

การศึกษาไม้พลาสติกคอมโพสิตจากกากเส้นใยสับปรดจากโรงงานน้ำผลไม้

Study of Wood Plastic Composites (WPC) made from Pineapple Fiber
Residue from Juice Industry



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2555

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Study of Wood Plastic Composites (WPC) made from Pineapple Fiber
Residue from Juice Industry**



**A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIRMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE**

IN ENVIRONMENTAL CHEMISTRY

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2012

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การศึกษาไม้พลาสติกคอมโพสิตจากกากเส้นใยสับประด
จากโรงงานน้ำผลไม้

Study of Wood Plastic Composites (WPC) made from
Pineapple Fiber Residue from Juice Industry

ชื่อนักศึกษา นางสาวชุรีพร แก้วเจริญ

นายชนศักดิ์ อ้วนนวล

นางสาวสุวเพ็ญ เครือวงศ์

ปริญญา วิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชา เคมีสิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษา อ.กมลีนสุคนธ์ สุวรรณรัตน์

รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมี
สิ่งแวดล้อม ประจำปีการศึกษา 2555

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลธิ	
อ.ปัทมา ลีพหาวงศ์	
รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด	
อ.กมลีนสุคนธ์ สุวรรณรัตน์	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การศึกษาไม้พลาสติกคอมโพสิตจากกากเส้นใยสับประรด
จากโรงงานน้ำผลไม้

ชื่อนักศึกษา นางสาวสุรีพร แก้วเจริญ
นายชนศักดิ์ อ้วนนวล
นางสาวสุวเพ็ญ เครือวงศ์

ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต

สาขาวิชา เคมีสิ่งแวดล้อม

ปีการศึกษา 2555

อาจารย์ที่ปรึกษา อ.กลินสุคนธ์ สุวรรณรัตน์
รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ สนใจศึกษาไม้พลาสติกคอมโพสิต (Wood Plastic Composites; WPCs) ที่ผลิตจากกากเส้นใยสับประรดจากโรงงานน้ำผลไม้ และ พลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene; HDPE) ในการศึกษาที่ใช้กากเส้นใยสับประรด 2 เกรด คือ เกรด PFF (กากเส้นใยสับประรดจากกระบวนการผลิตโดยตรง ใช้ขนาด 12 mesh ลงไป) และ เกรด HP (กากเส้นใยสับประรดที่ผ่านกระบวนการสกัดด้วยแอลกอฮอล์จากโรงงานน้ำผลไม้ ใช้ขนาด 20 mesh ลงไป) ทำการศึกษาแยกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรก การปรับปรุงกากเส้นใยเกรด HP ด้วยการต้ม น้ำที่ระยะเวลา 0-3 ชั่วโมง และ การต้มด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 5, 10 และ 15 % (ระยะเวลา 2 ชั่วโมง) พบว่า พบน้ำตาลในน้ำต้มสกัดจากการปรับปรุงกากเส้นใย ด้วยการต้มน้ำ อย่างไรก็ตาม การปรับปรุงด้วยการต้มน้ำที่ระยะเวลา 1, 2 และ 3 ชั่วโมง และด้วยการต้มสารละลาย NaOH ปริมาณน้ำตาลรวม และสถานะทางวิทยาของเส้นใย จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) ไม่มีความแตกต่างกันกัน อย่างมีนัยสำคัญ การศึกษาส่วนที่สอง ศึกษาผลของกากเส้นใยใน WPCs โดย WPCs ถูกผสม เป็นสารผสมด้วยเครื่องผสมชนิดเกลียวหนอนคู่ (Twin-screw extruder) และ ขึ้นรูปด้วย เครื่องฉีดขึ้นรูป (Injection molding) การศึกษาผลของการเติมสารช่วยผสม พอลิเอทิลีน กราฟท์มาลิกอิกแอนไฮไดรด์ (Polyethylene grafted Maleic Anhydride; PE-g-MA) พบว่า สมบัติเชิงกลโดยรวมของ WPCs มีสมบัติดีขึ้น ภาพจากเครื่อง SEM แสดงให้เห็นการยึดเกาะที่ดีขึ้นของกากเส้นใย กับ วัสดุภาค HDPE การศึกษาสมบัติของ WPCs ที่ผลิตจากกากเส้นใยที่ปรับปรุง ด้วยการต้มน้ำ และต้ม NaOH พบว่า สมบัติเชิงกลโดยรวมมีค่าใกล้เคียงกัน การศึกษาอัตราส่วน

ผสมกากเส้นใยใน WPCs (ผสมกากเส้นใย 20-50%) เมื่อเพิ่มกากเส้นใยมากขึ้น สมบัติเชิงกล มีแนวโน้มลดลง ภาพจากเครื่อง SEM แสดงให้เห็นการกระจายตัวที่ต่ำลง การศึกษาชนิดของ กากเส้นใย (เกรด PFF และ เกรด HP) พบว่า สมบัติเชิงกลโดยรวมของ WPCs จากกากเส้นใย เกรด HP มีค่าดีกว่า WPCs จากกากเส้นใยเกรด PFF ส่วนการศึกษาด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) พบว่า อุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) อุณหภูมิตกผลึก (T_c) และ ความเป็นผลึก (เปอร์เซ็นต์ X_c) ของ WPCs ทุกสูตร ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

คำสำคัญ : ไม้พลาสติกคอมโพสิต, กากเส้นใยสับปะรด



Title	Study of Wood Plastic Composites (WPC) made from Pineapple Fiber Residue from Juice Industry
Students	Miss Chureeporn Kaewcharoen Mr.Thanasak Uannual Miss Suwapen Khreawong
Degree	Bachelor of Science
Major Program	Environmental Chemistry
Academic Year	2012
Advisor	Glinsukol Suwannarat Assoc.Prof.Dr.Ittipol Jangchud

ABSTRACT

This research focused on Wood-Plastic Composites (WPCs) produced from pineapple fiber residue from juice industry and High Density Polyethylene (HDPE). Two grades of Pineapple fiber residues were used in this work, i.e., PFF (12 mesh ground from as-recieved fibers) and HP (20 mesh alcohol extracted by the juice company). The work was divided into two parts. First, HP fibers were treated by boiling water (0-3 hr) and NaOH 5, 10, and 15 % (2 hr). It was found that fibers treated by boiling water had less sugar content. However, no significant change in total sugar and fiber morphology by Scanning Electron Microscope (SEM) were detected in 1, 2, and 3 hr treatment. The second part involved effects of the fibers on WPCs properties. WPCs samples was compounded by a twin-screw extruder and then shaped by an injection molding machine. By adding a polyethylene grafted maleic anhydride (PE-g-MA) compatibilizer, mechanical properties of WPCs were improved. As revealed by SEM micrographs, interfacial bonding of the fibers and HDPE matraix was also improved. It was found that WPCs made from both boiling water and NaOH treated fibers showed similar mechanical properties. By studying %fiber loading (20-50%), it was found that mechanical properties of WPCs were deteriorated as the fiber loading was increased. As expected, SEM micrographs revealed voids and poor fiber dispersion as % fiber loading was increased. By studying the types of the fibers (HP vs. PFF), overall mechanical properties of WPCs made from HP were better than those made from PFF. In Differential Scanning Calorimeter (DSC)

study, it was revealed that melting temperature (T_m), crystallization temperature (T_c) and percentage of crystallinity (% X_c) of all WPCs were insignificantly different.

Keywords : Wood Plastic Composites, Pineapple fiber



กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษเล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากผู้จัดทำได้รับความช่วยเหลือจากบุคคลผู้มีพระคุณหลายท่าน ดังนี้

ขอขอบพระคุณ อ.กติน์สุคนธ์ สุวรรณรัตน์และรศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด อาจารย์ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษที่ได้ให้คำแนะนำ ให้คำปรึกษาอย่างใกล้ชิด และเสนอแนะแนวทางแก้ปัญหา รวมทั้งตรวจแก้โครงการพิเศษฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์เพิ่มขึ้น

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลธิ์ และ อ.ปัทมา ลีพหาวงศ์ ที่ให้ความกรุณามาเป็นกรรมการตรวจสอบโครงการพิเศษ ช่วยกรุณาตรวจทาน และแก้ไขโครงการพิเศษฉบับนี้ให้ถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ บริษัท ทีบีโก้ฟูดส์ (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน) ที่ให้ความอนุเคราะห์ภาคเส้นใยสับปะรดใช้ในงานวิจัยนี้ และคุณนิชากร เจริญกุล ผู้ติดต่อช่วยเหลือในโครงการพิเศษนี้

ขอขอบพระคุณ บริษัท เบนเมเยอร์ เคมีคอล (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน) ที่ให้ความอนุเคราะห์สารเติมแต่งในไม้พลาสติกคอมโพสิต

ขอขอบพระคุณ คุณกฤษณะ เกษประดิษฐ์ และคุณสุดใจ สอนสะอาด เจ้าหน้าที่อาคารฝึกงานทางอุตสาหกรรมเคมี และพอลิเมอร์ คุณสาคร สอนพงษ์ คุณปราณี บุญวัฒน์ คุณรจนา จำกัด คุณชัชชัย ลัทธิลักษณ์ และคุณฉัฐพงษ์ ไกรธรรม เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการเคมี สิ่งแวดล้อม คุณรังสรรค์ ปานทอง คุณชนก พอค้าผล เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการเคมีอาคารจุฬารัตน์ 2 คุณกัญญา มงคลโกชนันท์ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการเคมีอาคารวิทยาศาสตร์ ที่อำนวยความสะดวกและให้คำปรึกษาในการใช้เครื่องมือต่างๆ รวมทั้งช่วยแก้ปัญหาตลอดการดำเนินการ

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ทุกท่าน บุคคลในครอบครัว พี่นักศึกษาปริญญาโท เพื่อนๆ นื่องๆ ที่ให้ความช่วยเหลือ และกำลังใจตลอดในการทำโครงการพิเศษนี้

สุดท้ายนี้ผู้จัดทำ ขอขอบพระคุณบุคคลท่านอื่นๆ ที่ให้ความกรุณาช่วยเหลือ ซึ่งผู้จัดทำมิได้กล่าวถึง ทางผู้จัดทำขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้ด้วย

นางสาวชวีพร แก้วเจริญ
นายธนศักดิ์ อ้วนนวล
นางสาวสุวเพ็ญ เครือวงศ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	III
กิตติกรรมประกาศ	V
สารบัญ	VI
สารบัญตาราง	XI
สารบัญรูป	XII
สัญลักษณ์และคำย่อ	XV
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 คอมโพสิต (Composites)	4
2.1.1 ชนิดของคอมโพสิต	6
2.1.2 องค์ประกอบของคอมโพสิต	6
2.2 เส้นใยธรรมชาติ (Natural fibers)	12
2.2.1 องค์ประกอบของเส้นใยธรรมชาติ	12
2.2.2 สมบัติของเส้นใย	18
2.3 การทำความสะอาดเส้นใย	20
2.3.1 วิธีการทำความสะอาดเส้นใยด้วยน้ำ	20
2.3.1.1 การตรวจวิเคราะห์น้ำตาลรวม (Total sugar) ด้วยวิธีฟีนอล-ซัลฟูริก (Phenol-sulfuric method)	21
2.3.2 วิธีการทำความสะอาดเส้นใยด้วยสารละลาย NaOH	22

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4 สับปะรด (Pineapple)	23
2.4.1 ประวัติ	23
2.4.2 ลักษณะทั่วไป	23
2.4.3 ประโยชน์ของสับปะรด	24
2.4.4 พันธุ์สับปะรด	25
2.5 พลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene; HDPE)	26
2.5.1 สมบัติทั่วไปของ HDPE	27
2.5.2 สมบัติเฉพาะของ HDPE	28
2.6 สารเติมแต่ง (Additives)	30
2.6.1 สารช่วยผสม (Compatibilizers)	31
2.6.2 แอนติออกซิแดนท์ (Antioxidants)	33
2.6.3 สารหล่อลื่น (Lubricants)	36
และสารช่วยในกระบวนการผลิต (Processing aids)	
2.7 การผสมสารเติมแต่งในพลาสติก	39
2.8 การขึ้นรูป WPC	40
2.9 เครื่องบดพลาสติก	43
2.10 การทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical properties testing)	44
2.10.1 การทดสอบการทนต่อแรงดึง (Tensile testing)	44
2.10.2 การทดสอบการทนต่อแรงดัด (Flexural testing)	50
2.10.3 การทดสอบการทนต่อแรงกระแทก (Impact testing)	52
2.10.4 การทดสอบความแข็งกด (Hardness testing)	53
2.11 การทดสอบสมบัติทางความร้อน (Thermal properties testing)	55
2.12 การศึกษาสัณฐานวิทยาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy; SEM)	57
2.13 การศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	58

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย	
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	62
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	64
3.3 วิธีการทดลอง	65
3.3.1 การเตรียมวัตถุดิบ	65
3.3.1.1 การเตรียมกากเส้นใยสับเกรดเกรด PFF	65
3.3.1.2 การเตรียมกากเส้นใยสับเกรดเกรด HP	65
3.3.1.3 การเตรียม HDPE	65
3.3.2 การปรับปรุงกากเส้นใยสับเกรดเกรด HP	65
3.3.2.1 การปรับปรุงกากเส้นใยด้วยการต้มน้ำ	65
3.3.2.2 การปรับปรุงกากเส้นใยด้วยการต้มสารละลาย NaOH	65
3.3.3 การเตรียม WPC	66
3.3.3.1 การเตรียม WPC จากกากเส้นใยสับเกรดเกรด HP เพื่อศึกษาผลของการเติมสารช่วยผสม PE-g-MA	67
3.3.3.2 การเตรียม WPC จากกากเส้นใยสับเกรดเกรด HP เพื่อศึกษาผลของการปรับปรุงกากเส้นใยสับเกรดเกรด HP	67
3.3.3.3 การเตรียม WPC จากกากเส้นใยสับเกรดเกรด HP เพื่อศึกษาอัตราส่วนผสมระหว่าง HDPE กับกากเส้นใย	67
3.3.3.4 การเตรียม WPC จากกากเส้นใยเกรด HP และเกรด PFF เพื่อศึกษาชนิดของกากเส้นใย	67
3.4 การทดสอบสมบัติต่างๆ	68
3.4.1 ศึกษาผลของการปรับปรุงกากเส้นใย	68
3.4.1.1 การวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลรวมด้วยวิธีฟินอล-ซัลฟูริก (Phenol-sulfuric method)	68
3.4.1.2 ศึกษาสัณฐานวิทยา (Morphology)	69
3.4.2 ศึกษาสมบัติของ WPC	69
3.4.2.1 ศึกษาสมบัติเชิงกล (Mechanical properties)	69
3.4.2.2 ศึกษาสมบัติทางความร้อน (Thermal properties)	70
3.4.2.3 ศึกษาสัณฐานวิทยา (Morphology)	70

