแข็งแรงครากของวัสดุผสมเพิ่มขึ้น 26.78% จากภาพที่ 2-20 จะเห็นได้ว่าความเหนียวของวัสดุผสมลดลงเมื่อเติม ZrO_2 และเถ้ากะลามะพร้าว อนุภาค ZrO_2 และ CSA ที่แข็งและเปราะในวัสดุผสมจะทำให้เกิดการแตกร้าวขนาดเล็ก และลดความเหนียวของวัสดุผสม การลดลงของความเหนียวจะสูงขึ้นเมื่อเติม ZrO_2 10% ในขณะที่การเติมเถ้ากะลามะพร้าว 10% ไม่มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อความเหนียว ซึ่งอาจเป็นผลมาจากผลการหล่อลื่นของอนุภาค CSA ความหนาแน่นต่ำ การเพิ่มการเสริมแรงจะต้านทานความหนาแน่นของการเคลื่อนตัวของโลหะผสมอะลูมิเนียม และทำให้ความเหนียวของวัสดุผสมลดลง ลักษณะเปราะของวัสดุผสมที่มีอนุภาคเสริมแรง (ZrO_2 และ CSA) มีบทบาทสำคัญในความเหนียวของวัสดุผสม การเพิ่มขึ้นของความเปราะของวัสดุผสมจะลดความเหนียวของวัสดุผสม



ภาพที่ 2-21 ผลการทดสอบแรงดัดงอ

ความสามารถของวัสดุเชิงประกอบในการต้านทานแรงดัดในทิศทางตั้งฉากกับแกนตามยาว เรียกว่า ความแข็งแรงดัด ความแข็งแรงดัดของคอมโพสิต Al/ZrO_2/CSA แสดงไว้ในภาพที่ 2-21 จะเห็นได้ว่าความแข็งแรงดัดของคอมโพสิตที่มี CSA สูงกว่าคอมโพสิตที่มีอนุภาค ZrO_2 ความแข็งแรงดัดที่สูงขึ้นอาจเป็นผลมาจากผลการหล่อลื่นของอนุภาคเถ้ากะลามะพร้าวอ่อน นอกจากนี้ การเพิ่มขึ้นของความแข็งแรงพันธะระหว่างอะลูมิเนียมและอนุภาค CSA ยังช่วยเพิ่มความแข็งแรงดัด การเพิ่มขึ้นของ ZrO_2 จะเพิ่มความแข็งและความเปราะของคอมโพสิต ส่งผลให้ความแข็งแรงดัดของคอมโพสิตลดลง ความแข็งแรงดัดของคอมโพสิตเพิ่มขึ้นสูงสุด 9.52% และลดลงสูงสุด 5.95% เมื่อเทียบกับโลหะผสมอะลูมิเนียม Dipti Kanta Das และคณะรายงานแนวโน้มความแปรผันของความแข็งแรงดัดของวัสดุคอมโพสิต Al/SiC ที่คล้ายคลึงกันในการศึกษาของพวกเขา การมีอนุภาค ZrO_2 นำไปสู่การเกิดและการแพร่กระจายของรอยแตกเปราะ และทำให้ความแข็งแรงดัดของวัสดุคอมโพสิตลดลง การลดลงของความแข็งแรงดัดส่วนใหญ่เกิดจากรอยแตกเปราะระหว่างเกรนของวัสดุเชิงประกอบ ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความล้มเหลวของวัสดุคอมโพสิต ได้แก่ การหลุดออกจากพันธะของอนุภาค การแตกร้าวที่ส่วนต่อประสาน และการแตกร้าวของอนุภาค

บทที่ 3

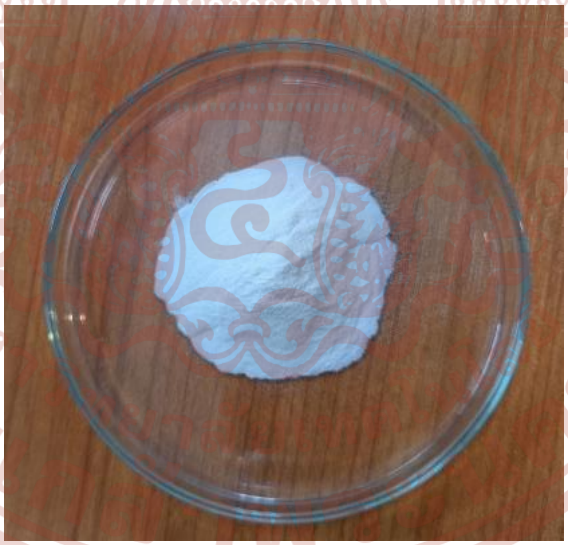
วิธีดำเนินการวิจัย

บทนี้จะกล่าวถึงการทดลองและการทดสอบที่ใช้ในสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของวัสดุเชิงประกอบพอลิเอไมด์ 12 ที่เหลือใช้จากกระบวนการขึ้นรูป 3 มิติ เสริมแรงด้วยเส้นใยกัญชงและเติมสารเติมแต่งด้วยอนุภาคนาโนเซอร์โคเนียมออกไซด์

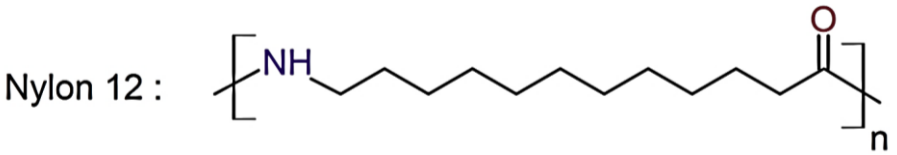
3.1 วัสดุที่ใช้ในการขึ้นรูปและเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 พอลิเอไมด์ 12 ที่เหลือใช้จากการขึ้นรูป 3 มิติ

พอลิเอไมด์ 12 ผลิตโดยบริษัท EOS GmbH ในรูปแบบผงละเอียดสีขาว ซึ่งเป็นเทอร์โมพลาสติก แสดงในภาพที่ 3-1 และข้อมูลเฉพาะ แสดงในตารางที่ 3-1



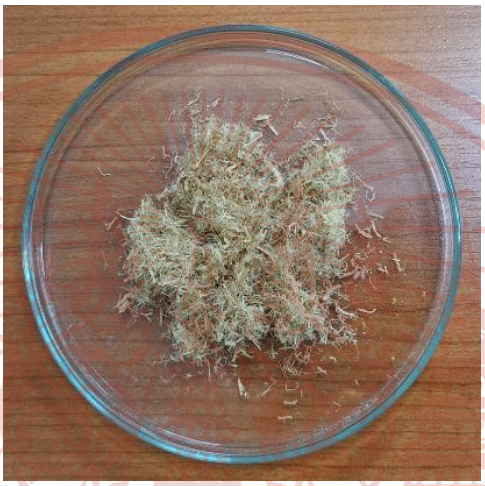
ภาพที่ 3-1 ผงพอลิเอไมด์



ภาพที่ 3-2 โครงสร้างทางเคมีของพอลิเอไมด์ 12

3.1.2 เส้นใยกัญชง

เส้นใยกัญชงแสดงไว้ดังภาพที่ 3-3 หน้าตัดของเส้นใยโดยประมาณเป็นวงกลมและขนาดประมาณ 20-500 ไมโครเมตร เส้นใยกัญชงถูกใช้เป็นวัสดุเสริมแรงสำหรับวัสดุเชิงประกอบ สมบัติเชิงกลของเส้นใยแสดงในตารางที่ 3-2



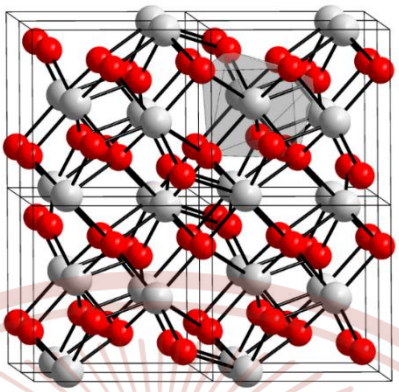
ภาพที่ 3-3 เส้นใยกัญชง

3.1.3 นาโนเซอร์โคเนียมออกไซด์

นาโนเซอร์โคเนียมออกไซด์ ผลิตโดยบริษัท SAT NANO ลักษณะเป็นผงละเอียดขนาดเล็กสีขาว ซึ่งเป็นอนุภาคประเภทเซรามิก มีขนาด 30 ไมครอน แสดงไว้ดังภาพที่ 3-4 สมบัติเชิงกลของนาโนเซอร์โคเนียมออกไซด์แสดงในตารางที่ 3-3



ภาพที่ 3-4 ผงนาโนเซอร์โครเนียมออกไซด์



ภาพที่ 3-5 โครงสร้างทางเคมีของเซอร์โครเนียมออกไซด์

ตารางที่ 3-1 ตารางแสดงข้อมูลสมบัติของพอลิเอไมด์ 12[26]

Properties	PA 12
Tensile strength (MPa)	48
Elongation at break (%)	24
Flexural strength (MPa)	58
Flexural modulus (MPa)	1500
Hardness (Shore D)	75
Melting temperature (°C)	172-180
Density (g/cm^3)	0.45

ตารางที่ 3-2 ตารางแสดงข้อมูลสมบัติของเส้นใยกัญชง[14]

Properties	Hemp fiber
Density (g/cm^3)	1.47
Tensile Strength (MPa)	690
Modulus of Elasticity (GPa)	70
Elongation (%)	4

ตางรางที่ 3-3 ตารางแสดงข้อมูลสมบัติของเซอร์โคเนียมออกไซด์[7]

Properties	ZrO_2
Appearance	Solid
Melting point	2700°C
Boiling point	5000°C
Relative density	5.89
Young's modulus	210 GPa
Bend Strength	900 – 1200 MPa
Compressive Strength	2000 MPa
Hardness	1200 HV

ตารางที่ 3-4 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

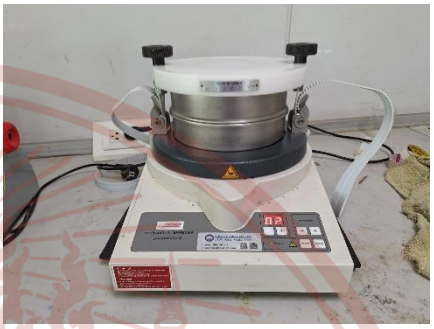
เครื่องมือ	รุ่น/ยี่ห้อ
เครื่องตัดเส้นใย	FRITSCH; PULVERISETTE 25
เครื่องเขย่าแยกเส้นใย	FRITSCH; ANALYSETTE 3
เครื่องผสมสารด้วยการกลิ้งกวน	SYH; HYWELL
เครื่องขึ้นรูปแบบกดอัด	Carver; CMG 30H-12 ASTM Model B
เครื่องทดสอบแรงดึงและแรงดัด	Cometech; QC-506M1
เครื่องทดสอบแรงกระแทก	Zwick/Roell; HIT5.5P
เครื่องทดสอบความล้า	Zwick/Roell LTM2
เครื่องทดสอบความแข็งวัสดุ	Rex DUROMETER; OS-1
เครื่องวิเคราะห์สมบัติเชิงกลแบบไดนามิก	METTLER TOLEDO; DMA/SDTA1+
เครื่องวัดค่าการเปลี่ยนแปลงความร้อนของสาร	METTLER TOLEDO, DSC 3+
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	Thermo Scientific; Axia

3.2 วิธีการวิจัย

3.3.1 ทำการตัดเส้นใยกัญชงและคัดแยกเส้นใยกัญชง ในงานวิจัยนี้เลือกใช้เส้นใยที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 250 ไมครอน และมีความยาวของเส้นใย 0.5 มิลลิเมตรโดยประมาณ



ภาพที่ 3-6 เส้นใยกัญชงที่ทำการตัดแล้ว



ภาพที่ 3-7 การคัดแยกเส้นใยกัญชงด้วยเครื่อง

3.3.2 นำเส้นใยกัญชง พอลิเอไมด์ 12 และนาโนเซอร์โคเนียมออกไซด์เข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้นในวัสดุ

3.3.3 นำวัสดุที่เตรียมไว้ใส่ลงในถุงเพื่อเตรียมเข้าใส่ในเครื่องผสมสารด้วยการกลิ้งกวน โดยในงานวิจัยจะแบ่งออกเป็น 2 หัวข้อ ดังนี้

3.3.3.1 เตรียมวัสดุสำหรับการศึกษาปริมาณเส้นใยกัญชงที่เหมาะสม มี 6 สูตร ดังตารางที่ 3-5 โดยจะเพิ่มปริมาณเส้นใยขึ้นสูตรละ 2 wt% เนื่องจากในการออกแบบทดลองวัสดุเชิงประกอบการเติมเส้นใยเพิ่มขึ้นจะช่วยเพิ่มคุณสมบัติทางกลได้จนถึงระดับหนึ่ง แต่หากเติมเกินขีดจำกัดนี้ การกระจายตัวไม่ดีและการยึดเกาะระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์ที่ไม่เพียงพออาจทำให้สมบัติลดลงหรือไม่เพิ่มขึ้นอีก การศึกษาปริมาณเส้นใยแบบขั้นบันไดจึงช่วยให้เห็นแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงชัดเจนและเหมาะสำหรับการวิเคราะห์เชิงสถิติ โดยยังอยู่ในช่วงที่สามารถขึ้นรูปได้จริง แม้ไม่ได้ปรับปรุงผิวของเส้นใยธรรมชาติ

3.3.3.2 หลักจากที่ได้ปริมาณเส้นใยที่เหมาะสมตามหัวข้อที่ 3.3.3.1 แล้ว จะทำการเตรียมวัสดุสำหรับการศึกษาปริมาณนาโนเซอร์โคเนียมที่เหมาะสม มี 5 สูตร ดังตารางที่ 3-6 โดยทำการเพิ่มการใส่อนุภาคสูตรละ 3 wt% เนื่องจากจะทำให้สังเกตแนวโน้มและวิเคราะห์เชิงสถิติได้ อีกทั้งการศึกษาที่ 0–12 wt% เพื่อศึกษาความแข็งและความต้านทานแรงกระแทกของวัสดุเชิงประกอบลักษณะการหาปริมาณที่เหมาะสอมแบบ incremental นี้ช่วยให้เห็นแนวโน้มของสมบัติตามปริมาณตัวเติมได้อย่างชัดเจน

ตารางที่ 3-5 การศึกษาปริมาณเส้นใยกัญชงที่เหมาะสม

Sample	Hemp fiber (wt%)	Nomenclature
1	0	Pure
2	4	Hemp4%
3	6	Hemp6%
4	8	Hemp8%
5	10	Hemp10%
6	12	Hemp12%

ตารางที่ 3-6 การศึกษาปริมาณนาโนเซอร์โคเนียมที่เหมาะสม

Sample	Hemp fiber (wt%)	ZrO_2 (wt%)	Nomenclature
1	0	0	Pure
2	10	0	HZr0
3	10	3	HZr3
4	10	6	HZr6
5	10	9	HZr9
6	10	12	HZr12

3.3.4 ทำการขึ้นรูปด้วยเครื่องกดอัดที่อุณหภูมิ 185 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 min ด้วยแรงกด 4000 PSI และให้ความเย็น (Cooling) เป็นนเวลา 5 min หลังจากนั้นดึงวัสดุออกจากแม่พิมพ์

3.3.5 ตัดชิ้นงานเพื่อเตรียมทำการทดสอบตามหัวข้อ 3.4

3.3 สมบัติเชิงกล

ทดสอบแรงดึงด้วยมาตรฐาน ASTM D3039 ขนาดทดสอบ 22 mm x 150 mm x 3 mm ความเร็วในการดึง 5 mm/min

ทดสอบแรงดัดงอด้วยมาตรฐาน ASTM D790 ขนาดทดสอบ 10 mm x 90 mm x 3 mm ความเร็วในการดัดงอ 25 mm/min

ทดสอบความล้าด้วยมาตรฐาน ASTM D7774-22 ขนาดทดสอบ 15 mm x 90 mm x 3 mm โดยใช้แรงกด 30 นิวตัน ทำซ้ำ 50,000 cycle

ทดสอบแรงกระแทก (Drop weight test) ด้วยมาตรฐาน ISO 6603-2 (ASTM D3763) ขนาดทดสอบ 100 mm x 100 mm x 3mm ความเร็วของลูกตุ้มน้ำหนัก 3.7 เมตรต่อวินาที น้ำหนักของลูกตุ้ม 4 กิโลกรัม

ทดสอบ DMA ด้วยมาตรฐาน ASTM D7028-07 ขนาดทดสอบ 10 mm x 90 mm x 3 mm ความเร็วในการดึง 5 mm/min ดึงด้วยอุณหภูมิ 25°C - 125°C และทดสอบความแข็งด้วยมาตรฐาน Shore D

3.4 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน (Differential scanning calorimetry, DSC)

การทดสอบ DSC ทำภายใต้แก๊สไนโตรเจน 60ml/min ด้วยจาน (Pan) ขนาด 40μm ทำการทดสอบ 2 cycle ดังตารางที่ 3-6 โดย Cycle 1 ใช้เพื่อเคลียร์หรือรีเซ็ตประวัติทางความร้อนของตัวอย่าง เช่น ผลจากกระบวนการขึ้นรูปหรือการตกผลึกก่อนหน้า เพื่อให้ตัวอย่างอยู่ในสถานะที่สม่ำเสมอ ข้อมูลจาก Cycle 2 ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนที่แท้จริงของวัสดุ ได้แก่ อุณหภูมิหลอมเหลว (Tm) อุณหภูมิการตกผลึก (Tc) และเอนทัลปี เนื่องจากตัวอย่างผ่านการควบคุมประวัติทางความร้อนแล้ว

ตารางที่ 3-7 กระบวนการทดสอบ DSC

Cycle 1	Cycle 2
ISO - 20°C เป็นเวลา 1 นาที Dyn - 20°C - 250°C (10°C/min) ISO - 20°C เป็นเวลา 1 นาที Dyn - 20°C - 250°C (10°C/min)	ISO - 20°C เป็นเวลา 1 นาที Dyn - 20°C - 250°C (10°C/min) ISO - 20°C เป็นเวลา 1 นาที Dyn - 20°C - 250°C (10°C/min)

*Dyn = Dynamic

3.5 การทดสอบสัณฐานวิทยา

ภาพการทดสอบของพื้นผิวรอยแตกของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยแรงอัดได้มาจากการใช้ SEM สุญญากาศต่ำ ที่ทำงานด้วยแรงดันไฟฟ้า 5 กิโลโวลต์ พื้นผิวที่ใช้ในการวิเคราะห์คือพื้นผิวรอยแตกของการทดลองทดสอบแรงดึง

3.6 การวิเคราะห์ธาตุและองประกอบด้วยวิธี Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDX)

ภาพการทดสอบการกระจายตัวของอนุภาคนาโนเซอร์โคเนียมได้มาจากการใช้ SEM สุญญากาศต่ำ ที่ทำงานด้วยแรงดันไฟฟ้า 5 กิโลโวลต์ พื้นผิวที่ใช้ในการวิเคราะห์คือพื้นผิวของชิ้นงาน

บทที่ 4

ผลการวิจัย

ในการวิเคราะห์ผลจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือศึกษาปริมาณของเส้นใยกัญชงและปริมาณของนาโนเซอร์โคเนียมออกไซด์ที่เหมาะสม โดยจะแบ่งเป็น 2 หัวข้อ ดังนี้

4.1 การศึกษาปริมาณของเส้นใยกัญชง

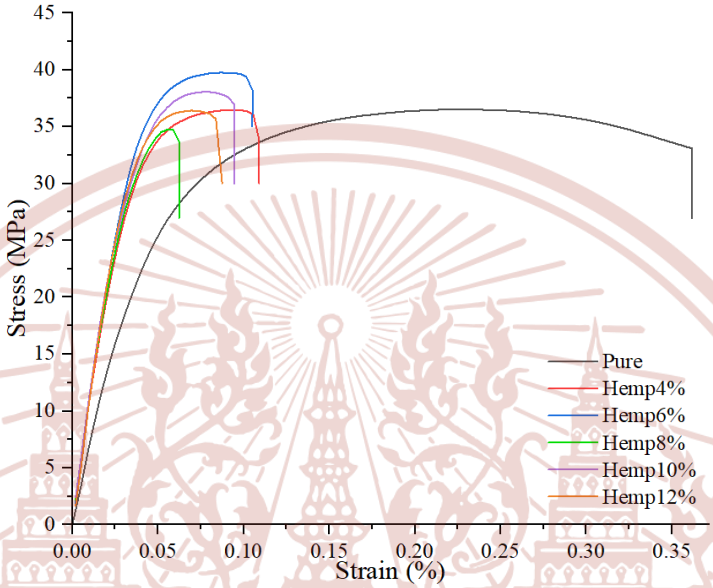
4.2 การศึกษาอิทธิพลของนาโนเซอร์โคเนียมออกไซด์

