



รายงานผลการวิจัย

เรื่อง

วัสดุคอมโพสิตด้วยเส้นใยธรรมชาติสำหรับการใช้งานด้านบรรจุภัณฑ์

Natural fiber composite for packaging applications

โดย

ชวิษฐ์ สร้อยทอง

มหาวิทยาลัยแม่โจ้

2557

มจ. 1-56-040



รายงานผลการวิจัย

เรื่อง วัสดุคอมโพสิตด้วยเส้นใยธรรมชาติสำหรับการใช้งานด้านบรรจุภัณฑ์
Natural Fiber Composite for Packaging Applications

ได้รับการจัดสรรงบประมาณวิจัย ประจำปี 2556
จำนวน 150,000 บาท

หัวหน้าโครงการ นายวัฒน์ สร้อยทอง

งานวิจัยเสร็จสมบูรณ์

11 มีนาคม 2557

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยเรื่อง วัสดุคอมโพสิตด้วยเส้นใยธรรมชาติสำหรับการใช้งานด้านบรรจุภัณฑ์ (Natural fiber composite for packaging applications) ได้สำเร็จลุล่วง โดยได้รับทุนอุดหนุนการทำวิจัยจากสำนักวิจัยและส่งเสริมวิชาการการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ประจำปีงบประมาณ 2556 ผู้วิจัยขอขอบคุณ สาขาวิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่อนุเคราะห์เรื่องสถานที่และอุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินการวิจัยให้เสร็จสมบูรณ์

ผู้วิจัย



สารบัญ

	หน้า
สารบัญตาราง	ข
สารบัญภาพ	ค
บทคัดย่อ	1
Abstract	2
คำนำ	2
วัตถุประสงค์ของการวิจัย	4
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการวิจัย	28
ผลการวิจัยและวิจารณ์ผลการวิจัย	42
สรุปผลการวิจัย	53
เอกสารอ้างอิง	54

สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 1	พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงชนิดต่างๆ	5
ตารางที่ 2	อัตราส่วนของวัสดุผสมที่ไม่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว (น้ำหนักรวม 100 กรัม)	30
ตารางที่ 3	แสดงดัชนีความเป็นผลึกของเส้นใยกัญชง	41
ตารางที่ 4	พฤติกรรมทางความร้อนของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง และวัสดุผสมพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงเสริมแรงด้วยเส้นใยกัญชงที่ปริมาณ 40 wt%	43
ตารางที่ 5	สมบัติความทนแรงดึงของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง และวัสดุผสมพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงเสริมแรงด้วยเส้นใยกัญชงที่ปริมาณ 5-50 wt%	44
ตารางที่ 6	สมบัติความทนแรงดึงของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง และวัสดุผสมพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงเสริมแรงด้วยเส้นใยกัญชงที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ในปริมาณต่างๆ	45
ตารางที่ 7	สมบัติความทนแรงดึงของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง และวัสดุผสมพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงเสริมแรงด้วยเส้นใยกัญชงที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารคู่ควบโซลในปริมาณต่างๆ	46
ตารางที่ 8	สมบัติความทนแรงดึงของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง และวัสดุผสมพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงเสริมแรงด้วยเส้นใยกัญชงที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์โดยมีการเติมสารช่วยผสม พอลิเอทิลีนกราฟท์มาเลอิกแอน-ไฮดรอกไซด์	47
ตารางที่ 9	แสดงค่าสมบัติความทนแรงกระแทกของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง และวัสดุผสมพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงเสริมแรงด้วยเส้นใยกัญชงที่ไม่ผ่านการปรับปรุงผิวและผ่านการปรับปรุงพื้นผิว	48

สารบัญรูป

	หน้า	
รูปที่ 1	ภาพแสดงอนุภาคของเฟสที่กระจายในเนื้อวัสดุในรูปทรงและการวางเรียงตัวที่แตกต่างกัน	7
รูปที่ 2	ประเภทของวัสดุผสม	8
รูปที่ 3	ตัวอย่างของวัสดุผสม	10
รูปที่ 4	ประเภทของเส้นใย	10
รูปที่ 5	โครงสร้างของเซลล์โลส	12
รูปที่ 6	พฤติกรรมแรงเค้นความเครียดของพอลิเมอร์	14
รูปที่ 7	การเปลี่ยนแปลงของยูนิตเซลล์เมื่อได้รับแรงกระทำ	14
รูปที่ 8	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของวัสดุ	16
รูปที่ 9	แสดง 0.2% offset yield strength คัดที่ตำแหน่ง strain = 0.002	17
รูปที่ 10	เครื่องมือ pendulum test	18
รูปที่ 11	รูปแบบการวางชิ้นงานสำหรับการทดสอบแรงกระแทกแบบ Izod และ Charpy	19
รูปที่ 12	ผลของรอยบากต่อค่าการทนแรงกระแทก	19
รูปที่ 13	แสดงแผนภาพส่วนประกอบหลักที่สำคัญที่ประกอบขึ้นเป็น ก่อตั้งจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	20
รูปที่ 14	แสดงอันตรกิริยาที่สำคัญที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานที่จะนำมาใช้ในการแปรสัณฐาน ในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	21
รูปที่ 15	เทอร์โมแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย DSC	22
รูปที่ 16	ส่วนประกอบหลักของเครื่อง DSC	24
รูปที่ 17	เส้นใยกัญชง	28
รูปที่ 18	การปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยกัญชงด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์	28
รูปที่ 19	อบเส้นใยกัญชง	28
รูปที่ 20	การปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยกัญชงด้วยสารคู่ควบ	29
รูปที่ 21	การผสมวัสดุผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน	30
รูปที่ 22	เทวัสดุผสมลงในแม่แบบเพื่อเตรียมชิ้นงาน โดยวิธีการกดอัดขึ้นรูป	31

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า	
รูปที่ 23	วัสดุผสมที่ผ่านการอัดขึ้นรูปแล้วกราฟการแจกแจงขนาดอนุภาคของผง	31
รูปที่ 24	ชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นรูปดัมเบล	31
รูปที่ 25	ชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยม	32
รูปที่ 26	แสดงขั้นตอนการเตรียมวัสดุผสม	33
รูปที่ 27	เครื่องเครื่อง Fourier Transform-Infra Red Spectroscopy-Microscope	35
รูปที่ 28	เครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อน	36
รูปที่ 29	เครื่องทดสอบความทนแรงดึง	38
รูปที่ 30	เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทก	38
รูปที่ 31	เครื่องทำรอยบาก	38
รูปที่ 32	เครื่องทดสอบลักษณะพื้นผิวของเส้นใย	40
รูปที่ 33	กราฟแสดง FTIR ของเส้นใยกัญชงที่ไม่ผ่านการปรับปรุงผิวและ ที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วย 5 wt% โซเดียมไฮดรอกไซด์ และ 0.5 wt% สารคู่ควบไซเลน	41
รูปที่ 34	กราฟ XRD แสดงความเป็นผลึกของเส้นใยกัญชงที่ไม่ผ่านการปรับปรุงผิว และผ่านการปรับปรุงผิวด้วย 5 wt% โซเดียมไฮดรอกไซด์	42
รูปที่ 35	กราฟแสดง DSC แสดงอุณหภูมิหลอมเหลวของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง และวัสดุผสมพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงเสริมแรงด้วยเส้นใยกัญชงที่ ปริมาณ 40 wt%	43
รูปที่ 36	แสดงภาพ SEM ลักษณะพื้นผิวของเส้นใยกัญชง (ก) ไม่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว (ข) ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วย 5 wt% NaOH (ค) ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยไซเลน 0.5 wt%	49
รูปที่ 37	แสดงภาพ SEM ของ (ก) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (ข) วัสดุผสมพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงเสริมแรงด้วยเส้นใยกัญชงที่ไม่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วย 5 wt% NaOH (ค) วัสดุผสมพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงเสริมแรงด้วยเส้นใยกัญชงที่ไม่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วย 0.5 wt% Silane และ (ง) วัสดุผสมพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงเสริมแรงด้วยเส้นใยกัญชงที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วย NaOH และมีการเติมสารช่วยผสม 5 wt% PE-g-MA	50

วัสดุคอมโพสิตด้วยเส้นใยธรรมชาติสำหรับการใช้งานด้านบรรจุภัณฑ์

Natural fiber composite for packaging applications

ชวัลณ์ สร้อยทอง

Tawat Soitong

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จ.เชียงใหม่ 50290

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมและศึกษาสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อนของวัสดุผสมพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่เสริมแรงด้วยเส้นใยกล้วย พบว่าค่ามอดุลัสของแข็งของวัสดุจะมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 336 MPa ไปเป็น 518.72 MPa เมื่อปริมาณของเส้นใยเพิ่มขึ้นจาก 0-50 % โดยน้ำหนัก การปรับปรุงผิวของเส้นใยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 5 % โดยน้ำหนักส่งผลให้ค่ามอดุลัสของแข็งของวัสดุผสมเพิ่มขึ้นเป็น 614.94 MPa เนื่องจากการปรับปรุงผิวทำให้ความสามารถในการยึดเกาะกันของเมทริกซ์และตัวเสริมแรงมีมากขึ้น และการนำเส้นใยไปทำการปรับปรุงผิวด้วย โซเลนจะส่งผลให้ค่ามอดุลัสมีค่ามากขึ้นเป็น 661.69 MPa สำหรับการใส่สารช่วยผสม PE-g-MA จะทำให้ค่ามอดุลัสของวัสดุผสมเพิ่มขึ้นเป็น 665.38 MPa ซึ่งพบว่าการปรับปรุงผิว และการใส่สารช่วยผสม ทำให้ความแข็งแรงของวัสดุเพิ่มขึ้น จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนพบว่า การใช้เส้นใยที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยกระบวนการต่างๆ ไม่ทำให้สมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์เสียไป นอกจากนี้ ภาพจากกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราดช่วยยืนยันได้ว่าการยึดเกาะของพอลิเมอร์และเส้นใยกล้วยงเกิดขึ้นได้ดี ส่งผลให้สมบัติเชิงกลเพิ่มขึ้น

คำสำคัญ: วัสดุผสม เส้นใยธรรมชาติ บรรจุภัณฑ์

Abstract

In this study, the thermal and mechanical properties of untreated hemp fibers/high density polyethylene (HDPE) composites were investigated. It was found that Young's Modulus of hemp fiber reinforced HDPE composites increased from 336.61 to 518.72 MPa as the fiber content increased from 0 to 50 wt%. Alkali (NaOH) fiber treatments were found to improve Young's Modulus which appears to be due to good fiber/matrix adhesion. A 5 wt% NaOH treated fiber reinforced HDPE composite with a young's modulus of 614.94 MPa. Fiber/matrix adhesion was assured by the use of Polyethylene-graft-maleic anhydride (PE-g-MA) as a compatibilizer. Young's modulus of composite with PE-g-MA compatibilizer increased to 665.83 MPa. All modified composites improved adhesion of the fiber to the matrix. Scanning electron microscopy (SEM) and Differential scanning calorimetry (DSC) were conducted to investigate the microstructure and thermal properties of the composites.

Key words: Polymer composite, Natural fiber, Packaging

คำนำ

ในปัจจุบันการขนส่งสินค้าให้ถึงมือผู้บริโภคจะเกิดขึ้นอยู่ตลอดเวลา โดยสินค้าจะถูกบรรจุอยู่ในบรรจุภัณฑ์ที่เหมาะสม โดยบรรจุภัณฑ์มีหน้าที่ป้องกันแรงกระทำจากภายนอก ป้องกันสิ่งสกปรกเพิ่มความสะดวกสบายให้ผู้บริโภค ทำให้เป็นที่จดจำสินค้านั้นๆ โดยบรรจุภัณฑ์โดยทั่วไปจะผลิตจาก โลหะ แก้ว ไม้ กระดาษ พลาสติก หรือวัสดุผสมต่างๆ โดยบรรจุภัณฑ์จะทำหน้าที่อยู่ 3 ด้านหลักๆ คือ 1. บรรจุภัณฑ์ปฐมภูมิ (Primary Packaging) เป็นบรรจุภัณฑ์ที่ผู้ซื้อจะได้สัมผัสเวลาที่จะบริโภค 2. บรรจุภัณฑ์ขั้นที่สองหรือทุติยภูมิ (Secondary Packaging) เป็นบรรจุภัณฑ์ที่รวบรวมบรรจุภัณฑ์ชิ้นแรกเข้าด้วยกัน เพื่อเหตุผลในการป้องกันหรือจัดจำหน่ายสินค้าได้มากขึ้น 3. บรรจุภัณฑ์ขั้นที่สามหรือตติยภูมิ (Tertiary Packaging) หน้าที่หลักของบรรจุภัณฑ์นี้คือ การป้องกันสินค้าระหว่างการขนส่ง เช่น พาเลทไม้หรือพลาสติก (Davis and Song, 2006) โดยปกติพลาสติกชนิดต่างๆ สำหรับงานด้านบรรจุภัณฑ์ไม่สามารถใช้พลาสติกบริสุทธิ์ในการผลิตได้ เนื่องจากบรรจุภัณฑ์ขั้นที่สามเป็นบรรจุภัณฑ์ที่ต้องสัมผัสกับสิ่งแวดล้อม และแรงกระทำจากภายนอก ระหว่าง

การขนส่งโดยไม่ทำให้สินค้าภายในเสียหาย จำเป็นต้องมีการเติมสารเสริมแรงต่างๆ เพื่อเพิ่มสมบัติของชิ้นงานให้ได้ตามต้องการ เช่นสารเติมแต่งเพื่อให้ขึ้นรูปได้ง่าย (สารเพิ่มความหล่อลื่น สารเพิ่มความเสถียร และสารป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน) สารเพิ่มความแข็งแรง และค่ามอดุลัส (เส้นใยแก้ว, พงเขม่าดำ และคาร์บอน ฯลฯ) (Sapalidis *et al.*, 2007) โดยพบว่าวัสดุที่นิยมนำมาทำเป็นบรรจุภัณฑ์ประเภทนี้ได้แก่พอลิเอทิลีน และพอลิพروفิเลนที่เสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วโดยจะมีความทนแรงดึงอย่างน้อยและแรงกระแทกอย่างน้อย 50 MPa และ 10 kJ/m²ตามลำดับ (Fu *et al.*, 2000) (Karger *et al.*, 1995)

ปัจจุบันกระแสความตื่นตัวในด้านสิ่งแวดล้อม และมลภาวะของโลก ส่งผลให้มีการกำหนดมาตรการป้องกัน และกฎหมายสิ่งแวดล้อมที่มีความเข้มงวดมากขึ้น ดังนั้นจึงทำให้ประเทศต่างๆเกิดความตื่นตัวในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่มีความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมากขึ้น ทั้งในงานอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมรถยนต์ อุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ โดยได้มีการปรับแนวทางการผลิตให้มีการใช้วัสดุจากธรรมชาติมากขึ้น (Chand and Fahim, 2008)

เส้นใยธรรมชาติเป็นทางเลือกที่สำคัญที่นำมาใช้ในการผลิตวัสดุพอลิเมอร์คอมโพสิต (polymer composite) โดยนำมาใช้เป็นสารเสริมแรงแทนเส้นใยสังเคราะห์ เช่นเส้นใยแก้ว เส้นใยพอลิเมอร์ หรือเส้นใยหินที่มีความเป็นพิษต่อร่างกายมนุษย์ เพื่อเป็นการลดต้นทุนการผลิตเนื่องจากเส้นใยธรรมชาติที่นำมาใช้มีอยู่ทั่วไปในประเทศไทย เพิ่มปริมาณการผลิต และเพิ่มความแข็งแรงแก่ผลิตภัณฑ์ ทำให้วัสดุคอมโพสิตที่ได้มีน้ำหนักเบา นอกจากนี้เส้นใยธรรมชาติยังมีข้อดีอื่นๆ เช่นไม่เป็นพิษ เป็นฉนวนความร้อน และเสียงที่ดี ย่อยสลายได้ สำหรับข้อเสียของเส้นใยธรรมชาติ เช่นคุณภาพไม่คงที่ ไม่ทนความร้อน คุณค่าขึ้น และจำเป็นต้องทำการปรับปรุงผิวเพื่อให้วัสดุคอมโพสิตที่ได้มีความแข็งแรงสูง (Brahmakumar *et al.*, 2005, Pracella *et al.*, 2006)

เส้นใยธรรมชาติในประเทศไทยที่เหมาะสมสำหรับการนำมาใช้ในการขึ้นรูปวัสดุคอมโพสิตมีหลายชนิด ไม่ว่าจะเป็นเส้นใยกล้วย เส้นใยสับปะรด เส้นใยปอ เส้นใยผักตบชวา และอื่นๆ ในที่ที่น่าสนใจในการเตรียมการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้คือ เส้นใยกล้วย และเส้นใยมะพร้าว เนื่องจากเส้นใยทั้งสองชนิดสามารถหาได้ง่าย โดยกล้วยสามารถหาได้ง่ายในบริเวณภาคเหนือของประเทศ และมีความยืดหยุ่นสูง แข็งแรงและทนทานสูง นอกจากนี้เส้นใยยังมีขนาดยาว คือยาว 22-30 ม.ม. นอกจากนี้สำหรับเส้นใยมะพร้าวสามารถพบได้ทั่วไปในประเทศไทย เส้นใยมะพร้าวมีข้อดีคือ เป็นเส้นใยที่เหนียว แข็งแรง ทนทาน มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน ความยาวเส้นใยยาว 2-10 ซม. (ลิลลี่ และคณะ, 2544)

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาความเป็นไปได้ของการนำเส้นใยธรรมชาติ มาเตรียมเป็นวัสดุคอมโพสิตสำหรับทำผลิตภัณฑ์ด้านบรรจุภัณฑ์
2. ศึกษาและปรับปรุงการยึดเกาะของเส้นใยธรรมชาติกับพอลิเมอร์เพื่อให้ได้วัสดุที่มีสมบัติเชิงกลที่เหมาะสมกับการนำไปใช้ประโยชน์
3. ศึกษาสมบัติทางด้านสัณฐานวิทยา และทางารภาพของวัสดุคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใยธรรมชาติ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เป็นองค์ความรู้ในการวิจัยต่อไป จะได้ประโยชน์จากองค์ความรู้ที่ได้จากการทดลอง ซึ่งสามารถสร้างงานวิจัย และพัฒนาบัณฑิต และบุคลากรให้มีความรู้ความสามารถในการวิจัยเกี่ยวกับวัสดุคอมโพสิต นอกจากนี้องค์ความรู้ที่ได้สามารถนำมาพัฒนาผลิตภัณฑ์ในเชิงพาณิชย์ โดยใช้วัสดุและสารตั้งต้นราคาถูกที่มีในประเทศในอุตสาหกรรมพลาสติก และวัสดุจากธรรมชาติ
2. เป็นประโยชน์ต่อประชากรกลุ่มเป้าหมาย ผลงานวิจัยนี้บางส่วนจะถูกนำไป ประยุกต์ใช้เพื่อพัฒนาการเรียนการสอนสำหรับนักศึกษาใน ระดับปริญญาตรี สาขาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ใช้เป็นส่วนประกอบหนึ่งของ การเรียนการสอนใน รายวิชา วศ ๓๒๓ พฤติกรรมการไหล และการแปรรูปพอลิเมอร์
3. บริการความรู้แก่ประชาชน ผลงานวิจัยที่ได้รับจากโครงการวิจัยนี้จะถูกนำมาเผยแพร่ ในรูปแบบการนำเสนอในที่ประชุมวิชาการในระดับชาติหรือนานาชาติ พร้อมนำผลการวิจัยที่ได้ตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับชาติ หรือนานาชาติ

การตรวจเนื้อหา

1. พอลิเอทิลีน

พอลิเอทิลีนเป็นพลาสติกชนิดหนึ่งที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายในประเทศไทย ทั้งชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) และชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ส่งผลให้ปริมาณของขยะพลาสติกชนิดนี้มีมากขึ้นตามไปด้วย (พิชิต, 2542)

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene; HDPE)