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	
4.1 การศึกษาผลของการปรับปรุงกากเส้นใยสับปะรด	74
4.1.1 การวิเคราะห์กากเส้นใยสับปะรด	74
4.1.1.1 การวิเคราะห์กากเส้นใยสับปะรดเกรด PFF	74
4.1.1.2 การวิเคราะห์กากเส้นใยสับปะรดเกรด HP	78
4.1.2 การศึกษาการปรับปรุงกากเส้นใยสับปะรดเกรด HP	81
4.1.2.1 การศึกษาการปรับปรุงกากเส้นใยสับปะรดเกรด HP ด้วยการต้ม	81
4.1.2.2 การศึกษาการปรับปรุงกากเส้นใยสับปะรดเกรด HP ด้วยการต้มสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)	84
4.2 การศึกษาสมบัติของ WPC	86
4.2.1 การศึกษาสมบัติเชิงกล (Mechanical properties)	86
4.2.2 การศึกษาสมบัติทางความร้อน (Thermal properties)	95
4.2.3 การศึกษาสัณฐานวิทยา (Morphology)	97
บทที่ 5 สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลวิจัย	102
5.2 ข้อเสนอแนะ	103
เอกสารอ้างอิง	104
ภาคผนวก ก ผลการทดสอบทางกายภาพของกากเส้นใยสับปะรด	111
ภาคผนวก ข ผลการตรวจวัดปริมาณน้ำตาลรวมด้วยวิธีฟีนอล-ซัลฟิวริกจากเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer	113
ภาคผนวก ค สภาวะที่ใช้ในการฉีดขึ้นรูป WPC ด้วยเครื่อง Injection molding	115
ภาคผนวก ง ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical properties) ของ WPC สูตรต่างๆ	118

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก จ ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อน (Thermal properties) ด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC)	121
ภาคผนวก ฉ รูปของ WPC สูตรต่างๆ ที่ผลิตได้จากงานวิจัยนี้	129



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ส่วนประกอบของเส้นใยธรรมชาติชนิดต่างๆ	17
2.2 สมบัติทางกายภาพของเส้นใยธรรมชาติชนิดต่างๆ	19
2.3 ปริมาณน้ำตาลในผลไม้	25
2.4 ความหนาแน่นของพลาสติก PE แต่ละชนิด	29
2.5 ลักษณะเฉพาะของสารหล่อลื่นภายใน และสารหล่อลื่นภายนอก	38
2.6 สูตรคำนวณข้อมูลที่ได้จากการทดสอบการทนต่อแรงคัตแบบ 3 จุด	51
3.1 สมบัติบางประการของ HDPE	63
3.2 อัตราส่วนผสมระหว่าง HDPE กับกากเส้นใยสับประดเกรด HP	66
3.3 สูตรผสมที่ใช้ในการทดลอง	66
3.4 ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานกลูโคส	68
4.1 สมบัติของกากเส้นใยสับประดเกรด PFF	75
4.2 สมบัติของกากเส้นใยสับประดเกรด HP	78
4.3 อุณหภูมิเริ่มหลอมเหลวผลึก (T_m onset) อุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) อุณหภูมิเริ่มตกผลึก (T_c onset) อุณหภูมิการตกผลึก (T_c) และค่าองค์ประกอบเป็นผลึก (%X _c) ของ WPC	96

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 องค์ประกอบหลักของ WPC	5
2.2 ชนิดของคอมโพสิต	6
2.3 รูปแบบการจัดเรียงตัวของเทอร์โมพลาสติก และเทอร์โมเซต	8
2.4 การกระจายตัวของเส้นใยเสริมแรงในพลาสติก	8
2.5 ผลของความยาวเส้นใยเสริมแรงที่มีต่อความเค้นดึงของเส้นใย	10
2.6 การกระจายตัวของพอลิเมอร์ผสมเมื่อได้รับแรงเหวี่ยง	11
2.7 การจัดเรียงตัวของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และสารแทรกในเส้นใย	12
2.8 สูตรโครงสร้างของเซลลูโลส	13
2.9 พันธะไฮโดรเจนภายใน และระหว่างโมเลกุลเซลลูโลส และการเรียงตัวของไฟบริล ไมโครไฟบริล และเซลลูโลสในผนังเซลล์พืช	14
2.10 ลักษณะการจัดเรียงโมเลกุลของเซลลูโลส	15
2.11 สูตรโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส	15
2.12 หน่วยที่ซ้ำกันของลิกนิน	16
2.13 โครงสร้างของลิกนินในไม้เนื้ออ่อน	16
2.14 รูปร่างหน้าตัดขวางของเส้นใยต่างๆ	20
2.15 ปฏิริยาของวิธีฟินอล-ซัลฟูริก	21
2.16 กราฟมาตรฐานสารละลายกลูโคส	22
2.17 ส่วนต่างๆของต้นสับปะรด	24
2.18 กลไกการเกิดปฏิริยาออกซิเดชันของ PE	27
2.19 ความยาวของสายโซ่พอลิเมอร์ก่อน และหลังการเกิดปฏิริยาออกซิเดชัน	27
2.20 สูตร โครงสร้างอย่างง่ายของ HDPE	28
2.21 ลักษณะโครงสร้างของ PE-g-MA	32
2.22 กลไกการเกิดปฏิริยาระหว่างเส้นใยธรรมชาติกับ PE-g-MA	33
2.23 ปฏิริยาการเกิดออกซิเดชันได้เอง	33
2.24 ปฏิริยาการเกิดอนุมูลอิสระ	34
2.25 การเข้าทำปฏิริยาของสารป้องกันการเกิดออกซิเดชันปฐมภูมิ	35
2.26 โครงสร้างของสารประกอบอินเคอร์ฟินอล	35

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.27 ปฏิบัติการเกิดฟอสเฟตจากการสลายเปอร์ออกไซด์	36
2.28 ภาพตัดขวางของเครื่องหลอมอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่	39
2.29 เครื่องฉีดขึ้นรูปชนิดเกลียวหนอนเดี่ยว	40
2.30 แม่พิมพ์แบบสองส่วนของกระบวนการฉีดขึ้นรูป	41
2.31 ช่วงต่างๆ ของเกลียวหนอน	42
2.32 ขั้นตอนต่างๆ ในวัฏจักรการฉีดขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติก	43
2.33 ภาพตัดขวางของเครื่องบดพลาสติก	43
2.34 การรับแรงเค้นของวัตถุ	44
2.35 ความเครียดดึงตามแนวแกน	45
2.36 การหาค่ามอดูลัสจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด	47
2.37 กราฟแสดงตำแหน่งจุดครากที่ได้จากวิธีเยื้องศูนย์	48
2.38 กราฟแสดงตำแหน่งของขีดจำกัดสัดส่วน	48
2.39 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด	49
2.40 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของวัสดุเหนียวและวัสดุเปราะ	50
2.41 การทดสอบ Three point bending	51
2.42 การวางชิ้นงานทดสอบการทนต่อแรงกระแทกแบบ Izod	53
2.43 หลักการทำงานเครื่องทดสอบความแข็งแบบคูโรมิเตอร์	53
2.44 เครื่องทดสอบความแข็งชอร์ แบบชอร์ D และฐานทดสอบ	54
2.45 เครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC)	55
2.46 การให้ความร้อนแก่ถาดใส่ตัวอย่างของเครื่อง DSC	55
2.47 ภาพที่ได้จากเครื่อง SEM	57
3.1 ลักษณะของกากเส้นใยสับปะรด	62
4.1 รูปร่าง และขนาดของกากเส้นใยสับปะรดเกรด PFF ที่ร้อนด้วยตะแกรงร้อนขนาดต่างๆ	76
4.2 SEM Micrograph กำลังขยาย 200X แสดงลักษณะผิวของกากเส้นใยสับปะรดเกรด PFF	77
4.3 รูปร่าง และขนาดของกากเส้นใยสับปะรดเกรด HP ที่ร้อนด้วยตะแกรงร้อนขนาดต่างๆ	79
4.4 SEM Micrograph กำลังขยาย 200X แสดงลักษณะผิวของกากเส้นใยสับปะรดเกรด HP	80
4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำตาสรวมในน้ำดื่มสกัด (g/L) กับเวลาที่ใช้ต้มสกัดกากเส้นใยสับปะรดเกรด HP	82

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำตาครวมในน้ำต้มสกัด (% ของน้ำหนักกากเส้นใยทั้งหมด) กับเวลาที่ใช้ต้มสกัดกากเส้นใยสับประดเกรด HP	82
4.7 SEM Micrographs กำลังขยาย 200X แสดงลักษณะวิทยาของกากเส้นใยสับประดเกรด HP ที่ปรับปรุงด้วยการต้มน้ำที่เวลาต่างๆ	83
4.8 SEM Micrographs กำลังขยาย 200X แสดงลักษณะวิทยาของกากเส้นใยสับประดเกรด HP ที่ปรับปรุงด้วยการต้มสารละลาย NaOH ที่เปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นต่างๆ	85
4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติเชิงกลของ WPC กับการเติมสารช่วยผสม PE-g-MA	87
4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติเชิงกลของ WPC กับเวลาในการต้มน้ำ	89
4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติเชิงกลของ WPC กับเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH	90
4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติเชิงกลของ WPC กับอัตราส่วนผสมระหว่าง HDPE กับกากเส้นใยสับประด HP	92
4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติเชิงกลของ WPC กับชนิดของกากเส้นใยสับประดเกรด HP และเกรด PFF	94
4.14 SEM Micrographs กำลังขยาย 500X แสดงลักษณะวิทยาของ WPC จาก HDPE กับกากเส้นใยสับประดเกรด HP	98
4.15 กลไกของการยึดเกาะระหว่าง HDPE สารช่วยผสม และเส้นใยธรรมชาติ	98
4.16 SEM Micrographs กำลังขยาย 200X แสดงลักษณะวิทยาของ WPC จาก HDPE กับกากเส้นใยสับประดเกรด HP	99
4.17 SEM Micrographs กำลังขยาย 100X แสดงลักษณะวิทยาของ WPC จาก HDPE กับกากเส้นใยสับประดเกรด HP ในอัตราส่วนผสมต่างๆ	100
4.18 SEM Micrographs กำลังขยาย 200X แสดงลักษณะวิทยาของ WPC จาก HDPE กับกากเส้นใยสับประดเกรดต่างๆ	101

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

WPC	หมายความว่า	ไม้พลาสติกคอมโพสิต (Wood Plastic Composites)
HDPE	หมายความว่า	พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene)
HP	หมายความว่า	กากเส้นใยสับเกรด HP (ชื่อเกรดทางการค้า)
PPF	หมายความว่า	กากเส้นใยสับเกรด Pineapple Fruit Fiber
PE-g-MA	หมายความว่า	สารช่วยผสมพอลิเอทิลีนกราฟท์มาลิกแอนไฮไดรด์ (Polyethylene grafted Maleic Anhydride)
HDPE+HP non PE-g-MA	หมายความว่า	ไม้พลาสติกคอมโพสิตระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงกับกากเส้นใยสับเกรด HP ไม่เติมสารช่วยผสมพอลิเอทิลีนกราฟท์มาลิกแอนไฮไดรด์ อัตราส่วนผสม 80:20
HDPE+HP PE-g-MA	หมายความว่า	ไม้พลาสติกคอมโพสิตระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงกับกากเส้นใยสับเกรด HP เติมสารช่วยผสมพอลิเอทิลีนกราฟท์มาลิกแอนไฮไดรด์ อัตราส่วนผสม 80:20
HDPE+HP treat H ₂ O 0 hr	หมายความว่า	ไม้พลาสติกคอมโพสิตระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงกับกากเส้นใยสับเกรด HP อัตราส่วนผสม 80:20
HDPE+HP treat H ₂ O 1 hr	หมายความว่า	ไม้พลาสติกคอมโพสิตระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงกับกากเส้นใยสับเกรด HP ที่ต้มด้วยน้ำเป็นเวลา 1 ชั่วโมง อัตราส่วนผสม 80:20
HDPE+HP treat H ₂ O 2 hr	หมายความว่า	ไม้พลาสติกคอมโพสิตระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงกับกากเส้นใยสับเกรด HP ที่ต้มด้วยน้ำเป็นเวลา 2 ชั่วโมง อัตราส่วนผสม 80:20

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

HDPE+HP treat H ₂ O 3 hr	หมายความว่า	ไม้พลาสติกคอมโพสิตระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงกับกากเส้นใยสับประดเกรด HP ที่ต้มด้วยน้ำเป็นเวลา 3 ชั่วโมง อัตราส่วนผสม 80:20
HDPE+HP treat [NaOH] 0%	หมายความว่า	ไม้พลาสติกคอมโพสิตระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงกับกากเส้นใยสับประดเกรด HP อัตราส่วนผสม 80:20
HDPE+HP treat [NaOH] 5%	หมายความว่า	ไม้พลาสติกคอมโพสิตระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงกับกากเส้นใยสับประดเกรด HP ที่ต้มด้วยสารละลาย NaOH 5% (w/v) อัตราส่วนผสม 80:20
HDPE+HP treat [NaOH] 10%	หมายความว่า	ไม้พลาสติกคอมโพสิตระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงกับกากเส้นใยสับประดเกรด HP ที่ต้มด้วยสารละลาย NaOH 10% (w/v) อัตราส่วนผสม 80:20
HDPE+HP treat [NaOH] 15%	หมายความว่า	ไม้พลาสติกคอมโพสิตระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงกับกากเส้นใยสับประดเกรด HP ที่ต้มด้วยสารละลาย NaOH 15% (w/v) อัตราส่วนผสม 80:20
HDPE:HP = 100:0	หมายความว่า	ไม้พลาสติกคอมโพสิตระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงกับกากเส้นใยสับประดเกรด HP อัตราส่วนผสม 100:0
HDPE:HP = 80:20	หมายความว่า	ไม้พลาสติกคอมโพสิตระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงกับกากเส้นใยสับประดเกรด HP อัตราส่วนผสม 80:20
HDPE:HP = 70:30	หมายความว่า	ไม้พลาสติกคอมโพสิตระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงกับกากเส้นใยสับประดเกรด HP อัตราส่วนผสม 70:30

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

HDPE:HP = 60:40	หมายความว่า	ไม้พลาสติกคอมโพสิตระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงกับกากเส้นใยสับปะรดเกรด HP อัตราส่วนผสม 60:40
HDPE:HP = 50:50	หมายความว่า	ไม้พลาสติกคอมโพสิตระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงกับกากเส้นใยสับปะรดเกรด HP อัตราส่วนผสม 50:50
HDPE+Fiber HP	หมายความว่า	ไม้พลาสติกคอมโพสิตระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงกับกากเส้นใยสับปะรดเกรด HP (ชื่อเกรดทางการค้า) อัตราส่วนผสม 80:20
HDPE+Fiber PFF	หมายความว่า	ไม้พลาสติกคอมโพสิตระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงกับกากเส้นใยสับปะรดเกรด Pineapple Fruit Fiber อัตราส่วนผสม 80:20
DSC	หมายความว่า	เครื่องทดสอบสมบัติทางความร้อน (Differential Scanning Calorimeter)
T _m onset	หมายความว่า	อุณหภูมิเริ่มหลอมเหลวผลึก
T _m	หมายความว่า	อุณหภูมิหลอมเหลวผลึก
T _c onset	หมายความว่า	อุณหภูมิเริ่มตกผลึก
T _c	หมายความว่า	อุณหภูมิการตกผลึก
X _c	หมายความว่า	ค่าองศาความเป็นผลึก
SEM	หมายความว่า	กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope)
ASTM	หมายความว่า	American Society for Testing and Materials