4.1 การศึกษาปริมาณของเส้นใยกัญชง

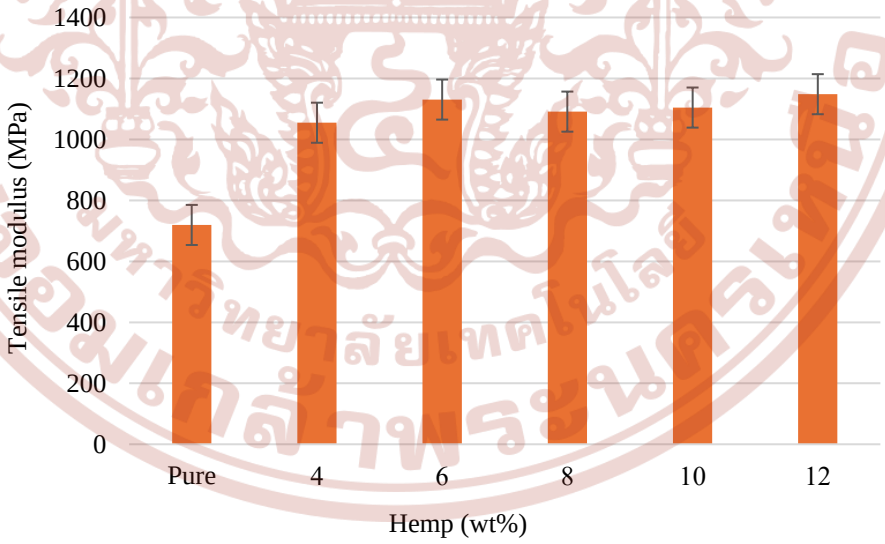
4.1.1 การทดสอบแรงดึง (Tensile testing)

จากการทดสอบแรงดึง กราฟแสดงความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดแสดงดังภาพที่ 4-1 จะเห็นได้ว่าวัสดุที่มีแค่เมทริกซ์จะมีความยืดหยุ่นที่สูงเนื่องจากโครงสร้างของพอลิเอไมด์ มีลักษณะเป็นเส้นตรงซึ่งแตกต่างจากวัสดุเชิงประกอบที่ทำการเสริมแรง เมื่อทำการเสริมแรงด้วยเส้นใยกัญชงแล้วพบว่าวัสดุสามารถรับแรงดึงได้เพิ่มขึ้น เนื่องจากการยึดเกาะระหว่างส่วนต่อประสานระหว่างเมทริกซ์และเส้นใย ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของเมทริกซ์นั่นคือการลดความยืดหยุ่นที่มากและเพิ่มความสมารถในการรับแรง ซึ่งเมื่อเมทริกซ์ได้รับแรงแล้วแรงจะส่งต่อไปยังเส้นใย นั่นหมายความว่าเมื่อเติมเส้นใยลงไป วัสดุเชิงประกอบสามารถถ่ายโอนความเค้นหรือกระจายความเค้นได้ดี แต่เมื่อเติมเส้นใยลงไปมากขึ้นการเชื่อมกันระหว่างเมทริกซ์และเส้นใยจะลดลง เนื่องจากเมทริกซ์ที่ทำหน้าที่เป็นตัวประสานลดลงและเส้นใยที่มากขึ้นเกิดการจับกลุ่มกันทำให้การถ่ายโอนความเค้นลดลง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Islam และคณะ[8] ซึ่งปริมาณเส้นใยที่เหมาะสมสำหรับการรับแรงดึงคือ 6 wt% และ 10 wt% เมื่อดูจากกราฟมอดูลัสของแรงดึงที่แสดงดังภาพที่ 4-2 พบว่ามีค่าสูงสุดเมื่อใส่เส้นใยที่ 6 wt% และลดลงเล็กน้อยที่ 8 wt% จากนั้นค่อยๆเพิ่มขึ้นเนื่องจากทิศทางของเส้นใยขนานกับแรง นั่นหมายความว่าหากเพิ่มเส้นใยมากขึ้นเส้นใยก็จะมีความสามารถใยการยืดหยุ่นมากขึ้น ดังข้อมูล ตารางที่ 4-1 และหากเปรียบเทียบค่ามอดูลัสกับความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดแล้ว พบว่าการใส่เส้นใยที่ 6wt% มีความสามารถในการรับแรงและมีมอดูลัสของสภาพ

ยืดหยุ่นที่ดีเมื่อเทียบกับตัวอย่างอื่นๆนั่นเป็นการแสดงให้เห็นว่าหากทำการผสมด้วยการกลิ้งกวนสารที่ 6wt% จะเหมาะสมที่สุดสำหรับใช้งานวัสดุที่ต้องการสมบัติของแรงดึงที่สูง



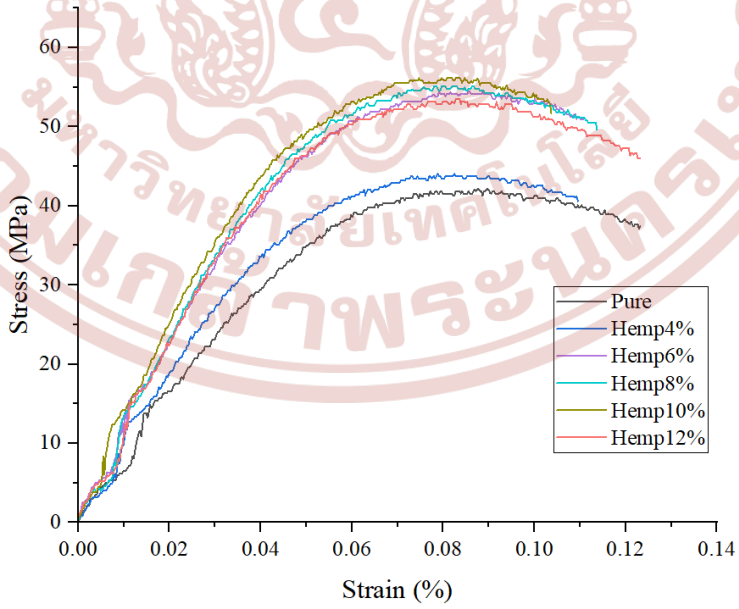
ภาพที่ 4-1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดของการทดสอบแรงดึง



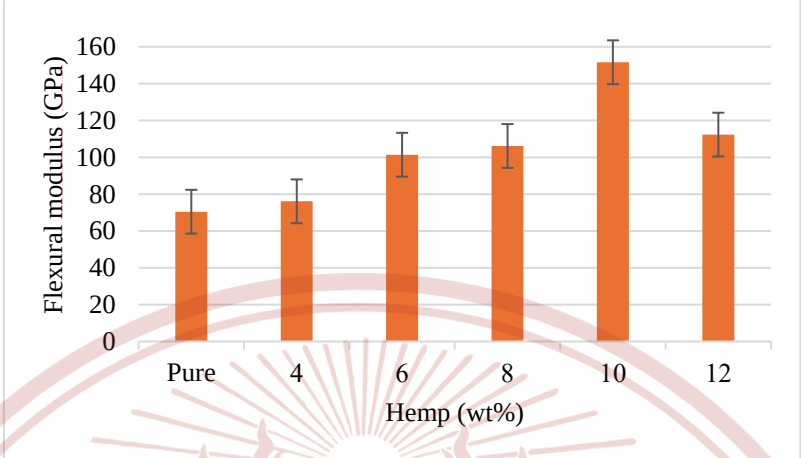
ภาพที่ 4-2 กราฟแสดงค่า Tensile Modulus

4.1.2 การทดสอบแรงดัดงอ (Flexural testing)

การทดสอบแรงดัดงอ กราฟแสดงความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดแสดงดังภาพที่ 4-3 พบว่าวัสดุที่ไม่ได้เติมเส้นใยมีความสามารถในการรับแรงได้น้อยกว่าและการเติมเส้นใยที่ 4 wt% เพิ่มความสามารถในการรับแรงได้เพียงเล็กน้อย เพราะเมื่อเทียบอัตราส่วนระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์แล้วเมทริกซ์ยังคงมีอัตราส่วนที่มากกว่าทำให้เกิดการกระจายแรงได้น้อย เมื่อเปรียบเทียบการเติมเส้นใยที่ 6–12wt% จะเห็นได้ว่าวัสดุเชิงประกอบที่มีเส้นใยกัญชง 10 wt% มีความสามารถในการรับแรงและโมดูลัสความหยืดหยุ่นของการดัดงอมากที่สุด เนื่องจากเส้นใยมีความเหนียวและแรงที่ทำการทดสอบตั้งฉากกับเส้นใยทำให้พื้นที่ผิวในการรับแรงเพิ่มขึ้นจึงมีพื้นที่สำหรับการถ่ายโอนแรงที่มาก ดังนั้นจึงทำให้สามารถรับแรงได้มากกว่าการทดสอบแรงดึง อย่างไรก็ตามหากมีเส้นใยมากเกินไป เส้นใยอาจเกิดการกระจายตัวน้อยลงและจับกลุ่มกันมากขึ้น ทำให้เกิดความหยืดหยุ่นของวัสดุลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sawpan และคณะ[24] จากภาพที่ 4-4 พบว่าค่ามอดูลัสของแรงดัดงอเพิ่มขึ้นตามลำดับ แต่ที่ 12 wt% ลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับ 10wt% นั่นหมายความว่าการใส่เส้นใยที่มากเกินไปทำให้ความแข็งแรงยืดหยุ่นของวัสดุลดลง เนื่องจากเกิดการจับกลุ่มกันมากกว่าการกระจายตัวเหมาะสม ดังนั้นหากต้องการใช้งานในชิ้นงานที่ต้องรับแรงดัดงอ การใส่เส้นใยที่ 10 wt% จะเหมาะสมที่สุด



ภาพที่ 4-3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดของการทดสอบแรงดัดงอ



ภาพที่ 4-4 กราฟแสดงค่า Flexural Modulus

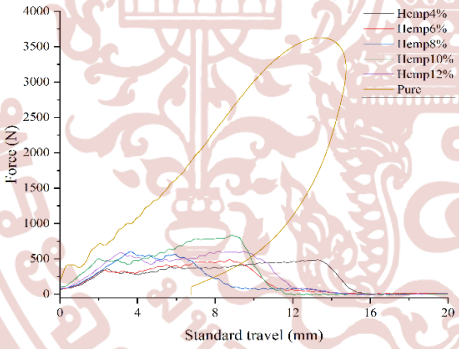
ตารางที่ 4-1 ผลทดสอบแรงดึงและแรงดัดงอ

Hemp (wt)%	Tensile strength (MPa)	Tensile modulus (MPa)	Flexural strength (MPa)	Flexural modulus (GPa)
Pure	36.52	719.44	42.17	70.46
4	36.47	1054.79	44.07	76.12
6	39.75	1130.71	54.46	101.40
8	34.73	1091.19	55.14	106.17
10	38.06	1104.47	56.13	151.61
12	36.41	1148.35	53.49	112.32

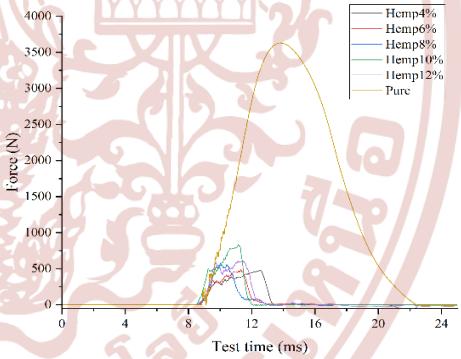
4.1.3 การทดสอบแรงกระแทก (Drop weight test)

การทดสอบแรงกระแทกจากการตกกระทบจะรายงานกราฟ 3 ผลการทดสอบ ซึ่งจะมีกราฟแรงกระแทก พลังงานในการดูดซับแรงกระแทก และการต้านความเร็วในการกระแทก จากการรายงานผลการทดสอบดังภาพที่ 4-5 (a-f) พบว่า Pure มีความสามารถในการรับแรงกระแทกได้ดีที่สุดเนื่องจากเป็นโครงสร้างกึ่งผลึก (Semi-Crystalline) ซึ่งจะผสมผสานความแข็ง (Crystalline) และความยืดหยุ่น (Amorphous) ทำให้ทนต่อแรงกระแทกและมีความเหนียวสูง เมื่อมีแรงกระแทกวัสดุจะเกิดการยืดตัวออก (เกิดการเสียรูป) แล้วจะพยายามหดตัวกลับที่เดิม และเมื่อใส่เส้นใยกัญชง

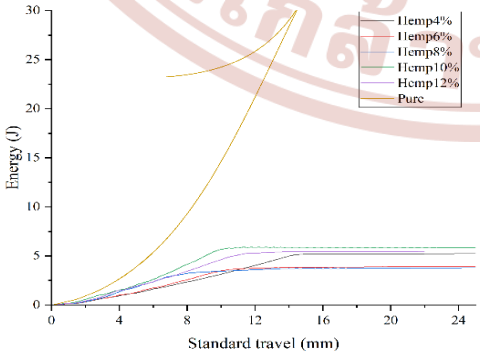
ลงไปพบว่า วัสดุเชิงประกอบที่มีเส้นใยกัญชงมีความสามารถในการรับแรงกระแทกลดลงจาก Pure แต่เมื่อเทียบกับกลุ่มวัสดุที่ศึกษาปริมาณเส้นใย ที่ 10 wt% มีความต้านทานแรงกระแทกสูงสุดเมื่อเทียบกับเปอร์เซ็นต์ของเส้นใยอื่นๆ การกระจายตัวของเส้นใยแบบสุ่มภายในเมทริกซ์มีส่วนทำให้ประสิทธิภาพในการรับแรงกระแทกดีขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Pingulkar และคณะ[19] ในงานวิจัย PA12และเส้นใยกัญชงนี้ ผลการทดสอบซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มเส้นใยกัญชงทำให้วัสดุเชิงประกอบมีความแข็งเพิ่มขึ้นในขณะที่ความยืดหยุ่นลดลง จากภาพที่ 4-5 (a-f) สำหรับวัสดุที่เพิ่มเส้นใย นอกจากจะเสริมความแข็งแรงแล้ว ยังช่วยดูดซับแรงและเพิ่มการยืดตัวของวัสดุก่อนที่จะแตกหักได้อีกด้วย โดยวัสดุผสมที่มีเส้นใยกัญชงที่ 10 wt% สามารถทนต่อแรงกระแทกได้สูงถึง 63.37 นิวตัน ซึ่งมากที่สุดเมื่อเทียบกับวัสดุผสมที่มีปริมาณเส้นใยอื่น เมื่อเพิ่มเส้นใยเข้าไปอีกจะเห็นได้ว่าที่ 12 wt% อีกทั้งยังมีความสามารถในการยืดตัวจะสูงแต่ความสามารถในการดูดซับแรงจะลดลง ซึ่งเกิดจากการเพิ่มเส้นใยมากเกินไป ส่งผลให้อัตราส่วนของเมทริกซ์น้อยทำให้เกิดการเชื่อมกันระหว่างเมทริกซ์กับเส้นใยลดลง อีกทั้งเส้นใยจะเกิดการเกาะกลุ่มกัน ทำให้เมทริกซ์เข้าไปเชื่อมประสานได้น้อยลง



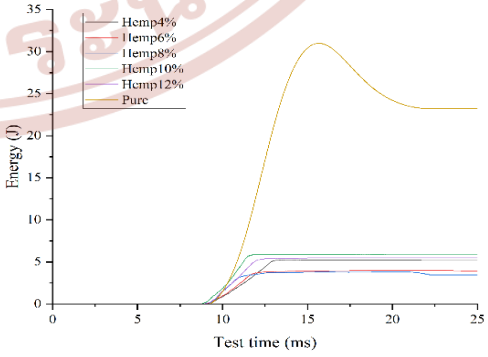
ภาพที่ 4-5 (a) ความสัมพันธ์ แรง–ระยะยืด



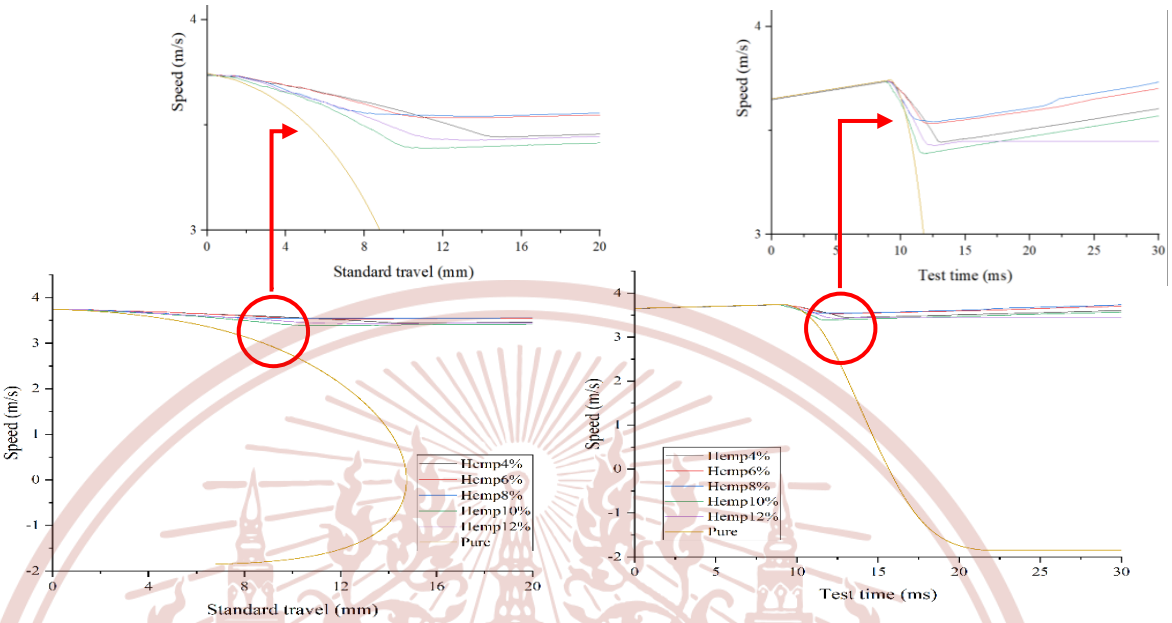
ภาพที่ 4-5 (b) ความสัมพันธ์ แรง-เวลา



ภาพที่ 4-5 (c) ความสัมพันธ์ พลังงาน–ระยะยืด



ภาพที่ 4-5(d) ความสัมพันธ์ พลังงาน-เวลา



ภาพที่ 4-5 (e) ความสัมพันธ์ ความเร็ว–ระยะยืด **ภาพที่ 4-5 (f)** ความสัมพันธ์ ความเร็ว-เวลา

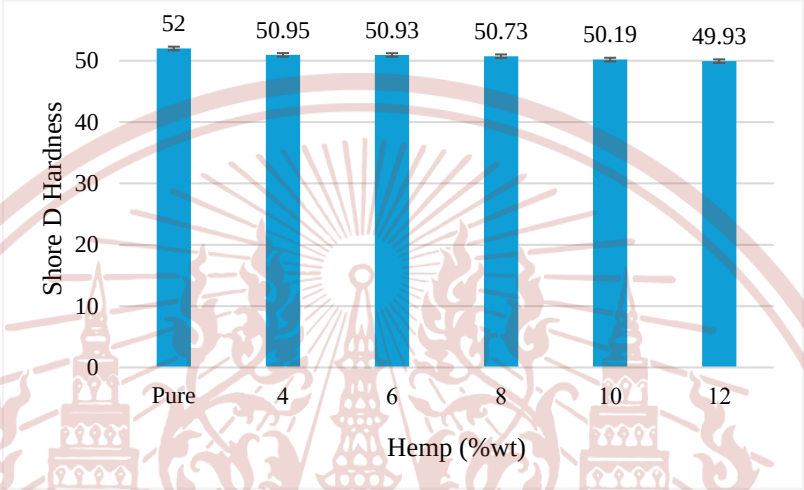
ตารางที่ 4-2 ผลการทดสอบแรงกระแทก

Hemp (wt%)	Drop weight		
	Force (N)	Energy (J)	Speed (m/s)
0 (Pure)	3629.84	30.99	-1.81
4	481.75	5.20	3.45
6	487.48	3.76	3.54
8	569.99	3.69	3.55
10	830.14	5.86	3.34
12	606.66	5.29	3.43

4.1.4 การทดสอบความแข็ง (Hardness testing)

การทดสอบความแข็งใช้เพื่อประเมินจุดเจาะทะลุของวัสดุและระดับความแข็งจะแสดงบนหน้าปัด จากการทดสอบนี้แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มเส้นใยป่านไม่มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อความแข็งโดยรวมของวัสดุเชิงประกอบ ค่าความแข็งที่วัดได้โดยเฉลี่ยค่อนข้างสม่ำเสมอในเปอร์เซ็นต์ของปริมาณเส้นใยที่แตกต่างกัน เมื่อทำการทดสอบเมทริกซ์หรือเส้นใยอาจได้รับแรงกดจากเครื่องมือ แต่ความนุ่มของเส้นใยและเมทริกซ์จะใกล้เคียงกันจึงส่งผลให้มีความแข็งของพื้นผิววัสดุมีความใกล้เคียง