PE เป็นเทอร์โมพลาสติกชนิดหนึ่ง ได้จากการสังเคราะห์สารปิโตรเลียม มีการนำไปใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมครัวเรือน อุตสาหกรรมยานยนต์ หรือ อุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ สามารถจำแนกเป็นชนิดต่างๆ ได้แก่ HDPE LDPE LLDPE และ MDPE ซึ่งแต่ละชนิดมีโครงสร้างโมเลกุลและสมบัติทางกายภาพต่างกัน จึงนำไปใช้ประโยชน์แตกต่างกัน สำหรับ HDPE เป็น PE ชนิดหนึ่ง มีลักษณะโครงสร้างเป็นเส้นตรงเกือบตลอด องค์ประกอบส่วนใหญ่เป็น $(CH_2)_n$ และส่วนที่เป็นกิ่งก้านน้อยมาก ผลิตโดยผ่านกระบวนการซีเกอร์ (Ziegler Process) และกระบวนการฟิลลิปส์ (Phillips Process) มีการนำไปใช้งานในปริมาณมาก และหลากหลาย ทั้งในอุตสาหกรรมเกษตร ประมง บรรจุภัณฑ์ ฯลฯ เนื่องจากมีสมบัติเหมาะสม เช่น มีสมบัติเด่นด้านความสามารถในการขึ้นรูปง่าย มีความแข็งแรง มีความคงทนสูง มีความเหนียวและทนทานต่อแรงดึงปานกลาง เหมาะสำหรับงานเป่าฟิล์ม งานเป่าแบบงานท่อ งานฉีดแบบ และงานเส้นใย ทำให้สามารถนำมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์มากมายหลายชนิด แสดงตัวอย่างในตาราง 1 จึงเป็นที่ยอมรับอย่างกว้างขวางทั้งตลาดในประเทศและต่างประเทศ (นิทัศน์, 2540)

ตารางที่ 1 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงชนิดต่างๆ

เกรดของ HDPE	ตัวอย่างผลิตภัณฑ์
1. Injection Molding Grade	ถังแกลอนพลาสติก ถังขยะ ถาดใส่ขนมปัง ถังใส่ขวด ของเล่น และพวกชิ้นงานที่มีโครงสร้างซับซ้อน
2. Blow Molding Grade	ขวดต่างๆ เช่น ขวดนม ขวดน้ำ ขวดแชมพู และแกลอนขนาดเล็ก
3. Film Extrusion Grade	ถุงซีOPPต่างๆ
4. Extrusion Sheet Grade	แห และเชือก
5. Pipe Extrusion Grade	ท่อน้ำ ท่อร้อยสายไฟ และสายเคเบิล

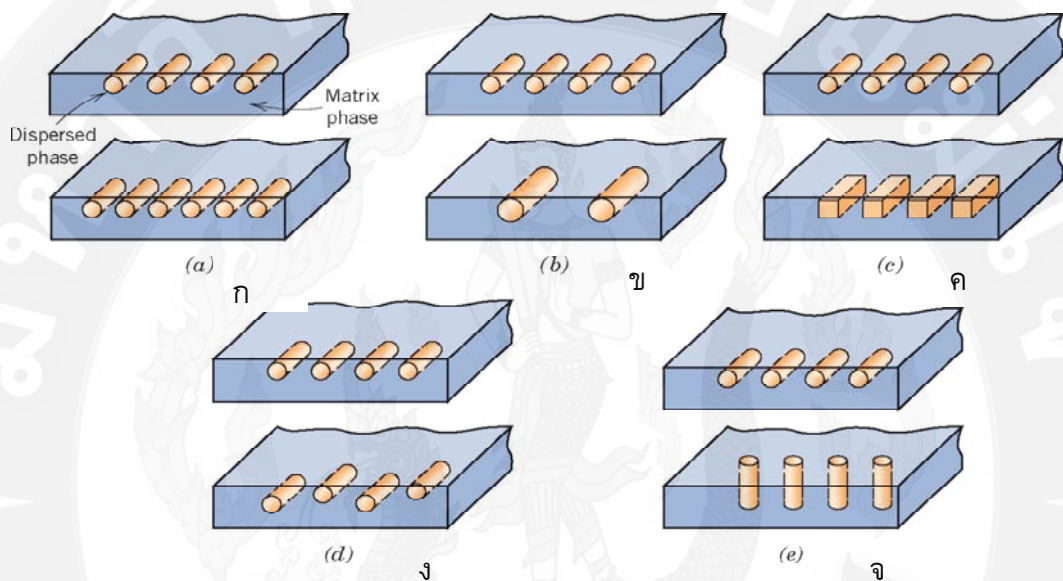
2. วัสดุผสม

เทคโนโลยีสมัยใหม่มากมายที่ต้องการวัสดุที่มีสมบัติหลายอย่างอยู่ร่วมกัน ซึ่งไม่สามารถพบในวัสดุทั่วไปทั้งในโลหะ เซรามิกและพอลิเมอร์ วัสดุดังกล่าวจำเป็นอย่างยิ่งในการใช้งานด้านอากาศยาน ได้ทั้งทะเลมหาสมุทร ใต้น้ำและใช้ในด้านการขนส่ง เช่น วิศวกรรมการบิน ได้เสาะแสวงหาวัสดุสำหรับงาน โครงสร้างที่มีสมบัติด้านความหนาแน่นต่ำ แข็งแรงและแกร่งทนทานต่อการเสียดสีและการกระแทก และต้องไม่ผุกร่อนได้ง่ายนัก ลักษณะทุกอย่างรวมกันเหล่านี้หาพบได้ยากเพราะวัสดุแข็งแรงมักมีความหนาแน่นสูง การเพิ่มความแข็งแรงหรือความแกร่งแบบยืดหยุ่นส่งผลให้ด้านทนต่อการกระแทกลดลง การพัฒนาด้านวัสดุผสมทำให้เกิดความหลากหลายในการรวมสมบัติวัสดุเข้าด้วยกันมากขึ้น อาจอธิบายอย่างง่ายได้ว่า วัสดุผสมเป็นวัสดุที่มีหลายเฟส โดยแต่ละเฟสที่นำมาประกอบจะแสดงสมบัติที่สำคัญของมันเองเพื่อให้ได้สมบัติที่ดีมากกว่าเดิม ดังนั้นจากหลักการผสมเหล่านี้ทำให้สามารถรวมสมบัติต่างๆ ที่ดี เข้าด้วยกัน โดยการนำวัสดุที่แตกต่างกันแตกต่าง 2 ชนิดขึ้นมารวมกันและส่งผลให้วัสดุผสมมีคุณสมบัติหลากหลายมากขึ้น (วิลเลียมส์, 2548)

“วัสดุผสม” อาจกล่าวได้ว่าเป็นวัสดุหลายเฟสที่ประดิษฐ์สร้างขึ้น (Artificially made) ซึ่งต้องไม่ใช่วัสดุที่เกิดขึ้นหรือสร้างขึ้นโดยธรรมชาติ นอกจากนี้ส่วนประกอบของเฟสต้องมีความแตกต่างทางเคมีและแยกออกจากกันอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งจะเห็นรอยต่อระหว่างเฟสขึ้น ดังนั้น โลหะผสมส่วนใหญ่และเซรามิกทั้งหลายจึงไม่ตรงตามนิยามนี้เพราะเฟสต่างๆ ในวัสดุโลหะและเซรามิกถูกสร้างขึ้นจากปรากฏการณ์ทางธรรมชาติ ในการออกแบบวัสดุผสมนักวิทยาศาสตร์และวิศวกรได้ผสมโลหะ เซรามิก และพอลิเมอร์ต่างๆ เพื่อผลิตวัสดุพิเศษใหม่ๆ ออกมา วัสดุผสมส่วนใหญ่ที่ถูกสร้างขึ้นมาก็ปรับปรุงสมบัติและลักษณะทางกลโดยรวม เช่น มอดูลัสความยืดหยุ่น ความแกร่ง ความแข็งแรงหรือความต้านทานการดึงที่อุณหภูมิสูง (วิลเลียมส์, 2548)

วัสดุผสมประกอบขึ้นจากเฟส 2 ชนิด เฟสแรกเรียกว่า เนื้อพื้น (Matrix) ซึ่งอยู่ด้วยกันอย่างต่อเนื่องและล้อมรอบเฟสที่สองไว้วัสดุเนื้อพื้นสามารถเป็น โลหะ เซรามิก หรือพอลิเมอร์ได้ เฟสที่สองจะถูกเรียกว่า เฟสที่กระจาย (Dispersed phase) หรือตัวเสริมแรง (Reinforcement) จะช่วยเสริมหรือเพิ่มสมบัติทางกลของเมทริกซ์ ตัวเสริมแรงจะมีความแข็ง (Harder) แข็งแรง (Stronger) และแข็งตึง (Stiffer) กว่าเมทริกซ์ ตัวเสริมแรงสามารถเป็นได้ทั้งอนุภาคหรือเส้นใย สมบัติของวัสดุผสม

ที่ได้จะเป็นฟังก์ชันหรือขึ้นกับสมบัติของสารตั้งต้น ปริมาณของสารตั้งต้นเหล่านี้และรูปทรงทางเรขาคณิตของเฟสที่กระจายตัว คำว่า “รูปทรงทางเรขาคณิตของเฟสที่กระจายตัว” หมายถึงรูปทรงและขนาดของอนุภาค (Shape and size) การกระจายตัว (Distribution) และการเรียงตัว (Orientation) ลักษณะต่างๆ เหล่านี้ แสดงไว้ในรูปที่ 1 (วิลเลียมส์, 2548)

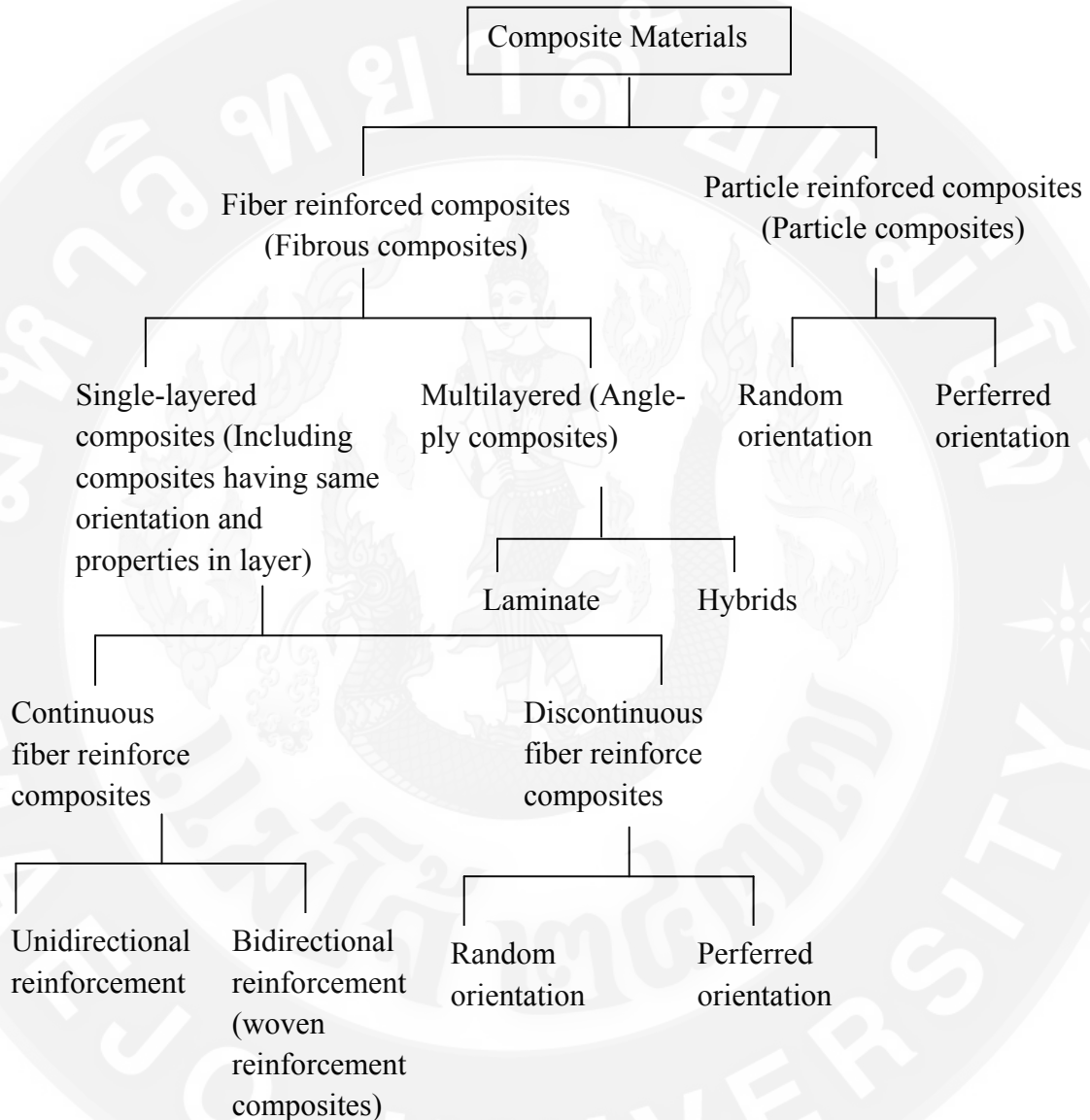


รูปที่ 1 ภาพแสดงอนุภาคของเฟสที่กระจายในเนื้อวัสดุในรูปทรงและการวางเรียงตัวที่แตกต่างกัน (ก) ปริมาณ (ข) ขนาด (ค) รูปร่าง (ง) การกระจายตัว (จ) ทิศทางการวางเรียงตัว ซึ่งส่งผลต่อสมบัติของวัสดุผสม

โดยปกติแล้ว วัสดุเสริมแรงจะแข็งแรงและมีความหนาแน่นต่ำในขณะที่เมทริกซ์มักจะเป็นวัสดุที่อ่อนเหนียว (Ductile) หรือเหนียว (Tough) ถ้าวัสดุผสมได้ถูกออกแบบและทำขึ้นอย่างถูกต้อง มันจะรวมเอาความแข็งแรงของตัวเสริมแรงกับความเหนียวของเมทริกซ์เพื่อให้เกิดการรวมกันของสมบัติที่ไม่มีในวัสดุแบบเดิม วัสดุผสมมีข้อเสียคือมักจะมีราคาแพงกว่าวัสดุแบบเดิมๆ ตัวอย่างการใช้งานบางส่วนของวัสดุผสม เช่น แผ่นยางรถยนต์และอากาศยาน ที่มีส่วนประกอบของวัสดุผสม 100 %

ความแข็งแรงของวัสดุผสมจะขึ้นอยู่กับจำนวน การจัดเรียงตัวและประเภทของตัวเสริมแรง โดยทั่วไป ปริมาณตัวเสริมแรงที่สูงจะทำให้มีความแข็งแรงมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้ วัสดุผสมมักจะเป็นการพัฒนาที่รวมกันของสารเติมแต่ง (Fillers) และสารตัวเติม (Additives) ที่เป็นปัจจัยกำหนด

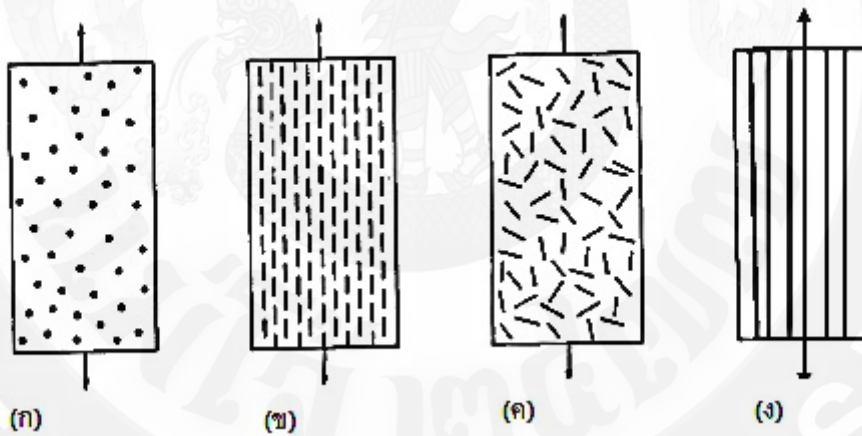
ประสิทธิภาพของวัสดุผสม การจำแนกประเภทของวัสดุผสมจะขึ้นอยู่กับลักษณะและการจัดเรียงตัวของตัวเสริมแรง รูปที่ 2 แสดงแผนผังประเภทของวัสดุผสมที่ใช้กำหนดตัวเสริมแรง (วิลเลียมส์, 2548)



รูปที่ 2 ประเภทของวัสดุผสม

รูปร่างของอนุภาคเสริมแรงอาจจะเป็นทรงกลม ลูกบาศก์ เกล็ดหรือรูปทรงเรขาคณิตที่ปกติตามรูปแบบหรือผิดปกติ การจัดเรียงของอนุภาคเสริมแรงอาจจะเป็นแบบสุ่มหรือจัดเรียงอย่างสมบูรณ์ ในส่วนของวัสดุอนุภาคเสริมแรงที่มีทิศทางของอนุภาคที่ถือว่าเหมาะสมเพื่อวัตถุประสงค์ในทางปฏิบัติที่เป็นแบบสุ่ม (รูปที่ 3 (ก)) ด้วยเทคโนโลยีในปัจจุบัน วัสดุผสมที่สำคัญมากที่สุดคือวัสดุ

ผสมที่มีตัวเสริมแรงอยู่ในรูปของเส้นใย จุดมุ่งหมายในการออกแบบ คือต้องการความแข็งแรงและหรือมอดุลัสยืดหยุ่นต่อน้ำหนักที่สูง ลักษณะดังกล่าวเรียกกันว่า ความแข็งแรงจำเพาะ (Specific strength) (อัตราส่วนความแข็งแรงต่อความถ่วงจำเพาะ) และมอดุลัสจำเพาะ (Specific modulus) (อัตราส่วนมอดุลัสความยืดหยุ่นต่อความถ่วงจำเพาะ) วัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยที่ต้องการความแข็งแรงจำเพาะและมอดุลัสจำเพาะสูง ผลผลิตขึ้นโดยใช้เส้นใยและวัสดุเนื้อพื้นที่มีความหนาแน่นต่ำ วัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยจะแบ่งออกโดยอาศัยความยาวของเส้นใย ทั้งการจัดแนวการเรียงตัวของเส้นใย ปริมาณของเส้นใยและการกระจายตัวส่งผลที่สำคัญต่อความแข็งแรงและสมบัติอื่นๆ ของวัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยอย่างมาก แนวการเรียงตัวมีอยู่สองแบบที่น่าสนใจคือ (1) การเรียงตัวขนานแกนตามยาวของเส้นใยในทิศทางเดียวกัน (Parallel alignment) (2) การเรียงตัวแบบอิสระ (Random alignment) โดยปกติเส้นใยต่อเนื่องจะมีแนวการเรียงตัวแบบรูปที่ 3 (ง) ในขณะที่เส้นใยไม่ต่อเนื่องอาจจะมีการเรียงตัวแนวเดียวกันดังรูปที่ 3 (ข) หรืออาจจะเรียงตัวแบบอิสระดังรูปที่ 3 (ค) หรือเรียงแนวเดียวกันบางส่วน (Partially oriented) ก็ได้ (วิลเลียมส์, 2548)



รูปที่ 3 ตัวอย่างของวัสดุผสม (ก) อนุภาค, จัดเรียงแบบสุ่ม (ข) เส้นใยแบบไม่ต่อเนื่อง, จัดเรียงในทิศทางเดียว (ค) เส้นใยแบบไม่ต่อเนื่อง, จัดเรียงแบบสุ่ม (ง) เส้นใยแบบต่อเนื่อง, จัดเรียงในทิศทางเดียว

วัสดุผสมแบบหลายชั้น (Multilayered composites) เป็นอีกประเภทของวัสดุผสมที่เสริมแรงด้วยเส้นใย โดยจะจำแนกประเภทเป็นแบบลามิเนต (Laminate) หรือวัสดุผสมแบบลูกผสม (Hybrid composites) อย่างใดอย่างหนึ่ง ลามิเนตมีลักษณะเป็นแผ่นทำขึ้นโดยการกองขึ้นเป็นชั้นๆ (เรียกว่า พายล์ (Plies) หรือ ลามินา (Laminar) และมักจะจัดเรียงในทิศทางเดียว) อยู่ใน

ลำดับที่ระบุไว้ โดยทั่วไปลามิเนตอาจจะมีระหว่าง 4 ถึง 40 ชั้นและทิศทางการจัดเรียงของเส้นใยจะเปลี่ยนจากชั้นต่อชั้นในลักษณะสมมาตรตลอดความหนาของลามิเนต (วิลเลียมส์, 2548)