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ในสภาวะการณ์ปัจจุบัน โลกประสบกับปัญหาภาวะโลกร้อน (Global warming) อันหมายถึง การที่อุณหภูมิเฉลี่ยของอากาศบน โลกสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้สภาพลมฟ้าอากาศผิดแปลกไป จากเดิม ภัยธรรมชาติที่ทวีความรุนแรงมากขึ้น สิ่งมีชีวิตทั้งพืช สัตว์ รวมถึงมนุษย์ ต้องเสี่ยง ภัยอันตราย หนึ่งในสาเหตุสำคัญของภาวะโลกร้อนมาจากการตัดไม้ทำลายป่า เพื่อผลิตเป็น เฟอร์นิเจอร์ หรือข้าวของเครื่องใช้ต่างๆ การตัดไม้ทำลายป่าเหล่านี้เป็นตัวเร่งให้ปัญหาภาวะ โลกร้อนที่ทวีความรุนแรงมากยิ่งขึ้น เนื่องจากต้นไม้เป็นแหล่งดูดซับแก๊สคาร์บอน ไดออกไซด์ (CO₂) อันเป็นหนึ่งในแก๊สเรือนกระจกสำคัญที่ทำให้โลกมีอุณหภูมิสูงขึ้น การลดการตัดไม้ทำลาย ป่าจะช่วยลดปัญหาภาวะโลกร้อนได้ แต่เนื่องจากความต้องการใช้ไม้ที่มีปริมาณมาก ส่งผลให้ ไม้จากป่าไม่เพียงพอต่อความต้องการของผู้บริโภค ดังนั้นวิธีที่เป็นทางเลือกสนับสนุนแนวคิด ดังกล่าวคือ การหาวัสดุอื่นทดแทนไม้ธรรมชาติ โดยวัสดุที่นำมาทดแทนควรมีสมบัติ และลักษณะ ที่ใกล้เคียงกับไม้ธรรมชาติ ในปัจจุบันวัสดุทางเลือกที่กำลังได้รับความนิยมผลิตเป็นไม้เทียม ทดแทนไม้ธรรมชาติ คือ ไม้พลาสติกคอมโพสิต (Wood Plastic Composites; WPC) ซึ่งเป็น เทคโนโลยีการผลิตวัสดุที่มีการผสมผสานของวัสดุหลักสองชนิด ระหว่างไม้ หรือเส้นใยธรรมชาติ กับพลาสติก และสารเติมแต่งต่างๆ ในอัตราส่วนที่เหมาะสม ทำให้ได้วัสดุที่มีสมบัติคล้ายคลึงกับ ไม้ธรรมชาติ วัสดุทางเลือกชนิดนี้มีอายุใช้งานยาวนาน ทนทานต่อสภาพแวดล้อม มีสีสันทัน ประคบกับลวดลายที่หลากหลาย ปลอดภัยจากสัตว์ หรือแมลงกัดกินไม้ เนื้อไม้ไม่เปื่อยยุ่ยง่าย การบวมบ่น้อย ไม่มีกลิ่นอับ ไม่เกิดเชื้อรา การผลิตมีความยืดหยุ่น ต้นทุนการผลิตต่ำ เทคโนโลยี WPC สามารถใช้วัตถุดิบได้หลากหลายในการผลิต เช่น วัสดุเหลือใช้จากภาคการผลิตต่างๆ ของภาคเกษตรกรรม และอุตสาหกรรม โดยเฉพาะในภาคอุตสาหกรรมเป็นภาคการผลิตที่มี ภาคเส้นใยธรรมชาติเหลือทิ้งเป็นจำนวนมาก เช่น โรงงานคั้นน้ำผลไม้ สำหรับการศึกษารุ่นนี้ ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำกากเส้นใยสับปะรดที่เหลือจากการผลิต และแปรรูปน้ำผลไม้ ของบริษัท ทิปโก้ฟู้ดส์ (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน) มาผลิต WPC เพื่อทดแทนไม้ธรรมชาติ และเพื่อช่วยลดกากของเสียจากภาคอุตสาหกรรมอีกทางหนึ่ง

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำกากเส้นใยสับปะรดจากโรงงานน้ำผลไม้ มาผลิตเป็น WPC
2. เพื่อศึกษาวิธีการปรับปรุงกากเส้นใยสับปะรดก่อนเข้าสู่กระบวนการผลิต WPC และศึกษาผลกระทบของการปรับปรุงกากเส้นใยที่มีต่อสมบัติของ WPC
3. เพื่อศึกษาปัจจัยบางประการที่มีผลต่อสมบัติของ WPC ได้แก่ ผลของการเติมสารช่วยผสม Polyethylene grafted Maleic Anhydride (PE-g-MA) ผลของการปรับปรุงกากเส้นใย ผลของอัตราส่วนผสม HDPE ต่อกากเส้นใยสับปะรด และผลของชนิดกากเส้นใยสับปะรด

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. เตรียมกากเส้นใยสับปะรดเกรด PFF และเกรด HP โดยการร่อนคัดขนาดด้วยตะแกรงร้อนขนาด 12 และ 20 mesh ตามลำดับ
2. ปรับปรุงกากเส้นใยสับปะรดเฉพาะกากเส้นใยสับปะรดเกรด HP ด้วยการต้ม น้ำ และต้มสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)
3. ศึกษาผลของการปรับปรุงกากเส้นใย
 - กากเส้นใยสับปะรดเกรด HP ที่ผ่านการปรับปรุงด้วยการต้ม น้ำ ทำการศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) และปริมาณน้ำตาลรวม (Total sugar) ในน้ำต้มสกัด ด้วยวิธีฟีนอล-ซัลฟูริก (Phenol-sulfuric)
 - กากเส้นใยสับปะรดเกรด HP ที่ผ่านการปรับปรุงด้วยการต้มสารละลาย NaOH ทำการศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยเครื่อง SEM
4. เตรียม WPC จากกากเส้นใยสับปะรดเกรด PFF และเกรด HP กับพลาสติก HDPE ของบริษัท SCG Plastics Co., Ltd. เกรดชนิด (H5818J) และสารเติมแต่งอื่นๆ ในปริมาณเท่ากันทุกสูตร โดยกากเส้นใยสับปะรดเกรด PFF ใช้เตรียมเฉพาะในการศึกษาผลของชนิดเส้นใยเท่านั้น ผสมคอมพาวด์ด้วยเครื่องผสมชนิดเกลียวหนอนคู่ และทำการขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องฉีดขึ้นรูป

5. ศึกษาสมบัติเชิงกลของ WPC

- การทดสอบแรงดึง (Tensile test) ตามมาตรฐาน ASTM D638
- การทดสอบความแข็งแรงกระแทก (Impact test) ตามมาตรฐาน ASTM D256
- การทดสอบความแข็งกด (Hardness test) ตามมาตรฐาน ASTM D2240
- การทดสอบความแข็งแรงโค้งงอ (Flexural test) ตามมาตรฐาน ASTM D790

6. ศึกษาสมบัติทางความร้อนของ WPC ด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeters; DSC

7. ศึกษาสัณฐานวิทยาของ WPC ด้วยเครื่อง SEM

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถผลิต WPC จากกากเส้นใยสับปรดที่มีสมบัติใกล้เคียงกับไม้ธรรมชาติ
2. ทราบวิธีการปรับปรุงกากเส้นใยสับปรดก่อนเข้าสู่กระบวนการผลิต WPC รวมทั้งสูตรผสมที่เหมาะสมในการผลิต WPC ที่เหมาะสม
3. เพิ่มมูลค่ากากเส้นใยสับปรดจากโรงงานน้ำผลไม้
4. ลดปริมาณกากของเสียจากภาคอุตสาหกรรม และลดอัตราการตัดไม้ทำลายป่า
5. เพิ่มทางเลือกในการใช้ประโยชน์จากเส้นใยธรรมชาติ

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 คอมโพสิต (Composites) (เป็นสุภา ปีติรักษ์สกุล, 2551)

คอมโพสิต (Composites) คือ วัสดุที่ประกอบด้วยส่วนประกอบอย่างน้อยสองชนิดขึ้นไป ที่มีสมบัติต่างกัน เมื่อผสมเป็นคอมโพสิตแล้วจะมีสมบัติที่ดีกว่าแต่ละองค์ประกอบย่อย

คอมโพสิตจัดเป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมมากในปัจจุบัน และมีปริมาณการใช้เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากคอมโพสิตมีข้อดีหลายประการ เช่น น้ำหนักเบา แข็งแรง ค่ามอดูลัสต่อน้ำหนักสูง กรรมวิธีในการขึ้นรูปง่าย และต้นทุนการผลิตต่ำ มีสมบัติที่ใกล้เคียงวัสดุเดิม และสามารถประยุกต์ใช้งานแทนวัสดุอื่นได้ เช่น โลหะ เซรามิก และไม้

ไม้พลาสติกคอมโพสิต (WPC) รู้จักในชื่อทั่วไปว่า ไม้เทียม วัสดุชนิดนี้สามารถทนทานต่อแสงแดด ลม ฝน มีสีสันทน ทนต่อรอยขีดข่วน สามารถทาสีได้ตามความต้องการและปลอดภัยจากการรุกรานของปลวก WPC นี้ครอบคลุมการใช้วัสดุคอมโพสิตในช่วงกว้างนับตั้งแต่การใช้พลาสติกชนิดต่างๆ ได้แก่ โพลีโพรพิลีน (PP) โพลีเอทิลีน (PE) โพลีไวนิลคลอไรด์ (PVC) และโพลิสไตรีน (PS) เป็นต้น พลาสติกเหล่านี้เป็นเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastics) เมื่อได้รับความร้อนจะหลอมตัวเป็นของเหลวหนืด และกลายเป็นของแข็งเมื่อปล่อยให้เย็นลง สมบัติดังกล่าวทำให้สามารถเติมวัสดุอื่นๆ ลงไปผสมกับพลาสติกก่อนการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์คอมโพสิตได้ สารดังกล่าวเรียกโดยรวมว่า สารเติมแต่ง (Additives) ด้วยเหตุนี้ไม้พลาสติกคอมโพสิตจึงเป็นวัสดุที่ผลิตง่าย สามารถขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้หลากหลาย และยังสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ผ่านกระบวนการรีไซเคิล

โดยทั่วไปแล้ว WPC จะมีไม้ทำหน้าที่เป็นสารตัวเติม (Fillers) หรือสารเสริมแรง (Reinforcement) ในปริมาณ 30-60% ของส่วนผสมทั้งหมด ไม้ดังกล่าวจะอยู่ในรูปของเศษไม้ นอกจากสารตัวเติมที่เป็นไม้แล้ว ยังมีสารเติมแต่งชนิดอื่นที่เติมลงในไม้พลาสติกคอมโพสิต เพื่อเพิ่มสมบัติของผลิตภัณฑ์ให้เหมาะสมกับการใช้งาน ตัวอย่างเช่น สารหล่อลื่น (Lubricants) ซึ่งช่วยให้ผิวของผลิตภัณฑ์ลื่นสัมผัสกันง่ายต่อกระบวนการขึ้นรูป สารเชื่อมโยง (Crosslinking)

หรือสารประสาน (Binders) ช่วยในการปรับปรุงการยึดติดระหว่างองค์ประกอบของพลาสติกกับไม้ สารให้สี (Pigments) ทำหน้าที่เพิ่มสีสัน สารเพิ่มความเสถียรต่อแสง (Light stabilizer) สารเพิ่มฟอง (Blowing agents) และเรซินเทอร์โมเซต (Thermosetting resin) เป็นต้น องค์ประกอบหลักของ WPC ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 องค์ประกอบหลักของ WPC (บนซ้าย) PE (บนขวา) ผงไม้ และ (ล่าง) เม็ดคอมพาวด์ (เป็นสุภา ปีติรักษสกุล, 2551)

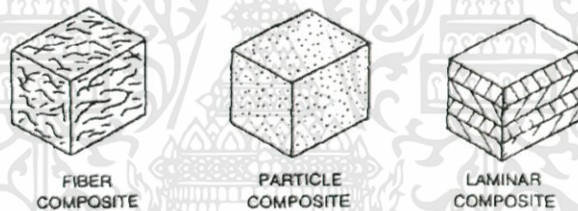
WPC ได้จากการผสมระหว่างเศษไม้เลื่อย หรือผงไม้ สารประสาน และพลาสติกเพื่อผลิตเป็นวัสดุซึ่งสามารถขึ้นรูปได้เหมือนกับการขึ้นรูปพลาสติกทั่วไป แต่รวมลักษณะเด่นของทั้งไม้และพลาสติกเข้าไว้ด้วยกัน ในส่วนที่เป็นไม้นั้นมักได้จากเศษไม้เลื่อย หรือชิ้นไม้จากการตัดขอบไม้ส่วนที่เหลือใช้ และไม่สามารถนำไปใช้งานอื่นๆ ได้ รวมทั้งเศษพืชจากเกษตรกรรม นำมาผ่านกระบวนการบด (Grinding) เป็นผงอนุภาคขนาดเล็กก่อนเติมลงในเนื้อพลาสติก นั้นแสดงว่าการผลิต WPC ไม่จำเป็นต้องสูญเสียทรัพยากรไม้เพิ่มขึ้นจากเดิม ส่วนของพลาสติกนั้นเราสามารถนำพลาสติกซึ่งเคยผ่านการใช้งานแล้ว กลับมาขึ้นรูป และใช้ใหม่อีกได้ เช่น ถุงพลาสติกเก่า พลาสติกเหลือใช้ และเศษวัสดุเป็นวัตถุดิบในการผลิต ด้วยเหตุนี้ทำให้ WPC มีต้นทุนในการผลิตต่ำ ให้ผลกำไรสูง และรักษาสภาพแวดล้อม

2.1.1 ชนิดของคอมโพสิต (ปิยะวรรณ เจียวก๊ก และ พงศ์ศักดิ์ เพ็ญน้อย, 2543)

1. คอมโพสิตแบบอนุภาค (Particulate composites) เกิดจากการกระจายอนุภาคในเมตริกซ์ ซึ่งอนุภาคจะมีรูปร่างการจัดเรียงตัว และขนาดต่าง ๆ กัน อาจเป็นผง หรือเม็ด ตัวอย่างคอมโพสิตชนิดนี้ ได้แก่ คอนกรีต หรือพาร์ทิเคิลบอร์ด เป็นต้น

2. คอมโพสิตแบบลามินาร์ (Laminar composites) เกิดจากการยึดติดระหว่างแผ่นวัสดุกับเมตริกซ์โดยอัดเป็นชั้นๆ ด้วยความดันสูง มีลักษณะคล้ายแซนวิช ตัวอย่างคอมโพสิตชนิดนี้ ได้แก่ กระดาษ หรือฟิล์ม เป็นต้น