กัน จากผลทดสอบหากไม่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใย เมทริกซ์จะแสดงความแข็งที่สูงกว่าเล็กน้อยที่ 52 และเมื่อเพิ่มเส้นใยเข้าไป ความแข็งโดยเฉลี่ยจะอยู่ที่ประมาณ 50 ข้อมูลความแข็งจะแสดงเป็นภาพในภาพที่ 4-6

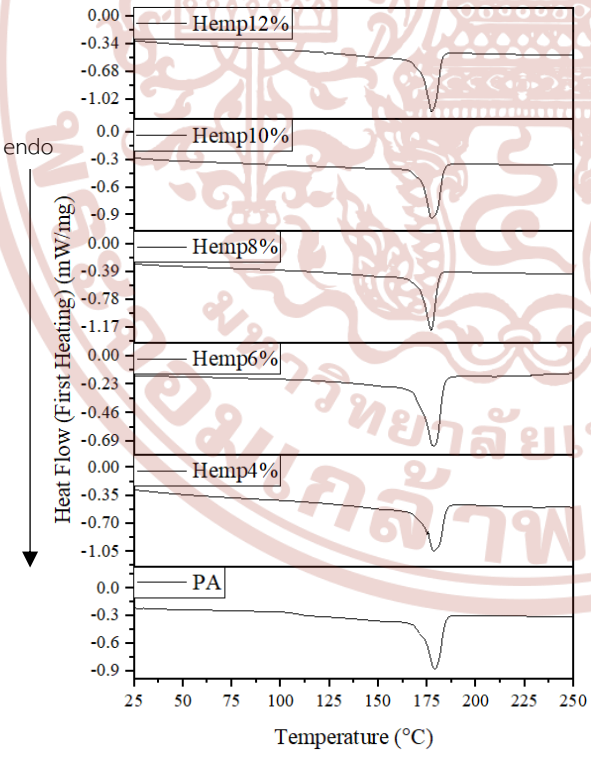


ภาพที่ 4-6 ผลการทดสอบความแข็งของวัสดุเชิงประกอบ

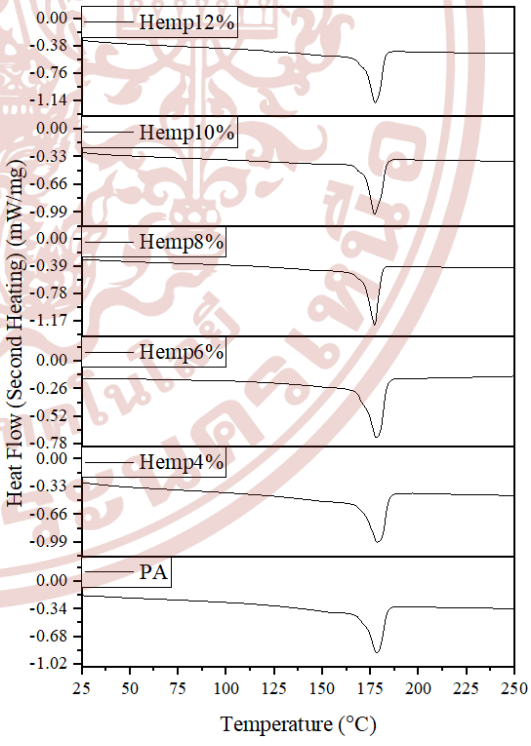
4.1.5 การวิเคราะห์ความร้อน (Differential Scanning Calorimetry : DSC)

การเพิ่มเส้นใยส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิการหลอมเหลวของวัสดุผสมอย่างไม่มีนัยสำคัญแต่มีความแตกต่างกันในการดูดซับพลังงานและการปลดปล่อยพลังงาน จุดสูงสุดของการดูดความร้อนนี้เกี่ยวข้องกับการคลายตัวของโซ่พอลิเมอร์ จากภาพที่ 4-7(a) และ 4-7(c) เมื่อปริมาณเส้นใยกัญชงเพิ่มขึ้นในวัสดุผสม อุณหภูมิการหลอมเหลวของเมทริกซ์พอลิเมอร์มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย ซึ่งอาจเกิดจากปฏิสัมพันธ์ระหว่างเส้นใยกัญชงและเมทริกซ์พอลิเมอร์หรือเกิดจากการเพิ่มขึ้นของการเคลื่อนตัวของเฟสอสัณฐานของ PA 12 ซึ่งทำให้โครงสร้างพอลิเมอร์มีการจัดเรียงตัวน้อยลง ส่งผลให้มีอุณหภูมิการหลอมเหลวที่ต่ำลงและจุดสูงสุดของวัสดุที่มีปริมาณเส้นใยกัญชงสูงมีแนวโน้มจะกว้างขึ้น ซึ่งอาจบ่งชี้ถึงการกระจายอุณหภูมิการหลอมเหลวที่กว้างขึ้น เนื่องจากเส้นใยกัญชงอาจทำหน้าที่เป็นนิวเคลียสสำหรับการตกผลึกของพอลิเมอร์ เมื่อเปรียบเทียบเส้นโค้งการให้ความร้อนครั้งแรกและครั้งที่สอง สามารถบ่งชี้ถึงการเปลี่ยนแปลงในโครงสร้างผลึกของพอลิเมอร์ได้ หากจุดสูงสุดในการให้ความร้อนครั้งที่สองมีขนาดเล็กลงหรือหายไป แสดงว่าพอลิเมอร์บางตัวอาจสลายตัวหรือเปลี่ยนโครงสร้างอย่างถาวร จากภาพที่ 4-7 (a) แสดงกราฟสูงสุดของการหลอมเหลวค่อนข้างแคบ บ่งบอกถึงโครงสร้างของผลึกที่สม่ำเสมอ เมื่อเติมเส้นใยกัญชงพบว่าการเติมเส้นใยส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอุณภูมิการหลอมเหลวเล็กน้อยซึ่งเกิดจากโครงสร้างและขนาดของผลึก

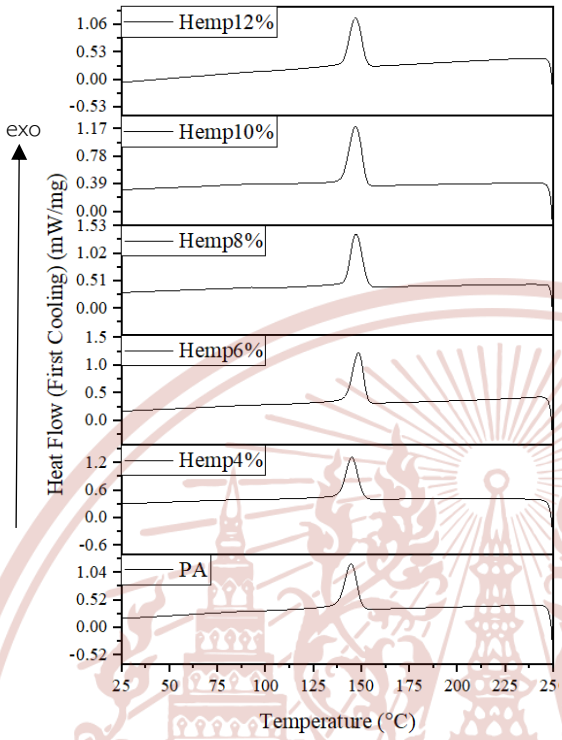
และพื้นที่ใต้กราฟของการหลอมเหลวแสดงถึงปริมาณความร้อนที่ใช้ซึ่งสัมพันธ์กับปริมาณการเป็นผลึกของวัสดุ หากพื้นที่ลดลงอาจหมายถึงความเป็นผลึกของพอลิเอไมด์ลดลง เนื่องจากปริมาณกัญชงที่เพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการการหยุดชะงักของการตกผลึกของพอลิเมอร์ และการให้ความร้อนครั้งที่ 2 ภาพที่4-7 (c) ลักษณะกราฟคล้ายกับการให้ความร้อนครั้งที่ 1 แสดงว่าวัสดุมีพฤติกรรมการตกผลึกที่คงที่ เมื่อเปรียบเทียบกราฟการทำความเย็นครั้งที่ 1 พบว่าการเติมเส้นใยกัญชงช่วยกระตุ้นการตกผลึก ทำให้อุณหภูมิในการตกผลึกสูงขึ้น (กราฟเลื่อนไปทางขวา) และกราฟมีลักษณะเดียวกัน ซึ่งหมายความว่าวัสดุมีการตกผลึกที่สม่ำเสมอ และกราฟการทำความเย็นครั้งที่ 2 มีลักษณะไม่เปลี่ยนแปลงจากครั้งที่ 1 ซึ่งเป็นการยืนยันพฤติกรรมการตกผลึกของวัสดุ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Oliver-Ortega et al.[17] จากกราฟ DSC จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิที่โซ่พอลิเมอร์เริ่มคลายตัวหรืออุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะเป็นแก้ว (Tg) ไม่สามารถสังเกตได้ เนื่องจากอุณหภูมิดังกล่าวมีค่าต่ำกว่า Tm นอกจากนี้ กราฟ DSC ยังต้องตรวจสอบด้วย DMA เมื่อดูผลการทดสอบ DMA ในกราฟปัจจัยการหน่วง จะเห็นว่า Tg ของวัสดุจะมีค่าต่างกัน อุณหภูมิ Tg และ Tm แสดงอยู่ในตารางที่ 4-3



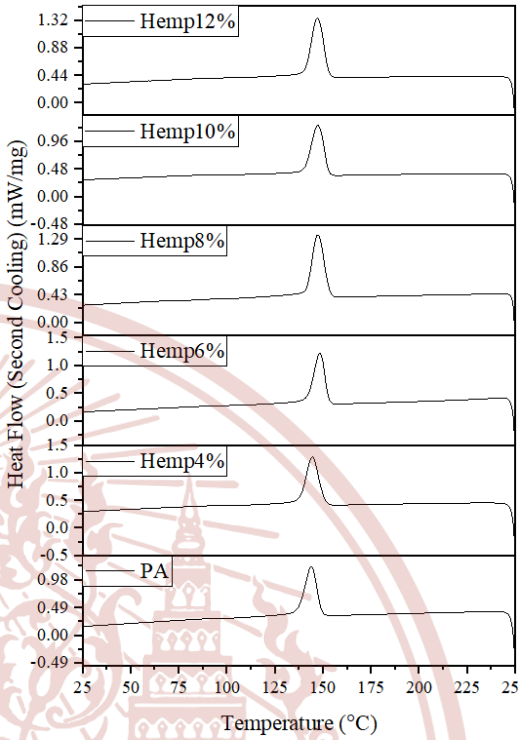
ภาพที่ 4-7 (a) การให้ความร้อนครั้งที่ 1



ภาพที่ 4-7 (b) การให้ความร้อนครั้งที่ 2



ภาพที่ 4-7 (c) การให้ความเย็นครั้งที่ 1

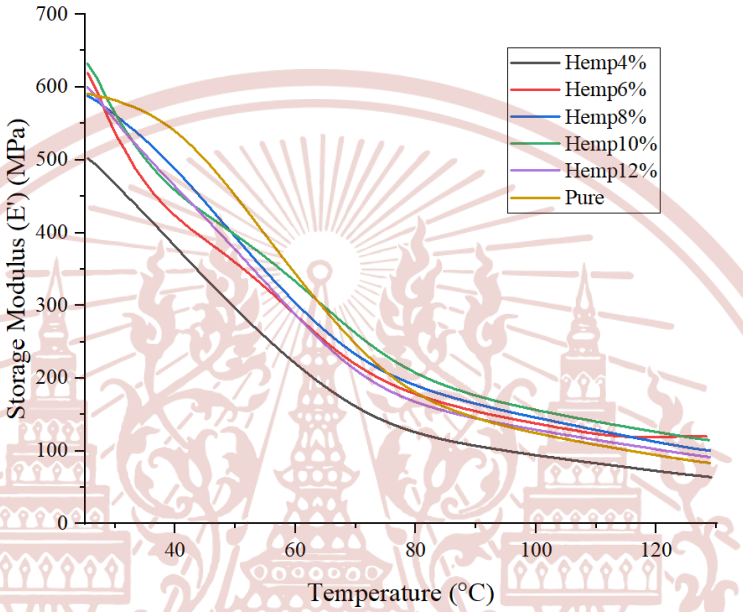


ภาพที่ 4-7 (d) การให้ความเย็นครั้งที่ 2

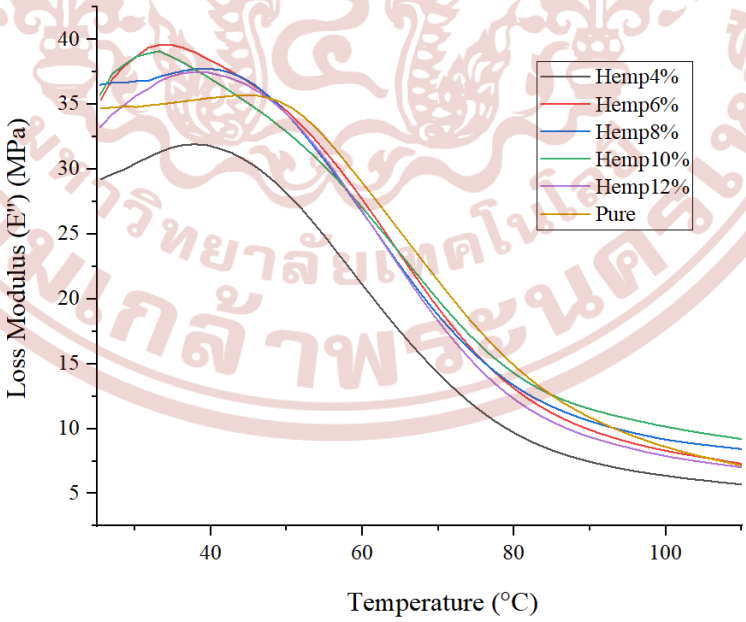
4.1.6 การทดสอบการวิเคราะห์สมบัติเชิงกลแบบไดนามิก (Dynamic Mechanical Analysis : DMA)

ในการทดสอบ DMA เมื่อสังเกตกราฟ Storage Modulus (E') ของวัสดุที่เติมเส้นใยกัญชงในปริมาณต่างกัน (4%, 6%, 8%, 10%, 12%) และบริสุทธิ์ พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ค่า E' ของตัวอย่างทั้งหมดจะลดลง แสดงให้เห็นถึงการลดลงของความแข็งแรงเชิงกลของวัสดุเมื่อได้รับความร้อน การเติมเส้นใยกัญชงจะเพิ่มค่า E' โดยเฉพาะในช่วงอุณหภูมิต่ำ (ต่ำกว่า 60°C) แต่ผลกระทบจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับกราฟที่แสดงค่า Loss Modulus (E'') ซึ่งเกี่ยวข้องกับพลังงานที่สูญเสียไปในรูปของความร้อน โดยพบว่าตัวอย่างที่เติมเส้นใยกัญชงจะมีค่า E'' สูงกว่าวัสดุบริสุทธิ์ในช่วงอุณหภูมิหนึ่ง ซึ่งบ่งบอกถึงการเพิ่มขึ้นของการดูดซับพลังงาน เมื่อสังเกตกราฟ Damping Factor (tan **δ**) จะพบว่าวัสดุที่เติมใยกัญชงจะมีค่า tan **δ** สูงขึ้นในช่วงอุณหภูมิหนึ่ง ซึ่งบ่งชี้ถึงการปรับปรุงคุณสมบัติการดูดซับการสั่นสะเทือน โดยค่า tan **δ** จะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ซึ่งบ่งชี้ว่าคุณสมบัติเหล่านี้ไวต่ออุณหภูมิ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Oliver-Ortega et al.[17]เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โครงสร้างภายในของวัสดุจะเริ่มอ่อนตัวลง ค่าโมดูลัสสะสมในวัสดุเชิงประกอบที่มีเส้นใย 10 wt% มีค่าสูงสุดที่ 632.85 MPa เมื่อเปรียบเทียบกับ Pure โมดูลัสสะสมที่ 10% มีค่าสูงกว่า Pure ถึง 26.13% อีกทั้งยังพบว่าการสูญเสียโมดูลัสเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น

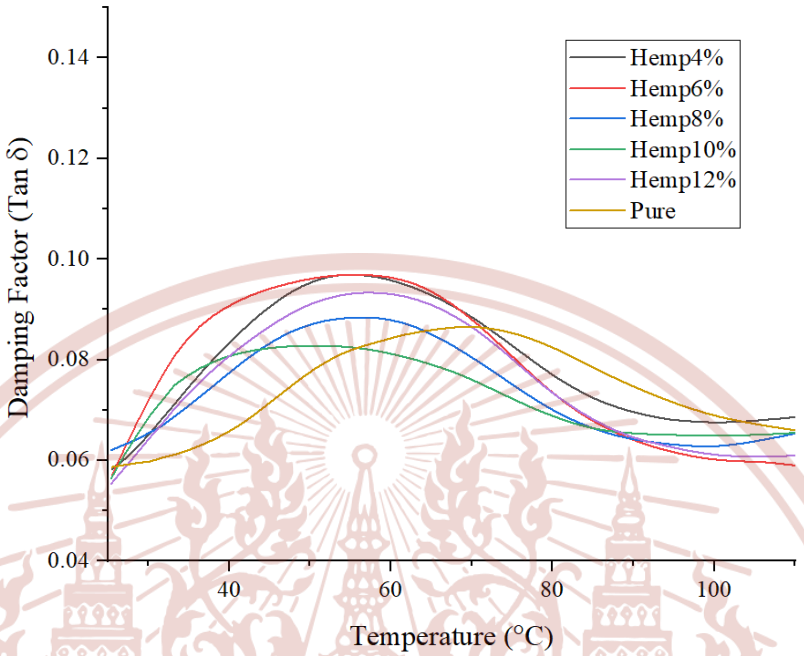
เมื่อสังเกตจาก Damping Factor จะเห็นว่าการสูญเสียโมดูลัสของวัสดุมีค่าใกล้เคียงกัน กราฟการทดสอบแสดงดังภาพที่ 4-8 (a) – 4-8 (c) และผลของอุณหภูมิแสดงไว้ในตารางที่ 4-3



ภาพที่ 4-8 (a) Storage Modulus-Temperature



ภาพที่ 4-8 (b) Loss Modulus-Temperature



ภาพที่ 4-8 (c) Damping Factor-Temperature

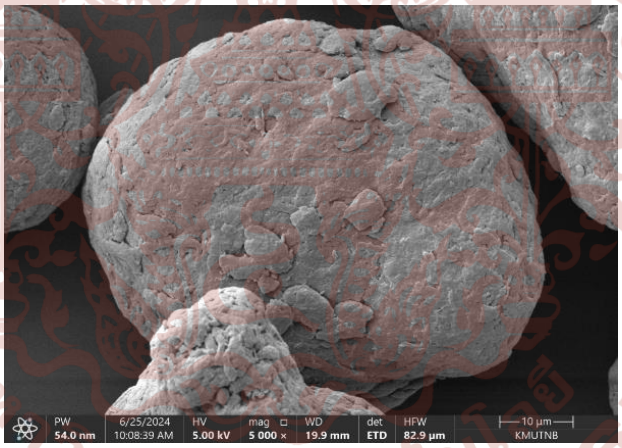
ตารางที่ 4-3 ผลอุณหภูมิการทดสอบ DMA และ DSC จากการศึกษาปริมาณเส้นใยที่เหมาะสม

Hemp (%wt)	Damping Factor (°C) [T_g]	Melting point (°C)		Cooling point (°C)	
		First Heating	Second Heating	First Cooling	Second Cooling
Pure	69.011	178.950	178.260	144.523	143.771
4	55.232	178.324	178.449	144.837	144.398
6	54.069	178.386	178.010	148.349	148.223
8	55.794	177.132	177.195	147.032	147.157
10	48.546	177.320	177.195	146.906	147.220
12	57.383	177.446	177.446	146.845	146.969

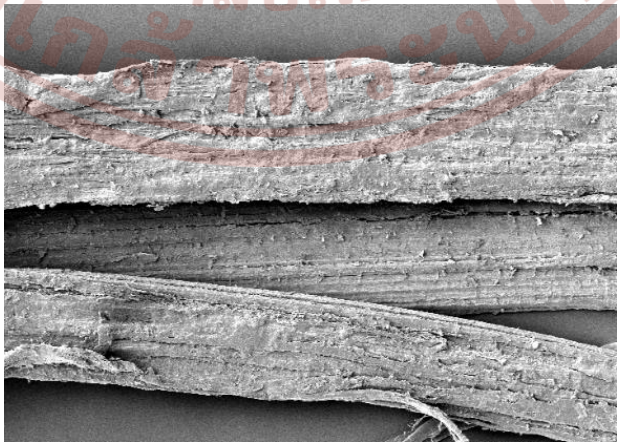
4.1.7 การทดสอบ Scanning Electron Microscope (SEM)