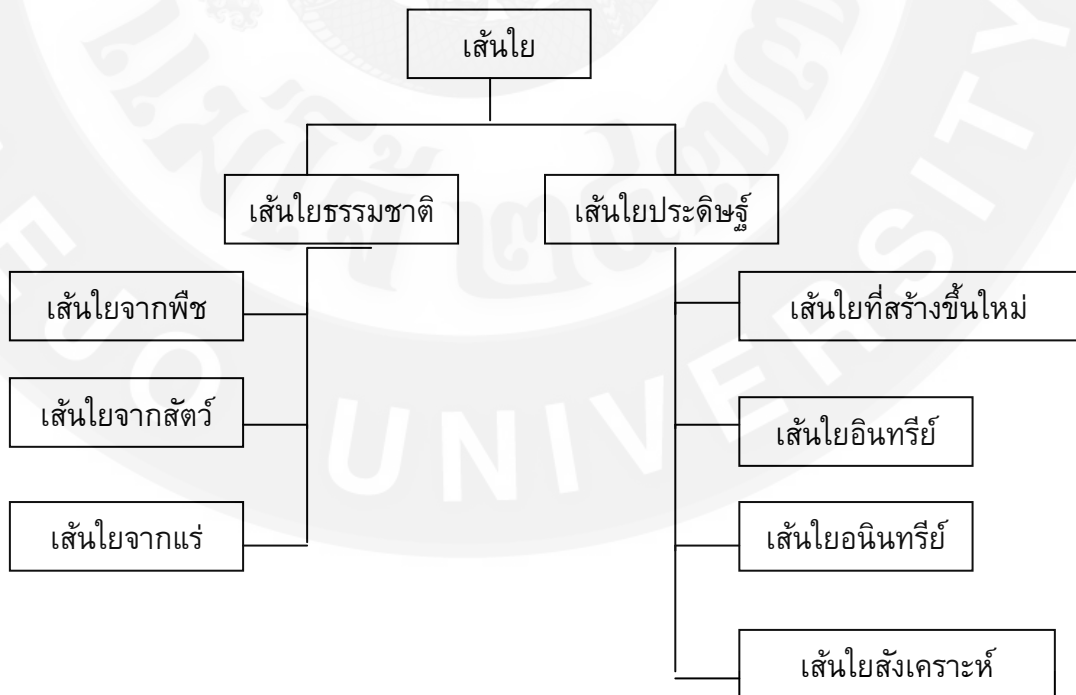
วัสดุผสมแบบลูกผสมมักจะเป็นวัสดุผสมแบบหลายชั้นรวมเข้ากับเส้นใยที่ผสมกันแล้ว เส้นใยอาจจะผสมในส่วนผสมแล้วหรือในชั้นแต่ละชั้นและวัสดุผสมนี้ถูกออกแบบให้ได้รับประโยชน์จากสมบัติที่แตกต่างกันของเส้นใยที่ใช้ (วิลเลียมส์, 2548)

3. เส้นใย (Fiber)

เส้นใยเป็นวัสดุประเภทหนึ่งที่มีลักษณะเป็นเส้นยาวต่อเนื่องหรือมีชิ้นส่วนยาวต่อเนื่องแยกออกจากกันอย่างสิ้นเชิงคล้ายกับความยาวของด้าย เส้นใยมีความสำคัญมากในทางชีววิทยาทั้งของพืชและสัตว์เป็นการจับเนื้อเยื่อรวมกัน เส้นใยสามารถหมุนเป็นเส้น สายหรือเชือกที่ใช้เป็นส่วนประกอบของวัสดุผสมเพื่อเป็นผลิตภัณฑ์ เช่น กระดาษหรือผ้าสักหลาด เส้นใยมักจะใช้ในการผลิตวัสดุอื่นๆ เส้นใยสังเคราะห์มักจะผลิตได้น้อยมากเมื่อเทียบกับเส้นใยธรรมชาติ แต่สำหรับเสื้อผ้าที่ทำจากเส้นใยธรรมชาติสามารถให้ประโยชน์บางอย่าง เช่น สวมใส่สบายมากกว่าเส้นใยสังเคราะห์ (James, 1984)

ประเภทของเส้นใย

เส้นใยจะถูกจำแนกเป็นเส้นใยธรรมชาติและเส้นใยที่มนุษย์สร้างขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 ประเภทของเส้นใย

เส้นใยธรรมชาติ (Natural fibers)

เส้นใยธรรมชาติมีลักษณะคล้ายเส้นผมที่ได้รับโดยตรงจากพืช สัตว์และแร่ ในทางพฤกษศาสตร์ เส้นใยธรรมชาติคือชุดของเซลล์ที่ความยาวและมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางน้อยกว่าตัวอย่างเช่น ปอ ขนสัตว์ ผ้าไหม เส้นผม ขน ป่านและลินิน ลักษณะของเส้นใยธรรมชาติคือสามารถหมุนหรือบิดได้เพื่อที่จะทำเป็นเส้นใ้สวมใส่เมื่อสวมใส่แล้วทำให้นุ่มสบายทั้งยังมีความแข็งแรงทนทานและดูดซึมความชื้นได้ดี

เส้นใยที่มนุษย์สร้างขึ้น (Man-made fibers)

เส้นใยสังเคราะห์ (Synthesis) หรือเส้นใยที่มนุษย์สร้างขึ้น โดยทั่วไปมาจากวัสดุสังเคราะห์ เช่น ปิโตรเลียม แต่เส้นใยสังเคราะห์บางประเภทจะผลิตจากเซลลูโลสธรรมชาติ เส้นใยเซลลูโลสมีสองประเภทคือ เซลลูโลสที่สร้างขึ้นใหม่หรือเซลลูโลสบริสุทธิ์ เช่น ได้มาจากกระบวนการของ Cupro-ammonium และทำการปรับปรุงหรือได้มาจากเซลลูโลสอย่างเดียว เช่น เซลลูโลส อะซิเตท (James, 1984)

เส้นใยกัญชง (Hemp fiber)

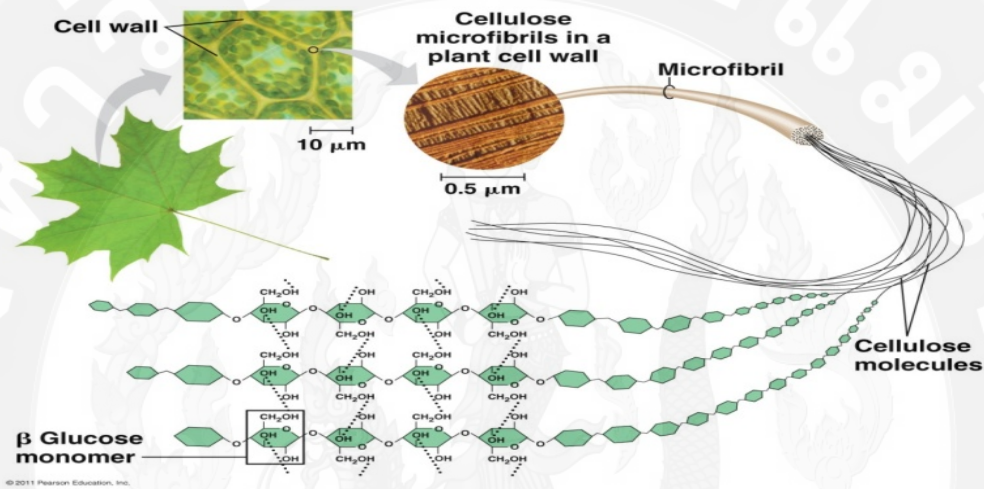
ป่าน ม่าง กัญชง หรือ Hemp เป็นพืชเส้นใย เดิมพบในเขตอบอุ่นของทวีปเอเชีย ได้แก่ ทางตอนใต้ของแคว้นไซบีเรีย ประเทศเปอร์เซีย ตอนเหนือของประเทศอินเดีย บริเวณแคชเมียร์ เซิงเขาหิมาลัยและประเทศจีน ในประเทศไทยกัญชงยังคงเป็นพืชห้ามปลูกตามกฎหมาย ต้องขออนุญาตปลูกภายใต้การดูแลของหน่วยงานส่งเสริม ผ้าใยกัญชงมีลักษณะคล้ายผ้าที่ทำจากใยลินิน เส้นใยมีสีเหลืองนวล มีความเหนียว ยืดหยุ่นและทนทาน เนื้อผ้ามีน้ำหนัก ทิ้งตัว เมื่อรีดจะเรียบและมันวาวเล็กน้อย แม้จะยับง่ายแต่ก็คงทน ยิ่งใช้ไปนานยิ่งสวย สวมใส่สบายไม่ร้อน ให้ความอบอุ่นได้ดีในฤดูหนาว จึงสวมใส่ได้ทุกฤดูกาล

ลักษณะโครงสร้างภายในลำต้นที่สร้างเส้นใย

จากการศึกษาลักษณะกายวิภาคของเปลือกลำต้นภายใต้กล้องจุลทรรศน์พบว่ามีโครงสร้างเส้นใย (fiber) 2 ชนิดจัดเรียงแยกกันอย่างชัดเจน โดยกลุ่มเซลล์ขนาดใหญ่ผนังเซลล์หนา มีช่อง lumen ขนาดใหญ่ เรียงอยู่ด้านนอกในชั้น cortex เรียกว่า blast fiber และกลุ่มเซลล์ขนาดเล็กเรียงเป็นวงอยู่ด้านในติดกับ vascular cambium เรียกว่า phloem fiber และระหว่าง fiber ทั้งสองชนิดยังพบเนื้อเยื่อ parenchyma แทรกอยู่ fiber ทั้ง 2 ชนิดเกี่ยวข้องกับการใช้ประโยชน์ด้านเส้นใย ส่วน fiber ในชั้นของ secondary xylem ใช้ประโยชน์ด้านเยื่อกระดาษ

สมบัติและลักษณะเฉพาะ

โดยธรรมชาติเส้นใยมักจะเป็นสีขาวนวลเป็นมัน ไม่เปลี่ยนสีแม้จะตากแดดเป็นเวลานาน ทนต่อแบคทีเรียและฟังไจ (Fungi) ตลอดจนเห็ดราได้ดี คุณน้ำดีและเร็ว คุณดัดย้อมได้ดีแต่ต้องระวังให้สีกระจายตัวได้สม่ำเสมอ ซักง่าย ทนทาน ความเหนียวเมื่อเปียกร้อยละ 140 - 160 ของความเหนียวเมื่อแห้ง เฉลี่ย (นวลแข, 2542)



รูปที่ 5 โครงสร้างของเซลลูโลส

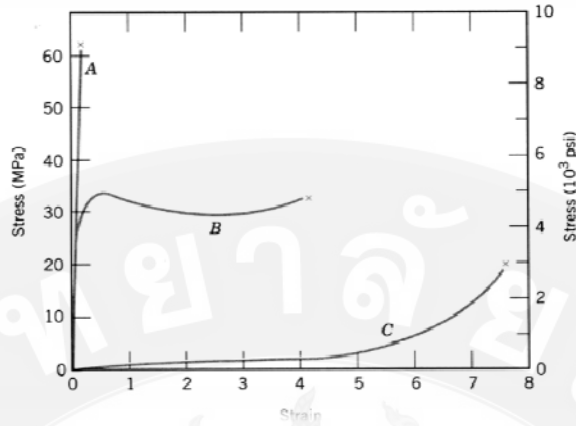
4. สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ (Mechanical Properties of Polymers)

สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์จะมีพารามิเตอร์หลายอย่างเหมือนกับโลหะได้แก่ โมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of elasticity) ความแข็งแรงดึง ความแข็งแรงอัดและความแข็งแรงการด้าโดยค่าพารามิเตอร์ทางกลต่างๆ เหล่านี้จะหาค่าด้วยการทดสอบแรงเค้นความเครียด คุณลักษณะทางกลของพอลิเมอร์ส่วนใหญ่จะอ่อนไหวมากต่ออัตราการเสียรูป (อัตราความเครียด) อุณหภูมิและธรรมชาติ ทางเคมี ของสิ่งแวดล้อมเช่นในสภาวะที่มีน้ำ ออกซิเจนตัวทำละลายอินทรีย์ เป็นต้น บางครั้งในการทดสอบวัสดุพอลิเมอร์ จำเป็นต้องดัดแปลงเทคนิคการทดสอบ รวมทั้งรูปทรงของชิ้นทดสอบที่ใช้ทดสอบวัสดุโลหะ โดยเฉพาะวัสดุที่มีความยืดหยุ่นสูงเช่นยาง (ณรงค์ศักดิ์, 2549)

พอลิเมอร์บนพื้นฐานพฤติกรรมแรงเค้นความเครียดโดยทั่วไปจะสามารถแบ่งออกได้เป็นสามกลุ่มคือแข็งเปราะ นิ่มเหนียว และยืดหยุ่นอย่างมาก วัสดุเหล่านี้มีความแข็งแรงและความต้านทานของวัสดุต่อการเสียรูปภายใต้แรงกระทำในช่วงยืดหยุ่นน้อยกว่าโลหะและมีสมบัติทางกลที่อ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิพอลิเมอร์กิ่งผลึกที่มีโครงสร้างแบบ spherulite จะมีกลไก

ของการเสียรูปแบบพลาสติก โดยการเสียรูปจากแรงดึงจะเกิดขึ้นหลายขั้นตอนทั้งส่วนของ tie chain ในบริเวณออสันฐานและส่วนของ chain-folded ในบริเวณผลึกที่แยกออกจาก Lamellae ซึ่งจะเกิดการจัดเรียงทิศทางในแนวของแรงดึง ความแข็งแรงของวัสดุเหล่านี้ อาจเพิ่มขึ้นจากการที่พอลิเมอร์ที่เป็นร่างแหมีสายหลายสายเชื่อมต่อกัน รวมทั้งความเป็นผลึกที่เพิ่มขึ้นและการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย เทคนิคของการเกิดผลึกการหลอมเหลวและการเปลี่ยนสภาพจากเหนียวเป็นเปราะของโมเลกุลพิจารณาได้ โดยการวัดอุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพจากเหนียวเป็นเปราะและอุณหภูมิการหลอมเหลวเป็นสำคัญอุณหภูมิเหล่านี้ มีความสำคัญต่อช่วงอุณหภูมินำไปใช้งานและการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ของพอลิเมอร์ ค่าอุณหภูมิสภาพแก้ว และ อุณหภูมิการหลอมจะเพิ่มขึ้นตามค่าความต้านทานของวัสดุต่อการเสียรูปภายใต้แรงกระทำในช่วงยืดหยุ่น (stiffness) ของสายโซ่ที่เพิ่มขึ้น โดย stiffness นี้จะสูงขึ้นตามปริมาณของพันธะคู่ในสายโซ่ (วิลเลียมส์, 2548)

พฤติกรรมทางกลในสภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิจะทำให้ สามารถแยกประเภทของพอลิเมอร์ว่าเป็นเทอร์โมพลาสติกหรือเทอร์โมเซตกล่าวคือเทอร์โมพลาสติกจะอ่อนตัวเมื่อได้รับความร้อนและแข็งเปราะเมื่อลดอุณหภูมิ โดยพฤติกรรมทั้งสองสามารถเกิดสลับกันไปมาได้ ในขณะที่เทอร์โมเซตจะแข็งเปราะเมื่อลดอุณหภูมิแต่ไม่อ่อนตัวเมื่อได้รับความร้อนส่วนพฤติกรรมทางกลแบบยืดหยุ่นหนืดเป็นพฤติกรรมที่อยู่ระหว่างยืดหยุ่นกับไหลหนืดซึ่งจะมีอยู่ในวัสดุพอลิเมอร์บางชนิด โดยจะแสดงค่าในรูปของโมดูลัสการคลายตัว (Relaxation modulus) ซึ่งเป็นโมดูลัสความยืดหยุ่นที่ขึ้นกับเวลาขนาดของโมดูลัสการคลายตัวจะว่องไวมากต่ออุณหภูมิดังนั้นการใช้งานวัสดุอีลาสโตเมอร์ จึงขึ้นอยู่กับอุณหภูมิช่วงนี้และวัสดุอีลาสโตเมอร์ที่โครงสร้างออสันฐานและมีโครงสร้างแบบร่างแหเล็กน้อยจะสามารถยืดออกอย่างมาก โดยการเสียรูปเกิดจากการคลายตัวของสายโซ่ที่พับงอหรือวนเป็นขดตามขนาดของแรงที่กระทำเมื่อพอลิเมอร์ที่เป็นร่างแหมีสายหลายสายเชื่อมต่อกัน จะเกิดในระหว่างกระบวนการที่ข่างทำปฏิกิริยากับกำมะถันในปริมาณที่พอเหมาะที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมเหลวของกำมะถัน (Vulcanization) อีลาสโตเมอร์ส่วนใหญ่จะเป็นโคพอลิเมอร์ส่วนอีลาสโตเมอร์ที่เป็นวัสดุอินทรีย์ ได้แก่ อีลาสโตเมอร์ซิลิโคนเป็นต้น ความแข็งแรง (Strength) ของวัสดุพอลิเมอร์จะมีค่าต่ำเมื่อเทียบกับโลหะและเซรามิกโดยสามารถเกิดการแตกหักทั้งในรูปของการแตกเปราะและแตกเหนียว นอกจากนี้วัสดุเทอร์โมพลาสติกบางชนิดยังสามารถเปลี่ยนสภาพจากเหนียวเป็นเปราะได้ด้วยการลดอุณหภูมิเพิ่มอัตราความเครียดและหรือการเปลี่ยนรูปทรงหรือความหนาของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกคล้ายแก้วบางชนิดกระบวนการเกิดการแตกหักอาจเป็นแบบร่างแหเล็กๆ (crazing) ซึ่งการแตกแบบนี้จะสามารถเพิ่มความแข็งแรงและความเหนียวของวัสดุ (วิลเลียมส์, 2548)



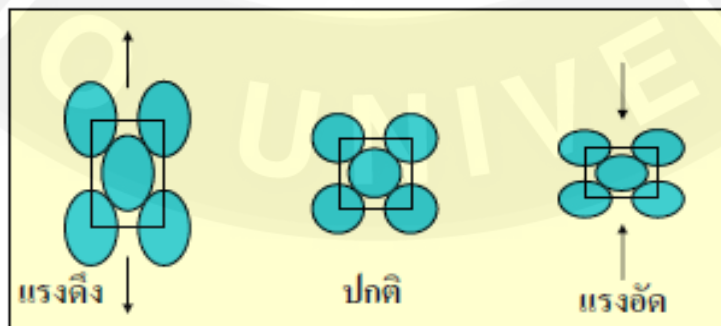
รูปที่ 6 พฤติกรรมแรงเค้นความเครียดของพอลิเมอร์ กราฟ A แสดงพฤติกรรมแบบเปราะ กราฟ B แสดงพฤติกรรมแบบพลาสติกและ กราฟ C แสดงพฤติกรรมแบบอิลาสติกทั้งหมด

การทดสอบแรงดึง (Tensile Test)

การเปลี่ยนแปลงแบบยืดหยุ่น

เมื่อมีแรงใดๆมากระทำต่อวัสดุ อาจส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุได้ เราสามารถจำแนกประเภทของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุแบ่งได้ เป็น 2 ประเภทคือ การเปลี่ยนแปลงแบบยืดหยุ่น (elastic deformation) และการเปลี่ยนแปลงแบบถาวร (plastic deformation)

ในกรณีที่วัสดุมีการเปลี่ยนแปลงแบบยืดหยุ่น หมายความว่า ถ้าวัสดุได้ รับความเค้นดึง (tensile stress) จะมีการยืดออกเล็กน้อย แต่ถ้าได้ รับความเค้นกด (compression stress) วัสดุจะหดลงเล็กน้อย และเมื่อเอาแรงกระทำออก วัสดุจะกลับคืนสู่สภาพเดิม รูปที่ 7 แสดงการเปลี่ยนแปลงของยูนิตเซลล์เมื่อได้รับแรงกระทำ (เสกศักดิ์, 2550)



รูปที่ 7 การเปลี่ยนแปลงของยูนิตเซลล์เมื่อได้รับแรงกระทำ

ความเค้นและความเครียด

ถ้าออกแรงดึงวัสดุที่มีความยาว l_0 พื้นที่หน้าตัด A_0 ด้วยแรง F แล้วทำให้วัสดุยืดออก ความเค้น stress, σ ที่เกิดขึ้นจะมีค่าเท่ากับ

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (1)$$

เมื่อ σ คือ ความเค้น (Pa หรือ N/m^2)

F คือ แรงกระทำ (นิวตัน, N)

A_0 คือ พื้นที่หน้าตัดรับแรง (ตารางเมตร, m^2)

เมื่อวัสดุได้รับแรงกระทำจะเกิดการเปลี่ยนรูป ในกรณีที่วัสดุได้รับแรงดึงจะเกิดการยืดออก โดยอัตราส่วนของความยาวที่เปลี่ยนไปต่อความยาวเดิมเรียกว่า ความเครียด (strain, ϵ) และสามารถหาได้จากสมการ

$$\epsilon = \frac{l-l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (2)$$

เมื่อ ϵ คือ ความเครียด

$l-l_0$ คือ ความยาวที่เปลี่ยนไป (เมตร, m)

l_0 คือ ความยาวเดิม (เมตร, m)