3. คอมโพสิตแบบเส้นใย (Fibrous composites) เกิดจากเส้นใยเสริมแรงในเมตริกซ์ โดยเส้นใยที่นำมาใช้นั้นมีอยู่ด้วยกันหลายประเภท เช่น เส้นใยคาร์บอน (Carbon fibers) เส้นใยอินทรีย์ (Organic fibers) เส้นใยอารามิด (Aramid fibers) เส้นใยแก้ว (Glass fibers) หรือเส้นใยธรรมชาติ (Natural fibers) เป็นต้น



รูปที่ 2.2 ชนิดของคอมโพสิต (Gazianter Universitesi, 2010)

2.1.2 องค์ประกอบของคอมโพสิต

1. ส่วนเมตริกซ์ (Matrix phase) (Trostyankaya, E.B., 1995)

เมตริกซ์ คือ วัสดุที่เป็นโครงสร้างหลัก เป็นส่วนประกอบส่วนใหญ่ของวัสดุผสม โดยทั่วไปจะมีความเหนียวสูง แต่มีความแข็งแรง และมอดุลัสต่ำกว่าส่วนเสริมแรง เมตริกซ์เป็นส่วนที่มีความต่อเนื่อง (Continuous phase) และปกคลุมส่วนเสริมแรงช่วยยึดส่วนเสริมแรงเข้าไว้ด้วยกัน เมื่อเมตริกซ์ได้รับการกระทำภายนอกกระทำ ภาระที่กระทำจะถูกส่งผ่านจากเมตริกซ์ไปสู่

ส่วนเสริมแรงซึ่งมีความแข็งแรงสูงกว่า เป็นผลให้เกิดการรับภาระได้สูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุที่ไม่มีเสริมแรง เมตริกซ์ที่นิยมใช้ ได้แก่ พอลิเมอร์ โลหะ เป็นต้น

หน้าที่หลักของเมตริกซ์ในคอมโพสิต มีดังนี้

1. คงความเสถียรในรูปร่าง และขนาดของวัสดุคอมโพสิต
2. รักษาการกระจายตัว และการยึดเกาะของเส้นใย
3. ทำให้สามารถทนต่อการเสียหายภายใต้อุณหภูมิ หรือแรงกระทำที่ระดับหนึ่งๆ
4. สามารถกระจาย หรือส่งถ่ายแรงที่ได้รับจากภายนอกไปยังเส้นใยได้
5. ช่วยให้ทนทานต่อสภาพแวดล้อม และมีความเสถียรในตัวกลางต่างๆ

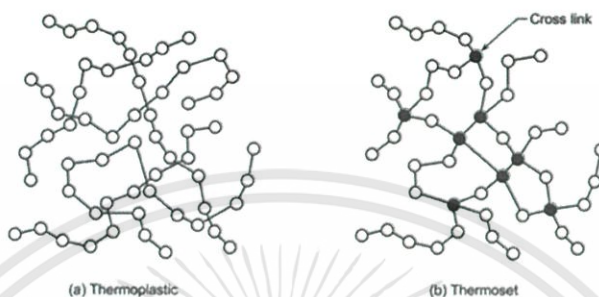
พอลิเมอร์เมตริกซ์ โดยทั่วไปแบ่งเป็น 2 ประเภท ดังนี้

1. เทอร์โมเซต (Thermoset) พอลิเมอร์กลุ่มนี้เมื่อผ่านกรรมวิธีการผลิตจะมีรูปทรงถาวร ผลผลิตที่ได้ไม่สามารถนำไปหลอมขึ้นรูปซ้ำ และไม่ละลายในตัวทำละลาย ไม่เกิดกระบวนการย้อนกลับ สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าก่อนผ่านกระบวนการเตรียม โครงสร้างของพอลิเมอร์ยังไม่เป็นร่างแห แต่เมื่อผ่านกระบวนการ โดยให้ความร้อน หรือความดันเข้าไปจะมีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีในโครงสร้างเกิดการเชื่อมโยง (Crosslinking) ระหว่างสายโซ่โมเลกุล มีลักษณะเป็นระบบสามมิติ มีการสร้างพันธะโควาเลนต์ระหว่างสายโซ่โมเลกุลทำให้ผลผลิตที่ได้มีความคงทนไม่หลอมละลาย ถ้าให้ความร้อนมากๆ จะไหม้ และสมบัติเปลี่ยนไปจากเดิม (Jang, B.Z., 1994)

2. เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) จะละลายได้ดีในตัวทำละลายบางชนิด เมื่อถูกความร้อนสามารถหลอมตัวได้ และเมื่อเย็นลงก็จะแข็งตัว สามารถทำให้หลอม และแข็งตัวหลายๆ ครั้ง โดยไม่ทำให้สมบัติทางเคมีเปลี่ยนแปลงไป อาจแยกได้เป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มเทอร์โมพลาสติกอสัณฐาน (Amorphous thermoplastic) และเทอร์โมพลาสติกที่มีผลึกบางส่วน (Semi – crystalline thermoplastic)

เทอร์โมพลาสติกจะไม่เกิดการเชื่อมโยง ดังนั้นความแข็งแรงเป็นผลโดยตรงจากสมบัติของหน่วยซ้ำ หรือมอนอเมอร์ และน้ำหนักโมเลกุลที่สูง เทอร์โมพลาสติกอสัณฐานจะมีการพันกันของสายโซ่โมเลกุลซึ่งจะส่งผลคล้ายกับการเกิดการเชื่อมโยง และในพอลิเมอร์ที่สามารถตกผลึกได้

จะมีการจัดเรียงตัวที่ดีทำให้เมตริกซ์มีความแข็งแรง สมบัติของเทอร์โมพลาสติกจะขึ้นกับองศาความเป็นผลึก สันฐานวิทยา และการจัดเรียงตัวของผลึก ซึ่งจะขึ้นกับสถานะในการผลิต ตัวอย่างเทอร์โมพลาสติก เช่น พอลิเอไมด์ พอลิสไตรีน พอลิฟอสฟีน และพอลิเอทิลีน เป็นต้น (Clyne, T.W. and Hull, D., 1996)

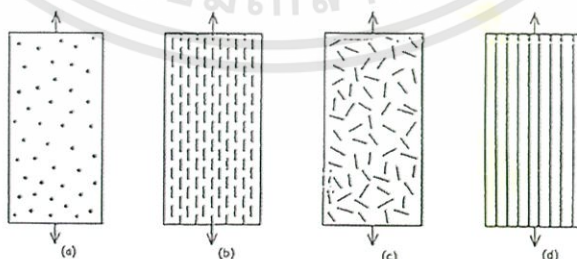


รูปที่ 2.3 รูปแบบการจัดเรียงตัวของเทอร์โมพลาสติก และเทอร์โมเซต (Karen K.Y.L. *et al.*, 1999)

2. ส่วนเสริมแรง (Reinforcement phase)

ส่วนเสริมแรง คือ ส่วนประกอบที่ทำให้คอมโพสิตมีความแข็งแรงสูงขึ้น มักเป็นส่วนที่ไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous phase) มีความแข็งแรงกว่าเมตริกซ์ เป็นส่วนรับแรงที่ถูกส่งผ่านมาจากเมตริกซ์ ขนาดและรูปร่างของสารเสริมแรงเป็นตัวแปรที่สำคัญมากตัวแปรหนึ่งที่ส่งผลถึงประสิทธิภาพในการเสริมแรง ซึ่งอาจมีลักษณะเป็นแผ่น อนุภาคเล็กๆ หรือเส้นใยก็ได้ วัสดุเสริมแรงที่นิยมใช้ ได้แก่ เส้นใยแก้ว เส้นใยธรรมชาติ เป็นต้น

การกระจายตัวของเส้นใยในเมตริกซ์ มีการจัดเรียงตัวเป็น 3 แบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ดังนี้



รูปที่ 2.4 การกระจายตัวของเส้นใยเสริมแรงในพลาสติก (a) แบบอนุภาค จัดเรียงตัวแบบสุ่ม (b) แบบเส้นใยสั้น จัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกัน (c) แบบเส้นใยสั้น จัดเรียงตัวแบบสุ่ม และ (d) แบบเส้นใยยาว จัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกัน (Mathews, F.L. and Rawlings, R.D., 1994)

หน้าที่ของส่วนเสริมแรง

1. เพิ่มความแข็งแรงทนทาน ความเหนียว การคืบ ความมีเสถียรภาพให้กับวัสดุผสม
2. รับแรงกระทำจากภายนอก โดยแรงกระทำนั้นจะถูกถ่ายทอดไปตามเส้นใย หรืออนุภาค

สมบัติของเส้นใยที่เหมาะสมสำหรับใช้เสริมแรง

1. มีมอดุลัสยืดหยุ่นสูงเพื่อประสิทธิภาพในการเสริมแรง
2. เส้นใยควรจะมีค่าความแข็งแรงสูง
3. ความแข็งแรงของเส้นใยแต่ละเส้นไม่ควรแตกต่างกันมาก
4. เส้นใยควรจะมีเสถียร และรับความแข็งแรงขณะจัดเก็บ และขึ้นรูปได้
5. ส่วนศูนย์กลาง และพื้นผิวของเส้นใยควรมีลักษณะเหมือนกัน

ปัจจัยสำคัญของเส้นใยที่มีผลต่อสมบัติของคอมโพสิต (De, S.K. and White, J.R., 1996)

1. การกระจายของเส้นใย (Fiber dispersion)

วัสดุคอมโพสิตที่มีสมบัติเชิงกลที่ดีนั้น ต้องมีการกระจายของเส้นใยในเมตริกซ์ที่ดี มีความสม่ำเสมอ โดยปัจจัยที่สำคัญที่มีอิทธิพลต่อการกระจายของเส้นใยในเมตริกซ์ คือ การเกิดอันตรกิริยาระหว่างเส้นใยกับเส้นใยด้วยกันเอง และความยาวของเส้นใยที่ใช้ จากปัจจัยดังกล่าวนี้จะส่งผลต่อการเกาะกันเป็นกลุ่มก้อน (Agglomerate) ในระหว่างการผสมของเส้นใย กล่าวคือ โดยธรรมชาติแล้ว เส้นใยธรรมชาติจะเกิดการเกาะกันเป็นกลุ่มก้อนในระหว่างการผสมได้ง่าย เนื่องจากการเกิดพันธะไฮโดรเจนของเซลลูโลสจากเส้นใยจับกับเส้นใยด้วยกันเอง ดังนั้น วิธีที่จะทำการลดการเกิดการเกาะกันเป็นกลุ่มก้อนของเส้นใย สามารถทำได้โดยการปรับปรุงพื้นผิวเส้นใย

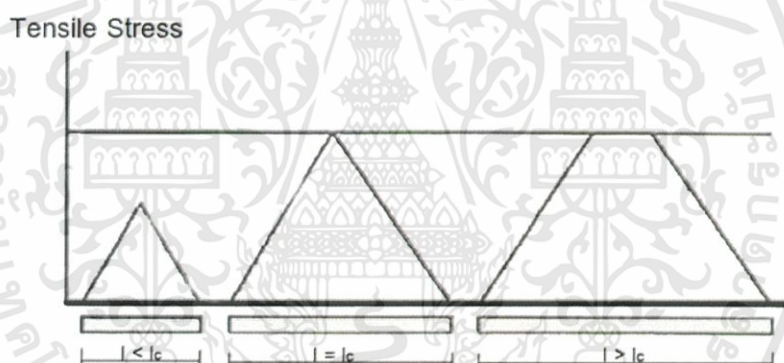
2. การยึดเกาะระหว่างเส้นใยกับเมตริกซ์ (Fiber –matrix adhesion)

การยึดเกาะระหว่างผิวหน้าของเส้นใยกับเมตริกซ์มีความสำคัญต่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางกลศาสตร์เชิงพลศาสตร์ และลักษณะการไหล (Rheology) ของคอมโพสิต เนื่องจากการเกิดการส่งผ่านความเค้น (Stress) จะเกิดขึ้นที่บริเวณผิวหน้าของเมตริกซ์และเส้นใย แก๊วโดยการเติมตัวเชื่อมประสาน ทำให้สามารถปรับปรุงการยึดเกาะระหว่างเส้นใยกับเมตริกซ์ให้เพิ่มขึ้นได้ ซึ่งจะส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของ WPC ที่ดีขึ้น

3. ค่าอัตราส่วนของความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (Aspect ratio) ของเส้นใย

ค่า Aspect ratio ของเส้นใยในการเสริมแรงเพื่อเตรียมเป็น WPC นั้น มีบทบาทที่สำคัญในการประเมินค่าสมบัติเชิงกลของ WPC โดยความยาววิกฤติของเส้นใย (Critical fiber length) จะแสดงถึงการเกิดการส่งผ่านความเค้น (Stress) ของ WPC ที่มีประสิทธิภาพ ซึ่งทำให้สามารถทำนายค่าความแข็งแรงของ WPC ได้ โดยกลไกของการเกิดการส่งผ่านความเค้นจากเมตริกซ์ไปยังเส้นใย จะมีความสอดคล้องกับรัศมี และความยาวของเส้นใย

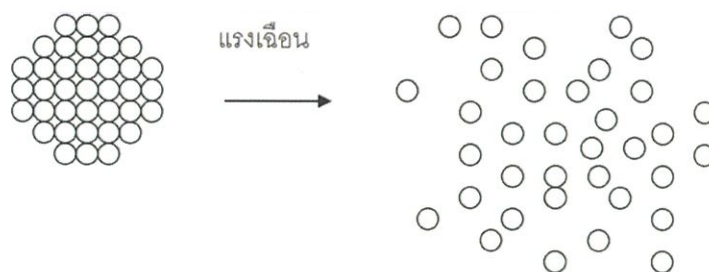
ค่า Aspect ratio ถือว่าเป็นปัจจัยหลักที่จะควบคุมการกระจายของเส้นใย การยึดเกาะระหว่างเส้นใยกับเมตริกซ์ และสมบัติที่ดีของ WPC กล่าวคือ ถ้าค่า Aspect ratio ของเส้นใยที่นำมาเสริมแรงใน WPC มีค่าต่ำกว่าค่าวิกฤติของ Aspect ratio ที่กำหนด จะทำให้การส่งผ่านความเค้นมีไม่เพียงพอ อีกทั้งจะทำให้การเสริมแรงด้วยเส้นใยไม่มีประสิทธิภาพ ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ผลของความยาวเส้นใยเสริมแรงที่มีต่อความเค้นดึงของเส้นใย

เมื่อ l = ความยาวเส้นใย, l_c = ความยาววิกฤติ (Maltheus, F.L. and Rawlings, R.D., 1994)