จากผลการทดสอบสัณฐานพบว่าวัสดุเชิงประกอบมีความสามารถในการเข้ากันได้ โดยจะเห็นจากเบื้องต้นได้ตามภาพดังตารางที่ 4-4 และจากภาพหน้าตัดชิ้นงานจากการทดสอบแรงดึงพบว่า เกิดการขาดที่เมทริกซ์และเกิดการขาดที่เส้นใยกัญชงเนื่องจากเมทริกซ์มีรอยย่นเนื่องจากการยืดก่อนขาดและเส้นใยมีลักษณะที่แตกส่วนปลาย นั่นหมายถึงเกิดการส่งผ่านแรงหรือเกิดการกระจายความเค้นจากเมทริกซ์ไปยังเส้นใย การวิเคราะห์ SEM ของพื้นผิวแตกแรงดึงเผยให้เห็นว่าการมีช่องว่างอากาศภายในชิ้นงานบางชิ้นมีส่วนทำให้เกิดการขาดออกจากกัน ในกรณีอื่นๆ เส้นใยถึงขีดความสามา รถใน

การรับน้ำหนักสูงสุดก่อนถึงเมทริกซ์ ส่งผลให้เกิดรอยย่นและการแยกตัวจากรูปที่ 39 เมื่อสังเกตลักษณะของผง PA 12 จะเห็นได้ว่าพื้นผิวของอนุภาคมีความขรุขระเล็กน้อย หากเราสังเกตลักษณะของเส้นใยกัญชงแสดงไว้ดังรูปที่ 40 เราจะพบว่าเส้นใยมีความยาวและขรุขระ เส้นใยอาจมีรอยแตกร้าวหรือแตกหักเล็กน้อยในบางจุด ลักษณะพื้นผิวและโครงสร้างของผง PA 12 และเส้นใยกัญชงมีผลต่อการยึดเกาะและคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบ จากภาพ Pure จะเห็นได้ว่าลักษณะพื้นผิวมีการกระจายตัวของวัสดุที่สม่ำเสมอ เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยกัญชง จะเห็นได้ว่าที่ 4 wt% ลักษณะของเส้นใยเริ่มกระจายตัวในโครงสร้างวัสดุ เส้นใยอาจผสมไม่หมดจึงทำให้เส้นใยและ PA 12 แยกจากกัน เมื่อเติมเส้นใยที่ 6 wt% - 8 wt% เส้นใยจะเริ่มสร้างโครงข่ายกับเมทริกซ์ และเมื่อเติมเส้นใยที่ 10 wt% - 12 wt% ปริมาณเส้นใยจะเพิ่มขึ้นอย่างมาก อาจทำให้เส้นใยเกาะตัวกันเป็นกกลุ่มในบางจุด ทำให้เกิดรูพรุนและช่องว่างระหว่างเส้นใยเพิ่มขึ้นซึ่งอาจส่งผลต่อคุณสมบัติเชิงกล เช่น ความแข็งแรงลดลง

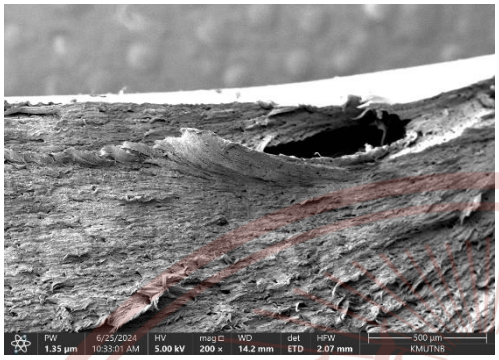


ภาพที่ 4-9 ผงพอลิเอไมด์12 เหลือใช้ (5000×)

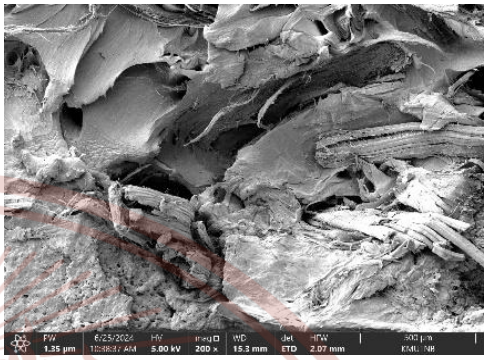


ภาพที่ 4-10 พื้นผิวเส้นใยกัญชง (200× zoom in)

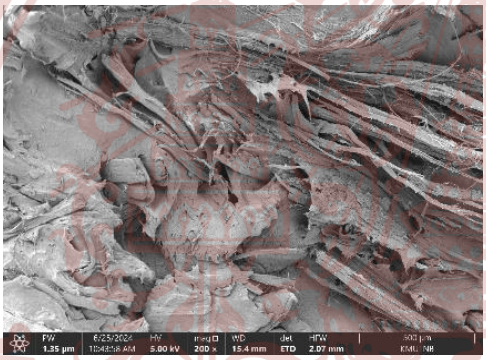
ตารางที่ 4-4 ภาพการทดสอบ SEM จากหน้าตัดการทดสอบการดึง (200×)



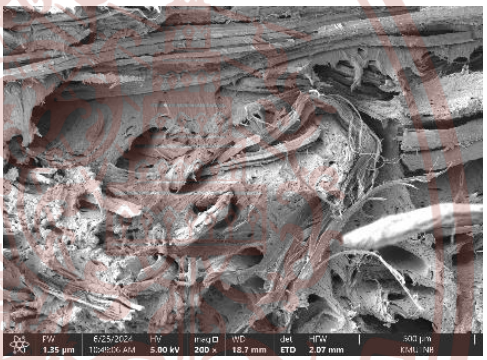
Pure



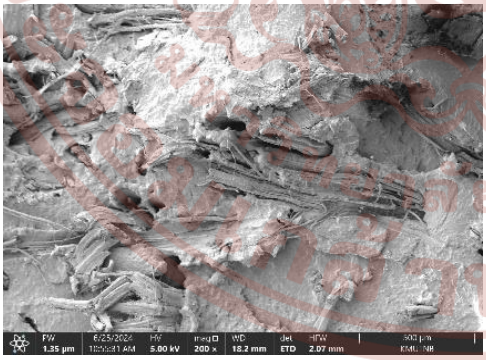
Hemp 4wt%



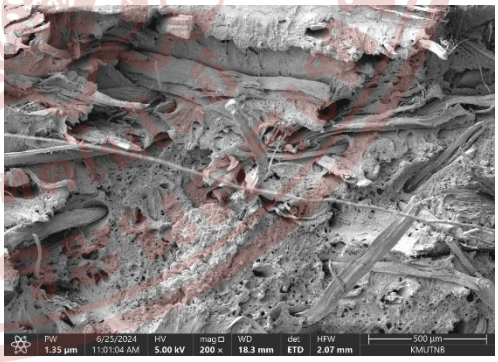
Hemp 6wt%



Hemp 8wt%



Hemp 10wt%



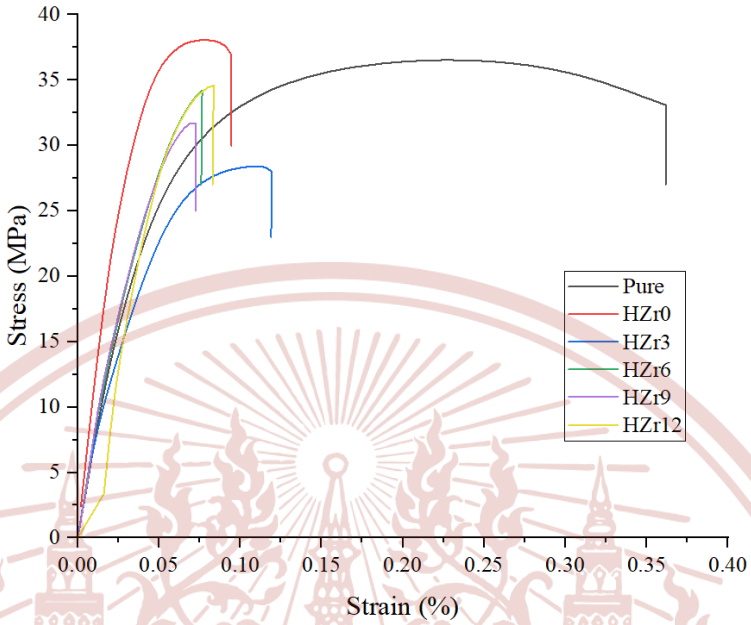
Hemp 12wt%

4.2 การศึกษาอิทธิพลของนาโนเซอร์โคเนียมออกไซด์

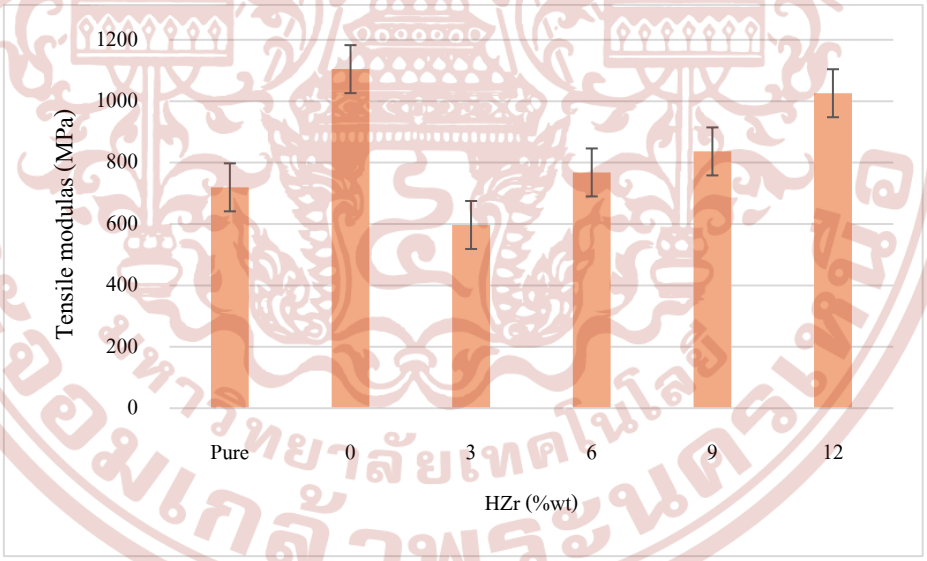
จากหัวข้อ 4.1 เมื่อทำการทดสอบแล้ว พบว่าการใส่เส้นใยที่ปริมาณ 10 wt% มีค่าการทดสอบเชิงกลเหมาะสมในการศึกษาต่อที่สุด ดังนั้นในหัวข้อ 4.2 จะเป็นการศึกษานาโนเซอร์โคเนียมออกไซด์เมื่อใส่เส้นใยกัญชงที่ 10 wt%

4.2.1 การทดสอบแรงดึง (Tensile testing)

จากการทดสอบแดงดึงกราฟแสดงความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียด แสดงดังภาพที่ 4-11 พบว่าการเติม nanoparticles ลงในวัสดุเชิงประกอบส่งผลให้ค่าความต้านแรงดึงและมอดูลัสมีการเปลี่ยนแปลงตามปริมาณ filler โดยลักษณะของ surface morphology และปริมาณของ ZrO_2 มีบทบาทสำคัญต่อการเสียรูปและการแตกหักของเนื้อวัสดุ เมื่อใส่เซอร์โคเนียมลงไปความเหนียวของชิ้นงานไม่ได้ใส่เซอร์โคเนียม (HZr0) และ HZr3 มีค่าใกล้เคียงกัน โดยขาดที่ความเครียดประมาณ 0.1 และที่ HZr6, HZr9 และ HZr12 ขาดที่ความเครียดประมาณ 0.08-0.09 อีกทั้งการทนแรงดึงที่ 6 wt% และ 12 wt% มีค่าใกล้เคียงกัน โดยที่ 6 wt% สามารถรับแรงดึงได้ 34.192 MPa และ 12 wt% สามารถรับแรงดึงได้ 34.580 MPa ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเติมนาโนเซอร์โคเนียมออกไซด์ทุกปริมาณส่งผลให้ความเครียดที่การแตกหักลดลงอย่างมาก ทำให้วัสดุมีความเปราะมากขึ้น ไม่สามารถยืดตัวได้มากเท่า PA 12 บริสุทธิ์ เนื่องจากผงนาโนเซอร์โคเนียมมีอนุภาคขนาดเล็ก อนุภาคนาโนจึงมีโอกาสเกิดการรวมตัว (agglomeration) ทำให้เกิดจุดรวมความเค้น (stress concentration) และเป็นตำแหน่งเริ่มต้นของการแตกร้าวกระจายตัวเข้าไปแทรกตัวอยู่ภายในช่องว่างของชิ้นงานซึ่งเข้าไปขัดขวางแรงดึง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kumar et al[11], Kan และคณะ[9] และผลของ Tensile modulus แสดงดังภาพที่ 4-12 พบว่าการเพิ่มขึ้นของเซอร์โคเนียมที่ HZr6, HZr9 และ HZr12 สามารถเพิ่มค่ามอดูลัสได้เมื่อเทียบกับวัสดุตั้งต้น (Pure) โดยผลข้อมูลทดสอบแสดงยังตารางที่ 4-5 นาโนเซอร์โคเนียมออกไซด์ทำหน้าที่เป็นตัวเพิ่มความแข็ง (stiffening agent) ช่วยเพิ่มความต้านทานต่อการเสียรูปของวัสดุ เนื่องจากอนุภาคนาโนมีความแข็งสูงและช่วยจำกัดการเคลื่อนที่ของพอลิเมอร์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sarkar และคณะ[23]



ภาพที่ 4-11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดของการทดสอบแรงดึง



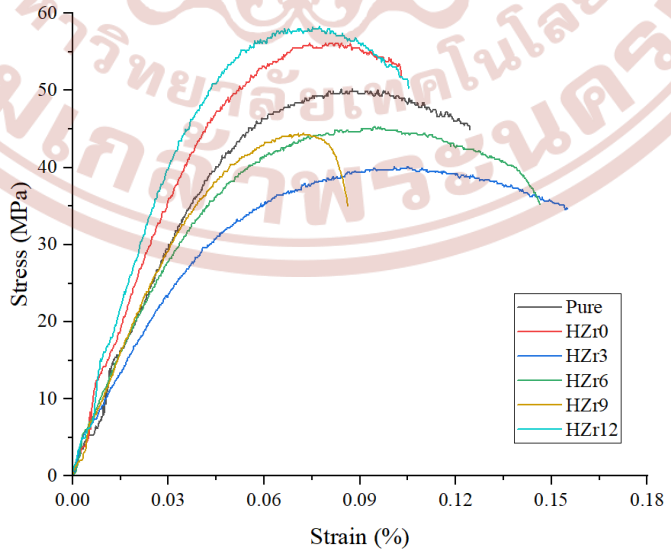
ภาพที่ 4-12 กราฟแสดงผล Tensile modulus

4.2.2 การทดสอบแรงดัดงอ (Flexural testing)

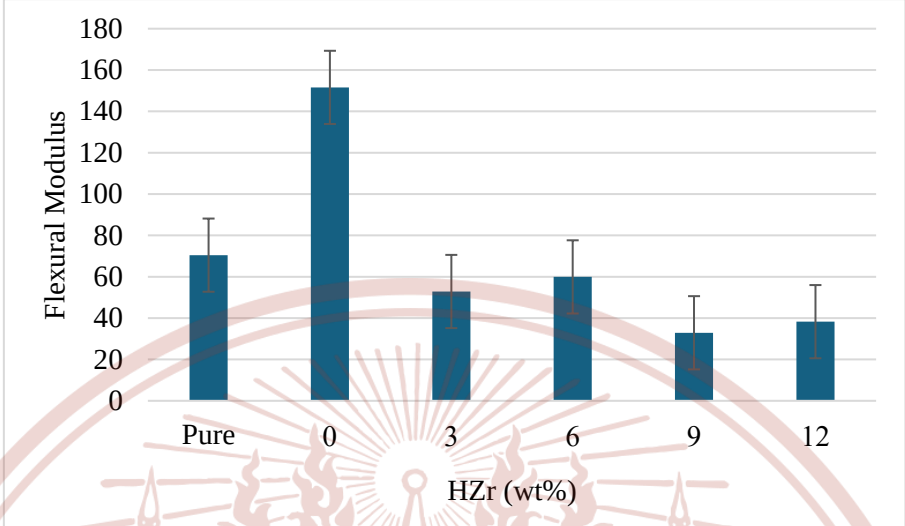
กราฟนี้แสดงพฤติกรรมของวัสดุภายใต้แรงดัดงอซึ่งคล้ายกับกราฟ Tensile Stress-Strain แต่มีข้อแตกต่างที่สำคัญในเรื่องของความเค้นและจุดแตกหัก โดยกราฟ Flexural เมื่อเติมเซอร์โคเนียมลงไปจะพบว่า ความแข็งแรงต่อแรงดัด (Flexural Strength) แสดงดังภาพที่ 4-13 เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน โดยจะเห็นว่ากราฟ HZr0, HZr3, HZr6, HZr9 และ HZr12 มีค่าความเค้นสูงสุด

ที่สูงกว่า Pure อย่างเห็นได้ชัด ซึ่งกราฟ HZr6 มีค่าความเค้นสูงสุดในกลุ่ม HZr และความเหนียวภายใต้แรงดัด (Flexural Ductility) ลดลง แม้ว่าความแข็งแรงจะเพิ่มขึ้น แต่กราฟของ HZr ทุกตัวมักจะแตกหักหรือแสดงพฤติกรรมเปราะ นั่นคือความเค้นลดลงอย่างรวดเร็วหลังจุดสูงสุดที่ค่าความเครียดที่ต่ำกว่า Pure โดยเฉพาะ HZr12 ที่แสดงพฤติกรรมที่ค่อนข้างเปราะที่สุด (ขาดที่ความเครียดประมาณ 0.08) เมื่อเติมเซอร์โคเนียมลงไปซึ่งเป็นอนุภาคขนาดเล็กที่กระจายตัวอยู่ในเนื้อวัสดุ อนุภาคเหล่านี้จะทำหน้าที่ขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน ทำให้ความต้านทานต่อการเสียรูปภายใต้แรงดัดเพิ่มขึ้นอย่างมากส่งผลให้ใช้แรงดัดมากขึ้นในการทำให้วัสดุเสียรูป แต่เนื่องจากเซอร์โคเนียมเป็นวัสดุประเภทเซรามิกจึงทำให้ความเหนียวโดยรวมของวัสดุเชิงประกอบลดลง

Flexural Modulus เมื่อถูกดัดงอแสดงดังภาพที่ 4-14 การเปลี่ยนแปลงของ Flexural Modulus เมื่อเติมเซอร์โคเนียม คือ Pure มีค่าประมาณ 70 MPa และ HZr0 มีค่าสูงกว่าเล็กน้อยที่ 76.115 MPa ซึ่งแสดงว่าการเติมเซอร์โคเนียมในปริมาณน้อยมากอาจส่งผลให้วัสดุมีความแข็งเกร็งขึ้นเล็กน้อย เมื่อปริมาณเซอร์โคเนียมเพิ่มขึ้นจาก HZr3 ไปยัง HZr12 ค่า Flexural Modulus มีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจน โดย HZr9 และ HZr12 มีค่า Modulus ค่อนข้างต่ำแม้ว่าอนุภาคเซรามิกจะเพิ่มความแข็งแรง โดยผลข้อมูลทดสอบแสดงดังตารางที่ 4-5 แต่หากอนุภาคเหล่านี้กระจายตัวไม่สม่ำเสมอ อาจทำให้เกิดการจับตัวที่มากเกินไปภายในช่องว่างและเกิดรอยร้าวในโครงสร้างวัสดุเชิงประกอบ ซึ่งรอยร้าวเหล่านี้จะทำให้วัสดุอ่อนลงเมื่อถูกดัดงอทำให้ Flexural Modulus ลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kumar et al[12], Kan และคณะ[11]



ภาพที่ 4-13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดของการทดสอบแรงดัดงอ



ภาพที่ 4-14 กราฟแสดงผล Flexural modulus

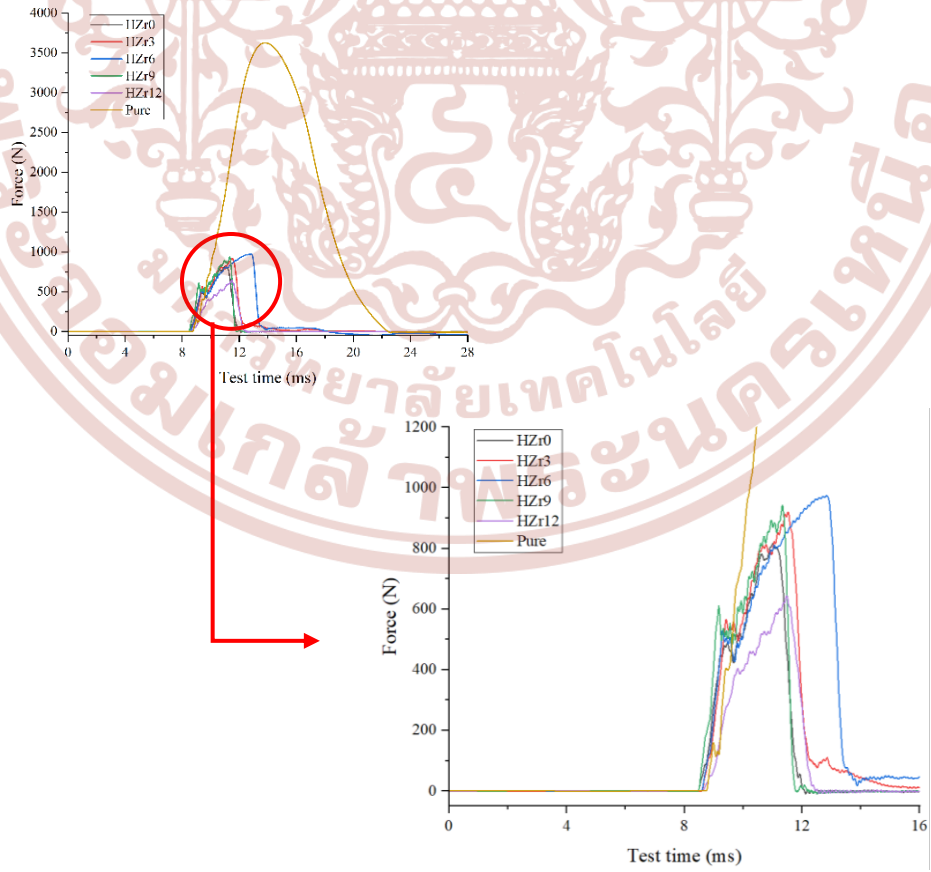
ตารางที่ 4-5 ข้อมูลทดสอบแรงดึงและแรงดัดงอของวัสดุเชิงประกอบที่เติมนาโนเซอร์โคเนียมออกไซด์

HZr (%wt)	Tensile strength (MPa)	Tensile modulus (MPa)	Flexural strength (MPa)	Flexural modulus (GPa)
Pure	36.524	719.444	42.165	70.456
0	38.057	1104.473	56.132	151..610
3	28.409	596.853	53.485	52.874
6	34.250	768.047	44.415	59.940
9	31.703	836.474	45.316	32.910
12	34.634	1026.032	58.301	38.285

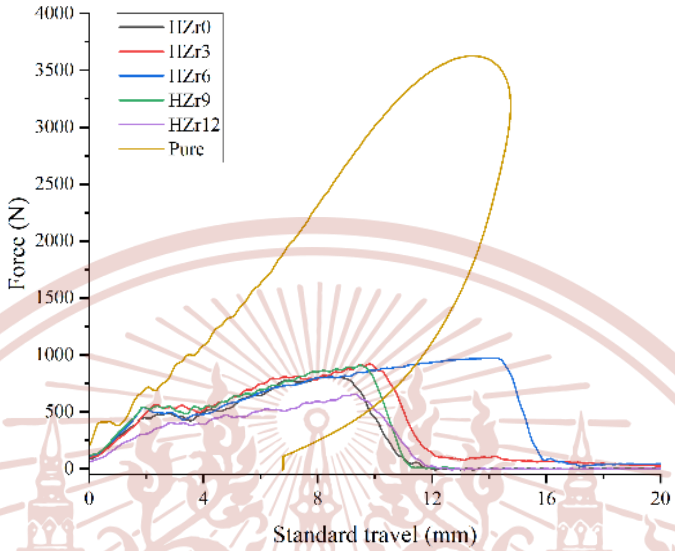
4.2.3 การทดสอบแรงกระแทก (Drop weight test)

การทดสอบ Drop weight test เป็นการวัดความสามารถของวัสดุในการดูดซับพลังงานก่อนการแตกหักเมื่อถูกกระแทกอย่างรวดเร็ว โดยจะมีการปล่อยตุ้มน้ำหนักให้ตกลงมากระทบชิ้นงานและบันทึกข้อมูลต่างๆ แสดงดังรูปที่ 45 (a-f)

กราฟแรงเทียบกับเวลารูปที่ 45(a) และแรงเทียบกับระยะเคลื่อนที่ภาพที่ 4-15(b) พบว่า Pure แสดงค่าแรงสูงสุดที่สูงที่สุด (ประมาณ 3500 N) และมีช่วงเวลาก่อนการแตกหักที่ยาวนานที่สุด กราฟมีลักษณะโค้งมน แสดงถึงการเสียรูปพลาสติก (plastic deformation) ที่สูง ความสามารถในการดูดซับแรงได้สูงที่สุด และมีความสามารถในการเสียรูปได้มากที่สุดก่อนการแตกหัก โดยที่กลุ่ม HZr มีลักษณะคล้ายกันโดยมีค่าแรงสูงสุด (Peak Force) อยู่ในช่วงประมาณ 500-1000 N ซึ่งต่ำกว่า Pure อย่างเห็นได้ชัด และมีช่วงเวลาก่อนและระยะการเคลื่อนที่ก่อนการแตกหักที่สั้นกว่ามาก แสดงถึงความสามารถในการดูดซับพลังงานที่ต่ำกว่า บ่งชี้ว่าวัสดุมีความเปราะมากขึ้นเมื่อเติมนาโนเซอร์โคเนียมออกไซด์

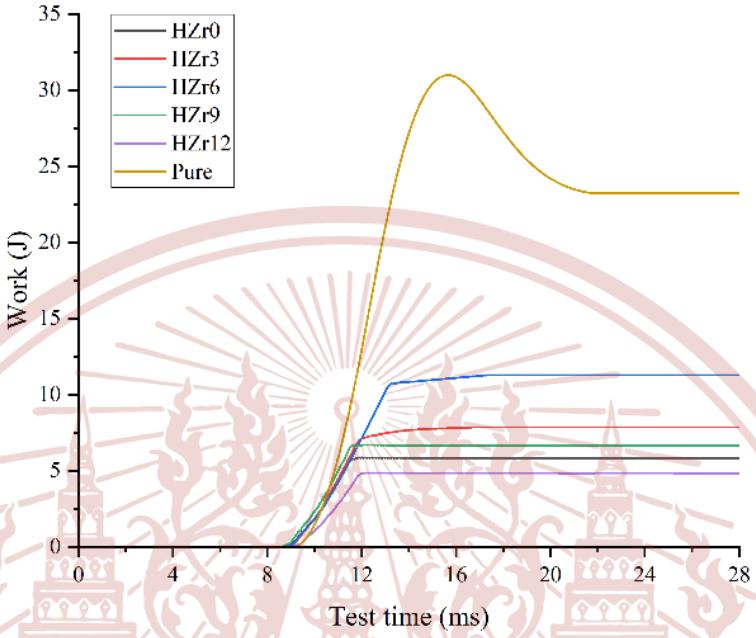


ภาพที่ 4-15 (a) กราฟแรงเทียบกับเวลา

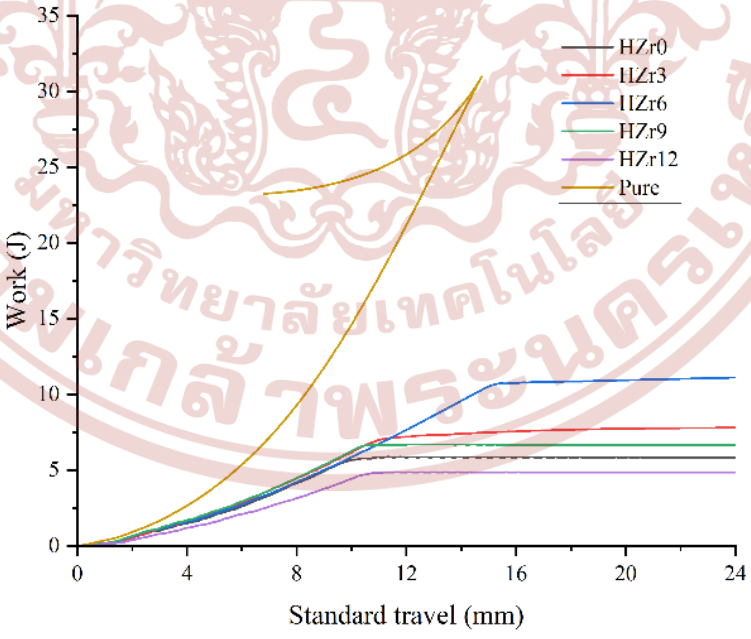


ภาพที่ 4-15 (b) กราฟแรงเทียบกับระยะเคลื่อนที่

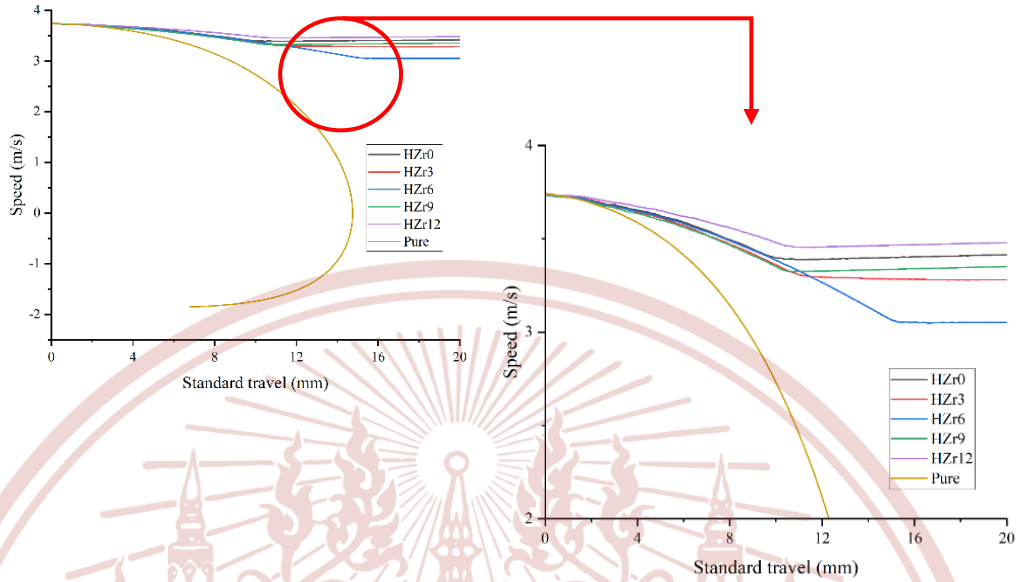
อีกทั้งจากกราฟพลังงานเทียบกับเวลา (Work vs. Test time) และกราฟพลังงานเทียบกับระยะเคลื่อนที่ (Work vs. Standard travel) แสดงดังภาพที่ 4-15(c) และภาพที่ 4-15(d) สามารถเป็นการยืนยันการดูดซับพลังงานของวัสดุ โดยพบว่า Pure มีความสารถในการดูดซับแรงและพลังงานได้ดีที่สุด และวัสดุในกลุ่ม HZr มีความเปราะกว่า Pure แต่เมื่อเทียบวัสดุในกลุ่มของ HZr จะเห็นได้ว่า HZr6 มีความสามารถในการดูดซับพลังงานได้ดีที่สุด และจากกราฟความเร็วเทียบกับระยะเคลื่อนที่ (Speed vs. Standard travel) และ ความเร็วเทียบกับเวลา (Speed vs. Test time) แสดงดังรูปที่ 45(e) และ รูปที่ 45(f) กราฟเหล่านี้แสดงการลดลงของความเร็วของตุ้มน้ำหนักเมื่อชนกับชิ้นงานซึ่งพบว่า Pure ความเร็วลดลงไปจนเกือบถึง 0 m/s และอาจจะติดลบเล็กน้อยก่อนที่จะกระดอนกลับ ซึ่งบ่งชี้ว่าพลังงานจลน์ส่วนใหญ่ของตุ้มน้ำหนักถูกดูดซับโดยชิ้นงานและเกิดการเสียรูปอย่างมาก และกลุ่ม HZr มีความเร็วลดลงอย่างรวดเร็วและกระทันหันเมื่อเทียบกับ Pure แสดงถึงการดูดซับพลังงานที่น้อยลงและการแตกหักที่รวดเร็วของชิ้นงาน



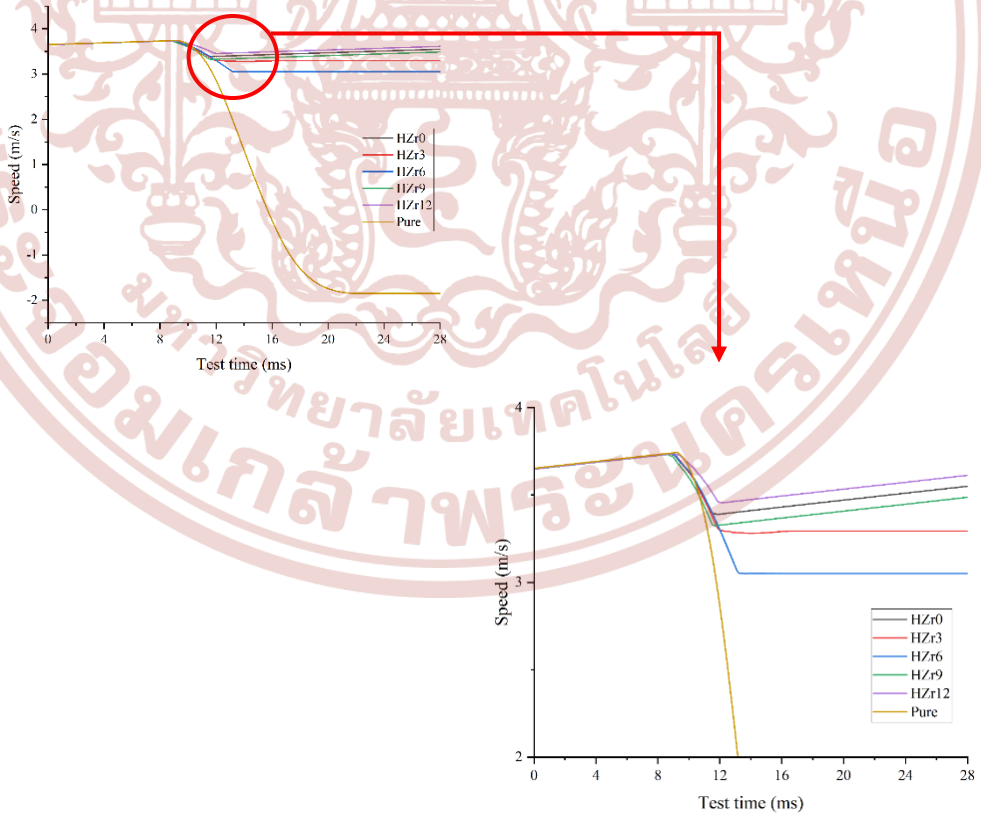
ภาพที่ 4-15 (c) กราฟพลังงานเทียบกับเวลา



ภาพที่ 4-15 (d) กราฟพลังงานเทียบกับระยะเคลื่อนที่



ภาพที่ 4-15 (e) กราฟความเร็วเทียบกับระยะเคลื่อนที่



ภาพที่ 4-15 (f) ความเร็วเทียบกับเวลา

จากการทดสอบแรงกระแทก Pure มีคุณสมบัติการทนทานต่อแรงกระแทกที่ดี และมีการเสียรูปพลาสติกที่ค่อนข้างมากก่อนการแตกหัก บ่งชี้ถึงความเหนียว (Ductility) ที่ดีเยี่ยม เมื่อเติมนาโนเซอร์โคเนียมออกไซด์ ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับพลังงานลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับ Pure แม้ว่าการเติมนาโนเซอร์โคเนียมออกไซด์จะช่วยเพิ่มความแข็งแกร่ง (Tensile Modulus) และมอดูลัสดัดงอ (Flexural Modulus) ในบางปริมาณตามผลการทดสอบก่อนหน้านี้ ทำให้วัสดุมีความเปราะมากขึ้นแต่เพิ่มความสามารถในการดูดซับพลังงานเมื่อถูกกระแทกอย่างรวดเร็ว เนื่องจากอนุภาคที่แทรกตัวเข้าไปช่วยเชื่อมช่องว่างภายในวัสดุทำให้แรงกระแทกถูกถ่ายโอน แรงจะไม่ถ่ายไปเฉพาะบริเวณเดียวแต่ถูกแบ่งกระจายผ่านอนุภาคหลายจุด และ ZrO_2 เป็นอนุภาคแข็งจึงสามารถขวางทางการลามของรอยร้าว (crack propagation) ได้ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Mwaikambo[16]

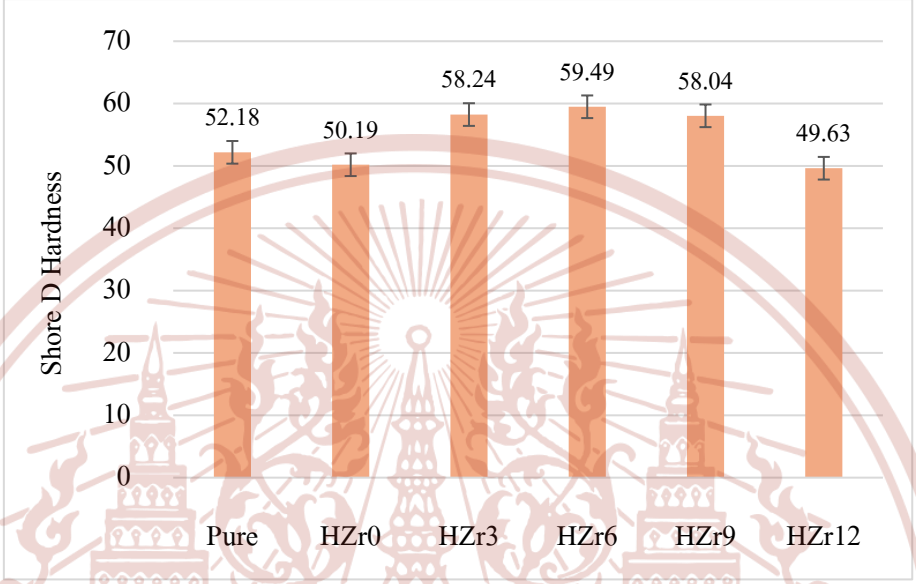
ตารางที่ 4-6 ผลการทดสอบ Drop weight

HZr (wt%)	Drop weight test		
	Force (N)	Energy (J)	Speed (m/s)
Pure	3629.84	30.99	-1.81
0	830.14	5.86	3.34
3	917.89	7.87	3.30
6	971.89	11.29	3.06
9	909.67	6.70	3.33
12	657.64	4.86	3.46

4.2.4 การทดสอบความแข็ง (Hardness)

การวิเคราะห์ผลการทดสอบความแข็ง Shore D ของวัสดุเชิงประกอบพอลิเอไมด์ 12 ที่เสริมด้วยเส้นใยกัญชง และอนุภาคนาโนเซอร์โคเนียมออกไซด์ (ZrO_2) แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มเกี่ยวกับผลกระทบของ ZrO_2 ต่อความแข็งของวัสดุ ซึ่งจะพบว่ากราฟมีความแตกต่างกับการใส่เพียงเส้นใยอย่างเดียว เนื่องจาก ZrO_2 เป็นอนุภาคประเภทเซรามิกซึ่งมีความแข็งมากกว่าเส้นใยธรรมชาติ และเนื่องด้วยเป็นอนุภาคขนาดเล็กระดับนาโนจึงสามารถกระจายตัวแทรกอยู่ในวัสดุได้ ทำให้วัสดุเชิงประกอบมีความแข็งเพิ่มขึ้นจากเดิมอย่างมีนัยยะ จากผลทดสอบพบว่าการใส่ ZrO_2 ที่ 6wt% มีความแข็งของวัสดุที่มากที่สุด แต่เมื่อใส่เพิ่มขึ้นความแข็งของวัสดุจะลดลงเนื่องจากนาโนเซอร์โคเนียม

มีลักษณะเกาะกันเป็นกลุ่ม ดังการทดสอบ SEM ภาพที่ 4-16 เมื่อทำการใส่เพิ่มขึ้นจะทำให้การกระจายตัวของเซอร์โคเนียมลดลง