จากค่าความเครียด เราสามารถหาค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (elongation) ได้จากสมการ

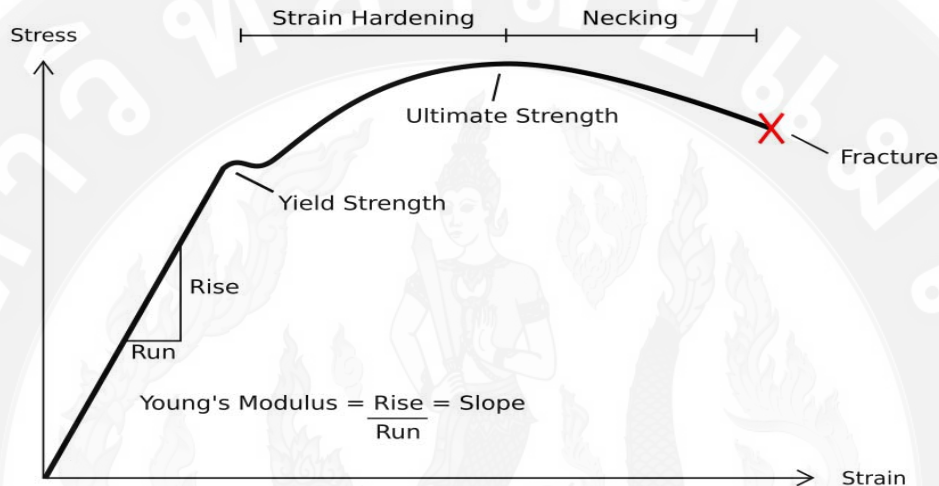
$$\% \text{ elongation} = \epsilon \times 100\% \quad (3)$$

เปอร์เซ็นต์การยืดตัวเป็นตัวบอกค่าความอ่อนตัว (ductile) ของวัสดุ วัสดุใดที่มีค่าเปอร์เซ็นต์ความยาวที่เปลี่ยนแปลงมาก แสดงว่ามีความอ่อนตัวมากการยืดตัว ณ จุดที่ขาด (elongation at break) มีความสำคัญในการศึกษาคุณภาพของวัสดุ เช่นถ้ามีค่าเปอร์เซ็นต์ความยาวที่เปลี่ยนแปลงต่ำกว่าปกติ แสดงว่าอาจมีรูพรุนหรือรอยแตกภายในวัสดุนั้น

ในช่วงการเปลี่ยนแปลงแบบยืดหยุ่น ค่าความเค้นและความเครียดมีความสัมพันธ์กันเป็นเส้นตรงดังที่อธิบายได้ด้วยกฎของฮุก (Hooke's law) (ฉรungskศักดิ์, 2549)

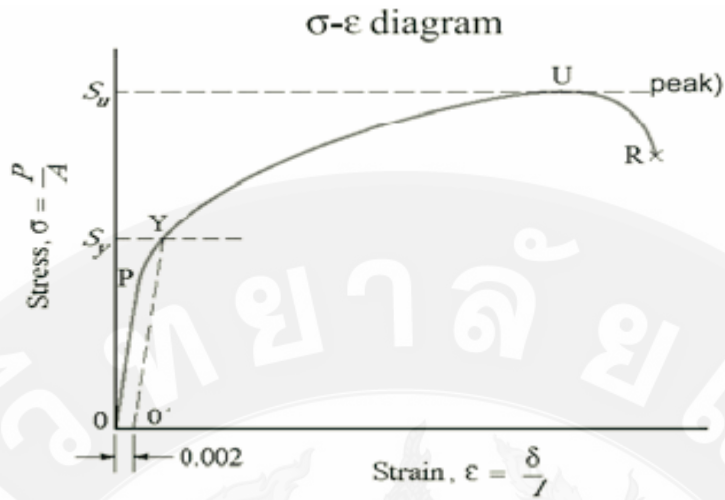
$$\sigma = E\epsilon \quad (4)$$

เมื่อ E คือค่ามอดูลัสของความยืดหยุ่น (modulus of elasticity) หรือมอดูลัสของยัง (Young's Modulus) มีหน่วยเป็น ปาสกาล (Pa) หรือ นิวตันต่อตารางเมตร ค่า E นี้สัมพันธ์กับความแข็งแรงของพันธะระหว่างอะตอมของวัสดุและอุณหภูมิ ถ้าพันธะมีความแข็งแรงมาก วัสดุนั้นก็จะมีค่า E สูง และเมื่อ อุณหภูมิเพิ่มขึ้น ค่า E จะลดลง(วิลเลียมส์, 2548)



รูปที่ 8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของวัสดุ

ความสัมพันธ์แบบทั่วไประหว่างความเค้นกับความเครียดแสดงดังรูปที่ 8 จากรูปจะเห็นได้ว่าตอนแรกความเค้นกับความเครียดมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง หรือว่าวัสดุมีการเปลี่ยนแปลงแบบยืดหยุ่นเราสามารถหาค่า E ได้จากความชันของกราฟในช่วงนี้ จากนั้น เมื่อเพิ่มความเค้นให้กับวัสดุขึ้นเรื่อยๆ จนถึงจุดคราก (yield point) ความเค้น ณ จุดนั้น คือความเค้น ณ จุดคราก (yield stress) หรือบางครั้ง อาจเรียกว่าความแข็งแรง ณ จุดคราก (yield strength) ซึ่งมีค่าเท่ากับค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุนั้น จะทนได้ก่อนที่จะมีการเปลี่ยนรูปถาวร และในช่วงของการเปลี่ยนรูปถาวรนี้ เมื่อให้แรงเพิ่มขึ้น วัสดุจะมีการเปลี่ยนรูปไปเรื่อยๆ จนเมื่อถึงจุดๆหนึ่ง วัสดุจะเกิดการแตกหักหรือขาดออกจากกัน เราเรียกค่าความเค้นที่วัสดุทนได้สูงสุดก่อนการแตกหักว่า ค่าความแข็งแรงสูงสุด (ultimate strength) (ณรงค์ศักดิ์, 2549)



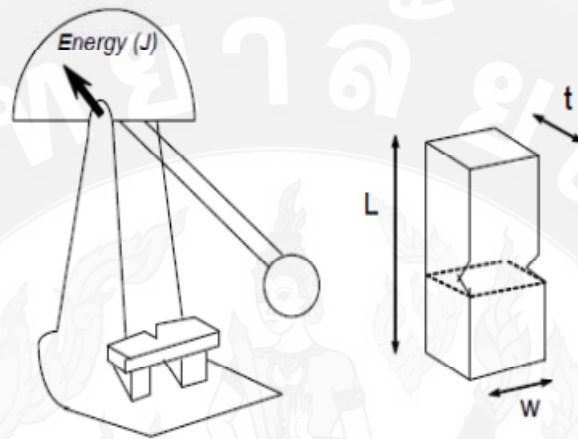
รูปที่ 9 แสดง 0.2% offset yield strength คัดที่ตำแหน่ง strain = 0.002

ในกรณีของวัสดุอ่อนเหนียว จะเกิดการเปลี่ยนรูปแบบถาวรหลังจากได้รับความเค้นเกินจุดครากและจะเกิดเป็นระยะเวลาหนึ่งก่อนการแตกหัก จุดครากนี้ จำเป็นต่อการขึ้น รูปของวัสดุ เช่น การตัด โกง แผ่น เหล็กเพื่อทำเป็นกันชนรถยนต์ เป็นต้นแต่ในโลหะบางชนิด เช่น อลูมิเนียม ทองเหลือง ทองแดง สังกะสี กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นกับความเค้นจะไม่มีจุดครากให้เห็น ดังนั้น จึงต้องมีการกำหนดค่าความเค้นคราก (yield stress) เพื่อความปลอดภัยในการใช้งาน โดยทั่วไปแล้วจะกำหนดไว้ที่ 0.2% offset หรือที่ค่าความเครียดเท่ากับ 0.002 แล้วลากเส้นขนานกับเส้นกราฟ จุดที่เส้นตัดกัน (จุดที่ 3 ในรูปที่ 9) คือค่าขอบเขตของความเค้นสูงสุดในการใช้งานวัสดุ นั้น ๆ (ณรงค์ศักดิ์, 2549)

การทดสอบสมบัติด้านการทนแรงกระแทก (Impact Properties testing)

การทดสอบสมบัติด้านการทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์จะมีจุดเด่นตรงที่เป็นการทดสอบด้วยอัตรา การกระแทกด้วยความเร็วสูง โดยมีรูปแบบ 2 ลักษณะ คือ แบบ pendulum test (รูปที่ 10) และ falling weight test [3] ลักษณะการทดสอบแบบ pendulum test จะใช้ค้อนเหวี่ยงลงมากระแทกชิ้นงาน พลังงานส่วนหนึ่ง สูญเสียไปในการทำให้ชิ้นงานแตกหัก ซึ่งสามารถอ่านค่าพลังงานที่ใช้ไปได้จากเข็มหน้าปัด (หน่วยเป็น ft-lbs) ซึ่งในกรณีที่ทดสอบแล้วชิ้นงานไม่หักแสดงว่าพลังงานไม่พอ ซึ่งจะต้องเพิ่มน้ำหนักขึ้นไปอีก (หรือใช้เครื่องมือที่มีขนาดใหญ่กว่าหรือ specification ตรงกว่า)

ชิ้นงานทดสอบจะต้องมีการทำ รอยบากเพื่อให้เกิดจุดรวมแรง (stress concentration point) ดังรูปที่ 11 (ณรงค์ศักดิ์, 2549, กวี, 2554)



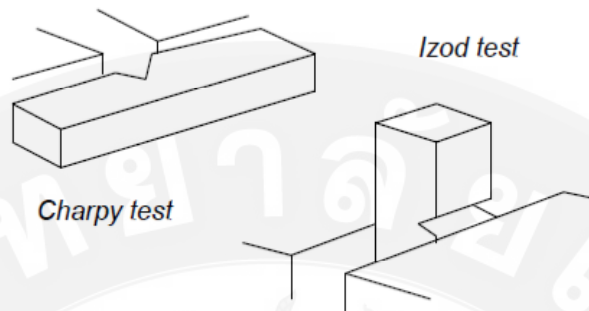
รูปที่ 10 เครื่องมือ pendulum test

โดยจากพลังงานที่อ่านได้สามารถนำมาคำนวณเป็น impact strength ได้จากสูตร

$$\text{Strength Impact} = \frac{\text{Energy (J)}}{\text{Thickness (m)}} \quad (5)$$

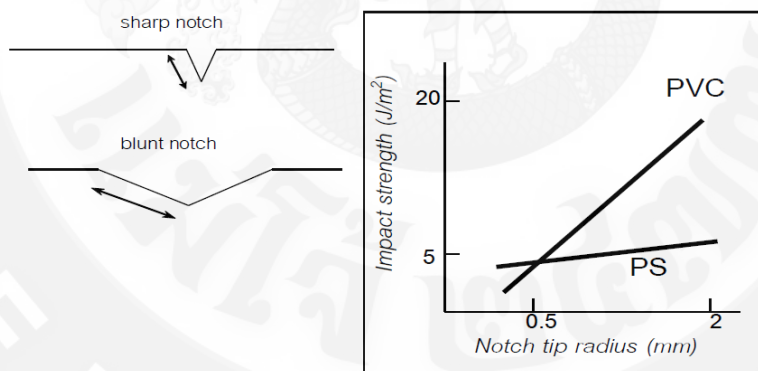
$$\text{หรือบางกรณี จะใช้สมการ Strength Impact} = \frac{\text{Energy (J)}}{\text{Area (notch) (m}^2\text{)}} \quad (6)$$

การวางชิ้นงานจะทำ ได้ 2 ลักษณะตามรูปแบบของการทดสอบกล่าวคือถ้าเป็นแบบ Charpy test จะวาง แนวนอน แต่ถ้าเป็นแบบ Izod test จะวางแนวตั้ง



รูปที่ 11 รูปแบบการวางชิ้นงานสำหรับการทดสอบแรงกระแทกแบบ Izod และ Charpy

สิ่งสำคัญหรือข้อควรระวังในการทดสอบแบบ pendulum คือขนาดของรอยบาก (notch) ต้องคงที่เพราะขนาด จะมีผลต่อค่า impact strength ที่ได้ ตัวอย่างเช่นรอยบากที่แหลมกับรอยบากที่ทื่อหรือป้านกว่าจะให้ค่า ไม่เท่ากัน โดยทั่วไปแล้วรัศมีของ notch tip ที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ impact strength สูงขึ้น (รูปที่ 12)

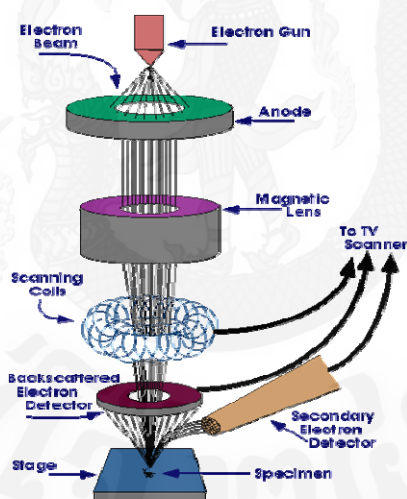


รูปที่ 12 ผลของรอยบากต่อค่าการทนแรงกระแทก

นอกจากนั้นความเหนียวของชิ้นงานที่ได้จาก tensile test กับที่ได้จาก impact test อาจจะให้ผลไม่สอดคล้อง กันก็ได้ เนื่องจากการทดสอบที่สภาวะต่างกัน โดยในกรณี impact test จะทดสอบด้วยความเร็วสูงมาก และที่สำคัญคือชิ้นงานจะมีรอยบากหรือจุดรวมแรง ซึ่งพอลิเมอร์บางตัวจะมีความเหนียวลดลงอย่างมากถ้า หากมีตำหนิหรือจุดรวมแรง เช่น notch เช่น PVC, Nylon เป็นต้น (ณรงค์ศักดิ์. 2549, กวี. 2554)

5. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนเป็นการศึกษาที่ผิวหรือบริเวณส่วนลึกใกล้ผิว โดยจะมี ส่วนประกอบสำคัญ คือ ปืนอิเล็กตรอนซึ่งจะมีการเร่งอิเล็กตรอนให้มีพลังงานประมาณ 20 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ถึง 40 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ จากนั้นจะมีเลนส์คอนเดนเซอร์ เลนส์ใกล้วัตถุ และที่สำคัญมีส่วนที่เรียกว่า ขดลวดแสกน (scanning coil) ซึ่งคอยส่องกราดลำอิเล็กตรอนลงบนชิ้นงาน และเมื่ออิเล็กตรอนตกกระทบพื้นผิวของชิ้นงาน จะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ อิเล็กตรอนสะท้อนกลับหรือรังสีอื่นๆ ที่ปลดปล่อยออกมาจากผิว ซึ่งจะถูกรวบรวมด้วยหัววัดแบบต่างๆ โดย จะทำการวัดแต่ละจุดที่มีการสแกน ซึ่งหลักการของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จะมี บางส่วนที่มีลักษณะการทำงานคล้ายการสแกนภาพในโทรทัศน์ สำหรับกำลังขยายภาพนั้นจะ พิจารณาจากกรอบสี่เหลี่ยม ซึ่งประกอบด้วยกลุ่มของเส้นตรงที่เรียกว่าเรสเตอร์ (raster) จะพบว่า เรสเตอร์ที่ถูกสแกนด้วยอิเล็กตรอนจะเล็กกว่าเรสเตอร์ที่ปรากฏบนจอภาพ



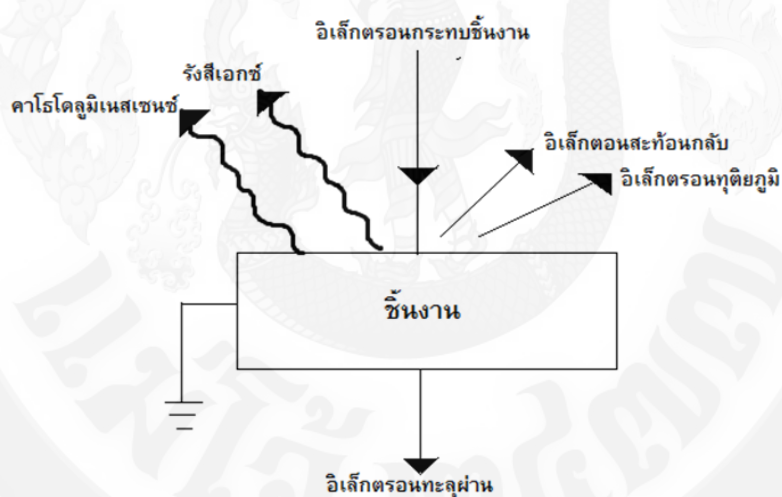
รูปที่ 13 แสดงแผนภาพส่วนประกอบหลักที่สำคัญที่ประกอบขึ้นเป็นกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ในการสร้างภาพในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จะใช้การตรวจจับ อิเล็กตรอนที่หลุดออกจากผิว ซึ่งก็ได้จากการทำอันตรกิริยาของลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิต่อชิ้นงานดัง ปรากฏในรูป ซึ่งแสดงแผนภาพของสิ่งที่เกิดขึ้น หรือลำอิเล็กตรอนตกกระทบชิ้นงาน โดยแปรเป็น สัญญาณต่างๆ ในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

สำหรับการสร้างภาพส่วนใหญ่แล้ว ในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดจะใช้สัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมิ และอิเล็กตรอนสะท้อนกลับ นอกจากนั้นแล้วสัญญาณของรังสีเอกซ์ที่ถูกปลดปล่อยสามารถนำมาวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีได้ (กอบวุฒิ, 2549)

ส่วนประกอบหลักหลักของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่สำคัญมีดังต่อไปนี้

1. แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (electron source)
2. อิเล็กตรอนแมกเนติกเลนส์ (electromagnetic lens) หรือขดลวดทำหน้าที่ควบคุมการส่องกราดของลำอิเล็กตรอน
3. ปุ่มระบบสุญญากาศและควบคุมความดัน (control pressure lens system)
4. ช่องใส่ตัวอย่าง (specimen chamber)
5. ตัวตรวจวัดสัญญาณอิเล็กตรอน (electron signal detector)
6. อุปกรณ์สร้างภาพ (imaging devices)



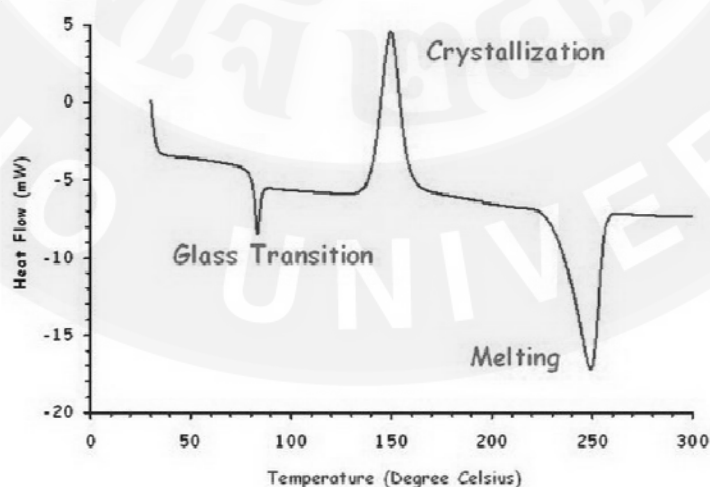
รูปที่ 14 แสดงอันตรกิริยาที่สำคัญที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานที่จะนำมาใช้ในการแปรสัญญาณ

ในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

สำหรับการสร้างภาพส่วนใหญ่แล้ว ในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดจะใช้สัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมิ และอิเล็กตรอนสะท้อนกลับ นอกจากนั้นแล้วสัญญาณของรังสีเอกซ์ที่ถูกปลดปล่อยสามารถนำมาวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีได้ (กอบวุฒิ, 2549)

6. ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimetry)