ในความเป็นจริงแล้วขนาดและความยาวของเส้นใยที่ใช้ จะมีขนาดและความยาวลดลงในระหว่างการผสม ดังแสดงในรูปที่ 2.6 โดยความรุนแรงของการขาดของเส้นใย จะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลัก 2 ปัจจัย คือ 1) ชนิดของเส้นใยและค่า Aspect ratio ของเส้นใยในตอนเริ่มต้น 2) ขนาดของแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในระหว่างการผสม ตัวอย่างเช่น เส้นใยแก้ว จะมีลักษณะเปราะ และมีความแข็งแรงโค้งงอ (Flexural strength) ที่ต่ำ ดังนั้นเส้นใยจะถูกทำลายได้ง่าย และมีโอกาสเกิดการฉีกขาดได้มาก ในทางตรงกันข้ามเส้นใยประเภทเซลลูโลสหรือเส้นใยธรรมชาติ มีความยืดหยุ่นและมีความแข็งแรงโค้งงอที่สูง จึงไม่ทำให้เกิดการขาดได้ง่ายเหมือนเส้นใยแก้ว สำหรับปัจจัยของแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในระหว่างการผสมที่สูง ย่อมจะทำให้เส้นใยเกิดการขาดที่สูง



รูปที่ 2.6 การกระจายตัวของพอลิเมอร์ผสมเมื่อได้รับแรงเฉือน (ชลลดา ฤตวิรุฬห์, 2544)

4. การจัดเรียงตัวของเส้นใย (Fiber orientation)

การจัดเรียงตัวของเส้นใยในเมตริกซ์ ถือว่ามีบทบาทที่สำคัญเกี่ยวกับแอนไอโซทรอปี (Anisotropy) ในเมตริกซ์ และการนำไปใช้งานของ WPC สำหรับในอุตสาหกรรมต่างๆ 60 – 70 % ของเส้นใยจะมีการจัดเรียงตัวตามทิศทางของความเค้นในระหว่างการขึ้นรูป เส้นใยที่นำมาเสริมแรงจะมีทิศทางของการจัดเรียงตัวขึ้นอยู่กับธรรมชาติของการไหล เช่น การไหลแบบคอนเวเจนต์ (Convergent flow) เส้นใยจะมีการจัดเรียงตัวเป็นเส้นตรงในทิศทางตามแนวยาว แบบไดเวเจนต์ (Divergent flow) เส้นใยจะมีการจัดเรียงตัวในทิศทางตามแนวขวาง ดังนั้นจึงได้มีการออกแบบหัวคายของเครื่องอัดรีด (Extruder) เพื่อควบคุมการจัดเรียงตัวของเส้นใย

5. ปริมาณของเส้นใย (Fiber concentration)

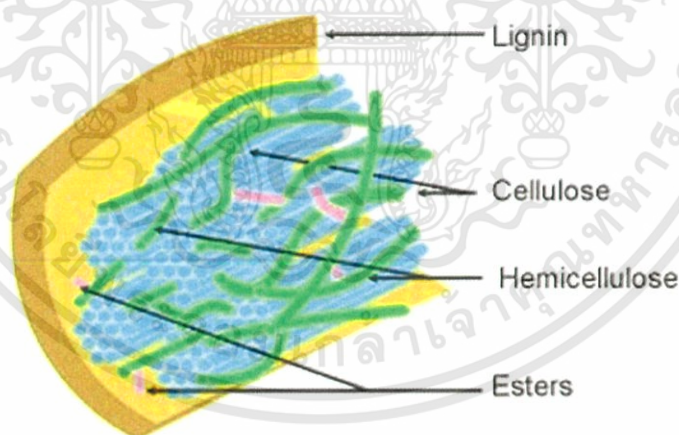
ปริมาณของเส้นใยที่ใช้ในการเสริมแรงใน WPC ถ้าใช้ปริมาณเส้นใยที่น้อย ส่งผลให้สมบัติเชิงกลของ WPC ที่ได้มีค่าด้อยลง เนื่องจากเส้นใยที่ใช้ในปริมาณน้อยจะไม่สามารถเสริมความแข็งแรงให้กับ WPC ได้ ซึ่งการเติมปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้นจะช่วยปรับปรุงสมบัติความทนต่อแรงดึง โดยเฉพาะค่าความแข็งแรงที่สูงกว่าพอลิเมอร์เริ่มต้น อย่างไรก็ตามการเติมปริมาณเส้นใยที่มากเกินไปอาจทำให้สมบัติเชิงกลลดลงได้ อันเป็นผลเนื่องมาจากรอยตำหนิบนชิ้นงาน

2.2 เส้นใยธรรมชาติ (Natural fibers)

เส้นใยธรรมชาติ (Natural fibers) เป็นวัสดุอินทรีย์ที่สำคัญ หาได้ง่ายจากธรรมชาติ มีปริมาณมาก สามารถเกิดขึ้นได้ใหม่เรื่อยๆ และมีราคาถูกกว่าเส้นใยสังเคราะห์ ด้วยเหตุผลนี้เส้นใยธรรมชาติจึงนิยมใช้เป็นสารเติมแต่งในพอลิเมอร์ โดยอาจเป็นทั้งสารตัวเติมและสารเสริมแรงในพอลิเมอร์ เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกล และทางกายภาพ ลดต้นทุนการผลิต

2.2.1 องค์ประกอบของเส้นใยธรรมชาติ

โครงสร้างของเส้นใยธรรมชาติประกอบด้วยเซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) ลิกนิน (Lignin) และสารแทรกอื่นๆ (Extractive) โดยทั่วไปอัตราส่วนจะมีความแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับ ชนิด สายพันธุ์ อายุ ส่วนประกอบต่างๆ ของพืช และสถานะของพื้นที่ ที่ทำการเพาะปลูก องค์ประกอบหลักเหล่านี้จับตัวกันอย่างเหนียวแน่น ลักษณะการเรียงตัวของเซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลสจะถูกห่อหุ้มด้วยลิกนิน เซลลูโลสอยู่ในชั้นในสุดของผนังเซลล์พืช ที่จัดเรียงตัวอยู่ในชั้นไมโครไฟบริล (Microfibril) ห่อหุ้มด้วยเมทริกซ์ (Matrix) ของเฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ซึ่งมีลักษณะแข็ง หุ้มอยู่ชั้นนอกสุดของผนังเซลล์พืช ดังแสดงในรูปที่ 2.7



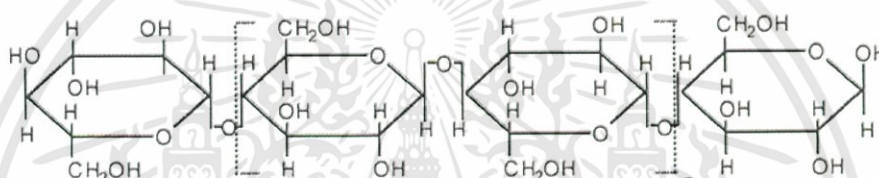
รูปที่ 2.7 การจัดเรียงตัวของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และสารแทรกในเส้นใย

(Liam M., 2008)

1. เซลลูโลส (Cellulose)

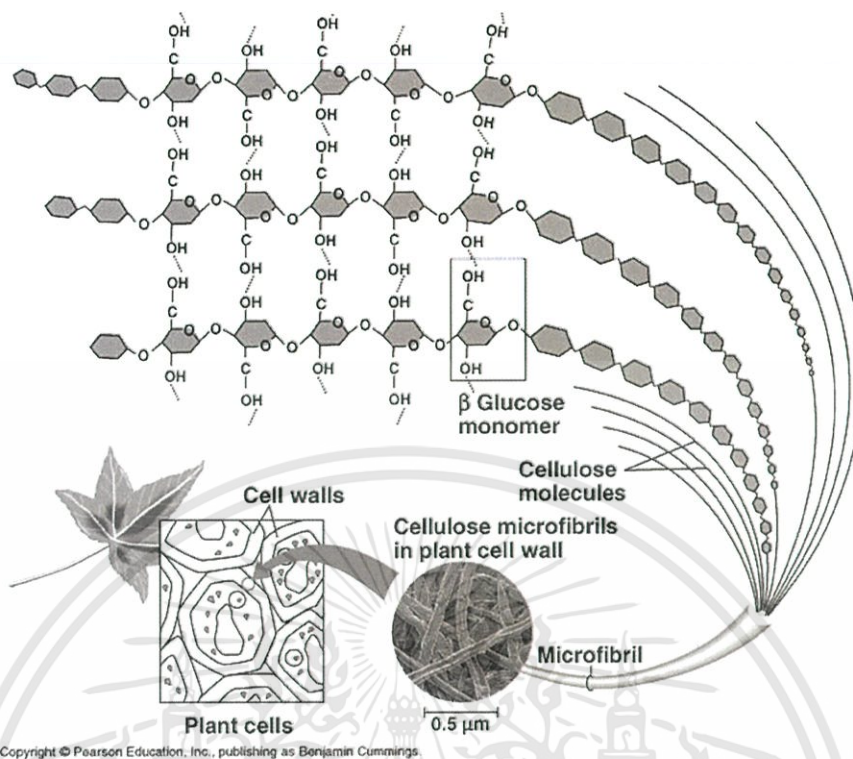
เซลลูโลส คือ คาร์โบไฮเดรตรูปแบบหนึ่ง เป็นองค์ประกอบหลักของผนังเซลล์พืช (Cell wall) ทุกชนิด ซึ่งเซลลูโลสทำหน้าที่ให้ความแข็งแรงกับพืช (อรพิน ภูมิภมร, 2523)

เซลลูโลสเป็นพอลิเมอร์สายยาวพวกโฮโมพอลิแซคคาไรด์ (Homopolysaccharide) ที่มีโครงสร้างโมเลกุลเป็นแบบไม่มีกิ่งก้านสาขา และมีมวลโมเลกุลสูง ประกอบด้วยกลูโคส (β -D-glucose) หลายๆหน่วย เชื่อมต่อกันเป็นสายยาวด้วยพันธะเบตา (1,4) (β -(1,4) glucosidic linkage) โดยคาร์บอนตำแหน่งที่ 1 ของกลูโคสโมเลกุลแรกเชื่อมต่อกับคาร์บอนตำแหน่งที่ 4 ของกลูโคสโมเลกุลถัดไป ดังแสดงในรูปที่ 2.8 โดยทั่วไปแล้วมักมีการจัดเรียงตัวอยู่ในรูปของผลึก



รูปที่ 2.8 สูตรโครงสร้างของเซลลูโลส (วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา, 2542)

การจัดเรียงตัวของโมเลกุลเซลลูโลสค่อนข้างที่จะสม่ำเสมอ โมเลกุลของเซลลูโลสจะเรียงกันอยู่เป็นมัดๆ เรียกว่า ไมโครไฟบริล (Microfibril) ซึ่งเกิดจากพันธะไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นระหว่างหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ของกลูโคสที่อยู่ใกล้กันในแต่ละสาย และไมโครไฟบริลเหล่านี้จะรวมตัวกัน เรียกว่า ไฟบริล (Fibril) ดังแสดงในรูปที่ 2.9

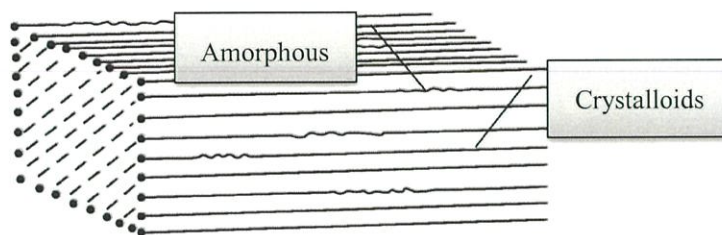


รูปที่ 2.9 พันธะไฮโดรเจนภายใน และระหว่างโมเลกุลเซลลูโลส และการเรียงตัวของไฟบริล ไมโครไฟบริล และเซลลูโลสในผนังเซลล์พืช (Wade, L.G., 2003)

เมื่อนำแต่ละไมโครไฟบริลมาขยายดู พบว่า เซลลูโลสมีการจัดเรียงตัว 2 แบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.10 คือ

1. แบบที่เป็นผลึก (Crystalloids) คือ อยู่รวมกันเป็นกระจุก มีการจับกันด้วยพันธะไฮโดรเจนเรียงตัวนานกันไป โครงสร้างอัดกันแน่นเรียงตัวเป็นระเบียบ (Parallel) ย่อยสลายได้ยาก ด้วยโครงสร้างบริเวณนี้ที่มีลักษณะเป็นเส้นใยและพันธะไฮโดรเจนที่แข็งแรงของเซลลูโลส ส่งผลทำให้เซลลูโลสมีสมบัติความทนแรงดึงที่แข็งแรงและทนต่อตัวทำละลายได้ดี

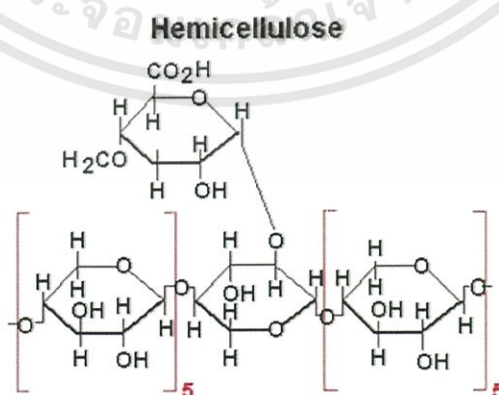
2. แบบที่เป็นอสัณฐาน (Amorphous) คือ อยู่รวมกันอย่างหลวมๆ มีการจัดเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ ซึ่งย่อยสลายได้ง่ายกว่า บริเวณนี้ทำให้เซลลูโลสสลายตัว และแยกออกจากกันได้โดยการเข้าทำปฏิกิริยาของของเหลว เช่น กรดแก่ นอกจากนี้ยังอาจเกิดการที่เปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ง่ายโดยแรงกล เนื่องจากความไม่เป็นระเบียบ และขีดจำกัดของความยืดหยุ่นของไมโครไฟบริล



รูปที่ 2.10 ลักษณะการจัดเรียงโมเลกุลของเซลลูโลส (Inder, M.S. and Malcolm, R.B.Jr., 2008)

2. เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose)

เป็นพอลิเมอร์ที่จัดอยู่ในกลุ่มของเฮเทอโรโพลิแซคคาไรด์ (Heteropolysaccharides) แบบอสัณฐาน มีลักษณะโครงสร้างทางเคมีเป็นกิ่งก้านสาขา มีมวลโมเลกุลต่ำ มีน้ำตาลเป็นองค์ประกอบในเฮมิเซลลูโลสหลายชนิด กล่าวคือ มีไซโลสมากที่สุดถึง 85-90% และส่วนที่เหลือเป็นน้ำตาลที่มีคาร์บอน 5 และ 6 อะตอม เช่น อะราบิโนส กลูโคส แมนโนส กาแลกโตส กรดแมนนูโรนิก (Mannuronic acid) และกรดกาแลกตูโรนิก (Galacturonic acid) เป็นองค์ประกอบ ดังแสดงในรูปที่ 2.11 เฮมิเซลลูโลสจะถูกย่อยสลายได้ง่ายด้วยกรดหรือเบส เจือจางหรือเอนไซม์ เพราะเฮมิเซลลูโลสไม่มีรูปร่างแน่นอน ไม่เป็นเส้นตรง และมีลำดับของหน่วยย่อยน้ำตาลที่เรียงตัวแบบสุ่ม จึงทำให้พันธะที่เชื่อมระหว่างไซโลสถูกทำลายด้วยกรดหรือเอนไซม์ได้โดยทั่วไป เฮมิเซลลูโลสจะมีความเป็นกรด เนื่องจากมีหมู่ 4-เมทิล-แอลฟา-ดี-กลูโคส (4-methyl- α -D-glucose) จับอยู่กับออกซิเจนตำแหน่งที่ 2 ซึ่งการมีหมู่แทนที่ในตำแหน่งที่ 2 และ 3 ส่งผลให้สามารถสกัดเฮมิเซลลูโลสออกได้ง่ายด้วยสารละลายเบส