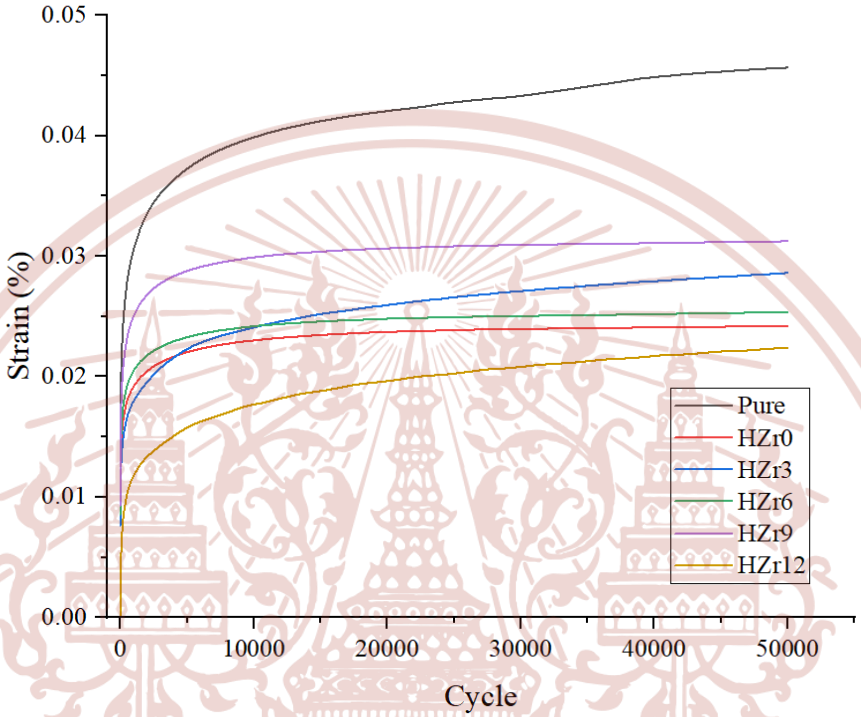


ภาพที่ 4-16 ผลการทดสอบความแข็งเมื่อใส่ ZrO_2

4.2.5 การทดสอบความล้า (Fatigue testing)

จากการวิเคราะห์พฤติกรรมของวัสดุเชิงประกอบนาโนเซอร์โคเนียมภายใต้การทดสอบความล้าโดยเน้นการเปรียบเทียบค่าความเครียดที่เกิดขึ้นจากแรงกระทำซ้ำๆที่ 50000 cycle ผลการทดสอบความล้าแสดงให้เห็นว่าวัสดุ Pure มีค่าความเครียดสะสมเพิ่มขึ้นสูงที่สุดตลอดช่วงการทดสอบ ซึ่งบ่งชี้ถึงการเกิด cyclic creep ภายใต้แรงซ้ำ เมื่อใส่เฉพาะเส้นใยลงไปที่ 10 wt% พบว่าความเครียดลดลงเหลือ 0.023 ในขณะที่วัสดุที่เสริมแรงด้วยเส้นใยกัญชงและนาโนเซอร์โคเนียมออกไซด์มีค่า strain ต่ำกว่าอย่างชัดเจน แสดงถึงความสามารถในการต้านทานการเสียรูปสะสมที่ดีขึ้น โดยสูตร HZr3 ถึง HZr12 แสดงค่าความเครียดที่ลดลงอย่างชัดเจน โดยผลการทดสอบมีค่า 0.026, 0.025, 0.031 และ 0.019 ตามลำดับ โดย HZr12 ให้ค่า strain ต่ำที่สุด สะท้อนถึงผลของการเติมเส้นใยกัญชงและนาโนฟิลเลอร์ช่วยเพิ่มความแข็ง (stiffness) และลดการเสียรูปสะสมภายใต้แรงซ้ำ อนุภาคนาโนที่ช่วยเพิ่มความแข็งและจำกัดการเคลื่อนที่ของโซ่พอลิเมอร์ ส่งผลให้วัสดุมีความทนทานต่อความล้าเพิ่มขึ้นช่วยจำกัดการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์ ส่งผลให้ strain สะสมลดลง ซึ่งหากเทียบกับ HZr6 ที่มีความเครียดลดลงมาเพียงเล็กน้อยแต่ช่วยเพิ่มการกระจายตัวของอนุภาคในวัสดุได้ดีกว่า ผลการทดลองนี้สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการออกแบบวัสดุสำหรับงานที่ต้องเผชิญกับ

แรงกระทำซ้ำๆ เช่น อุปกรณ์ทางการแพทย์ ชิ้นส่วนเครื่องจักร หรือโครงสร้างที่ต้องการความมั่นคงในระยะยาวซึ่งสอดคล้องกับเอกสารอ้างอิงของ Pickering และคณะ[20]

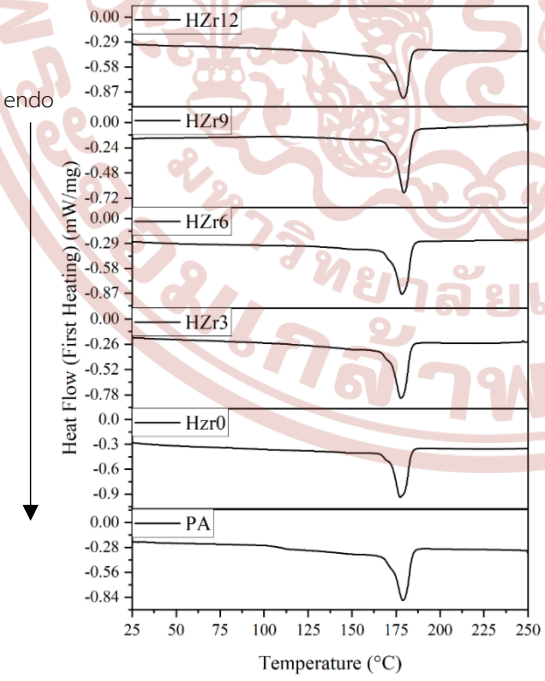


ภาพที่ 4-17 กราฟการทดสอบความล้าของวัสดุเชิงประกอบนาโนเซอร์โคเนียม

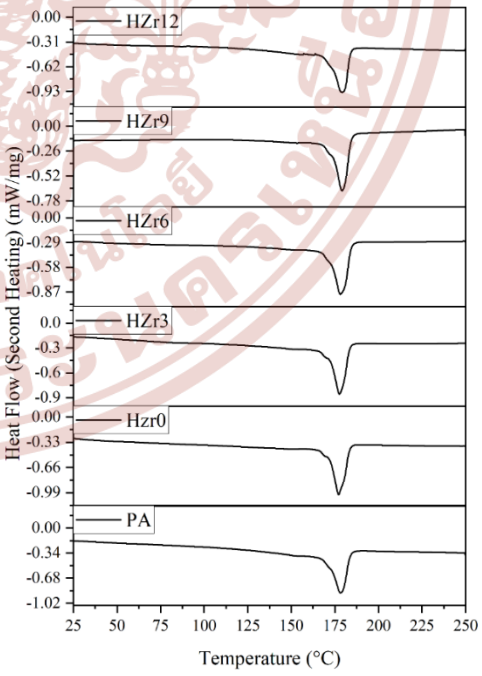
4.2.6 การวิเคราะห์ความร้อน (Differential Scanning Calorimetry : DSC)

ผลการทดสอบการวิเคราะห์ทางความร้อนเมื่อเติมนาโนเซอร์โคเนียมออกไซด์ ซึ่งการให้ความร้อนครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 จะค่อยๆเพิ่มอุณหภูมิขึ้น 10°C/นาที และการให้ความเย็นครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 จะค่อยๆลดอุณหภูมิลง 10°C/นาที จากรูปที่ 48(a) พบว่าเมื่อให้ความร้อนครั้งแรกวัสดุเชิงประกอบมีค่าอุณหภูมิหลอมเหลวอยู่ระหว่าง 175-180 °C ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกัน เมื่อมีการเติมนาโนเซอร์โคเนียมออกไซด์กราฟอุณหภูมิหลอมเหลวจะกว้างขึ้นและมีรูปร่างที่แตกต่างกันเล็กน้อย แสดงว่าโครงสร้างผลึกของพอลิเมอร์มีการเปลี่ยนแปลงจากเดิมแต่การเติมนาโนเซอร์โคเนียมนั้นไม่ได้ส่งผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อจุดหลอมเหลว จากพื้นที่ใต้กราฟพบว่าปริมาณความร้อนในการหลอมเหลวของตัวอย่างที่มีการเติมนาโนเซอร์โคเนียมออกไซด์มีพื้นที่กว่างขึ้น อาจหมายถึงความเป็นผลึกของพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณเซอร์โคเนียมออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งบ่งชี้ว่าการเติมเซอร์โคเนียมในปริมาณที่เหมาะสมอาจช่วยเพิ่มความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ได้ จากรูปที่ 48(b) การหลอมเหลวครั้งที่ 2 มีลักษณะกราฟและอุณหภูมิหลอมเหลวใกล้เคียงกับครั้งแรก

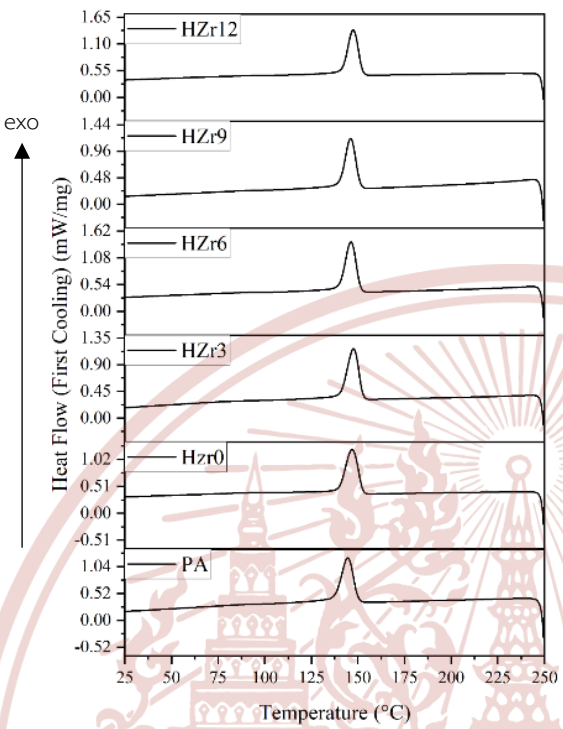
แสดงให้เห็นว่าอนุภาคนาโนเซอร์โคเนียมออกไซด์ยังคงทำหน้าที่เป็นสารเร่งการตกผลึกได้อย่างมีประสิทธิภาพแม้หลังจากผ่านกระบวนการความร้อนมาแล้ว และจากการให้ความเย็นครั้งที่ 1 ดังภาพที่ 4-18(c) พบว่าอุณหภูมิการตกผลึกเกิดที่อุณหภูมิสูงขึ้นจากเดิม แสดงให้เห็นว่าอนุภาคนาโนเซอร์โคเนียมออกไซด์ทำหน้าที่เป็น สารเร่งการตกผลึก (Nucleating Agent) ช่วยให้พอลิเมอร์สามารถเกิดการตกผลึกได้ง่ายขึ้นและรวดเร็วขึ้นในอุณหภูมิที่สูงกว่าเดิม การที่ความร้อนในการตกผลึกมีค่าเพิ่มขึ้นสอดคล้องกับผลที่พบในกราฟการหลอมเหลว ซึ่งยืนยันว่าการเติมนาโนเซอร์โคเนียมออกไซด์ช่วยเพิ่มความเป็นผลึกของวัสดุเชิงประกอบ จากภาพที่ 4-18(d) การให้ความเย็นครั้งที่ 2 มีลักษณะกราฟและอุณหภูมิใกล้เคียงกับครั้งแรกซึ่งหมายถึงความสม่ำเสมอในการเป็นผลึกของพอลิเมอร์ การเติมนาโนเซอร์โคเนียมออกไซด์ลงในพอลิเมอร์ PA12/เส้นใยกัญชงไม่ส่งผลกระทบต่ออุณหภูมิหลอมเหลวอย่างมีนัยสำคัญ แต่สามารถทำหน้าที่เร่งการตกผลึกได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งส่งผลให้จุดตกผลึก (Tc) สูงขึ้นและอุณหภูมิในการการตกผลึกสูงขึ้น การเพิ่มขึ้นของความเป็นผลึกนี้เป็นสิ่งสำคัญเพราะโดยทั่วไปจะช่วยเพิ่มคุณสมบัติทางกลของวัสดุ เช่น ความแข็ง (Hardness) และความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength) ปริมาณนาโนเซอร์โคเนียมที่เหมาะสมที่สุดคือ 6wt% ซึ่งส่งผลให้อุณหภูมิการตกผลึกสูงขึ้นอย่างมีประสิทธิภาพ และการตกผลึกเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและเป็นระเบียบกว่าปริมาณอื่นๆ



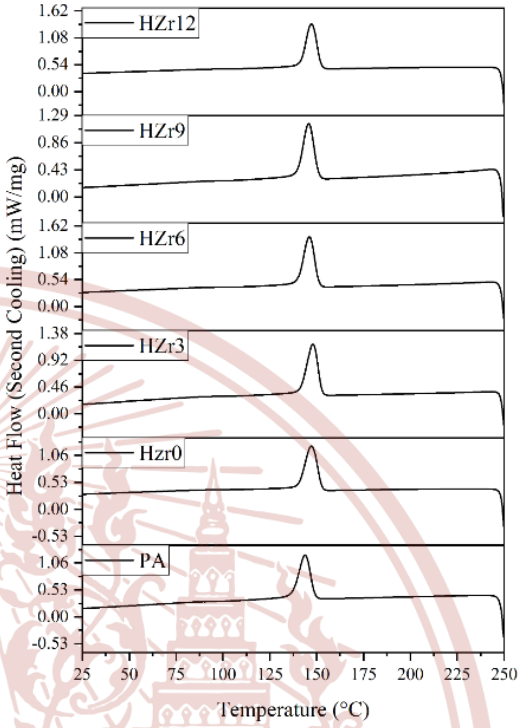
ภาพที่ 4-18 (a) การให้ความร้อนครั้งที่ 1



ภาพที่ 4-18 (b) การให้ความร้อนครั้งที่ 2



ภาพที่ 4-18 (c) การให้ความเย็นครั้งที่ 1

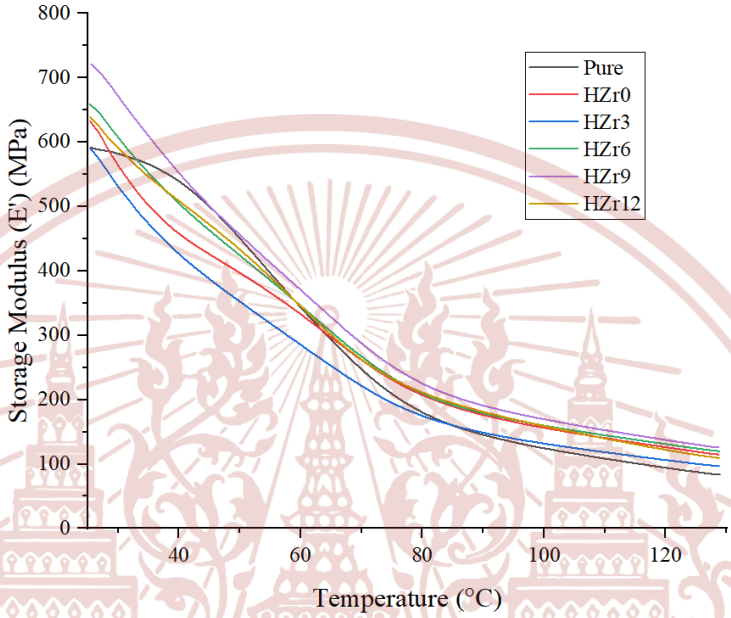


ภาพที่ 4-18 (d) การให้ความเย็นครั้งที่ 2

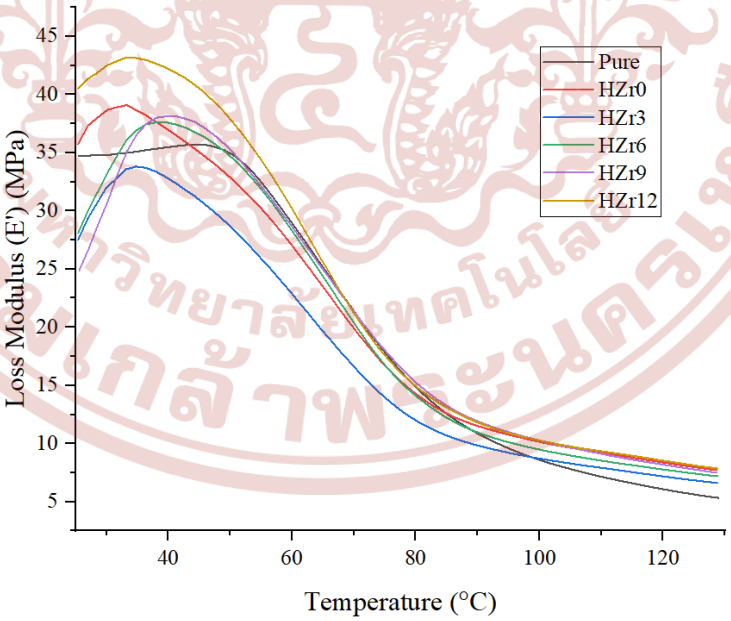
4.3.7 การทดสอบการวิเคราะห์สมบัติเชิงกลแบบไดนามิก (Dynamic Mechanical Analysis)

ผลการทดสอบ Dynamic Mechanical Analysis หรือ DMA เมื่อสังเกตกราฟ Storage Modulus (E') ของวัสดุที่เติมนาโนเซอร์โคเนียมออกไซด์ ภาพที่ 4-19(a) พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ค่า E′ ของวัสดุทุกชนิดมีค่าลดลง บอกถึงความสามารถในการเก็บพลังงานที่ใส่เข้าไปซึ่งค่าที่สูงแสดงถึงความแข็งแกร่ง (stiffer) ของวัสดุ และแสดงให้เห็นถึงการลดลงของความแข็งแรงเชิงกลของวัสดุเมื่อได้รับความร้อน การเติมเซอร์โคเนียมออกไซด์จะเพิ่มค่า E' โดยเฉพาะในช่วงอุณหภูมิต่ำ (ต่ำกว่า 60°C) แต่ผลกระทบจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับกราฟที่แสดงค่า Loss Modulus (E'') ที่เกี่ยวข้องกับพลังงานที่สูญเสียไปในรูปของความร้อนโดยพบว่าตัวอย่างที่เติมเซอร์โคเนียมออกไซด์ จะมีค่า E'' สูงกว่าวัสดุบริสุทธิ์ในช่วงอุณหภูมิหนึ่งบ่งบอกถึงการเพิ่มขึ้นของการดูดซับพลังงาน เมื่อสังเกตกราฟ Damping Factor (tan **δ**) จะพบว่าวัสดุที่เติมเซอร์โคเนียมออกไซด์จะมีค่า tan **δ** สูงขึ้นในช่วงอุณหภูมิหนึ่ง ซึ่งบ่งชี้ถึงการปรับปรุงคุณสมบัติการดูดซับการสั่นสะเทือน โดยค่า tan **δ** จะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ซึ่งบ่งชี้ว่าคุณสมบัติเหล่านี้ไวต่ออุณหภูมิ เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โครงสร้างภายในของวัสดุจะเริ่มอ่อนตัวลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Saba et al.[22] ค่าโมดูลัสสะสมในวัสดุเชิงประกอบที่มีเซอร์โคเนียมออกไซด์ 6wt% มีค่าสูงสุดที่ 658.97 MPa เมื่อเปรียบเทียบกับ Pure โมดูลัสสะสมที่ 6wt% มีค่าสูงกว่า Pure ถึง 12% อีกทั้งยังพบว่าการสูญเสีย

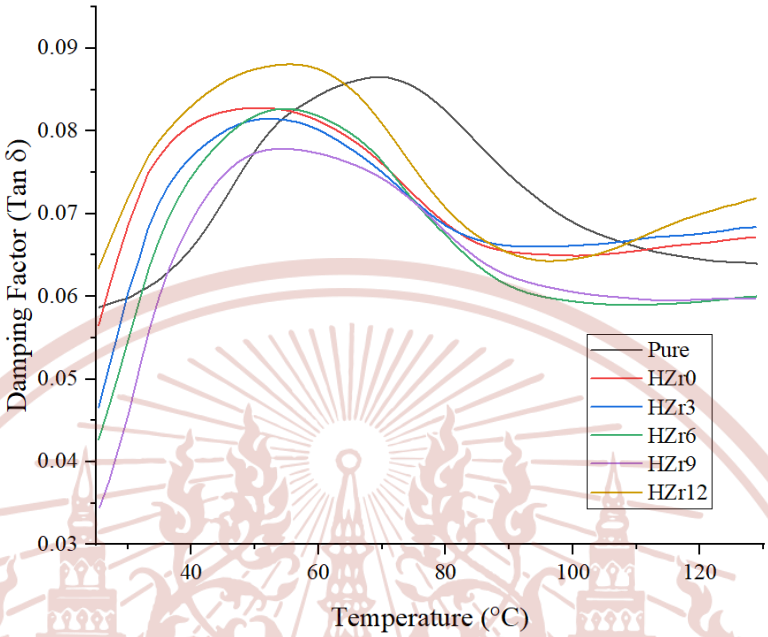
โมดูลัสเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น เมื่อสังเกตจาก Damping Factor จะเห็นว่าการสูญเสียโมดูลัสของวัสดุมีค่าใกล้เคียงกัน กราฟการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4-19(a) – 4-19(c) และผลของอุณหภูมิแสดงไว้ในตารางที่ 4-7