DSC เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์ทดสอบวัสดุ โดยการวัดค่าพลังงานความร้อนและอุณหภูมิของสารตัวอย่างเปรียบเทียบกับสารมาตรฐาน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ หรือการเปลี่ยนแปลงทางเคมี เช่น การหลอมเหลว การเปลี่ยนสถานะ การเปลี่ยนรูปผลึก การเกิดปฏิกิริยาเคมี เป็นต้น โดยที่พื้นที่ใต้กราฟที่เกิดขึ้นจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับการเปลี่ยนแปลงความร้อนของตัวอย่าง มีหลักการทำงาน คือ สารตัวอย่าง และ สารอ้างอิงที่เชื่อมต่อการเกิดปฏิกิริยา ที่บรรจุในถ้วยอะลูมิเนียมขนาดเล็ก (ทองแดง หรือ แกรไฟต์ใช้สำหรับการวิเคราะห์ที่อุณหภูมิสูงกว่า 800 องศาเซลเซียส) จะถูกให้ความร้อนในบรรยากาศไนโตรเจน จากนั้นสมบัติทางความร้อนของตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิในตัวอย่างจะถูกตรวจวัด และแปรผล ปริมาณของตัวอย่างที่ใช้วิเคราะห์อยู่ในช่วง 0.5 - 1.0 mg เทคนิค DSC สารตัวอย่าง และ สารอ้างอิงจะถูกให้ความร้อนจากแหล่งพลังงานสองแหล่งที่แยกกันค่าพลังงานความร้อน ที่ใช้ในการรักษาอุณหภูมิของตัวอย่าง และสารอ้างอิงให้เท่ากันจะถูกบันทึกไว้ (ซีรพงษ์, 2556) เพื่อให้อุณหภูมิต่างกันตลอด เครื่อง DSC จะต้องใช้หลักการให้อุณหภูมิเท่ากัน คือถ้าสารตัวอย่างเกิดการเปลี่ยนแปลงแบบดูดความร้อน มีการดูดกลืนพลังงานทำให้ T_s ลดลงเมื่อเทียบกับ T_f ดังนั้นเครื่องจะทำการชดเชยโดยการให้ความร้อนพลังงานไฟฟ้าให้กับสารตัวอย่างซึ่งเท่ากับจำนวนที่ดูดกลืนเข้าเปลี่ยนแปลงสถานะทำให้ $T_s = T_f$ ดังเดิม และค่าพลังงานการชดเชยถูกบันทึกไว้ ถ้าตัวอย่างเกิดการเปลี่ยนแปลงแบบคายความร้อน มีการคายพลังงานทำให้ T_s เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ T_f ดังนั้นเครื่องจะทำการชดเชยโดยให้ความร้อนจากพลังงานไฟฟ้าแก่สารอ้างอิง $T_s = T_f$ ดังนั้นกราฟ DSC หรือ Thermo gram ได้จากความสัมพันธ์ระหว่าง Heat flow rate และอุณหภูมิแสดงในรูปที่ 15 (ซีรพงษ์, 2556)



รูปที่ 15 เทอร์โมแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย DSC

จากเทอร์โมแกรมจะเห็นว่า อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงของพลาสติก เกิดขึ้นเป็นช่วงมากกว่าที่จะเป็นค่าใดค่าหนึ่ง อย่างไรก็ตามในการรายงานผลจะรายงานเป็นอุณหภูมิค่าหนึ่งดังนี้ คือ T_g จะใช้ Mid-point temperature ค่า T_c และ T_m เป็น Peak temperature DSC เป็นเทคนิคที่มีประโยชน์และมีประยุกต์ในการใช้งานทางด้านพลาสติก ทั้งทางด้านวิเคราะห์ทางคุณภาพ และปริมาณ เช่น

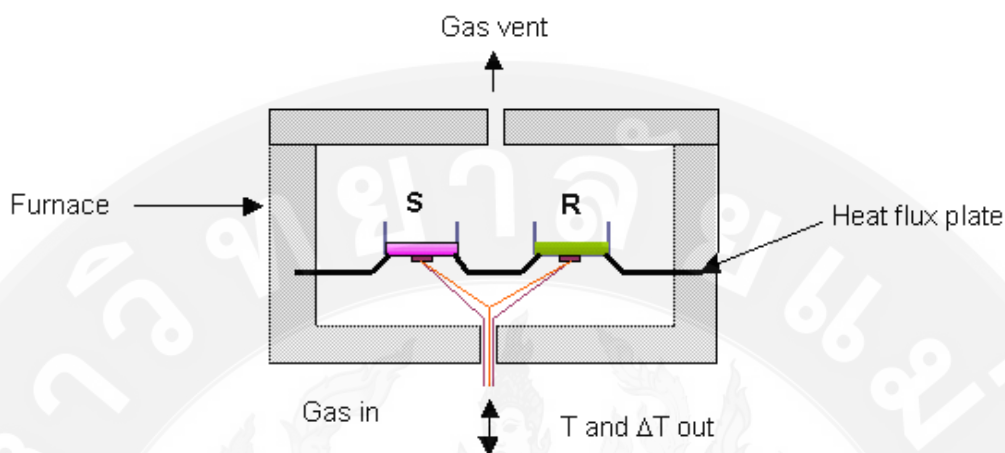
1. หาอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงสถานะคล้ายแก้ว
2. ศึกษาการหลอมเหลว หาค่า T_m และ ΔH_m
3. ศึกษาการเกิดผลึกหาค่า T_c และ ΔH_g
4. หาค่า % ความเป็นผลึก

เทคนิค DSC เป็นเทคนิคการวัดพลังงานที่แตกต่างจากการใส่พลังงานเข้าไปในสารตัวอย่างกับสารอ้างอิง เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิโดยที่พลังงานที่ใส่เข้าไปจะต้องควบคุมด้วย temperature program DSC curve แสดงดังรูปที่ 15 เมื่อเกิด thermal transition คือการเปลี่ยนแปลงทางเคมีหรือทางกายภาพจะมีผลทำให้เกิดความร้อนขึ้น (emission of heat หรือ exothermic) หรือดูดกลืนความร้อน (absorption of heat หรือ endothermic) กับสารตัวอย่าง พลังงานความร้อนที่ต้องใส่เข้าไปกับสารตัวอย่างหรือกับสารอ้างอิงเพื่อทำให้อุณหภูมิของสารตัวอย่างและสารอ้างอิงเท่ากัน DSC จะวัดได้โดยตรงทั้งอุณหภูมิ และผลรวมของพลังงานของการเปลี่ยนแปลง (transition) หรือ heat of reaction (ซีรพงษ์, 2556)

หลักการพื้นฐานของ DSC คือ จะมีถาด (Pan) อยู่ 2 ถาด ถาดแรกเป็นถาดที่บรรจุสารตัวอย่าง (Sample Pan) ส่วน ถาดที่สองเป็นถาดอ้างอิง (Reference Pan) ซึ่งเป็นถาดเปล่า ไปวางอยู่บนอุปกรณ์ให้ความร้อน (Furnace) ชนิดเดียวกัน ซึ่งวางอยู่ข้าง ๆ กัน เมื่อเริ่มการทดลอง จะเริ่มให้ความร้อนแก่ถาดทั้งสอง โดยเครื่อง DSC จะควบคุมอัตราการเพิ่มอุณหภูมิให้คงที่ (เช่น 10 องศาเซลเซียส ต่อ 1 นาที) แต่ที่สำคัญที่สุดก็คือ เครื่อง DSC จะควบคุมให้ อุณหภูมิทั้งสอง (การให้ความร้อนของถาดที่บรรจุสารตัวอย่าง และของถาดอ้างอิง) เพิ่มอุณหภูมิถาดทั้งสองที่วางแยกกัน ด้วยอัตราการเพิ่มความร้อนที่เท่ากันตลอดทั้งการทดลอง (ซีรพงษ์, 2556)

สาเหตุที่ความร้อนของถาดทั้งสองจะเพิ่มด้วยอัตราที่ไม่เท่ากันก็คือ ถาดทั้งสองมีความแตกต่างกัน นั่นคือ ถาดตัวอย่างมีตัวอย่างพอลิเมอร์อยู่ข้างใน แต่ ถาดอ้างอิงไม่มีสารตัวอย่างอยู่ข้างในทำให้ ถาดตัวอย่างมีสสารในปริมาณที่มากกว่า ถาดอ้างอิงนั้นหมายความว่า อุปกรณ์ให้ความร้อนต้องให้ความร้อน ถาดตัวอย่างมากกว่าทำให้ ถาดอ้างอิงเพื่อที่จะคงอัตราการเพิ่มอุณหภูมิให้เท่ากัน ดังนั้นอุปกรณ์ให้ความร้อนที่อยู่ใต้ ถาดตัวอย่างจะต้องทำงานหนักกว่า อุปกรณ์ให้ความ

ร้อนที่อยู่ได้ ถัดอ้างอิงคือมันต้องให้ความร้อนมากกว่า และการวัดความแตกต่างของปริมาณความร้อนจาก อุปกรณ์ให้ความร้อนทั้งสองนี้ ก็คือหน้าที่หลักของเครื่อง DSC (บรรณเลข, 2533)



รูปที่ 16 ส่วนประกอบหลักของเครื่อง DSC

7. Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy

Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy เป็นหนึ่งในเทคนิคทางด้าน Infrared Spectroscopic ที่มีประสิทธิภาพในการจำแนกประเภทของสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ และพอลิเมอร์เคมีในโมเลกุล รวมถึงสามารถบอกถึงปริมาณองค์ประกอบที่มีอยู่ในโมเลกุลของสารผสมตัวอย่างที่ไม่ทราบชนิด เทคนิค FTIR นี้มีความไว ใช้ระยะเวลาในการตรวจสอบน้อยกว่าเทคนิคอื่นๆ

Infrared (IR) Spectroscopy เป็นหนึ่งในเทคนิค Spectroscopic ทั่วๆ ไปที่ใช้ในทางเคมีอินทรีย์และ เคมีอนินทรีย์ โดยทำการตรวจวัดการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของตัวอย่างที่มีความถี่ต่างๆ ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของแต่ละพันธะ หรืออาจเรียกได้ว่าเป็น ลายพิมพ์โมเลกุล

IR Spectroscopy สามารถแยกเป็น 2 ประเภท คือ Dispersive Infrared Spectroscopy และ Fourier Transform Infrared Spectroscopy โดยในบทความนี้ผู้เขียนจะเน้นหนักไปทาง FTIR เพราะเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพมากกว่าแบบแรก แต่ก็จะแนะนำเครื่องมือในแบบแรกอย่างไม่เจาะลึกมากนัก

การดูดกลืนรังสีอินฟราเรด

ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิศูนย์องศาสมบูรณ์ อะตอมทุกตัวในโมเลกุลจะมีการสั่นอยู่ตลอดเวลา เมื่อความถี่ของการสั่นมีค่าเท่ากับความถี่ของรังสีอินฟราเรดที่ฉายมายังโมเลกุล โมเลกุลก็จะดูดกลืนรังสี จำนวนแถบการดูดกลืนทั้งหมดที่สังเกตได้จะมีค่าไม่เท่ากับการสั่นมูลฐานของโมเลกุลทั้งหมด โดยจะมีค่าลดลง ทั้งนี้เพราะจะมีบางแถบพลังงานที่ไม่มีการตอบสนองต่อพลังงานในช่วงรังสีอินฟราเรด

การทำงาน

โดยทั่วไปรังสีจากแหล่งกำเนิดจะผ่านตัวอย่างและถูกกระจายออกในช่วงความถี่ต่างๆ ด้วยโมโนโครเมเตอร์ หลังจากนั้นลำรังสีจะตกลงบนเครื่องตรวจวัดซึ่งจะทำให้เกิดเป็นสัญญาณไฟฟ้าแล้วทำการบันทึกผลสัญญาณนั้น

IR Spectrometer แบบนี้จะมีทั้งชนิดลำแสงเดี่ยว (single beam) และลำแสงคู่ (double beam) แต่โดยส่วนมากที่พบเห็นจะเป็นแบบลำแสงคู่ เพราะ background ที่เกิดจากแก๊สในบรรยากาศ เช่น คาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำ จะหมดปัญหาไป การทำงานของเครื่องแบบนี้ ลำแสงสองลำจะผ่านไปยังตัวอย่างและ chamber อ่างอิง จากนั้นใช้ตัวตัดแสง เช่น sector mirror แยกลำรังสีอ่างอิงและรังสีจากตัวอย่างให้ตกลงบนเครื่องตรวจวัด (Brian, 2011)

8. ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปัจจุบันพบว่ามีนักวิจัยหลายท่านได้ทำการวิจัยด้านวัสดุคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติ (Pracella, 2006, Placet, 2006) และได้มีการกล่าวถึงการประยุกต์ใช้ในงานด้านบรรจุภัณฑ์ และในอุตสาหกรรมยานยนต์ (Davis and Song 2006, Sapalidis et al. 2007) โดยพบว่าเส้นใยธรรมชาติสามารถนำมาเป็นสารเสริมแรงที่ดีสำหรับวัสดุคอมโพสิตพอลิเมอร์ โดย Davis and Song 2006 ได้ทำการทดลองผลิตฟิล์ม Polyvinyl alcohol โดยการเสริมแรงด้วยเส้นใยสาหร่าย Zostera พบว่าสามารถผสมสารเสริมแรงได้ในอัตราส่วนมากถึง 50 % โดยน้ำหนัก โดยมีการกระจายตัวที่ดีของเส้นใย แต่สมบัติเชิงกลที่ของวัสดุผสมที่ดี คือใช้อัตราส่วน 20 % โดยน้ำหนักของเส้นใยโดยไม่ทำให้สมบัติการซึมผ่านของก๊าซ และสมบัติการดูดซับน้ำของ PVA เปลี่ยนแปลง Brahmakumar และคณะได้ทำการศึกษาผลของจีฟังก์ชันผิวของเส้นใยมะพร้าวต่อการยึดเกาะกับพอลิเอทิลีนเททริกซ์ พบว่าจีฟังก์ชันผิวของเส้นใยมะพร้าวทำหน้าที่เหมือนสารประสานกลุ่มควบ และหากต้องการใช้สารประสานกลุ่มควบชนิดอื่น จำเป็นต้องกำจัดจีฟังก์ชันนี้ออกก่อน เพื่อให้วัสดุมีความแข็งแรงมากขึ้น Pracella et al., 2006 ได้ศึกษาสมบัติ เชิงกล และสมบัติทางความร้อน ของพอลิเอทิลีน ที่เสริมแรงด้วยเส้นใย Hemp โดยการใช้น้ำยาสาร glycidyl methacrylate (GMA) ปรับปรุงผิวของเส้นใย และใช้ styrene-(ethylene-co-butene) block copolymer (SEBS) ปรับปรุงผิวของพอลิเอทิลีน พบว่าวัสดุผสมพอลิเอทิลีนและเส้นใย hemp ที่ผ่านการปรับปรุงผิวจะมีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าวัสดุที่ไม่ผ่านการปรับปรุงผิว โดยมีค่าความทนแรงดึงที่สูงสุดเท่ากับ 2.9 GPa นอกจากนี้ยังพบว่าการปรับปรุงผิวยังทำให้เส้นใยเกิดการกระจายตัวที่ดีในพอลิเอทิลีนเททริกซ์ และเส้นใยยังทำหน้าที่เหมือนตัวก่อกผลึกให้แก่พอลิเอทิลีนอีกด้วย Dhakal et al., 2007 ได้ทำการเตรียมคอมโพสิตระหว่างพอลิเอสเทอร์ และเส้นใย hemp ในสัดส่วนเส้นใยต่างๆกัน ด้วยวิธีการอัดขึ้นรูป พบว่าวัสดุคอมโพสิตจะมีความ

แข็งแรงมากขึ้นเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้น แต่ถ้าหากตัวอย่างดูดซับความชื้นเข้าไปจะทำให้ความแข็งแรงของวัสดุมีความแข็งแรงลดลงเนื่องจาก ความชื้นไปทำให้เกิดช่องว่างภายในเส้นใย และทำให้เส้นใยมีความแข็งแรงลดลง ส่งผลให้วัสดุคอมโพสิตที่ได้มีความแข็งแรงน้อยลงด้วย Xie et al., 2010 ได้สรุปไว้ว่าสารประสานกลุ่มควบ เช่น silane จะถูกดูดซับและควบแน่นบนผิวของเส้นใยธรรมชาติ (โซลเจล) ที่ pH และอุณหภูมิที่เหมาะสม จะทำให้พันธะไฮโดรเจนเกิดขึ้นระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของเส้นใยธรรมชาติและสาร silane ที่ถูกดูดซับ ซึ่งการที่จะทำให้วัสดุผสมมีความแข็งแรงจำเป็นที่เมทริกซ์ต้องมีความสามารถในการเกิดพันธะกับsilane ซึ่งอาจทำได้โดยกระบวนการปรับปรุงผิวของเมทริกซ์อีกครั้งหนึ่ง Franco et al., 2004 เตรียมวัสดุเสริมแรงด้วยพอลิเอทิลีนและเส้นใยป่านสนรายณ์ 50 % โดยน้ำหนักด้วยวิธีการกดอัดผลการทดสอบเชิงกลพบว่าวัสดุคอมโพสิตมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นประมาณ 50 % สำหรับวัสดุคอมโพสิตที่เตรียมโดยมีการการปรับปรุงผิวเส้นใยด้วย silane จะทำให้ผิวของเส้นใยมีสมบัติการเปียกน้ำที่ดีขึ้น แต่ถึงอย่างไรสารปรับปรุงผิวก็ไม่ทำให้สมบัติเชิงกลของวัสดุผสมดีขึ้นมากนัก (ประมาณ 3 %) จากการศึกษาการกระจายตัวของเส้นใยในเมทริกซ์พบว่าเส้นใยที่ไม่ผ่านการปรับปรุงผิวจะแสดงพฤติกรรมหลุดออก (pull out) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงผิวช่วยให้การยึดเกาะที่เพิ่มขึ้นระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์

ดังนั้นทางผู้ทำการวิจัยจึงได้เล็งเห็นความสำคัญในการศึกษาเรื่องนี้ โดยจะทำการศึกษการเตรียมวัสดุคอมโพสิตระหว่างพอลิเมอร์และเส้นใยธรรมชาติ เพื่อลดการใช้เส้นใยสังเคราะห์ หรือเส้นใยที่เป็นพิษต่อมนุษย์ และสามารถลดปัญหาสิ่งแวดล้อมโดยคาดหวังว่าผลการทดลองจะทำให้ได้วัสดุที่เหมาะสมสำหรับนำไปประยุกต์ใช้ในด้านบรรจุภัณฑ์สำหรับสินค้าต่างๆ นอกจากนี้ยังเป็นการช่วยเพิ่มมูลค่าสินค้าทางการเกษตรอีกด้วย

อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้

1. พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) บริษัท PTT global chemical public จำกัด
2. สารกลุ่มควบ (Triethoxyvinylsilane) บริษัท Sigma-Aldrich จำกัด
3. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) บริษัท AGC Chemicals จำกัด
4. สารช่วยผสม (polyethylene- grafted- maleic anhydride) บริษัท Sigma-Aldrich จำกัด
5. อะซิโตน (acetone) บริษัท AGC Chemicals จำกัด
6. เอทานอล (ethanol) บริษัท AGC Chemicals จำกัด
7. เส้นใยกัญชง (Hemp fiber)

8. น้ำมันซิลิโคน (Silicone oil) บริษัท Ajax Finechem จำกัด
9. เครื่องชั่งน้ำหนัก 4 ตำแหน่ง บริษัท Scientific Promotion จำกัด
10. เตอบไฟฟ้า บริษัท EduSystem จำกัด
11. เครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง บริษัท Lab Tech Engineering จำกัด
12. เครื่องอัดขึ้นรูป บริษัท Lab Tech Engineering จำกัด
13. เครื่องอินฟราเรด Fourier Transform-Infra Red Spectroscopy-Microscope (FTIR-Microscope) (ศูนย์เครื่องมือ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่)
14. Scanning Electron Microscopy (SEM) และอุปกรณ์ Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDX) พร้อม software (ศูนย์จุลทรรศน์อิเล็กตรอน คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่)
15. เครื่องวิเคราะห์ทางความร้อน (Differential scanning calorimeter และ Thermo gravimetric analysis: DSC-TGA) (ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี)
16. เครื่อง X-ray Diffractometer (XRD พร้อมฐานข้อมูล Powder Diffraction Files ของ ICDD ใน CD-ROM (คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี)
17. เครื่องทดสอบความแข็งแรงของวัสดุ บริษัท Lloyd จำกัด
18. เครื่องทดสอบความต้านทานแรงกระแทก บริษัท Come Tech จำกัด

การดำเนินการวิจัย

วิธีการเตรียมเส้นใยถั่วงอก

การปรับปรุงผิวเส้นใยถั่วงอกด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์

เตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นที่ปริมาณ 2.5, 5, 7.5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แช่เส้นใยในอัตราส่วน เส้นใยต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 1:20 เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำเส้นใยมาล้างด้วยน้ำกลั่นจนค่า pH อยู่ในช่วง 6 ถึง 7 และแช่เส้นใยในสารละลายอะซิโตนต่อน้ำ 1:1 แช่ทิ้งไว้เป็นเวลา 15 นาที แล้วนำเส้นใยที่ได้ไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (Lu, 2013) ดังรูปที่ 17-19



รูปที่ 17 เส้นใยกัญชง



รูปที่ 18 การปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยกัญชงด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์



รูปที่ 19 อบเส้นใยกัญชง

การปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยด้วยสารคู่ควบ

เตรียมสารละลายคู่ควบเข้มข้นที่ปริมาณ 0.5, 1 และ 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเติมลงในสารละลายเอทานอล (ethanol) และน้ำในอัตราส่วน 50v/50v โดยเติมกรดอะซิติก (Acetic acid) ลงไปเพื่อปรับค่า pH ให้อยู่ในช่วง 4-5 นำเส้นใยที่ได้จากการปรับปรุงผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ในวิธีที่ 1 ไปแช่เป็นเวลา 3 ชั่วโมงดังรูปที่ 20 จากนั้นนำเส้นใยที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 6 ชั่วโมง (Fernyhough, 2011) หลังจากนั้นนำเส้นใยมาล้างน้ำให้มีความ pH อยู่ระหว่าง 6-7 เสร็จแล้วนำไปอบอีกครั้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง



รูปที่ 20 การปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยด้วยสารคู่ควบ

การเตรียมวัสดุผสมพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้ว

การเตรียมวัสดุผสมพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วที่ไม่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว

ผสมเม็ดพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) และเส้นใยแก้วที่ไม่มีการปรับปรุงพื้นผิวขนาด 20 มิลลิเมตรในปริมาณ 10, 20, 30, 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อัตราส่วน ดังแสดงในตารางที่ 2 ชั้นแรกเทเม็ดพลาสติก HDPE ระหว่างลูกกลิ้งทั้งสองของเครื่องผสมสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) โดยตั้งอุณหภูมิลูกกลิ้งหน้า 170 องศาเซลเซียส ลูกกลิ้งหลัง 180 องศาเซลเซียส จากนั้นหมุนลูกกลิ้งจนเม็ดเริ่มหลอม แล้วค่อยๆ เติมเส้นใยแก้วลงไปผสมจนหมดและเป็นเนื้อเดียวกัน ดังรูปที่ 21 แล้วนำวัสดุผสมที่ได้ออกมาจากลูกกลิ้งในลักษณะเป็นแผ่น ทิ้งให้เย็นนำไปตัดให้มีขนาดเป็นแผ่นเล็กๆ จากนั้นจะนำวัสดุผสมที่ได้ไปทำการเตรียมชิ้นงานโดยวิธีกดอัด (Compression Molding) ดังรูปที่ 22 โดยใช้แม่พิมพ์แผ่นเรียบ ขนาด 19x19 เซนติเมตร หนา 2 มิลลิเมตร ทาน้ำยาถอดแบบ (silicone oil) บนแม่แบบ ให้ทั่วเพื่อความสะดวกในการถอดชิ้นงาน

ออกจากแม่แบบ จากนั้นเทวัสดุผสมลงในแม่แบบแล้วนำไปขึ้นรูปเป็นแผ่นขึ้นงานด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป ที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส ความดัน 1,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว โดยมีกรให้ความร้อนก่อนการกดอัด 3 นาที จากนั้นทำการกดอัดร้อนเป็นเวลา 5 นาที และกดอัดเย็นอีกครั้งเป็นเวลา 5 นาที จะได้วัสดุผสมเป็นแผ่นสี่เหลี่ยม ดังรูปที่ 23 จากนั้นนำไปตัดเป็นรูปดัมเบลล์ และแท่งสี่เหลี่ยม ดังรูปที่ 24 และ 25 เพื่อนำไปวิเคราะห์สมบัติต่าง ๆ แสดงขั้นตอนการเตรียมวัสดุผสมโดยสรุปดังรูปที่ 26

ตารางที่ 2 อัตราส่วนของวัสดุผสมที่ไม่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว (น้ำหนักรวม 100 กรัม)

ชุดที่	Hemp fiber (g)	HDPE (g)	Materials (g)
1	0	100	100
2	10	90	100
3	20	80	100
4	30	70	100
5	40	60	100
6	50	50	100



รูปที่ 21 การผสมวัสดุผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน



รูปที่ 22 เทวัสดุผสมลงในแม่แบบเพื่อเตรียมชิ้นงาน โดยวิธีการกดอัดขึ้นรูป



รูปที่ 23 วัสดุผสมที่ผ่านการอัดขึ้นรูปแล้ว

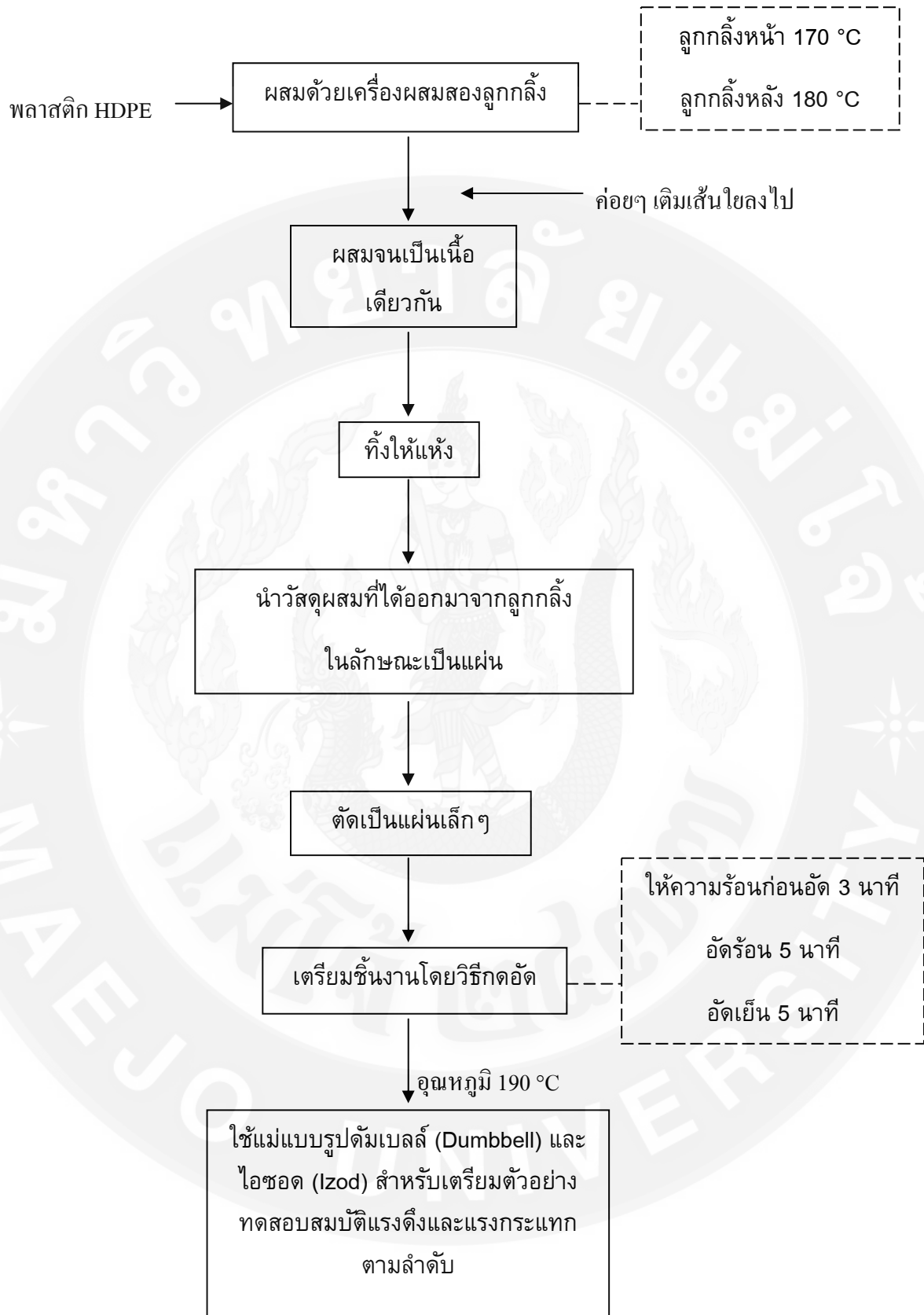


รูปที่ 24 ชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นรูปดัมเบล



รูปที่ 25 ชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยม





รูปที่ 26 แสดงขั้นตอนการเตรียมวัสดุผสม

การเตรียมวัสดุผสมพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงเสริมแรงด้วยเส้นใยกล้วยผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์

ทำการเตรียมวัสดุผสมพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงเสริมแรงด้วยเส้นใยกล้วยผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ขนาดความยาว 20 มิลลิเมตร ปริมาณ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่เลือกใช้อัตราส่วนนี้ เนื่องจากผลจากการทดสอบแรงดึงของวัสดุผสมพบว่า วัสดุผสมพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงเสริมแรงด้วยเส้นใยกล้วยที่ไม่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวที่มีอัตราส่วนผสมของเส้นใยใน ปริมาณ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักมีค่าดีที่สุด จึงนำอัตราส่วนนี้มาทำการผสมวัสดุผสมตามขั้นตอนตามรูปที่ 26 ดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ท่านมา แต่การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงกระแทก จะทำการกดอัดขึ้นรูป โดยใช้แม่พิมพ์แผ่นเรียบ ขนาด 19x19 เซนติเมตร หนา 3 มิลลิเมตร

การเตรียมวัสดุผสมพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงเสริมแรงด้วยเส้นใยกล้วยผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารคู่ควบ

ทำการเตรียมวัสดุผสมพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงเสริมแรงด้วยเส้นใยกล้วยผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารคู่ควบไซเลนที่ขนาดความยาว 20 มิลลิเมตร ปริมาณ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทำการผสมวัสดุผสมตามขั้นตอนตามรูปที่ 26 ดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ท่านมา แต่การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงกระแทก จะทำการกดอัดขึ้นรูป โดยใช้แม่พิมพ์แผ่นเรียบ ขนาด 19x19 เซนติเมตร หนา 3 มิลลิเมตร

การเตรียมวัสดุผสมพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงเสริมแรงด้วยเส้นใยกล้วยที่ไม่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวโดยมีการเติมสารช่วยผสม

ทำการเตรียมวัสดุผสมพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงเสริมแรงด้วยเส้นใยกล้วยผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์โดยมีการเติมสารช่วยผสม คือ พอลิเอทิลีนกราฟท์ มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (PE-g-MA) ตามอัตราส่วนที่ศึกษา คือเส้นใย 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สารช่วยผสม 1, 3, 5, และ 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (โดยน้ำหนักเทียบกับเส้นใย) และทำการขึ้นรูปตามขั้นตอนดังรูปที่ 26 ดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ท่านมา แต่การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงกระแทกจะทำการกดอัดขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์แผ่นเรียบ ขนาด 19x19 เซนติเมตร หนา 3 มิลลิเมตร

การตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันเคมี (Chemical Functional Group)

ตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันเคมีด้วยเครื่อง Fourier Transform-Infra Red Spectroscopy-Microscope (FTIR-Microscope) ทดสอบเส้นใยกล้วยที่ไม่ผ่านการปรับปรุงผิวและเส้นใยที่ผ่านการปรับปรุงผิว ในช่วงเลขคลื่น (wave number) $4000-800 \text{ cm}^{-1}$ Resolution 4 cm^{-1}



รูปที่ 27 เครื่องเครื่อง Fourier Transform-Infra Red Spectroscopy-Microscope
(FTIR-Microscope)

การศึกษาความเป็นผลึกของเส้นใยด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer , XRD

การทดสอบด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน เป็นการทดสอบเพื่อศึกษาวิเคราะห์เกี่ยวกับการเกิดผลึกของวัสดุผสมโดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนและการกระเจิงของรังสีเอกซ์ โดยใช้ผงของเส้นใยกัญชงที่ไม่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวและที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวมาไปรยให้ติดลงบนแผ่นสไลด์ จากนั้นทำการนำเข้าเครื่องเครื่อง X-ray Diffractometer โดยกำหนดให้มุมเริ่มต้นอยู่ที่ 10 ถึง 70 องศา ด้วยอัตรา 2 องศาต่อนาที เมื่อได้ผลการทดลองแล้วนำกราฟผลการทดลองที่ได้มาคำนวณหาความเป็นผลึกของเส้นใยกัญชง จากสมการต่อไปนี้

$$\text{Crystallinity (\%)} = \left[\frac{I_{002} - I_{amp}}{I_{002}} \right] \times 100 \quad (7)$$

โดย

I_{002} คือ ความเข้มสูงสุดของสัณฐานวิทยาที่ระนาบ 002

I_{amp} คือ ความเข้มสูงสุดของสัณฐานวิทยา

การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน

ในการทดสอบหาอุณหภูมิหลอมเหลวของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและวัสดุผสมพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงเสริมแรงด้วยเส้นใยกัญชงทำการทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อน ดังรูปที่ 27 ซึ่งเป็นเครื่องวัดปริมาณพลังงานความร้อนจากการ

เปลี่ยนแปลงทางความร้อนของสารตัวอย่าง โดยสามารถกำหนดช่วง อุณหภูมิการวิเคราะห์และ อัตราการเพิ่มหรือลดอุณหภูมิได้ภายใต้การควบคุมการทำงานด้วยระบบคอมพิวเตอร์

นำพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและวัสดุผสมพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงเสริมแรงด้วย เส้นใยแก้วลงไปลงในถ้วยอะลูมิเนียมประมาณ 3-4 มิลลิกรัม จากนั้นปิดฝาถ้วยอะลูมิเนียมแล้วนำไป เตาสารตัวอย่าง ส่วนเตาสารอ้างอิงให้ใส่ถ้วยอะลูมิเนียมเปล่า ในการทดสอบกำหนดค่าให้อุณหภูมิ เริ่มต้นที่อุณหภูมิห้อง ถึงอุณหภูมิสุดท้าย 700 องศาเซลเซียส ด้วยอัตรา 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน โดยสนใจศึกษาอุณหภูมิการหลอมตัว (melting temperature, T_m) และสามารถหาเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกได้จากสมการ 8

$$\chi = \frac{\Delta H_f}{(1-\phi_p) \times \Delta H_f^0} \times 100 \quad (8)$$

โดย

ΔH_f คือ Heat of Melting ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่ได้จากการทดลอง

ΔH_f^0 คือ Heat of Melting ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงตามทฤษฎี ซึ่งมี
เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกเท่ากับ 100 ($\Delta H_f^0 = 293.6 \text{ J/g}$)



รูปที่ 28 เครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อน

การทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุผสม

การทดสอบความทนแรงดึง

การทดสอบความทนแรงดึงของวัสดุผสมพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้ว ทำการทดสอบโดยใช้เครื่องทดสอบความแข็งแรงของวัสดุ (Universal testing machine) แสดงดังรูป 29 โดยทำการวัด ณ อุณหภูมิห้อง เมื่อมีการดึงเกิดขึ้นชิ้นงานที่ทดสอบจะถูกยืดออก และเกิดการต่อต้านแรงที่กระทำจากคาน ดังนั้นหัววัดแรงที่ติดกับคานจะทำหน้าที่วัดแรง แล้วส่งข้อมูลไปยังหน่วยแสดงผลเป็นตัวเลข และกราฟ ซึ่งควบคุมการทำงานด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป สามารถทดสอบ และแสดงผลของสมบัติความทนแรงดึงของชิ้นงานทดสอบ ชิ้นทดสอบมีความยาวพิกัด (Gauge length: L_0) 60 มิลลิเมตร ทำการวัดความกว้าง และความหนาของชิ้นทดสอบที่หลายๆ ตำแหน่งเพื่อนำค่าไปคำนวณพื้นที่หน้าตัดเริ่มต้น (Cross sectional area: A_0) กำหนดอัตราเร็วในการดึง 30 มิลลิเมตรต่อนาที ใช้หัววัดแรง (Load cell) 2,500 นิวตัน เครื่องจะดึงชิ้นทดสอบจนขาด โปรแกรมสำเร็จรูปจะแสดงผลค่าความทนแรงดึงของชิ้นงานทดสอบ

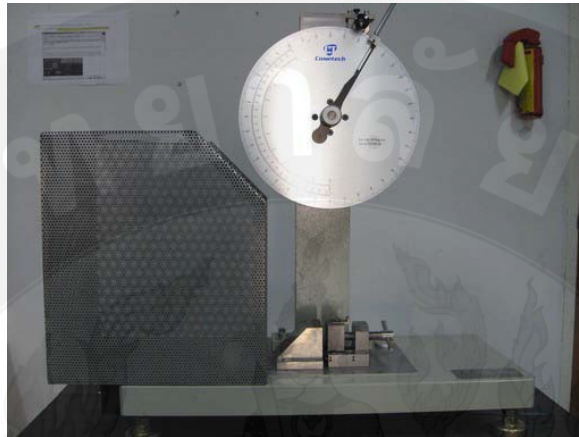


รูปที่ 29 เครื่องทดสอบความทนแรงดึง

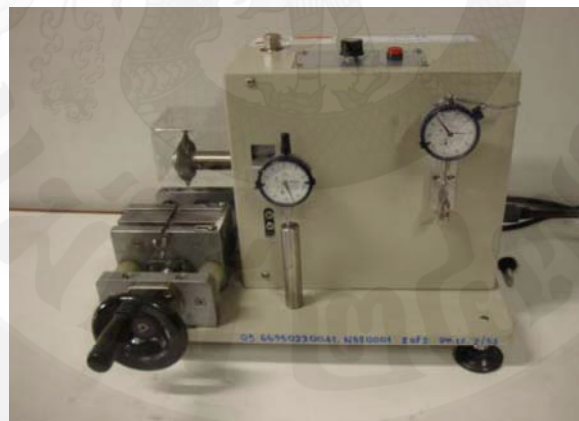
การทดสอบความทนแรงกระแทก

การทดสอบความทนแรงกระแทกเป็นการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D256-81 ทำการทดสอบด้วยเครื่องทนแรงกระแทก (Impact resistance testing machine) ดังรูปที่ 29 โดยใช้ตุ้มน้ำหนักเหวี่ยงกระแทก (Pendulum impact) แบบไอซอด (Izod type) ขนาดของตุ้มน้ำหนักคือ 1 จูล ชิ้นงานที่เตรียมมีความยาว 8 เซนติเมตร กว้าง 1 เซนติเมตร หนา 3 มิลลิเมตร ก่อนการทดสอบทำรอยบากโดยใช้เครื่องทำรอยบาก ดังรูปที่ 31 ด้านข้างที่จุดกึ่งกลางประมาณ 2 มิลลิเมตร จากนั้น

นำไปวัดระยะรอยบากจนถึงขอบ โดยใช้มาตรวัดจากเครื่องทำรอยบากวัดค่าได้เลย ค่าที่ได้ทำการบันทึกไว้เพื่อใช้ในการคำนวณต่อไป



รูปที่ 30 เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทก



รูปที่ 31 เครื่องทำรอยบาก

การทดสอบนี้เป็นการทดสอบความทนแรงกระแทกแบบไอซอด ซึ่งงานทดสอบจะถูกจับยึดให้อยู่ในแนวตั้งในลักษณะของคานยื่น (cantilever) และใช้เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทก (impact resistance testing machine) ที่เป็นแบบค้อนเหวี่ยงกระแทก (pendulum impact) ซึ่งเป็นเครื่องทดสอบที่ได้มาตรฐาน ISO-13802 โดยมีขนาดของหัวเหวี่ยง 1 จูล ในการทดลองจะมีการเหวี่ยงหัวเหวี่ยงสามครั้ง ครั้งแรกจะเหวี่ยงหัวเหวี่ยงให้โคนชิ้นงานบริเวณที่มีรอยบาก ชิ้นงานก็จะ