รูปที่ 2.11 สูตรโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส (University of Minnesota, 1998)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

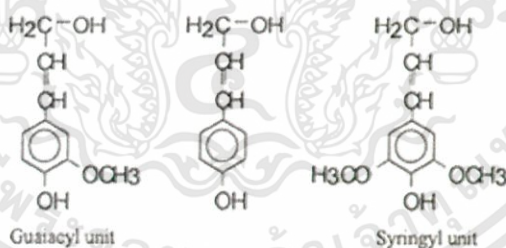
สมบัติของเฮมิเซลลูโลส

ส่วนใหญ่จะพบเฮมิเซลลูโลสในผนังเซลล์ชั้นนอกสุด และพบส่วนน้อยในผนังเซลล์ชั้นที่ 2 โดยจะถูกย่อยสลาย และสกัดออกจากผนังเซลล์พืชได้ในภาวะที่ไม่รุนแรง เนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลมีโซ่กิ่งเป็นจำนวนมากคล้ายกับโครงสร้างของเพกติน โมเลกุลของเฮมิเซลลูโลสจะชอบน้ำ ทำให้เกิดการรวมตัวกับน้ำเกิดเป็นเจลได้ ขณะที่เมื่อเป็นองค์ประกอบของผนังเซลล์จะไม่สามารถสกัดออกได้ด้วยน้ำ แต่สามารถละลายได้ในเบส

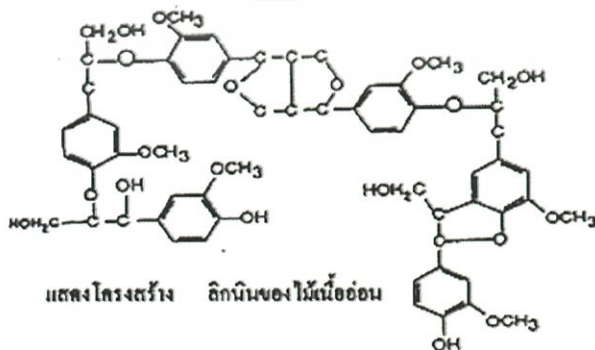
3. ลิกนิน (Lignin)

ลิกนินเป็นพอลิเมอร์ที่พบในผนังเซลล์พืชที่มีความสัมพันธ์เชิงโครงสร้างร่วมกับเซลลูโลส และพอลิแซคคาไรด์ชนิดอื่นๆ ลิกนินประกอบด้วย โมเลกุลที่เป็นวงแหวนต่อกันแบบสุ่มเป็นโครงสร้าง 3 มิติ โดยภายในโครงสร้างจะเชื่อมกันด้วยพันธะอีเทอร์หรือคาร์บอนระหว่าง 2 โมเลกุล ทำให้ลิกนินทนทานต่อการย่อยสลายด้วยสารเคมีและเอนไซม์มากกว่าพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ ดังนั้นต้องอาศัยสารเคมีในการแยกลิกนินออกจากพอลิแซคคาไรด์

ลิกนินมีโครงสร้างที่เกิดจากหน่วยที่เหมือนกันซ้ำๆ ประกอบเป็น โมเลกุลที่ใหญ่มีการเชื่อมต่อกันของหน่วยย่อยคือ ฟีนิลโพรพานอยด์ (Phenyl propanoid) ที่มีหมู่เมทิลอยู่บน โมเลกุล ดังแสดงในรูปที่ 2.12 ลิกนินจากไม้เนื้ออ่อน หญ้า และไม้เนื้อแข็งมีองค์ประกอบของหมู่แทนที่พวกเมธอกซี (Methoxy) และการเกิดพันธะระหว่างหมู่ฟีนิลที่แตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.12 หน่วยที่ซ้ำกันของลิกนิน (ริกาญจน์ ฉัตรสกุลวิไล, ม.ป.ป)



รูปที่ 2.13 โครงสร้างของลิกนินในไม้เนื้ออ่อน (ริกาญจน์ ฉัตรสกุลวิไล, ม.ป.ป)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมบัติของลิกนิน

ลิกนินมีสมบัติที่สำคัญคือ การละลายในตัวทำละลาย โดยปกติลิกนินจะไม่ละลายน้ำ และตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว ดังนั้นจึงสามารถสกัดลิกนินได้ด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ที่มีขั้วสูง ขณะที่บางส่วนของกลุ่มของอัลคาลีนลิกนิน (Alkaline lignin) สามารถละลายได้ในตัวทำละลายพวก ไดออกเซน (Dioxane) ไพริดีน (Pyridine) และสารละลายเบสเจือจางได้ ด้วยการที่ลิกนินอยู่ร่วมกับ เซลลูโลสในเนื้อไม้ ทำให้โครงสร้างของพืชมีความแข็งแรงได้ตามธรรมชาติ รวมทั้งยังทำให้ จูลินทรีย์ และเอนไซม์ไม่สามารถทำลายโครงสร้างพืชได้ง่าย โดยโครงสร้างที่ลิกนินอยู่ร่วมกับ เซลลูโลสจะมีพันธะโควาเลนต์เชื่อมระหว่างลิกนิน และเฮมิเซลลูโลส ดังนั้นเพื่อให้การใช้ ประโยชน์จากวัสดุกลุ่มลิกโนเซลลูโลสมีมากขึ้น จึงต้องทำการปรับสภาพวัสดุเหล่านี้ก่อน และป้องกันผลเสียที่เกิดจากลิกนิน รวมทั้งให้เซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลสอยู่ในสภาพที่เหมาะสม ต่อการใช้ประโยชน์ต่อไป

ไม่แต่ละชนิดจะมีอัตราส่วนระหว่างเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินไม่เท่ากัน ขึ้นกับ ชนิด และอายุของไม้ ในไม้ชนิดเดียวกัน ไม้ที่มีอายุมาก จะมีปริมาณลิกนินมาก ไม้ที่มีลิกนินมาก จะมีความแข็งแรงสูง ส่วนประกอบของเส้นใยธรรมชาติชนิดต่างๆแสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบของเส้นใยธรรมชาติชนิดต่างๆ

ชนิดเส้นใย	เซลลูโลส (%)	เฮมิเซลลูโลส (%)	ลิกนิน (%)
กล้วย	60-65	25-30	5-8
สับปะรด	80	16-19	12
มะพร้าว	43	< 1	45
ลินิน	70-72	14	4-5
ปอกระเจา	61-63	13	5-13
ฝ้าย	90	6	-
ป่านรามี	80-85	3-4	0.5
ป่านศรนารายณ์	60-67	10-15	8-12
ฟางข้าว	40	28	18
ไม้	45-50	23	27

หมายเหตุ ; “-” หมายถึง ไม่ได้วิเคราะห์

ที่มา : Bledzki, A.K. and Gassan, J., 1999

4. สารแทรก สารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ (Extractives organic and Inorganic

materials)

ทั้งสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ สามารถพบได้ในพืชทุกชนิด เป็นสารที่สามารถสกัดได้ง่าย สารประกอบอินทรีย์นี้มีส่วนทำให้คุณสมบัติของไม้มีความหลายหลาย เช่น ทำให้มีสีที่แตกต่างกัน รสชาติของพืช ความสามารถในการถูกย่อยสลาย ความหนาแน่นของไม้ ความชื้นสัมพัทธ์วิกฤตของไม้ และความสามารถในการดูดซับน้ำ สารแทรกนี้เรียกได้อีกอย่างว่าสารที่สามารถสกัดได้ โดยสารที่สามารถสกัดได้นี้รวมไปถึง แทนนิน (Tannins) และสารพอลิฟีนอลิกอื่นๆ (Other polyphenolics) สารให้สี (Coloring matter) น้ำมันหอมระเหย (Essential oil) ไข และไขมัน (Waxes and fats) เรซิน (Resins) แป้งกัม (Gum starch) และสารมัธยันท์เริ่มต้นในกระบวนการเผาผลาญพลังงาน (Simple metabolic intermediates) สารประกอบทั้งหมดนี้ถูกเรียกว่าสารที่สามารถสกัดได้ เนื่องจากสามารถสกัดออกจากเนื้อไม้ได้โดยการสกัดด้วยตัวทำละลาย เช่น น้ำ แอลกอฮอล์ อะซิโตน เบนซีน หรืออีเทอร์ เป็นต้น สารแทรกอาจพบเป็นส่วนประกอบของเนื้อไม้ 5% ถึง 30% ของเนื้อไม้ทั้งหมด โดยขึ้นอยู่กับชนิดของไม้แต่ละชนิด ลักษณะการเจริญเติบโต และอายุของต้นไม้

สารประกอบอนินทรีย์ในพืชโดยทั่วไป มักพบในปริมาณ 0.2% ถึง 1.0% ของเนื้อไม้ทั้งหมด ส่วนใหญ่แล้วสารประกอบอนินทรีย์ที่พบคือ แคลเซียม (Calcium) โพแทสเซียม (Potassium) แมกนีเซียม (Magnesium) และสารธาตุอื่นๆที่พบในปริมาณน้อยมาก (น้อยกว่า 100 ppm) ได้แก่ ฟอสฟอรัส (Phosphorus) โซเดียม (Sodium) เหล็ก (Iron) ซิลิคอน (Silicon) แมงกานีส (Manganese) ทองแดง (Copper) สังกะสี (Zinc) เป็นต้น (Miller, R.B., 1981)

2.2.2 สมบัติของเส้นใย

ความแตกต่างของเส้นใยขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางกายภาพ องค์ประกอบทางเคมี และการจัดเรียงตัวของโมเลกุล ซึ่งส่วนผสม และความแตกต่างในปัจจัยทั้งสามนี้ ทำให้เส้นใยมีสมบัติที่หลากหลายและแตกต่างกัน

โครงสร้างทางกายภาพ

โครงสร้างทางกายภาพนั้นครอบคลุมถึง ความยาว ขนาดหรือเส้นผ่านศูนย์กลาง รูปร่างภาคตัดขวาง (Cross-sectional shape) รูปร่างของผิวเส้นใยและความหยักของเส้นใย แสดงดังตารางที่ 2.2 แสดงสมบัติทางกายภาพของเส้นใยธรรมชาติชนิดต่างๆ

ตารางที่ 2.2 สมบัติทางกายภาพของเส้นใยธรรมชาติชนิดต่างๆ

ชนิดเส้นใย	Length (mm)	Diameter (mm)	Density (kg/ m ²)	Young's modulus (GPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
กล้วย	8-30	0.8-2.5	1,350	1.4	95	5.9
สับปะรด	10-90	0.2-8.8	1,543	14.5	413-1,627	3.42
มะพร้าว	50-350	0.1-0.4	1,440	0.9	200	29.0
ลินิน	500	NA	1,540	100.0	1,000	2.0
ปอกระเจา	1,800-3,000	0.1-0.2	1,500	32.0	350	1.7
ฝ้าย	NA	NA	1,500-1,600	11.0	350	2-10
ป่านรามี่	NA	NA	NA	33.0	585-900	2-3.5
ป่านศรนารายณ์	NA	0.5-2.0	1,450	100.0	1,100	NA

ที่มา : Bledzki, A.K. and Gassan, J., 1999

1. ความยาวเส้นใย (Fiber length)

ในเส้นใยธรรมชาติโดยทั่วไป เส้นใยจะมีความยาวที่ค่อนข้างแตกต่างกันมากด้วยอิทธิพลของธรรมชาติ ไม่ว่าจะเป็นสภาพดินฟ้าอากาศ น้ำ หรืออาหารในดิน ดังนั้น แม้ว่าจะเป็นเส้นใยจากพืชที่ปลูกมาพร้อมๆ กัน การกระจายของความยาวเส้นใยก็ยังอยู่ในระดับค่อนข้างสูง เส้นใยธรรมชาติมีทั้งชนิดสั้น และยาว ซึ่งความยาวของเส้นใยจะมีผลต่อสมบัติและการนำไปใช้งาน

- เส้นใยสั้น (Staple fiber) ความยาวอยู่ในช่วง 2-46 เซนติเมตร ส่วนใหญ่เป็นเส้นใยธรรมชาติทั้งหมด เส้นใยสั้นที่มาจากเส้นใยประดิษฐ์ มักทำเป็นเส้นใยยาวก่อนแล้วตัด (Chop) ให้เป็นเส้นใยสั้นตามความยาวที่กำหนด

- เส้นใยยาว (Filament fiber) เป็นเส้นใยที่มีความยาวต่อเนื่องไม่สิ้นสุด มีหน่วยวัดเป็นเมตร หรือหลา เส้นใยยาวส่วนใหญ่เป็นเส้นใยประดิษฐ์

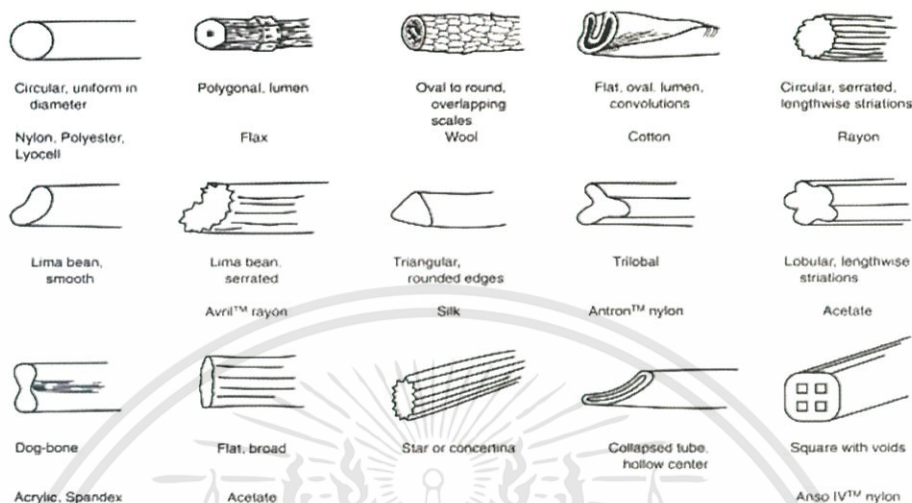
2. ขนาดเส้นใย (Fiber size)

เส้นใยธรรมชาตินั้นมักมีขนาดที่ไม่สม่ำเสมอ คุณภาพของเส้นใยธรรมชาติมักจะวัดจากความละเอียดของเส้นใย เส้นใยที่มีความละเอียดมาก (ขนาดเล็ก) จะมีคุณภาพที่ดีกว่า การวัดความละเอียดมักวัดจากเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย ในหน่วยของไมโครเมตร

3. รูปร่างหน้าตัดขวางของเส้นใย (Cross-sectional shape)