ภาพที่ 4-19(a) Storage Modulus-Temperature



ภาพที่ 4-19(b) Loss Modulus-Temperature



ภาพที่ 4-19(c) Damping factor-Temperature

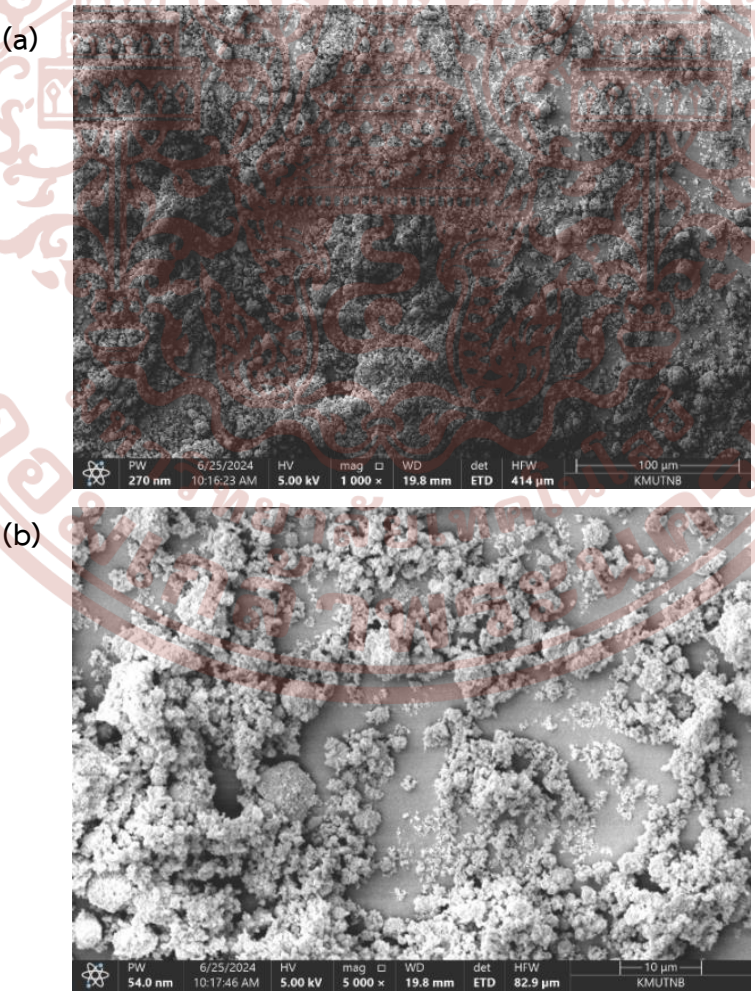
ตารางที่ 4-7 ผลอุณหภูมิการทดสอบ DMA และ DSC จากการศึกษาปริมาณนาโนเซอร์โคเนียมออกไซด์ที่เหมาะสม

ZrO_2 (wt%)	Damping Factor (°C)	Melting point (°C)		Cooling point (°C)	
		First	Second	First	Second
Pure	69.01	178.95	178.26	144.52	143.77
0	48.55	177.32	177.19	146.90	147.22
3	51.74	177.82	177.63	147.65	148.03
6	55.02	178.38	178.13	146.27	146.53
9	53.75	179.45	179.13	146.09	145.77
12	55.62	179.07	179.20	147.47	147.28

4.2.8 การทดสอบ Scanning Electron Microscope (SEM)

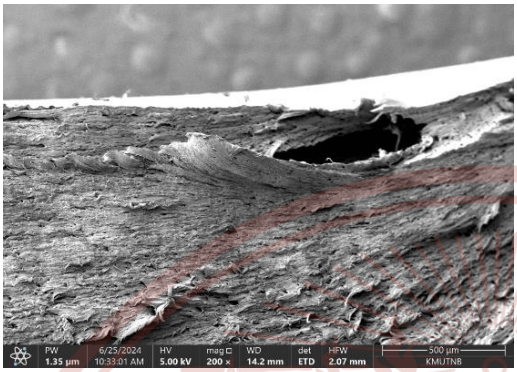
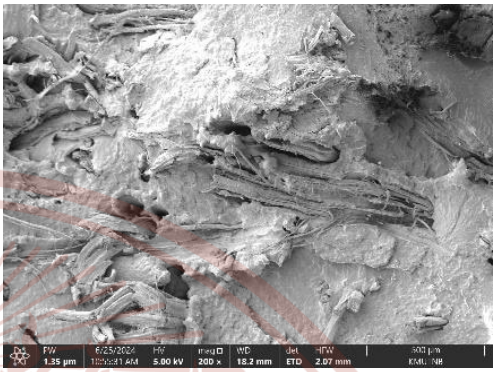
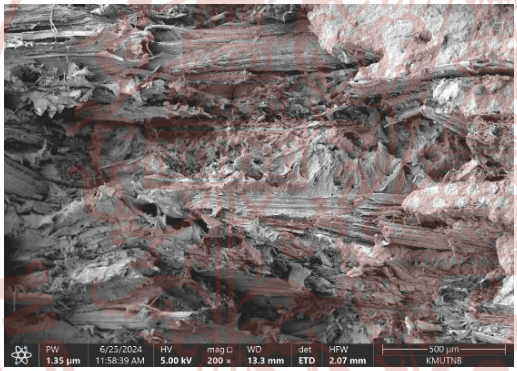
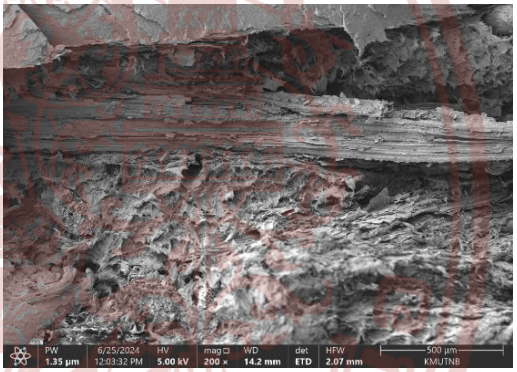
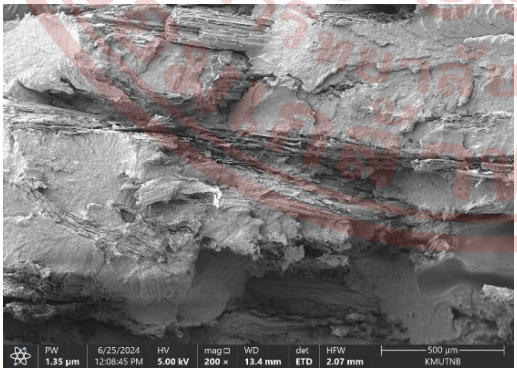
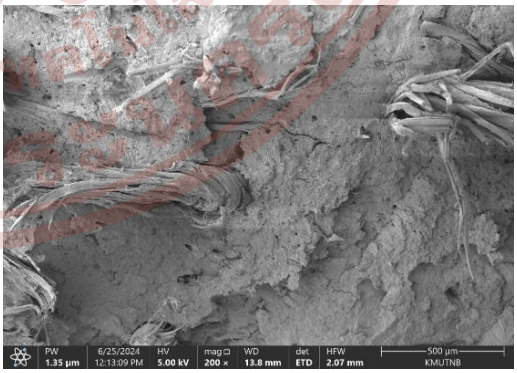
จากผลการทดสอบสัณฐานพบว่าวัสดุเชิงประกอบมีความสามารถในการเข้ากันได้ และจากภาพหน้าตัดชิ้นงานจากการทดสอบแรงดึงพบว่า เกิดการขาดที่เมทริกซ์และเกิดการขาดที่เส้นใยกัญชงซึ่งคล้ายกับตอนที่ยังไม่ได้ใส่นาโนเซอร์โคเนียมออกไซด์ นั่นหมายความว่ายังเกิดการส่งผ่านแรงหรือเกิดการกระจายความเค้นจากเมทริกซ์ไปยังเส้นใย จากการวิเคราะห์ SEM ของพื้นผิวแตกแรงดึง

เผยให้เห็นว่าการมีช่องว่างอากาศภายในชิ้นงานบางชิ้นมีส่วนทำให้เกิดการขาดออกจากกัน จากตารางที่ 4-8 พบว่า HZr3 และ HZr6 มีลักษณะเมทริกซ์คล้าย Pure บ่งบอกถึงวัสดุยังมีสมบัติด้านความยืดหยุ่นก่อนจะขาด ซึ่งแตกต่างจากพื้นผิวของ HZr0, HZr9 และ HZr12 ที่มีความเปราะกว่า เมื่อเปรียบเทียบกราฟจากการทดสอบแรงดึง HZr3 มีความยืดหยุ่นแต่มีความสามารถในการทนแรงดึงได้น้อยที่สุดเมื่อเทียบกับการใส่เซอร์โคเนียมปริมาณอื่นๆ เนื่องจากอนุภาคที่เติมลงในวัสดุมีปริมาณน้อยเมื่อเทียบกับปริมาณ PA 12 กับเส้นใยทำให้อนุภาคกระจายตัวได้ไม่ทั่ววัสดุจึงทำให้วัสดุยังมีความเป็นพลาสติก ซึ่งคล้ายกับ HZr6 ที่มีความยืดหยุ่นแต่สามารถรับแรงดึงได้สูงรองลงมาจาก HZr12 นั่นหมายถึงเซอร์โคเนียมกระจายตัวได้ดีในสูตรนี้ จากสูตร HZr9 ซึ่งมีลักณะผิวเรียบแต่จะมีรูที่เกิดจากการหลุดออกของเส้นใย และ HZr12 พบว่าพื้นผิวของวัสดุเกิดรูพรุนขขนาดเล็กทั่วหน้าตัดชิ้นงาน ซึ่งเกิดจากการใส่เซอร์โคเนียมมากเกินไป ทำให้อนุภาคเกิดการจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อนและทำให้เกิดเป็นจุดบกพร่อง (Defect) ภายในตัวชิ้นงาน



รูปที่ 4-20 ผงนาโนเซอร์โคเนียมออกไซด์ **(a)** ขนาด 1000× **(b)** ขนาด 5000×

ตารางที่ 4-8 ภาพการทดสอบ SEM จากหน้าตัดการทดสอบการดึง (200×)

 Pure	 HZr0
 HZr3	 HZr6
 HZr9	 HZr12

4.2.9 การวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDX) - Mapping analysis

จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDX) พบว่าในตัวอย่าง HZr3 และ HZr6 อนุภาคเซอร์โคเนียมมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งพื้นผิวของวัสดุ โดยไม่พบการรวมตัวเป็นกลุ่มที่ชัดเจน แสดงถึงการกระจายตัวที่มีประสิทธิภาพของอนุภาคนาโนภายในเนื้อพอลิเมอร์ ผลการวิเคราะห์แบบ Mapping ยืนยันว่าธาตุ Zr และ O ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของนาโนเซอร์โคเนียมออกไซด์มีการกระจายตัวอย่างต่อเนื่องทั่วพื้นผิววัสดุ เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างอื่น พบว่าความหนาแน่นของสัญญาณธาตุ Zr ในตัวอย่าง HZr9 และ HZr12 ซึ่งเริ่มแสดงแนวโน้มของการรวมตัวของอนุภาคนาโนในบางบริเวณ การกระจายตัวที่ดีของอนุภาค ZrO_2 ในตัวอย่าง HZr6 ส่งผลให้อนุภาคนาโนสามารถทำหน้าที่เป็นจุดเสริมแรง (reinforcing sites) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยช่วยให้แรงเค้นสามารถถ่ายโอนจากเมทริกซ์ไปยังอนุภาคได้อย่างเหมาะสม ส่งผลให้สมบัติเชิงกลของวัสดุมีแนวโน้มดีขึ้น ในทางกลับกันตัวอย่างที่มีปริมาณนาโนเซอร์โคเนียมสูงกว่า เช่น HZr9 และ HZr12 แม้จะมีสัญญาณของธาตุ Zr มากขึ้น แต่ผลการ Mapping แสดงให้เห็นว่าการกระจายตัวของอนุภาคเริ่มมีการรวมตัวบางส่วน ซึ่งอาจเกิดจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคที่เพิ่มขึ้นเมื่อมีความเข้มข้นสูงเกินไป การรวมตัวดังกล่าวอาจกลายเป็นจุดอ่อนในโครงสร้างวัสดุและส่งผลให้สมบัติเชิงกลลดลงเมื่อเทียบกับตัวอย่างที่มีการกระจายตัวอย่างเหมาะสม จากผลการวิเคราะห์ข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า การเติมนาโนเซอร์โคเนียมในปริมาณที่เหมาะสม เช่นในตัวอย่าง HZr6 เป็นสัดส่วนที่ให้ผลลัพธ์ดีที่สุด ทั้งในด้านความสม่ำเสมอของโครงสร้างและสมบัติเชิงกลของวัสดุ โดยการกระจายตัวที่มีประสิทธิภาพของอนุภาคนาโนไม่เพียงแต่ช่วยเพิ่มความแข็งแรง แต่ยังช่วยปรับปรุงสมบัติทางความร้อนและความเสถียรของวัสดุอีกด้วย

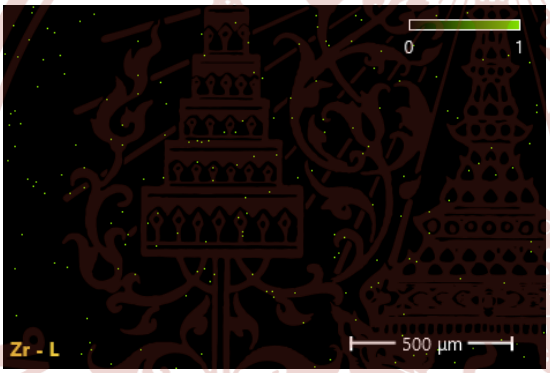
ตารางที่ 4-9 ภาพการทดสอบ EDS ของกระจายตัวของนาโนเซอร์โคเนียม

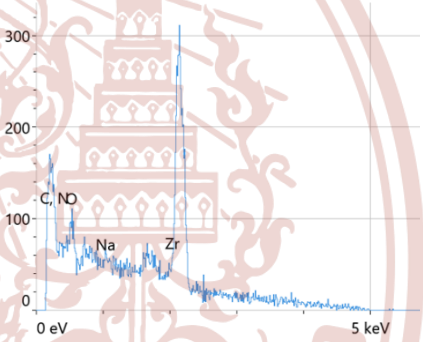


Pure

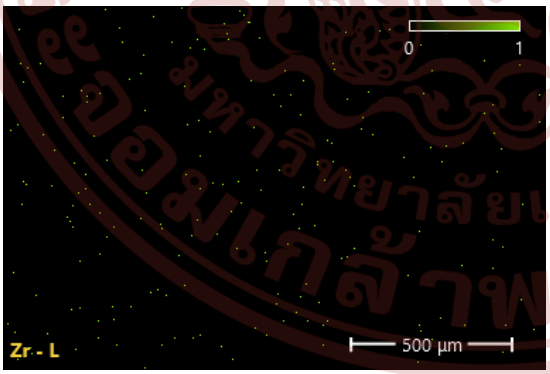


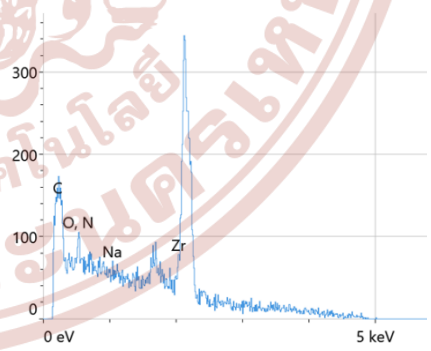
HZr0





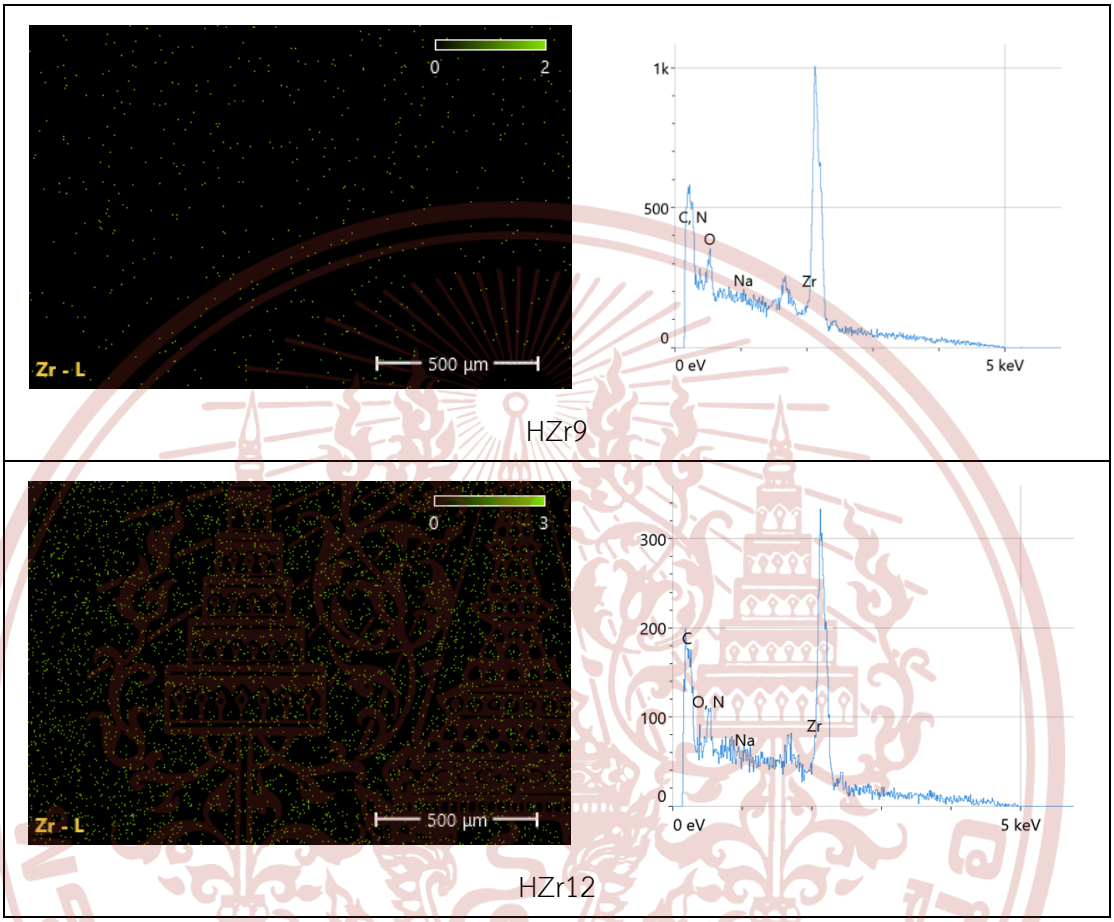
HZr3





HZr6

ตารางที่ 4-9 (ต่อ) ภาพการทดสอบ EDS ของกระจายตัวของนาโนเซอร์โคเนียม



บทที่ 5

สรุป อภิปรายผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

จากการศึกษาปริมาณของเส้นใยกัญชงที่จัดเรียงตัวกันแบบสุ่มมาผสมกับวัสดุเชิงประกอบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเชิงกล จากการทดสอบการรับน้ำหนักของเส้นใยต่างๆ (0%, 4%, 6%, 8%, 10% และ 12% โดยน้ำหนัก) พบว่าวัสดุเชิงประกอบที่มีปริมาณเส้นใย 6wt% มีความสามารถในการรับแรงที่ 39.751 MPa และมีมอดูลัสของสภาพยืดหยุ่นที่ดี แต่เมื่อใส่เส้นใยที่ 10wt% พบว่ามีค่า 38.057 MPa ซึ่งใกล้เคียงกัน อีกทั้งที่ 10wt% ยังให้ความสามารถในการรับแรงดัดและค่ามอดูลัสที่ดีอีกด้วย มีค่าอยู่ที่ 56.132 MPa และ 151.610 GPa นอกจากจะเสริมความแข็งแรงแล้ว ยังช่วยดูดซับแรงและเพิ่มการยืดตัวของวัสดุก่อนที่จะแตกหักได้อีกด้วย โดยวัสดุผสมที่มีเส้นใยกัญชงที่ 10wt% สามารถทนต่อแรงกระแทกได้สูงถึง 63.37 นิวตัน แต่เมื่อทดสอบความแข็งวัสดุพบว่าความแข็งโดยเฉลี่ยจะอยู่ที่ประมาณ 50 ความนุ่มของเส้นใยและเมทริกซ์จะใกล้เคียงกันจึงส่งผลให้มีความแข็งของพื้นผิววัสดุมีความใกล้เคียงกัน และจากการวิเคราะห์ความร้อนพบว่าการเพิ่มเส้นใยส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิการหลอมเหลวของวัสดุผสมอย่างไม่มีนัยสำคัญ แต่มีความแตกต่างกันในการดูดซับพลังงานและการปลดปล่อยพลังงาน จุดสูงสุดของการดูดความร้อนนี้เกี่ยวข้องกับการคลายตัวของโซ่พอลิเมอร์ อีกทั้งจากการทดสอบ DMA พบว่าตัวอย่างที่เติมเส้นใยกัญชงจะมีค่า E'' สูงกว่าวัสดุบริสุทธิ์ในช่วงอุณหภูมิหนึ่ง ซึ่งบ่งบอกถึงการเพิ่มขึ้นของการดูดซับพลังงานที่ดีขึ้น เมื่อทำการทดสอบ SEM เพิ่มเติมพบว่าเมทริกซ์กับเส้นใยความสามารถในการเข้ากันได้และเส้นใยมีลักษณะที่แตกส่วนปลาย นั่นหมายถึงเกิดการส่งผ่านแรงหรือเกิดการกระจายความเค้นจากเมทริกซ์ไปยังเส้นใย โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกการเติมเส้นใยกัญชงที่ 10wt% มาทำงานปรับปรุงสมบัติต่อไป