เกิดการแตกหัก จากนั้นทำการบันทึกค่าเป็นค่าที่หนึ่ง จากนั้นนำเข็มกลับเข้าที่ที่จุดเริ่มต้น แล้วปล่อยหัวเหวี่ยงลงมาเป็นครั้งที่สองแต่คราวนี้ไม่มีชิ้นงานให้เหวี่ยงอากาศ ทำการบันทึกเป็นค่าที่สอง จากนั้นนำหัวเหวี่ยงกลับเข้าที่แต่ไม่ต้องหมุนเข็มกลับ เหวี่ยงหัวเหวี่ยงให้โคนเข็ม และจะเหวี่ยงไปจนกว่าหัวเหวี่ยงไม่สามารถตีโคนเข็มแล้ว ทำการบันทึกค่าที่หัวเหวี่ยงไม่สามารถตีโคนเข็มแล้วเป็นค่าที่สาม จากนั้นนำค่าต่างๆที่ได้จากการวัดไปคำนวณด้วยวิธีมาตรฐาน (standard testing method) ดังสมการ (9) และ (10) ในการทดลองนี้ใช้ชิ้นทดสอบ 5 ชิ้นทดสอบเพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ย

$$I_s = (E_s - E_{tc}) / t \quad (9)$$

$$E_{tc} = \left(E_a - (E_b / 2) \right) (B/A) + E_b / 2 \quad (10)$$

โดย

I_s	คือ ความทนแรงกระแทก (J/m)
t	คือ ความกว้างของชิ้นงาน (m)
E_{tc}	คือ ค่าพลังงานที่ถูกต้อง (correction value)
E_s	คือ ค่าพลังงานที่ได้จากการตีครั้งที่ 1
E_a	คือ ค่าพลังงานที่ได้จากการตีครั้งที่ 2
E_b	คือ ค่าพลังงานที่ได้จากการตีครั้งที่ 3
A	คือ มุมที่ได้จากการตีครั้งที่ 2
B	คือ มุมที่ได้จากการตีครั้งที่ 3

การศึกษาลักษณะพื้นผิวการแตกหักของชิ้นทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

นำเส้นใยถักซึ่งที่ไม่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวและเส้นใยที่ผ่านการปรับปรุงผิว ชิ้นทดสอบที่ผ่านการทดสอบทดสอบความทนแรงดึง มาตัดให้มีขนาดหน้าประมาณ 2-4 มิลลิเมตร จากนั้นนำชิ้นงานมาติดกับแท่นวางตัวอย่างซึ่งทำมาจากทองเหลือง มีลักษณะเป็นแท่งกลม เมื่อทำการติดชิ้นงานเรียบร้อยแล้ว จะนำชิ้นทดสอบที่ติดเรียบร้อยแล้วมาทำการฉาบผิวด้วยสารตัวนำไฟฟ้าจำพวกประเภทโลหะ ในการทดสอบในครั้งนี้ ใช้ทองในการฉาบผิวเพื่อเพิ่มสมบัติการนำไฟฟ้าให้กับชิ้นทดสอบ โดยกระทำภายใต้สภาวะสุญญากาศ ในการศึกษาครั้งนี้จะใช้กำลังการขยายภาพที่ 50, 200, 500 เท่า ดังรูปที่ 32

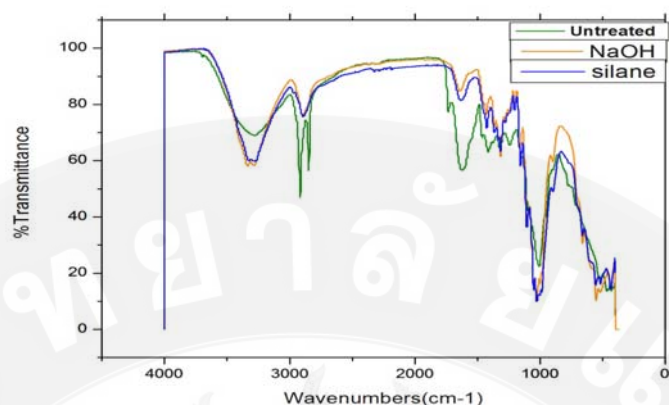


รูปที่ 32 เครื่องทดสอบลักษณะพื้นผิวของเส้นใย

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผลการวิจัย

ผลการศึกษาหมู่ฟังก์ชันเคมีของเส้นใยัญชงที่ไม่ผ่านการปรับปรุงผิว และผ่านการปรับปรุงผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ และสารคู่ควบไซเลน

การศึกษาหมู่ฟังก์ชันทางเคมีของเส้นใยัญชงที่ไม่ผ่านการปรับปรุงผิว และผ่านการปรับปรุงผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ และสารคู่ควบไซเลน แสดงดังรูปที่ 33 พบว่าเส้นใยัญชงที่ไม่ผ่านการปรับสภาพผิว (untreated) แสดงค่าการดูดกลืนแสงบริเวณ 3410 cm^{-1} ซึ่งเป็นค่าการดูดกลืนแสงของหมู่ไฮดรอกซิลของเส้นใย (-OH) และบริเวณ 2916 cm^{-1} เป็นหมู่ C-H และ $1650-1700\text{ cm}^{-1}$ เป็นหมู่ C=O ของหมู่ เฮมิเซลลูโลส (hemicelluloses) และบริเวณ 1450 cm^{-1} เป็นบริเวณของหมู่ C-H จากการปรับสภาพผิวของเส้นใยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ปรากฏว่าพีคบริเวณ 2916 cm^{-1} เป็นหมู่ C-H และ $1650-1700\text{ cm}^{-1}$ เป็นหมู่ C=O ของหมู่ เฮมิเซลลูโลสได้หายไปแสดงว่าการปรับสภาพผิวเส้นใยส่งผลให้สารเฮมิเซลลูโลสซึ่งเคลือบเส้นใยอยู่ได้ถูกกำจัดออกไปซึ่งจะส่งผลให้เส้นใยมีสภาพขั้วที่เกิดจากหมู่ไฮดรอกซิลได้มากขึ้นซึ่งจะส่งผลให้เกิดการยึดเกาะกับเมทริกซ์ได้ดีขึ้น แต่อย่างไรก็ตามเมื่อมีการปรับสภาพผิวด้วยไซเลนกลับไม่พบความเปลี่ยนแปลงของฟังก์ชันของไซเลนได้ชัดเจนนักบริเวณ 2220 cm^{-1} อาจเนื่องมาจากปริมาณไซเลนที่น้อย (1 % โดยน้ำหนัก) เมื่อทำการวิเคราะห์จึงปรากฏผลไม่ชัดเจน



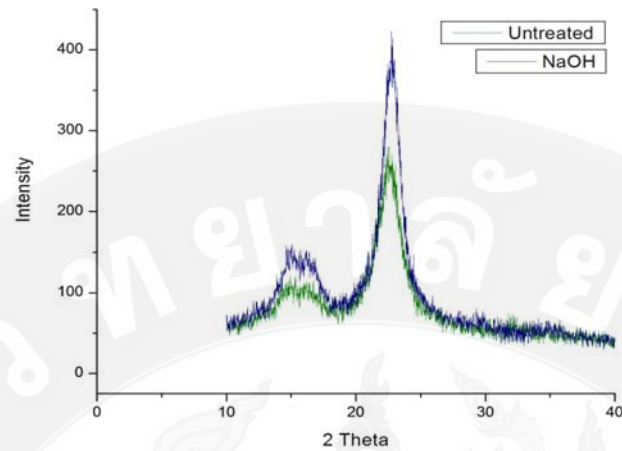
รูปที่ 33 กราฟแสดง FTIR ของเส้นใยกัญชงที่ไม่ผ่านการปรับปรุงผิวและ ที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วย 5 wt% โซเดียมไฮดรอกไซด์ และ 0.5 wt% สารคูควบไซเลน

การศึกษาการเกิดผลึกของเส้นใยกัญชงที่ไม่ผ่านการปรับปรุงผิว และผ่านการปรับปรุงผิว

ในการศึกษาการเกิดผลึกของเส้นใยกัญชงที่ไม่ผ่านการปรับปรุงผิว และผ่านการปรับปรุงผิวด้วยเทคนิค XRD แสดงดังรูปที่ 34 โดยสรุปดัชนีความเป็นผลึกของเส้นใยกัญชงจากสูตรคำนวณสมการที่ 7 ดังแสดงในตารางที่ 3 ผลการทดลองปรากฏว่าเมื่อทำการปรับสภาพเส้นใยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 5 wt% จะทำให้ปริมาณผลึกของเส้นใยเพิ่มขึ้นเกิดจากเส้นใยธรรมชาติปกติจะมีเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสอยู่ร่วมกัน เมื่อทำการกำจัดเฮมิเซลลูโลสออกไปทำให้ปริมาณผลึกของเส้นใยมีค่าเพิ่มขึ้น และทำให้เส้นใยสามารถยึดเกาะกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ได้ดีขึ้นด้วย

ตารางที่ 3 แสดงดัชนีความเป็นผลึกของเส้นใยกัญชง

Sample	% Crystalline
Hemp fiber untreated	65 %
Hemp fiber treated 5 wt% NaOH	70 %



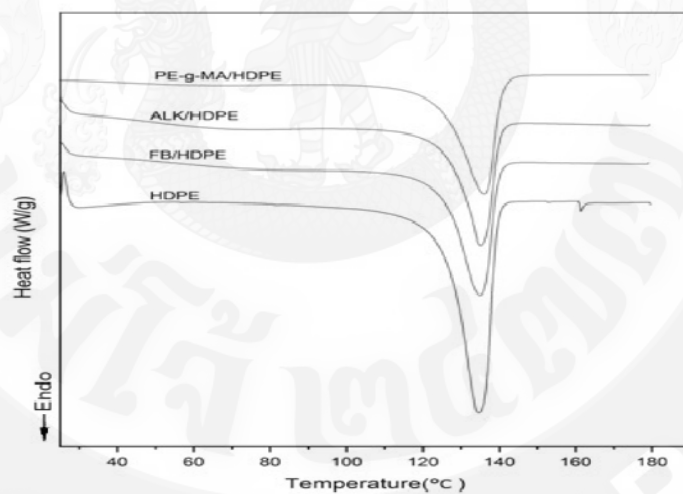
รูปที่ 34 กราฟ XRD แสดงความเป็นผลึกของเส้นใยถักซึ่งที่ไม่ผ่านการปรับปรุงผิว และผ่านการปรับปรุงผิวด้วย 5 wt% โซเดียมไฮดรอกไซด์

ผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของวัสดุผสมพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงเสริมแรงด้วยเส้นใยถัก

ผลการศึกษาอุณหภูมิหลอมเหลวของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและวัสดุผสมพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงเสริมแรงด้วยเส้นใยถักทำการทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนและสามารถหาเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกได้จากสมการ 7 ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4 และ รูปที่ 35 ผลการทดลองปรากฏว่า HDPE ที่ไม่มีสารเติมแต่งจะมีจุดหลอมเหลวอยู่ที่ 135 °C และมีอุณหภูมิก่อผลึกเท่ากับ 116 °C เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุผสมพบว่าจุดหลอมเหลวของวัสดุผสมมีค่าไม่แตกต่างจากเดิม รวมถึงอุณหภูมิก่อผลึกด้วย โดยจุดหลอมเหลวของวัสดุผสมที่เสริมแรงด้วยเส้นใยถัก 40 wt% ที่ปรับปรุงผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 5 wt% จะมีจุดหลอมเหลว และจุดอุณหภูมิก่อผลึกอยู่ที่ 135 และ 117 °C ตามลำดับ แต่พบว่ามีปริมาณผลึกของเมทริกซ์เพิ่มขึ้นเป็น 60 % เนื่องจากอาจมีเส้นใยบางส่วนที่ทำตัวเหมือนเป็นตัวก่อผลึกให้เนื้อเมทริกซ์ แต่อยากไว้ก็สำหรับการปรับปรุงผิวเส้นใยด้วยวิธีอื่นๆ พบว่าปริมาณผลึกของเส้นใยลดลงเนื่องจากเส้นใยจะทำหน้าที่ขัดขวางการเกิดผลึกของเมทริกซ์ซึ่งส่งผลให้เมทริกซ์มีผลึกน้อยลง อาจจะทำให้ความแข็งแรงของวัสดุผสมมีค่าลดลงด้วย

ตารางที่ 4 แสดงพฤติกรรมทางความร้อนของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง และวัสดุผสมพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงเสริมแรงด้วยเส้นใยกล้วยงที่ปริมาณ 40 wt%

Sample	Heating		Cooling		χ_c (%)
	T_m (°C)	ΔH_m (J/g)	T_c (°C)	ΔH_c (J/g)	
Neat HDPE	135	157.74	116	181.32	54.40
40 wt.% (FB/HDPE)	135	105.94	117	124.04	60.13
40 wt.% (ALK/HDPE)	136	91.76	117	108.36	52.08
40 wt.% (3%PE-g-MA/HDPE)	137	94.72	117	109.86	53.76



รูปที่ 35 กราฟแสดงDSC แสดงอุณหภูมิหลอมเหลวของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง และวัสดุผสมพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงเสริมแรงด้วยเส้นใยกล้วยงที่ปริมาณ 40 wt%

ผลการทดสอบสมบัติความทนแรงดึง

การทดสอบสมบัติความทนแรงดึงของวัสดุผสมพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงเสริมแรงด้วยเส้นใยกล้วย จะทดสอบโดยใช้เครื่องทดสอบความแข็งแรงของวัสดุ (Universal testing machine) โดยผลที่ได้ดังนี้

ผลการทดสอบสมบัติความทนแรงดึงของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง และวัสดุผสมพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงเสริมแรงด้วยเส้นใยกล้วยที่ไม่ผ่านการปรับปรุงผิว

ผลการทดสอบสมบัติความทนแรงดึงของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง และวัสดุผสมพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงเสริมแรงด้วยเส้นใยกล้วยที่ไม่ผ่านการปรับปรุงผิว โดยในการทดลองนี้ ได้ทำการปรับปริมาณเส้นใยกล้วยที่ใช้ในการเสริมแรงวัสดุผสมเท่ากับ 5-50 wt% แสดงดังตารางที่ 5 จากผลการทดลองพบว่าค่ามอดุลัสของยังของวัสดุผสมเส้นใยกล้วย 0, 5, 10, 20, 30, 40 และ 50 wt% มีค่าเท่ากับ 326, 330, 340, 396, 436, 515 และ 518 ตามลำดับซึ่งพบว่ายิ่งเพิ่มปริมาณเส้นใยมากขึ้นเท่าไรจะให้ความแข็งแรงของวัสดุผสมเพิ่มมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามความแข็งแรงของวัสดุผสมเริ่มคงที่เมื่อปริมาณเส้นใยเท่ากับ 40 wt% โดยในการทดลองอื่นๆ เราจะทำการเลือกอัตราส่วนนี้ในการทำการทดลองต่อไป โดยความแข็งแรงของวัสดุผสมที่เพิ่มขึ้นเกิดการการที่เส้นใยสามารถรับแรงกระทำที่ส่งผ่านเมทริกซ์มาได้ดี

ตารางที่ 5 แสดงสมบัติความทนแรงดึงของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง และวัสดุผสมพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงเสริมแรงด้วยเส้นใยกล้วยที่ปริมาณ 5-50 wt%

Sample	Tensile (MPa)	Young' Modulus (MPa)	Elongation at break (%)
Neat HDPE	21.16	336.61	240.61
5 wt.% FB/HDPE	17.66	320.74	10.95
10 wt.% FB/HDPE	17.54	340.70	11.06
20 wt.% FB/HDPE	15.75	396.30	8.00
30 wt.% FB/HDPE	14.87	436.06	6.42
40 wt.% FB/HDPE	11.50	515.53	4.63
50 wt.% FB/HDPE	9.84	518.72	5.23

ผลการทดสอบสมบัติความทนแรงดึงของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง และวัสดุผสมพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงเสริมแรงด้วย 40 wt% ของเส้นใยถั่วงูซึ่งผ่านการปรับปรุงผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์

ผลการทดลองการศึกษาผลของการปรับปรุงผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ แสดงดังตารางที่ 6 โดยในการทดลองจะมีใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ในการกำจัดเฮมิเซลลูโลสซึ่งจากผลการทดลอง FTIR พบว่าเฮมิเซลลูโลสสามารถโดนกำจัดได้จริง อย่างไรก็ตามการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์อาจส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุผสมทำให้ได้ความแข็งแรงที่เปลี่ยนไปในทางที่ลดลงจึงต้องทำการหาปริมาณของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหมาะสมในการทดลอง จากผลการทดลองพบว่าค่ามอดูลัสของยังของวัสดุผสมที่เสริมแรงเส้นใยที่ปรับสภาพผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ลดลงเหลือ 455 MPa เมื่อเทียบกับวัสดุผสมที่เสริมแรงด้วยเส้นใยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพผิวซึ่งมีค่า 515 MPa เป็นผลมาจากการที่เส้นใยถูกโซเดียมไฮดรอกไซด์จำกัดลิกนินไปแค่บางส่วนส่งผลให้การยึดเกาะของเมทริกซ์และเส้นใยมีค่าน้อยลง แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็น 7.5 และ 10 wt% ค่ามอดูลัสของเส้นใยลดลงเป็น 514 และ 422 ตามลำดับ ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการที่ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์มีค่ามากเกินไปทำให้เส้นใยนอกจากจะถูกกำจัดเฮมิเซลลูโลสแล้วอาจเกิดการกักตัวของเซลลูโลสด้วยดังนั้นในการทดลองนี้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหมาะสมคือ 5 wt% เพราะทำให้ได้ค่ามอดูลัสสูงที่สุดเท่ากับ 614.9 MPa

ตารางที่ 6 แสดงสมบัติความทนแรงดึงของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง และวัสดุผสมพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงเสริมแรงด้วยเส้นใยถั่วงูซึ่งผ่านการปรับปรุงผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ในปริมาณต่างๆ

Sample	Tensile strength (MPa)	Young's Modulus (MPa)	Elongation at break (%)
Neat HDPE	21.16	336.61	240.61
40 wt.% (FB/HDPE)	11.50	515.53	4.63
40 wt.% (2.5wt%NaOH/HDPE)	12.27	455.02	78.74
40 wt.% (5wt%NaOH /HDPE)	10.09	614.94	201.36
40 wt.% (7.5wt%NaOH /HDPE)	11.04	514.46	66.44
40 wt.% (10wt%NaOH /HDPE)	11.81	422.42	70.65

ผลการทดสอบสมบัติความทนแรงดึงของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง และวัสดุผสมพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงเสริมแรงด้วย 40 wt% ของเส้นใยแก้วซึ่งผ่านการปรับปรุงผิวด้วย โซเดียมไฮดรอกไซด์และสารคู่ควบไซเลน

จากการปรับสภาพผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ทำให้เส้นใยมีปริมาณหมู่ไฮดรอกซิลเพิ่มขึ้นซึ่งหมู่ไฮดรอกซิลจะเป็นหมู่ฟังก์ชันที่ชอบน้ำแต่อย่างไรก็ตามพอลิเอทิลีนเป็นพอลิเมอร์ที่มีสภาพขี้แบบไม่ชอบน้ำดังนั้นจึงได้ทำการปรับสภาพผิวของเส้นใยด้วยสารคู่ควบไซเลนเพื่อทำให้ผิวของเส้นใยมีสภาพไม่ชอบน้ำและสามารถยึดเกาะกับผิวของเมทริกซ์ได้ดีซึ่งผลการทดลองจะแสดงดังตารางที่ 7 จากการทดลองพบว่าเมื่อปรับสภาพผิวของเส้นใยด้วยไซเลน 0.5, 1 และ 3 wt% ค่ามอดูลัสของยังของวัสดุผสมเพิ่มขึ้นเป็น 464, 550 และ 661 ตามลำดับ โดยพบว่าที่ 0.5 wt% ของไซเลนค่ามอดูลัสของยังมีค่าน้อยอาจเป็นเพราะหมู่ฟังก์ชันของไซเลนมีน้อยเกินไปไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ทั้งหมดของผิวของเส้นใยแต่เมื่อปริมาณไซเลนเพิ่มขึ้นเป็น 1 และ 3 wt% พบว่าค่ามอดูลัสของยังเพิ่มขึ้นแสดงให้เห็นว่าเส้นใยและเมทริกซ์มีการยึดเกาะกันได้ดีแต่อย่างไรก็ตามไม่ได้ทำการทดลองต่อที่ปริมาณไซเลนสูงๆ เนื่องจากราคาไซเลนสูงมากถ้าใช้ในปริมาณมากก็ไม่เหมาะกับการนำไปประยุกต์ใช้งาน

ตารางที่ 7 แสดงสมบัติความทนแรงดึงของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง และวัสดุผสมพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วซึ่งผ่านการปรับปรุงผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารคู่ควบไซเลนในปริมาณต่างๆ

Sample	Tensile strength (MPa)	Young's Modulus (MPa)	Elongation at break (%)
Neat HDPE	21.16	336.61	240.61
40 wt.% (FB/HDPE)	11.50	515.53	4.63
40 wt.% (0.5wt%Silane/HDPE)	14.83	464.49	5.14
40 wt.% (1wt%Silane /HDPE)	12.98	550.33	6.38
40 wt.% (3wt%Silane /HDPE)	10.90	661.96	5.21

ผลของวัสดุผสมพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงเสริมแรงด้วยเส้นใยกล้วยที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์โดยมีการเติมสารช่วยผสม พอลิเอทิลีนกราฟท์มาเลอิกแอน-ไฮดรารด์ (PE-g-MA)

จากการปรับสภาพผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ทำให้เส้นใยมีปริมาณหมู่ไฮดรอกซิลเพิ่มขึ้นซึ่งหมู่ไฮดรอกซิลจะเป็นหมู่ฟังก์ชันที่ชอบน้ำแต่อย่างไรก็ตามพอลิเอทิลีนเป็นพอลิเมอร์ที่มีสภาพขี้แบบไม่ชอบน้ำ การเติมสารช่วยผสมที่มีความสามารถในการยึดเกาะกับเส้นใยและยึดเกาะกับเมทริกซ์ได้ดีจะส่งให้ค่าสมบัติเชิงกลเพิ่มขึ้นได้ โดยในการทดลองนี้จะใช้ PE-g-MA เป็นสารช่วยผสมและผลการทดลอง แสดงดังตารางที่ 8 พบว่าแนวโน้มของค่ามอดูลัสของยังของวัสดุผสมมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณสารช่วยผสมและค่าจะลดลงเมื่อปริมาณของสารช่วยผสมสูงสุดโดยค่ามอดูลัสของยังของวัสดุผสมที่ใช้สารช่วยผสมในปริมาณ 1, 3, 5 และ 7.5 wt% มีค่ามอดูลัสของยังเท่ากับ 474, 608, 665 และ 434 MPa ตามลำดับ การที่ค่ามอดูลัสของยังลดลงอาจเกิดจากปริมาณของสารช่วยผสมมีมากเกินไปซึ่งสารช่วยผสมจะมีความแข็งแรงน้อยกว่าเส้นใยและเมทริกซ์การใช้สารช่วยผสมมากเกินไปจะทำให้วัสดุผสมมีความสามารถในการรับแรงกระทำได้น้อยลง

ตารางที่ 8 แสดงสมบัติความทนแรงดึงของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง และวัสดุผสมพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงเสริมแรงด้วยเส้นใยกล้วยที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์โดยมีการเติมสารช่วยผสม พอลิเอทิลีนกราฟท์มาเลอิกแอน-ไฮดรารด์ (PE-g-MA)

Sample	Tensile strength (MPa)	Young's Modulus (MPa)	Elongation at break (%)
Neat HDPE	21.16	336.61	240.61
40 wt.% (FB/HDPE)	11.50	515.53	4.63
40 wt.% (1wt%PE-g-MA/HDPE)	13.34	474.49	4.33
40 wt.% (3wt%PE-g-MA/HDPE)	15.10	608.35	5.50
40 wt.% (5wt%PE-g-MA/HDPE)	12.74	665.83	4.68
40 wt.% (7.5wt%PE-g-MA/HDPE)	12.38	434.38	4.72

ผลการทดสอบสมบัติความทนแรงกระแทก

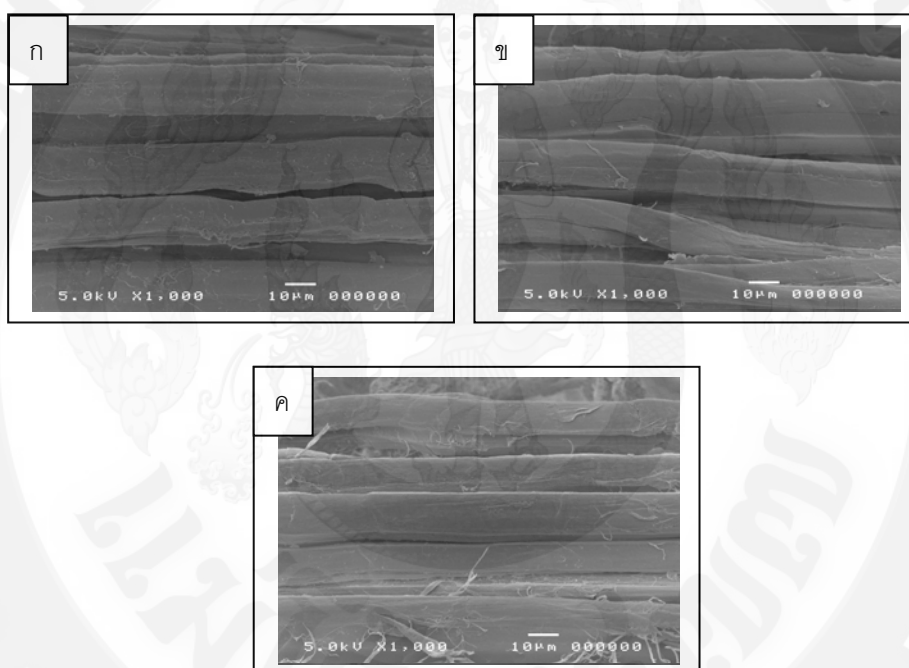
จากผลการทดลองสมบัติความทนแรงดึงของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง และวัสดุผสมด้วยเส้นใยที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกระบวนการทางเคมี หรือการใช้สารช่วยผสมพบว่าสมบัติความทนแรงดึงของวัสดุผสมมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ 5 wt% การปรับสภาพผิวด้วยไซเลน 3 wt% และการใช้สารช่วยผสม PE-g-Ma wt% จากผลการทดลองได้นำวัสดุผสมที่เตรียมได้มาทำการทดลองหาความทนแรงกระแทกเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในแปรรูปวัสดุผสมเป็นวัสดุสำหรับผลิตภัณฑ์ประเภทที่ 2 เช่น ถังพลาสติก ฐานรองพลาสติกสำหรับรองรับสินค้าซึ่งพบว่าวัสดุผสมพอลิเอทิลีนที่เสริมแรงด้วยเส้นใยกล้วยงมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นสามารถรับแรงกระแทกได้ดีกว่าเดิมมากกว่า 50 % โดย พอลิเอทิลีนสามารถรับแรงกระแทกได้ 57 J/m สำหรับวัสดุผสมด้วยเส้นใยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพผิวมีค่า 2140 J/m และวัสดุผสมด้วยเส้นใยที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ และไซเลน มีค่า 214, 193 J/m สำหรับวัสดุผสมที่ใช้สารช่วยผสมค่าความทนแรงกระแทกเพิ่มขึ้นไม่มากนักคือ 98 J/m เนื่องจากสารช่วยผสมสามารถเกิดความเสียหายได้ง่ายทำให้วัสดุเกิดการแตกหักได้ง่าย

ตารางที่ 9 ตารางแสดงค่าสมบัติความทนแรงกระแทกของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง และวัสดุผสมพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงเสริมแรงด้วยเส้นใยกล้วยงที่ไม่ผ่านการปรับปรุงผิว และผ่านการปรับปรุงพื้นผิว

Sample	Impact Strength		Impact Strength	
	KJ/(m ²)		J/m	
	Average	STDV.	Average	STDV.
HDPE	6.83	1.4	57.51	9.1
40 wt % Hemp	14.53	8.2	110.12	77.2
5 wt % NaOH	25.90	1.9	214.48	19.1
3 wt % Silane	24.05	10.0	193.80	81.3
5 wt % PE-g-Ma	11.81	2.8	98.42	19.2

ผลการศึกษาลักษณะพื้นผิวของเส้นใยกล้วยง และวัสดุผสมพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงเสริมแรงด้วยเส้นใยกล้วยงที่ไม่ผ่านการปรับปรุงผิวและผ่านการปรับปรุงพื้นผิว

การศึกษาลักษณะพื้นผิวของเส้นใยกล้วยงที่ไม่ผ่านการปรับสภาพผิวทางเคมี รูปที่ 36 (ก) พบว่าเส้นใยจะมีลักษณะขรุขระซึ่งเกิดจากการที่เส้นใยมีปริมาณของเฮมิเซลลูโลสอยู่ และเกิดจากการฉีกขาดของเส้นใยระหว่างกระบวนการผลิต สำหรับเส้นใยที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพผิว พบว่าผิวของเส้นใยมีความเรียบมากขึ้น และสะอาดขึ้นเนื่องจากโซเดียมไฮดรอกไซด์ถูกกำจัดล้างสกรปรก และเฮมิเซลลูโลสออกไป

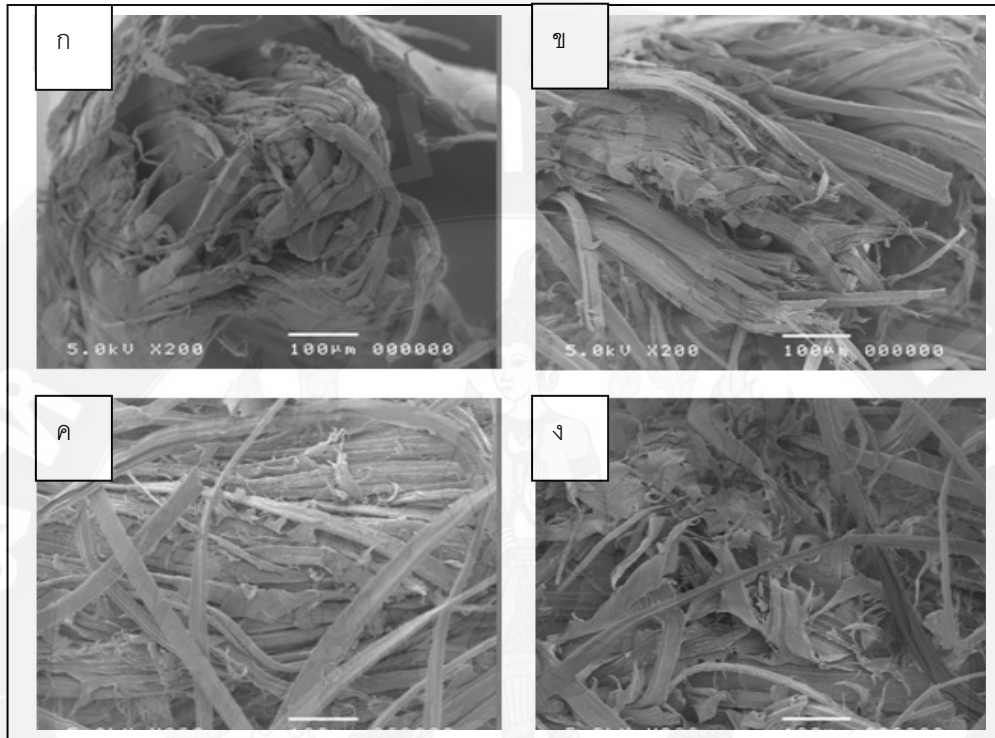


รูปที่ 36 แสดงภาพ SEM ลักษณะพื้นผิวของเส้นใยกล้วยง (ก) ไม่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว (ข) ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วย 5 wt% NaOH (ค) ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยไซเลน 0.5 wt%

การศึกษาลักษณะการแตกหักของวัสดุผสม

ผลการศึกษาลักษณะการแตกหักของวัสดุผสมพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงเสริมแรงด้วยเส้นใยกล้วยงที่ไม่ผ่านการปรับปรุงผิวและผ่านการปรับปรุงพื้นผิว จากภาพ SEM ที่กำลังขยาย 200 เท่า ดังรูปที่ 37 พบว่าพบว่าการแตกหักของเส้นใยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพผิวและผ่านการปรับสภาพผิวมีสภาพการฉีกขาดของเส้นใยเมื่อถูกแรงดึงจากการทดสอบแรงดึง นอกจากนี้ยังเห็นเมท

ริกซ์ พอลิเอทิลีนมีการยึดเกาะกับผิวของเส้นใยซึ่งบ่งบอกว่าวัสดุผสมมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเพราะมีการถ่ายโอนแรงกระทำจากเมทริกซ์ไปสู่เส้นใยได้ดี



รูปที่ 37 แสดงภาพ SEM ของ (ก) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (ข) วัสดุผสมพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงเสริมแรงด้วยเส้นใยกล้วยงที่ไม่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วย 5 wt% NaOH (ค) วัสดุผสมพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงเสริมแรงด้วยเส้นใยกล้วยงที่ไม่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วย 0.5 wt% Silane และ (ง) วัสดุผสมพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงเสริมแรงด้วยเส้นใยกล้วยงที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วย NaOH และมีการเติมสารช่วยผสม 5 wt% PE-g-MA

สรุปผลการวิจัย

จากผลการวิจัยเรื่องวัสดุคอมโพสิตด้วยเส้นใยธรรมชาติสำหรับการใช้งานด้านบรรจุภัณฑ์ เป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการวิจัยดังนี้

1. สามารถเตรียมวัสดุผสมพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงโดยใช้เส้นใยธรรมชาติ(เส้นใยกล้วย) ในปริมาณ 40 wt% ซึ่งทำให้วัสดุผสมที่เตรียมได้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น โดยค่ามอดูลัสของยังเพิ่มขึ้น 53 % โดยวัสดุผสมมีค่ามอดูลัสเท่ากับ 515.53 MPa
2. สามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลของวัสดุผสมพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงโดยใช้เส้นใยธรรมชาติ(เส้นใยกล้วย) ในปริมาณ 40 wt% โดยการปรับสภาพผิวของเส้นใยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 5 wt% ทำให้ค่ามอดูลัสเท่ากับ 614.94 MPa และปรับสภาพผิวด้วยไซเลน 3 wt% ทำให้ค่ามอดูลัสเท่ากับ 614.94 MPa 661.96 MPa และใช้สารช่วยกระจายตัว 5 wt% ทำให้ค่ามอดูลัสเท่ากับ 665.83 MPa
3. ได้เผยแพร่ผลการวิจัยด้วยการนำเสนอในที่ประชุมวิชาการระดับนานาชาติ

จากผลการวิจัยควรมีการปรับปรุงการทดลองโดยการใช้เวลาในการปรับสภาพผิวของเส้นใยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ด้วยระยะเวลาที่แตกต่างกัน และการเลือกใช้เส้นใยหลากหลายชนิดเพื่อเพิ่มมูลค่าของเส้นใยที่เป็นผลผลิตพลอยได้ทางการเกษตร และการเลือกใช้ชนิดของไซเลน และสารช่วยกระจายตัวให้หลากหลายชนิดมากกว่านี้ ซึ่งกระบวนการศึกษาเพิ่มเติมเหล่านี้ ไม่ได้ทำต่อในงานวิจัยนี้เนื่องด้วยเวลาในการทำวิจัยเรื่องวัสดุคอมโพสิตด้วยเส้นใยธรรมชาติสำหรับการใช้งานด้านบรรจุภัณฑ์นี้ใช้เวลานานเกือบ 1 ปี แล้ว หากต้องทำการทดลองในส่วนดังกล่าวเพิ่มเติมต้องใช้เวลานาน จึงขอเป็นข้อเสนอแนะเพื่อเป็นองค์ความรู้ใหม่ที่สามารถนำไปพัฒนาแนวทางการวิจัยอื่นๆและเพื่อเสริมองค์ความรู้เดิมที่มีอยู่ต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- กอบวุดดี รุจจินากุล. 2549. การวิเคราะห์ของแข็งเชิงฟิสิกส์. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่: เชียงใหม่.
- กวี หวังนิเวศน์กุล. 2554. วัสดุวิศวกรรม. สำนักพิมพ์ซีเอ็ดยูเคชั่น. กรุงเทพฯ: 384 น.
- ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ. 2549. วัสดุวิศวกรรม. สำนักพิมพ์ซีเอ็ดยูเคชั่นซ. กรุงเทพฯ. 548 น.
- ธีรพงษ์ วงศ์ชนะไพบุลย์. 2556. เคมีพอลิเมอร์. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย: กรุงเทพฯ. 274 น.
- นิทัศน์ จิระอรุณ. 2540. วัสดุพอลิเมอร์. คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่: เชียงใหม่.
- นวลแข ปาลิวนิช. 2542. ความรู้เรื่องผ้าและเส้นใย. บริษัท ซีเอ็ด ยูเคชั่น จำกัด (มหาชน): กรุงเทพฯ. 352 น.
- บรรเลง ศรีนิล. 2533. เทคโนโลยีพลาสติก. พิมพ์ครั้งที่ 6. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี. กรุงเทพฯ. 230 น.
- พิชิต เลี่ยมพิพัฒน์. 2542. พลาสติก. พิมพ์ครั้งที่ 15. สำนักพิมพ์สัมพันธ์พาณิชย์: กรุงเทพฯ. 311 น.
- วิลเลียมส์ ดี คาลิสเตอร์ เจ อาร์. 2548. วัสดุศาสตร์และวิศวกรรมวัสดุพื้นฐาน : Materials Science and Engineering. ท็อป จำกัด: กรุงเทพฯ. 752 น.
- เสกศักดิ์ อัสวะวิสิทธิ์ชัย. 2550. Tensile Test. โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย: กรุงเทพฯ. 98 น.
- ลิลลี่ กาวีตะ จูติวรา เติ้งหลวงมยุพดี เผ่าพันธุ์ กมรินทร์ พรหมรัตน์รักษ์ มาลี ณ นคร ศรีสมสุวรรณวงศ์ วีระชัย ณ นคร และ สุริยา ตันติวิวัฒน์, 2544. พืชเส้นใย กล้วยง **Fiber Crop: hemp (Cannabis sativa L var. sativa)**. จาก http://www.rdi.ku.ac.th/kufair50/plant/43_plant/43_plant.html [23 มิถุนายน 2556].
- Brahmakumar, M., C. Pavithran and R.M. Pillai. 2005. Coconut fibre reinforced polyethylene composites: effect of natural waxy surface layer of the fibre on fibre/matrix interfacial bonding and strength of composites. **Comp Sci and Tech.** 65: 563–569.
- Brian C. Smith. 2011. **Fundamentals of Fourier Transform Infrared Spectroscopy, Second Edition.** CRC Press. New York. 194 p.
- Chand, N. and M. Fahim. 2008. **Tribology of Natural Fiber Polymer Composites, 1st Ed.** Woodhead Publishing Limited: England. 220 p.
- Davis, G. and J.H. Song. 2006. Biodegradable packaging based on raw materials from crops and their impact on waste management. **Indus Crops and Prod.** 23: 147-161.

- Dhakal, H.N., Z.Y. Zhang and M.O.W. Richardson. 2007. Effect of water absorption on the mechanical properties of hemp fibre reinforced unsaturated polyester composites, **Comp Sci and Tech** 67: 1674–1683
- Franco, P.J.H. and A.V. Gonzalez. 2004. Mechanical properties of continuous natural fibre - reinforced polymer composites, **Comp**, 35: 339–345.
- Fernyhough, A., K.L. Pickering and M. A. Sawpan. 2011. Effect of various chemical treatments on the fibre structure and tensile properties of industrial hemp fibres, **Comp A**. 42: 888–895.
- Fu, S.Y., B. Lauke, E. Mader, C.Y. Yue and X. Hu. 2000. Tensile properties of short-glass-fiber- and short-carbon-fiber-reinforced polypropylene composites. **Comp A**. 31: 1117-1125.
- James Gordon Cook. 1984. **Man Made Fibers**. Cornell University: New York. 723 p.
- Karger, K.J., T. Harmia and T. Czighnyb. 1995. Comparison of the Fracture and Failure Behavior of Polypropylene Composites Reinforced by Long Glass Fibers and by Glass MaTs. **Comp Sci and Tech** 54: 287-298.
- Lu, N. and S. Oza. 2013. Thermal stability and thermo-mechanical properties of hemp-high density polyethylene composites: Effect of two different chemical modifications, **Comp B**. 44: 484–490.
- Pracella, M., D. Chionna, I. Anguillesi, Z. Kulinski, E. Piorkowska. 2006. Functionalization, compatibilization and properties of polypropylene composites with Hemp fibres. **Comp Sci and Tech**. 66: 2218–2230.
- Placet, V. 2006. Characterization of the thermo-mechanical behaviour of Hemp fibres intended for the manufacturing of high performance composites, **Comp**, 40: 1111-1118.
- Sapalidis, A. A., F. K. Katsaros, G. E. Romanos, N. K. Kakizis and N. K. Kanellopoulos. 2007. Preparation and characterization of novel poly-(vinyl alcohol)–Zostera flakes composites for packaging applications. **Comp B**. 38: 398-404.
- Xie, Y., C.A.S. Hill, Z. Xiao, H. Militz and C. Mai. 2010. Silane coupling agents used for natural fiber/polymer composites, **Comp**. 41: 806–819.