ความแตกต่างของรูปร่างหน้าตัดขวางของเส้นใยธรรมชาตินั้น เกิดจากลักษณะการสร้างเซลล์โลสในขณะที่พืชเติบโต เช่น ในเส้นใยฝ้าย หรือกระบวนการสร้างโปรตีนในสัตว์ เช่น

ขนสัตว์ หรือรูปร่างของช่อง (Orifice) ในตัวไหมที่ทำหน้าที่ฉีดเส้นใยไหมออกมา ดังแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 รูปร่างหน้าตัดขวางของเส้นใยต่างๆ (Gupta, V.B. and Kothari, V.K., 1997)

4. ความหยัก (Crimp)

ความหยักในเส้นใยช่วยเพิ่มความสามารถในการยึดเกาะ (Cohesiveness) ระหว่างเส้นใย ทำให้สามารถคืนตัวจากแรงอัด (Resilience) ได้ดี มีความต้านทานต่อแรงเสียดสี (Resistance to abrasion) และมีความยืดหยุ่น

2.3 การทำความสะอาดเส้นใย

2.3.1 วิธีการทำความสะอาดเส้นใยด้วยน้ำ

น้ำเป็นตัวทำละลายที่ดี หรืออาจเรียกว่า ตัวทำละลายไอออนไนซ์ (Ionizing solvent) หรือตัวทำละลายแบบมีขั้วเพราะน้ำสามารถละลายสารประกอบอิเล็กโตรวาเลนต์ (Electrovalent) ได้ เช่น กรดและเกลือ นอกจากนี้น้ำยังสามารถละลายสารประกอบโควาเลนต์ (Covalent compound) ได้ เช่น น้ำตาล และยูเรีย โดยโมเลกุลของสารที่มีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) จำนวนมากจะละลายน้ำได้ดี เพราะมีหมู่ที่มีขั้วมาก การดึงดูดกันระหว่างโมเลกุลของสารกับ โมเลกุลของน้ำจึงมีมากขึ้น เช่น การละลายของน้ำตาลในน้ำ เป็นต้น (พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์, 2553)

การเพิ่มอุณหภูมิให้กับน้ำจะช่วยให้สารที่สามารถละลายได้ในน้ำส่วนใหญ่มักมีความสามารถละลายในน้ำดีขึ้น ในกรณีการทำความสะอาดเส้นใยที่มีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็น เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และสารแทรก น้ำที่มีอุณหภูมิสูงจะเข้าไปแยกเอาส่วนขององค์ประกอบ

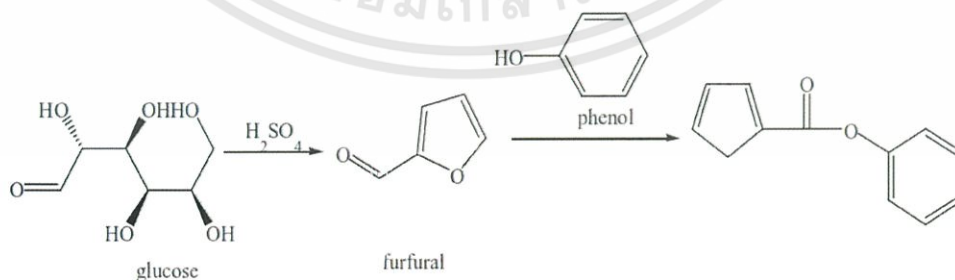
เกือบทั้งหมดออกจากกัน ผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ส่วนของเฮมิเซลลูโลสซึ่งมีองค์ประกอบหลักเป็นน้ำตาลไซโลสจะละลายในน้ำร้อน และสารแทรกส่วนหนึ่งจะถูกสกัดออกจากองค์ประกอบรวม คงเหลือไว้แต่ลิกนินที่อ่อนตัว และเซลลูโลสที่ไม่ละลายน้ำ (Salvado, J. *et al.*, 1998)

2.3.1.1 การตรวจวิเคราะห์น้ำตาลรวม (Total sugar) ด้วยวิธีฟินอล-ซัลฟูริก (Phenol-sulfuric method) (Dubois, M. *et al.*, 1956)

ในน้ำสกัดจากการต้มเส้นใยด้วยน้ำจะมีสารต่างๆถูกสกัดออกมามากมาย โดยหนึ่งในสารที่ถูกสกัดออกมาคือ น้ำตาล ซึ่งน้ำตาลที่ถูกสกัดออกมานี้สามารถตรวจวิเคราะห์ได้โดยกรรมวิธีทางเคมีที่เรียกว่าวิธี ฟินอล-ซัลฟูริก

น้ำตาลประเภท โอลิโกแซคคาไรด์ (Oligosaccharides) พอลิแซคคาไรด์ (Polysaccharide) และอนุพันธ์ของสารเหล่านี้ รวมทั้งพวกเมทิลเอสเทอร์ (Methyl ester) ที่มีหมู่รีดิวซ์อิสระ เมื่อนำมาทำปฏิกิริยากับฟินอล และกรดซัลฟูริกเข้มข้นแล้วจะได้สารประกอบที่มีสีส้มเหลือง สีที่เกิดขึ้นมีความคงตัว ความเข้มของสีที่เกิดขึ้นจะเป็นสัดส่วน โดยตรงกับปริมาณน้ำตาลที่ทำปฏิกิริยา ตรวจสอบปริมาณน้ำตาลรวมได้จากกราฟมาตรฐานที่ได้จากการพล็อตกราฟระหว่างความเข้มข้นของกลูโคสกับค่าการดูดกลืนแสง

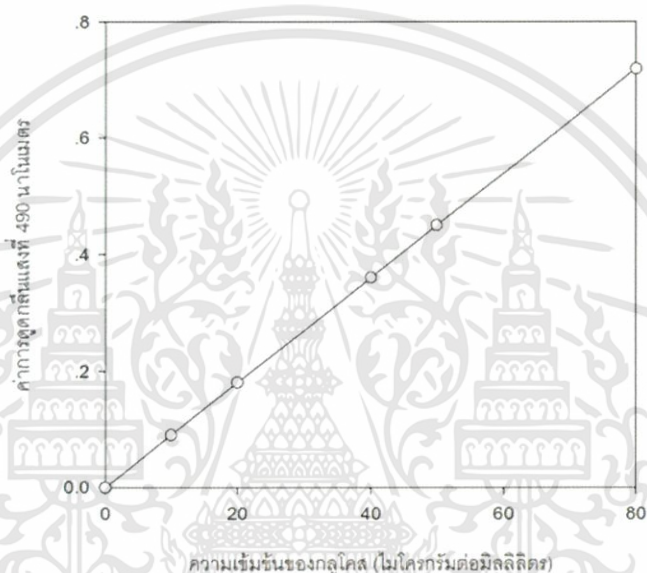
ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่มีอยู่เดิม และที่ได้จากการย่อยสลายสารประกอบคาร์โบไฮเดรตสามารถทำปฏิกิริยากับกรดซัลฟูริกแล้วเกิดเป็นสารประกอบเฟอพิวราลได้ หลักการของวิธีนี้ คือ กรดซัลฟูริกเข้มข้นสลายพันธะไกลโคซิดิกในสารประกอบพวกพอลิแซคคาไรด์ให้แตกออกเป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว (Monosaccharide) ซึ่งจะทำปฏิกิริยาต่อไปเป็นสารประกอบเฟอพิวราล และอนุพันธ์ต่างๆของสารประกอบเฟอพิวราล สารประกอบที่เกิดขึ้นสามารถรวมกันกับสารฟินอลเกิดเป็นอนุพันธ์ของเอสเทอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.15 ได้สารประกอบเชิงซ้อนที่มีสีส้มเหลืองที่สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 480-490 นาโนเมตรได้



รูปที่ 2.15 ปฏิกิริยาของวิธีฟินอล-ซัลฟูริก (Dubois, M. *et al.*, 1956)

เมื่อนำค่าการดูดกลืนแสงไปเทียบกับกราฟมาตรฐานกลูโคส ตัวอย่างกราฟมาตรฐานกลูโคส ดังแสดงในรูปที่ 2.16 จะสามารถหาความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคสในสารละลายตัวอย่างได้ (เนื่องจากน้ำตาลโอลิโกแซคคาไรด์ พอลิแซคคาไรด์ และอนุพันธ์ ถูกกรดซัลฟูริกเข้มข้นสลายพันธะไกลโคซิดิกออกได้เป็นน้ำตาลโมโนแซคคาไรด์ หรือน้ำตาลกลูโคสนั่นเอง) จากสูตร

$$\text{ความเข้มข้นของกลูโคส (กรัมต่อลิตร)} = \frac{(\text{ค่าการดูดกลืนแสงที่ } 490 \text{ นาโนเมตร}) \times (\text{อัตราการใช้จาง})}{(\text{ความชันของกราฟมาตรฐาน}) \times (1,000)}$$



รูปที่ 2.16 กราฟมาตรฐานสารละลายกลูโคส (Dobois et al., 1956)

2.3.2 วิธีการทำความสะอาดเส้นใยด้วยสารละลาย NaOH

การสกัดแยกเซลลูโลสออกจากลิกนิน และองค์ประกอบอื่นๆ ของเนื้อไม้สามารถใช้ต่างในการสกัดแยกเซลลูโลสได้ ซึ่งค่าที่มีความนิยมใช้มาก คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) จะช่วยทำลายลิกนินและสิ่งที่ไม่ใช่เซลลูโลสออกไปโดยเซลลูโลสจะยังอยู่เหมือนเดิม (Browning, B.I., 1967)

การสกัดแยกเซลลูโลสโดยใช้ต่างในการสกัดเรียกว่าวิธีการสกัดเซลลูโลสโดยใช้กรรมวิธีทางเคมี (Chemical process) เป็นการแยกให้เส้นใยแยกกัน (เพ็ญศรี อติวรรณาพัฒน์, 2540) สารเคมีต่างที่ใช้สกัดเซลลูโลสจากวัสดุธรรมชาติต้องเลือกใช้สารเคมีที่สามารถละลายเฮมิเซลลูโลสกับลิกนินได้ เพื่อให้สารเคมีต่างหรือตัวทำละลายนั้นละลายเฮมิเซลลูโลสกับลิกนิน ออกจากเซลลูโลส เช่น NaOH จะเข้าไปล้อมจับเฮมิเซลลูโลส และลิกนิน แล้วนำออกจากโครงสร้างเส้นใยธรรมชาติ

2.4 สับปะรด (Pineapple) (ชงชัย เนมขุนทด, 2530)

2.4.1 ประวัติ

สับปะรด (Pineapple) มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Ananas comosus* (L.) Merr. จัดเป็นผลไม้ในวงศ์ Bromeliaceae มีถิ่นกำเนิดดั้งเดิมอยู่ในทวีปอเมริกาใต้ เขตระหว่างเส้นละติจูด 15-30 องศาใต้ และลองจิจูด 40-60 องศาตะวันตก ได้แก่ บริเวณตอนกลาง และตอนใต้ของประเทศบราซิล รวมทั้งตอนเหนือของอาร์เจนตินา และปารากวัย สับปะรดได้ถูกนำเข้ามาในเมืองไทยเมื่อสมัยกรุงศรีอยุธยาโดยชาวโปรตุเกส

2.4.2 ลักษณะทั่วไป

สับปะรดเป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยวจำพวกไม้เนื้ออ่อนที่มีอายุหลายปี จัดเป็นพวกไม้ดิน (Terrestrials) คือ มีรากอาหารอยู่ในดิน และยังคงมีลักษณะบางประการของไม้อากาศ (Epiphytes) คือ สามารถเก็บน้ำเอาไว้ตามซอกใบได้เล็กน้อย และมีเซลล์พิเศษสำหรับเก็บน้ำเอาไว้ในใบ ทำให้ทนทานต่อช่วงแห้งแล้งได้ดี

ส่วนต่างๆของต้นสับปะรด ดังแสดงในรูปที่ 2.17

1. ลำต้น มีลักษณะคล้ายตะบอง สูงประมาณ 2-4 ฟุต ไม่มีกิ่งก้าน มีกาบใบหุ้มเวียนรอบลำต้น ทำให้เกิดเป็นข้อปล้อง จะมีความยาวแต่ละข้อประมาณ 1-6 เซนติเมตร ข้อที่ยาวที่สุดจะอยู่ตรงกลางของลำต้น บริเวณส่วนข้อของลำต้นเหนือโคนใบจะมีตาโผล่ขึ้นมา ซึ่งต่อไปจะเจริญเป็นหน่อ และรากต่อไป ที่โคนของลำต้นจะมีรากออกมาหนาแน่น
2. ก้านผล จะเชื่อมติดกับส่วนบนของลำต้น ที่พยางผลซึ่งมีใบเล็กๆ ติดอยู่ ที่ก้านผลนี้จะมีตาเล็กๆ พักตัวอยู่ ถ้าสภาพแวดล้อมเหมาะสมก็จะพัฒนาไปเป็นตะเกียง (Slip) สีของก้านผลปกติจะมีสีเขียว เมื่อถึงระยะผลแก่ก้านผลจะเหี่ยวเป็นแนวยาว
3. ใบ มีรูปร่างแคบ เรียวยาว ตอนกลางใบมีลักษณะเป็นร่องคล้ายรางน้ำติดกับก้านผล และลำต้น มีความยาวแตกต่างกันไป ภายในใบจะมีเซลล์พิเศษทำหน้าที่เก็บสำรองน้ำเอาไว้ใช้ในเวลาแห้งแล้ง ได้ใบจะมีลักษณะเป็นร่อง และสันพาดตามแนวยาว ในร่องจะเป็นที่ตั้งของปากใบซึ่งถูกปกคลุมด้วย Trichomes ทำให้ช่วยลดการระเหยของน้ำจากปากใบ และเป็นเหตุผลที่สำคัญที่สับปะรดเป็นพืชที่ทนแล้งได้ดีกว่าพืชอื่นๆหลายชนิด จำนวนใบมีตั้งแต่ 50-100 ใบต่อต้น ขึ้นอยู่กับพันธุ์ และความสมบูรณ์ของต้น
4. ผล มีรูปร่างคล้ายกระบอก จัดเป็นผลรวม (Multiple fruit) ที่เกิดจากการเชื่อมติดกันของผลย่อยจำนวนตั้งแต่ 100-200 ผล เข้ากับแกนกลางของช่อดอก ผลสับปะรดทั่วไปจะมีน้ำหนักเฉลี่ย 2.2 กิโลกรัม มีความยาว 20.5 เซนติเมตร กว้าง 14.5 เซนติเมตร โดยเฉลี่ย

5. จุก คือส่วนขยายพันธุ์ที่มีลักษณะคล้ายหน่อ แต่เกิดขึ้นบนส่วนยอดของผล ใช้ปลูกขยายพันธุ์ได้ดี นับเป็นส่วนสำคัญที่ใช้แบ่งแยกสกุลสับปะรดออกจากสกุลอื่นๆ ในวงศ์นี้ ตามปกติมักจะมีจุกเดียว บางพันธุ์อาจมีหน่อเล็กๆ แตกออกมาจากโคนจุกเดิมเรียกส่วนนี้ว่า จุกตะเกียงหรือจุกย่อย (Crown slips or Crown lets)