จากการศึกษาปริมาณของนาโนเซอร์โคเนียมออกไซด์ในพอลิเมอร์พอลิเอไมด์ 12 เหลือใช้กับเส้นใยกัญชง 10wt% เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพเชิงกล จากการทดสอบแรงดึงพบว่าการทนแรงดึงที่ 6wt% และ 12wt% มีค่าใกล้เคียงกัน โดยที่ 6wt% สามารถรับแรงดึงได้ 34.192 MPa และ 12wt% สามารถรับแรงดึงได้ 34.580 MPa แต่จะน้อยกว่าพอลิเมอร์ที่มีแต่เส้นใยเนื่องจากอนุภาคที่ใส่เป็นอนุภาคประเภทเซรามิก และค่ามอดูลัสแรงดึงในกลุ่ม HZr3 - HZr9 มีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับ

เมื่อทดสอบวัสดุภายใต้แรงดัดงอกราฟ HZr12 มีค่าความเค้นสูงสุดในกลุ่ม HZr โดยสามารถรับแรงดัดได้ 58.301 MPa แต่ค่ามอดูลัส HZr6 มีค่ามากที่สุดในกลุ่ม HZr เฉลี่ย 40% ผลการทดสอบพบว่าค่าโมดูลัสและค่าความเค้นสูงสุดไม่ได้เปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเดียวกัน เนื่องจากมอดูลัสขึ้นอยู่กับความแข็งและการยืดเกาะในช่วงยืดน้อย ขณะที่ค่าความเค้นสูงสุดสะท้อนความเหนียวและความสามารถในการถ่ายโอนแรงของวัสดุ จากการทดสอบแรกกระแทกพบว่า HZr6 มีความสามารถในการดูดซับแรงได้ถึง 971.89 นิวตัน ดูดซับพลังงานได้ 11.29 จูล และรับความเร็วได้ 3.06 เมตรต่อวินาที ซึ่งเป็นสูตรที่ดีที่สุดเมื่อเทียบกับกลุ่ม HZr และการวิเคราะห์ความแข็งของวัสดุพบว่าการเติมอนุภาคมีผลต่อความแข็งวัสดุเนื่องจาก ZrO_2 เป็นอนุภาคประเภทเซรามิกซึ่งมีความแข็งมากกว่าเส้นใยธรรมชาติและเนื่องด้วยเป็นอนุภาคขนาดเล็กระดับนาโนจึงสามารถกระจายตัวแทรกอยู่ในวัสดุได้ ทำให้วัสดุเชิงประกอบมีความแข็งเพิ่มขึ้นจากเดิมอย่างมีนัยยะ อีกทั้งเมื่อทดสอบความล้าพบว่าการเติมนาโนเซอร์โคเนียมในระดับ HZr3 ถึง HZr12 แสดงค่าความเครียดที่ลดลงอย่างชัดเจน โดยผลการทดสอบมีค่า 0.026, 0.025, 0.031 และ 0.019 ตามลำดับ และเมื่อทำการวิเคราะห์ความร้อนและการวิเคราะห์สมบัติเชิงกลแบบไดนามิก สังเกตได้ว่าการเติมนาโนเซอร์โคเนียมออกไซด์ลงในพอลิเมอร์ PA12/เส้นใยกัญชง ไม่ส่งผลกระทบต่ออุณหภูมิหลอมเหลวอย่างมีนัยสำคัญ แต่สามารถทำหน้าที่เป็นสารเร่งการตกผลึกที่มีประสิทธิภาพ อีกทั้งยังพบว่ากลุ่ม HZr3 – HZr12 อุณหภูมิคล้ายแก้ว (T_g) มีค่าเพิ่มขึ้นจาก HZr0 จากการทดสอบ SEM ไม่สามารถเห็นเซอร์โคเนียมได้เนื่องจากมีอนุภาคเล็กระดับนาโนแต่เมื่อทดสอบ EDS จะเห็นได้ว่ามีอนุภาคเซอร์โคเนียมการจายอยู่ในเนื้อพอลิเมอร์และที่ HZr6 มีการกระจายตัวที่ดี

5.2 อภิปรายผล

ผลการศึกษาการเสริมแรงของ เส้นใยกัญชงใน PA12 พบว่า ปริมาณเส้นใยที่ 6 wt% ให้ค่าความแข็งแรงแรงดึงสูงสุด ขณะที่ 10 wt% ให้ค่าที่ใกล้เคียงกัน และยังสูงกว่า Pure อย่างชัดเจน แสดงว่าโครงสร้างของวัสดุยังสามารถรองรับปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้นได้ โดยไม่เกิดการกระจุกตัวของเส้นใยในระดับที่ทำให้สมบัติลดลง ส่งผลให้สมรรถนะเชิงกลยังคงเสถียรแม้เพิ่มปริมาณเส้นใย ในด้านแรงดัดงอวัสดุที่มีเส้นใย 10 wt% ให้ผลดีที่สุด โดยความแข็งแรงดัดเพิ่มขึ้นกว่า Pure มาก และโมดูลัสเพิ่มขึ้นอย่างเด่นชัด สะท้อนว่าเส้นใยมีบทบาทสำคัญต่อการเพิ่มความแข็งในการต้านการโก่งตัวซึ่งเหมาะกับการรับโหลดแบบดัดมากกว่าการรับแรงดึง นอกจากนี้ความต้านทานแรงกระแทกยังเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเติมเส้นใย 10 wt% สอดคล้องกับคุณสมบัติความเหนียวของเส้นใย

ธรรมชาติที่ช่วยดูดซับพลังงาน โดยผล SEM สนับสนุนว่าการดูดซับพลังงานเกิดจากกลไก fiber pull-out และแรงเสียดทานภายในซึ่งช่วยเพิ่มความทนทานต่อการกระแทก

สำหรับการเติมนาโนเซอร์โคเนียมออกไซด์ พบว่าวัสดุมีพฤติกรรมแข็งขึ้นและมีลักษณะคล้ายเซรามิกมากขึ้น โดยเฉพาะที่ 6–12 wt% สามารถเพิ่มโมดูลัสได้อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากอนุภาคเซรามิกมีความแข็งสูง อย่างไรก็ตามเมื่อเติมในปริมาณมากเกินไปอาจเกิดการรวมตัวของอนุภาคนาโน ส่งผลให้วัสดุเริ่มเปราะและเกิดจุดอ่อนในโครงสร้าง ผลการทดสอบแรงกระแทกและความแข็งชี้ว่า HZr6 ให้สมดุลดีที่สุด เพราะอนุภาคช่วยถ่ายโอนแรงและลดช่องว่างภายในทำให้วัสดุสามารถดูดซับพลังงานได้ดีขึ้น ขณะที่ปริมาณสูงอย่าง HZr12 แม้ให้ผลดีด้านความล้า แต่ยังไม่โดดเด่นในสมบัติเชิงกลอื่น เนื่องจากปัญหา agglomeration ด้านสมบัติความร้อน การเติมนาโนเซอร์โคเนียมไม่มีผลชัดเจนต่อจุดหลอมเหลว แต่ช่วยเพิ่มความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ซึ่งส่งผลทางอ้อมต่อความแข็งและความต้านทานเชิงกล รวมถึงเพิ่มค่า Tg และการดูดซับพลังงานในช่วงอุณหภูมิหนึ่งจาก DMA โดยสรุป วัสดุผสม PA12/เส้นใยกัญชง/นาโนเซอร์โคเนียมออกไซด์ เป็นวัสดุที่มีสมดุลระหว่างความแข็งแรง น้ำหนักเบา และความยั่งยืน ซึ่งเหมาะต่อการพัฒนาเป็นวัสดุวิศวกรรมสมัยใหม่ และจากผลทั้งหมดสามารถระบุได้ว่าปริมาณนาโนเซอร์โคเนียมที่ 6 wt% เป็นสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการพัฒนาต่อยอด

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 แม้เส้นใยกัญชงจะช่วยเพิ่มสมบัติเชิงกลได้อย่างชัดเจน แต่การยึดเกาะระหว่างเส้นใยธรรมชาติกับพอลิเมอร์ยังเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการถ่ายโอนแรง ดังนั้นควรศึกษาการปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยหรือการใช้สารช่วยยึดเกาะเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของวัสดุให้สูงขึ้น

5.3.2 เพื่อรองรับการใช้งานในอุตสาหกรรมจริง ควรมีการทดสอบเพิ่มเติม เช่น การดูดซึมน้ำ การเสื่อมสภาพจากความชื้นและอุณหภูมิ รวมถึงการทนต่อสภาพแวดล้อม เนื่องจากเส้นใยธรรมชาติอาจไวต่อความชื้นมากกว่าวัสดุสังเคราะห์

บรรณานุกรม

[1] AIMPLAS Plastics Technology Centre. (2022 SEP 13). เข้าถึงได้จาก Types of composite materials: https://www.aimplas.net/blog/types-of-composite-materials/

[2] Alshgari, R. A., Sargunan, K., Kumar, C. S. R., Vinayagam, M. V., Madhusudhanan, J., Sivakumar & Ramasubramanian, G. (2022). Effect of Fiber Mixing and Nanoclay on the Mechanical Properties of Biodegradable Natural Fiber‐Based Nanocomposites. Journal of Nanomaterials, 2022(1), 4994658.

[3] A.Vinod, J. T. (11 November 2021). Jute/Hemp bio-epoxy hybrid bio-composite : Influence of stacking sequence on adhesion of fiber-matrix. ELSEVIER.

[4] Bannunah, A. M. (2023). Biomedical applications of zirconia-based nanomaterials: challenges and future perspectives. Molecules, 28(14), 5428.

[5] Chengsen Plastics Co.,ltd. (2018, April 11). Retrieved from พลาสติกที่มีประสิทธิภาพสูงกำลังมีบทบาทสำคัญในอุตสาหกรรมยานยนต์ในปัจจุบัน: https://th.absextruding.com/info/high-performance-plastics-are-playing-an-impor-25506695.html

[6] Ejaz, M., Azad, M. M., Shah, A. U. R., Afaq, S. K., & Song, J. I. (2022). Synergistic effect of aluminum trihydrate and zirconium hydroxide nanoparticles on mechanical properties, flammability, and thermal degradation of polyester/jute fiber composite. Cellulose, 29(3), 1775-1790.

[7] Inc. Technical Products. (2023). Zirconia (ZrO2) Material Specifications. USA: www.technicalproductsinc.com.

[8] Islam, S., Hasan, M. B., Kodrić, M., Motaleb, K. A., Karim, F. E., & Islam, M. R. (2025). Mechanical properties of hemp fiber‐reinforced thermoset and

thermoplastic polymer composites: A comprehensive review. SPE polymers, 6(1), e10173.

[9] Kan, K., Moritoh, D., Matsumoto, Y., & Hasegawa, M. (2020). Nanoscale effect of zirconia filler surface on mechanical tensile strength of polymer composites. Nanoscale Research Letters, 15, 51.

[10] krungsri. (13 January 2022). เข้าถึงได้จาก แนวโน้มธุรกิจ/อุตสาหกรรม ปี 2564-2566: อุตสาหกรรมพลาสติก: https://www.krungsri.com/th/research/industry/industry-outlook/petrochemicals/plastics/io/io-plastics-21

[11] Kumar, A., Singh, S., & Patel, V. K. (2022). A state-of-the-art review on potential applications of natural fiber-reinforced polymer composite filled with inorganic nanoparticle. Composites Part C: Open Access, 9, 100300.

[12] Kumar, K. R., Pridhar, T., & Balaji, V. S. (2018). Mechanical properties and characterization of zirconium oxide (ZrO2) and coconut shell ash (CSA) reinforced aluminium (Al 6082) matrix hybrid composite. Journal of Alloys and Compounds, 765, 171-179.

[13] LTD. Xiamen Gorgeous New Materials Co. (5 January 2025). Everything You Could Ever Want to Know About Zirconium Oxide. เข้าถึงได้จาก GORGEOUS : https://ggsceramic.com/news-item/the-ultimate-guide-to-zirconia

[14] Malkapuram, R. V. (2009). Recent development in natural fiber reinforced polypropylene composites. pp. 1169-1189.

[15] Medthai. (20 June 2020). เมดไทย Medthai. เข้าถึงได้จาก กัญชง สรรพคุณและประโยชน์ของต้นกัญชง 14 ข้อ: https://medthai.com/%e0%b8%81%e0%b8%b1%e0%b8%8d%e0%b8%8a%e0%b8%87/

[16] Mwaikambo, L. Y., & Ansell, M. P. (2006). The impact behaviour of hemp fibre reinforced polypropylene composites. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 37(3), 462–470.

[17] Oliver-Ortega, H., Méndez, J. A., Mutjé, P., Tarrés, Q., Espinach, F. X., & Ardanuy, M. (2017). Evaluation of thermal and thermomechanical behaviour of bio-based polyamide 11 based composites reinforced with lignocellulosic fibres. Polymers, 9(10), 522.

[18] Omnexus, The materail selection platform. (2024, April 11). Plastics & Elastomers. Retrieved from Polyamide (Nylon): How to Select the Right Grade?: https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/polyamide-pa-nylon

[19] Pingulkar, H., Mache, A., Munde, Y., & Siva, I. (2021). A comprehensive review on drop weight impact characteristics of bast natural fiber reinforced polymer composites. Materials Today: Proceedings, 44, 3872-3880.

[20] Pickering, K. L., Efendy, M. G. A., & Le, T. M. (2016).

A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance. Composites Part A, 83, 98–112.

[21] Pullawan, T. (2022, Augest 10). : Development of bio-filament using hemp fiber for 3D-printer. pp. 71-79.

[22] Saba, N., Jawaid, M., Alothman, O. Y., & Paridah, M. T. (2016).

A review on dynamic mechanical properties of natural fibre reinforced polymer composites. Construction and Building Materials, 106, 149–159.

[23] Sarkar, A., Saha, P., & Roy, S. (2025). Experimental investigation and optimization of epoxy composites reinforced with jute fiber and alumina. Scientific Reports, 15, 16587.

[24] Sawpan, M. A., Pickering, K. L., & Fernyhough, A. (2012). Flexural properties of hemp fibre reinforced polylactide and unsaturated polyester composites. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 43(3), 519-526.

[25] SpecialChem. (7 July 2025). เข้าถึงได้จาก Polyamide (Nylon): How to select the right grade?: https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/polyamide-pa-nylon

[26] Systems, E. G.-E. (2008). Retrieved from www.eos.info

[27] Talcott, S., Uptmor, B., & McDonald, A. G. (2023). Evaluation of the mechanical, thermal and rheological properties of hop, hemp and wood fiber plastic composites. Materials, 16(11), 4187.

[28] Teepprakasit, K. (2023, June 6). TOOLMAKER. Retrieved from กว่าจะมาเป็นพลาสติกที่ใช้ในวิศวกรรมยานยนต์: https://www.toolmakers.co/plastics-automotive-engineering/

[29] TEP Trading and Service Company Limited. (n.d.). Retrieved from Get to know Polyamide (PA) / Nylon (Nylon): https://www.tpe-trading.com/polymide-pa/

[30] The Association of Thai Bleaching Dyeing Printing & Finishing Industries . (25 06 2017). Composite natural fiber material in commercial industrial innovation . เข้าถึงได้จาก https://www.atdp-textiles.org/blog_fiber_composite/

[31] ฐิติวรา เส็งหลวง, กมรินทร์ พรหมรัตร์รักษ์, มาลี ณ นคร, ศรีสม สุวรรณวงศ์, วีระชัย ณ นครและสุรียา ตันติวิวัฒน์ ลิลลี่ กาวีต๊ะ. (ม.ป.ป.). พืชเส้นใย : กัญชง Fiber Crop : hemp (Cannabis sativa L var. sativa). เข้าถึงได้จาก งานวิจัยด้านพืช: https://www3.rdi.ku.ac.th/exhibition/50/plant/43_plant/43_plant.html

[32] ดร.รัตญา ยานะพันธุ์ และน.ส.ฐานิกา สุขผสม. (14 AUG 2025). สถาบันวิจัยและพัฒนาพื้นที่สูง (องค์การมหาชน). เข้าถึงได้จาก เส้นใยกัญชง: จากไร่สู่..สนามกีฬา: https://hkm.hrdi.or.th/Knowledge/detail/742

[33] บริษัท ทีอีพี เทรดดิ้งแอนด์เซอร์วิส จำกัด. (ม.ป.ป.). เข้าถึงได้จาก รู้จักกับ Polyamide(PA) /ไนล่อน (Nylon): https://www.tpe-trading.com/polymide-pa/

[34] ฟูฉวน เฉิน. (3 June 2024). โพลีเอไมด์กับไนลอน: ความแตกต่างที่สำคัญ. เข้าถึงได้จาก BOYI TECHNOLOGY: https://th.boyiprototyping.com/materials-guide/polyamide-vs-nylon/

[35] มหาวิทยาลัยแม่โจ้. (20 February 2020). วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์เบื้องต้น. เข้าถึงได้จาก https://chemistry.mju.ac.th/goverment/25610518095245_chemistry/Doc_25630220153619_414721.pdf

[36] สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน). (19 September 2023). สวก. ARDA. เข้าถึงได้จาก เส้นใยกัญชง...กับคุณสมบัติพิเศษ: https://cads.arda.or.th/th/documents/sharing/c1912088-07c9-4332-b258-3a59ca1afceb_th-TH

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ นางสาว ศิรินทิพย์ สมศรี

ชื่อวิทยานิพนธ์ การศึกษาสมบัติวัสดุเชิงประกอบจากพอลิเอไมด์12 เหลือใช้/เส้นใยกัญชง/นาโนเซอร์โคเนียมออกไซด์

สาขาวิชา เทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล

ประวัติ วัน/เดือน/ปี เกิด : 29 สิงหาคม พ.ศ.2541

ข้อมูลการติดต่อ

ที่อยู่ : 36/431 ต.คลองสาม อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12120

E-mail : s.sirinthip1998@gmail.com

เบอร์ติดต่อ : 093-7171296

การศึกษา

มัธยมศึกษา : โรงเรียนสวนกุหลาบวิทยาลัย รังสิต

ปริญญาบัณฑิต : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ภาควิชาเครื่องต้นกำลัง สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมซ่อมบำรุงอากาศยาน

มหาบัณฑิต : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล

ประวัติการทำงาน

- สายการบินไทยเวียตเจ็ทแอร์ ตำแหน่ง Technical Data Entry
- สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ ตำแหน่งพนักงานห้องปฏิบัติการสอบเทียบเครื่องมือแพทย์
- พิพิธภัณฑ์วิทยาศาสตร์แห่งชาติ ตำแหน่ง อาสาสมัครในกิจกรรมการแสดงทางวิทยาศาสตร์

ผลงานงานวิจัยที่เคยนำเสนอ

- Development and Mechanical Characterization of PA-12/Hemp Fiber Composites Derived from Waste PA-12 3D Printing Powder ในงาน 2nd International Conference on SUSTAINABLE TECHNOLOGIES, ENERGIES and MATERIALS
- Mechanical Properties of Recycled PA12/Hemp Fiber Composite ในงาน 2024 International Conference on Materials and Energy (ICOME 2024)