6. ตะเกียง คือหน่อที่เกิดจากตาบนก้านผล มีจำนวนแตกต่างกันไปแล้วแต่พันธุ์และความอุดมสมบูรณ์ของดินแม่

7. หน่ออุ้มลูก คือหน่อที่เกิดจากตาในบริเวณจุดเชื่อมระหว่างก้านผล และลำต้น ใช้ขยายพันธุ์ได้เช่นเดียวกับหน่อข้าง ปกติจะมี 1-2 หน่อ

8. หน่อข้าง คือหน่อที่เกิดจากตาบนลำต้น ใช้ขยายพันธุ์ได้ดี ปกติจะมี 2-3 หน่อ

9. หน่อดิน เป็นหน่อที่เกิดจากตาบนของลำต้นส่วนที่อยู่ใต้ผิวดิน มีจำนวนน้อย รูปร่างทรงเรียวยาวเล็ก ใบยาวกว่าหน่อข้าง

10. ราก สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ รากเหนือดินซึ่งอยู่ตามลำต้น ในกาบใบและรากในดินซึ่งเกิดจากลำต้นใต้ดิน ทำหน้าที่หาอาหารและยึดเหนี่ยวลำต้น



รูปที่ 2.17 ส่วนต่างๆของต้นสับปะรด (สันสนีย์ เกษตรสินสมบัติ, 2550)

2.4.3 ประโยชน์ของสับปะรด

สับปะรดมีส่วนต่างๆที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้อย่างกว้างขวางดังต่อไปนี้

1. เนื้อ ใช้รับประทานสด และนำไปทำสับปะรดกระป๋อง น้ำที่คั้นได้จากเนื้อใช้ดื่มสดหรือจะบรรจุเป็นน้ำสับปะรดกระป๋องก็ได้ มีปริมาณน้ำตาลค่อนข้างมาก แสดงดังตารางที่ 2.3 กากที่คั้นเอาน้ำออกแล้ว ยังสามารถนำไปกวนทำแยม ทำเป็นอาหารสัตว์หรือจะนำไปหมักทำเป็นปุ๋ยก็ได้

2. เปลือก สามารถที่จะนำไปเป็นอาหารสัตว์หรือจะคั้นเอาน้ำจากเปลือกของสับปะรดไปทำเป็นน้ำส้มสายชู บรันดี ไวน์ แอลกอฮอล์ และผงชูรส สำหรับกากของเปลือกสับปะรดที่คั้นเอาน้ำออกแล้วยังสามารถที่จะนำไปใช้ทำอาหารสัตว์และปุ๋ยได้

3. ตัน ในลำต้นของสับปะรดมีสารชนิดหนึ่งชื่อเอนไซม์บรอโมมิเลน เมื่อสกัดเอาออกมาแล้วสามารถใช้ฟอกหนังในโรงงานอุตสาหกรรมได้

4. ใบ ใบของสับปะรดจะมีเส้นใยอยู่มากมาย สามารถนำไปใช้ทำเสื้อผ้า แห อวน เชือก หรืออื่นๆ อีกมากมาย

ตารางที่ 2.3 ปริมาณน้ำตาลในผลไม้

ชื่อผลไม้	ปริมาณส่วนที่รับประทาน		ปริมาณน้ำตาล, กรัม			
	ปริมาณ	น้ำหนัก, กรัม	ทั้งหมด	ฟรุกโตส	กลูโคส	ซูโครส
เงาะโรงเรียน	4 ผล	70	12.51	1.75	1.77	8.99
แตงโมกินรี	10 ชิ้นคำ	140	11.20	5.46	2.30	3.44
สับปะรด, ภูเก็ต	6 ชิ้นคำ	70	10.18	2.10	2.01	6.07
สับปะรด, ศรีราชา	6 ชิ้นคำ	70	8.82	2.47	2.31	4.04
ส้มเขียวหวาน	1 ผล	90	10.21	2.17	1.83	6.20

ที่มา : พิมพร วัชรพงศ์กุล, 2549

2.4.4 พันธุ์สับปะรด

สับปะรด ที่มีอยู่ในโลกมีหลายพันธุ์ด้วยกัน แต่ที่มีอยู่ในประเทศไทย มีทั้งหมด 5 พันธุ์ ดังนี้

1. พันธุ์อินทรีชนิด ลำต้นใหญ่ ขอบใบมีหนามแหลมโค้งงอสีแดงอมน้ำตาลตลอดใบ ผลขนาดเล็กดก เนื้อสีเหลืองทอง พันธุ์นี้มีปลุกทั่วไป

2. พันธุ์ขาว ต้นเล็ก ใบสั้นสีเขียวอมเหลือง ขอบใบมีหนาม ผลมีสีเหลืองทอง

3. พันธุ์ปัดดาเวีย หรือ สับประดศรีราชา ทรงพุ่มใหญ่ ใบยาวขอบใบไม่มีหนามยกเว้นปลายใบ ซึ่งจะมีหนามบ้างเล็กน้อย ผลใหญ่ คาดื่น เป็นพันธุ์ซึ่งปลูกทั่วไปและใช้แปรรูปเป็นสับประดกระป๋องในปัจจุบัน

4. พันธุ์นางแล หรือ พันธุ์น้ำผึ้ง ลักษณะคล้ายๆ พันธุ์ปัดดาเวียแต่ผลค่อนข้างกลม คาดใหญ่ ลึก เปลือกบางเมื่อเทียบกับพันธุ์ปัดดาเวีย

5. พันธุ์ภูเก็ท หรือ พันธุ์สวี ใบสีเขียวอ่อน ขอบใบมีหนามสีแดง ผลเล็กยาว คาดลึก เนื้อผลสีเหลือง มีรสหวานกรอบ

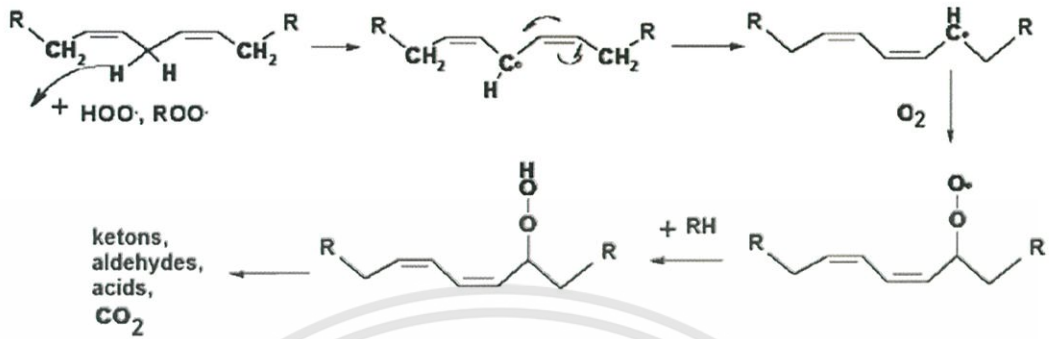
2.5 พลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene; HDPE)

(Fried, J.R., 1995), (Atiqullah, M. and Hamid, S.H., 1995)

พอลิเอทิลีน (PE) เป็นเทอร์โมพลาสติกชนิดหนึ่ง ที่ได้จากการสังเคราะห์สารปิโตรเลียม มีการนำไปใช้แพร่หลายในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมครัวเรือน อุตสาหกรรมยานยนต์ หรืออุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ สามารถจำแนกเป็นชนิดต่างๆ ได้แก่ HDPE MDPE LDPE และ LLDPE ซึ่งแต่ละชนิดมีโครงสร้างโมเลกุลและสมบัติทางกายภาพต่างกัน จึงนำไปใช้ประโยชน์แตกต่างกัน สำหรับ HDPE เป็น PE ชนิดหนึ่ง มีลักษณะโครงสร้างเป็นเส้นตรงเกือบตลอด องค์ประกอบส่วนใหญ่เป็น $(CH_2)_n$ และมีส่วนที่เป็นกิ่งก้านน้อยมาก ผลิตโดยผ่านกระบวนการซีเกอร์ (Ziegler process) และกระบวนการฟิลลิปส์ (Phillips process) มีการนำไปใช้งานในปริมาณมาก และหลากหลาย ทั้งในอุตสาหกรรมเกษตร ประมง บรรจุภัณฑ์ เป็นต้น เนื่องจากมีสมบัติเหมาะสม เช่น มีสมบัติเด่นด้านความสามารถในการขึ้นรูปง่าย มีความแข็งแรง มีความคงทนสูง มีความเหนียว และทนทานต่อแรงดึงปานกลาง เหมาะสำหรับงานเป่าฟิล์ม งานเป่าแบบ งานท่อ งานฉีดแบบ และงานเส้นใย ทำให้สามารถนำมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์มากมายหลายชนิด จึงเป็นที่ยอมรับอย่างกว้างขวางทั้งตลาดในประเทศ และต่างประเทศ

ในขั้นตอนการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิสูง PE อาจสลายตัวหรือเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation reaction) เกิดเป็นอนุมูลอิสระขึ้นบนสายโซ่ จากนั้นสามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในบรรยากาศกลายเป็นสารประกอบเปอร์ออกไซด์ และเกิดการสลายตัวต่อไป โดยแบ่งสายโซ่ออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกได้เป็นสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนเช่นเดิม ส่วนที่สองได้เป็นสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนที่ปลายข้างหนึ่งกลายเป็นหมู่คาร์บอกซิล ซึ่งสามารถเหนียวทำให้เกิดการสลายตัวต่อไป แสดงกลไกการเกิดปฏิกิริยา ดังแสดงในรูปที่ 2.18 ทำให้ความยาวของสายโซ่โมเลกุล และน้ำหนักโมเลกุลลดลง โมเดลความยาวของสายโซ่พอลิเมอร์ก่อน และหลังการเกิดปฏิกิริยา

ออกซิเดชัน ดังแสดงในรูปที่ 2.19 ส่งผลให้สมบัติเชิงกลของพลาสติกลดลง เช่น สมบัติการทนต่อแรงดึง และสมบัติการทนต่อแรงกระแทก



รูปที่ 2.18 กลไกการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของ PE (Chubukov, P., et al., 2009)



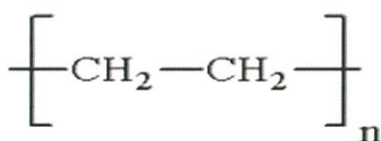
รูปที่ 2.19 ความยาวของสายโซ่พอลิเมอร์ก่อน และหลังการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน

HDPE นิยมนำกลับมาขึ้นรูปใหม่ หรือนำไปผสมกับพลาสติกบริสุทธิ์ แล้วทำการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ แต่ควรคำนึงถึงความบริสุทธิ์ของพลาสติกที่นำมาขึ้นรูปใหม่ ซึ่งหากกระบวนการแยกพลาสติกไม่ดีพอ อาจทำให้พลาสติกขึ้นรูปใหม่มีการปนเปื้อนของสิ่งสกปรก ส่งผลให้สมบัติเชิงกลของพลาสติกลดลงเช่นกัน ผลิตภัณฑ์ HDPE ที่นิยมนำมาขึ้นรูปใหม่ ได้แก่ บรรจภัณฑ์ชนิดต่างๆ เช่น ขวดน้ำดื่ม ขวดแชมพู ถังแกสลอนพลาสติก ถังขยะ ถาดใส่ขนมปัง ถัง เป็นต้น พวกพลาสติก HDPE ที่มีความแข็งแรงโดยส่วนใหญ่เป็นเกรดฉีด (Injection grade) เป็นที่ทราบกันว่าพลาสติกที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปมาแล้ว จะมีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าพลาสติกบริสุทธิ์ ดังนั้นในการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ จึงนิยมผสมพลาสติกเหล่านี้ร่วมกับสารเติมแต่ง เพื่อปรับปรุงสมบัติต่างๆ

2.5.1 สมบัติทั่วไปของ HDPE

HDPE มีความเป็นผลึกสูง เนื่องจากมีโครงสร้างเป็นสายโซ่ตรง และมีโซ่กิ่งน้อยมาก ไม่มีขั้ว มีสมบัติต้านทานทางเคมีสูง และไม่ดูดซึมของผสม จัดว่าเป็นสารที่ป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำ (Water vapor barrier) ที่ดี โดยทำการประยุกต์ใช้ในเรื่องของบรรจภัณฑ์ มีสมบัติทางไฟฟ้า

ที่ดี HDPE ที่มีช่วงของน้ำหนักโมเลกุลปานกลางถึงสูงจะมีสมบัติด้านความทนต่อแรงกระแทกได้ดีมาก สูตรโครงสร้างอย่างง่าย ดังแสดงในรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 สูตร โครงสร้างอย่างง่ายของ HDPE

2.5.2 สมบัติเฉพาะของ HDPE

สมบัติของ PE แต่ละชนิดขึ้นอยู่กับตัวแปร 4 อย่าง ดังต่อไปนี้

1. ความหนาแน่น (Density)
2. น้ำหนักโมเลกุล (Molecular Weight; MW)
3. การกระจายของน้ำหนักโมเลกุล (Molecular Weight Distribution; MWD)
4. สารเติมแต่ง (Additives)

1. ความหนาแน่น (Density)

ความหนาแน่นเป็นตัวแปรสำคัญในการหาคุณสมบัติของพลาสติก PE แสดงดังตารางที่ 2.4 โดย HDPE เป็นโฮโมพอลิเมอร์ที่มีความหนาแน่นสูงสุด มีความเหนียว (Stiffness) และสมบัติป้องกันการซึมผ่าน (Barrier properties) ที่ดีมาก แต่โดยทั่วไปจะให้ค่า Environmental Stress Crack Resistance (ESCR) ที่ต่ำ (ESCR คือ ความสามารถในการต้านทานการแตก ที่มาจาก Mechanical หรือ Chemical stress) โดยปกติความหนาแน่นที่สูงกว่า จะปรับปรุงสมบัติเชิงกล เช่น ความทนต่อแรงดึง (Tensile strength) ความเหนียว (Stiffness) และความแข็ง (Hardness) และสมบัติทางความร้อน เช่น จุดอ่อนตัว (Heat distortion temperature) และสมบัติป้องกันการซึมผ่าน (Barrier properties) ส่วนที่มีความหนาแน่นที่ต่ำกว่าจะปรับปรุงสมบัติทางด้านความทนต่อแรงกระแทก (Impact strength) และ ESCR

ตารางที่ 2.4 ความหนาแน่นของพลาสติก PE แต่ละชนิด

ชนิด	ความหนาแน่น (g/cm ³)
PE ที่มีความหนาแน่นต่ำ (LDPE)	0.92-0.94
PE ที่มีความหนาแน่นปานกลาง (MDPE)	0.93-0.95
PE ที่มีความหนาแน่นสูง (HDPE)	0.95-0.97

ที่มา : Harris, M.E., and Walker, B.J., 2010

2. น้ำหนักโมเลกุล (Molecular Weight; MW)

ปกติ HDPE จะมีน้ำหนักโมเลกุล (MW) อยู่ในช่วง 40,000-300,000 g/mol มีค่า Melt flow index (MI) อยู่ในช่วง 0.02-100 g/10 min โดยน้ำหนักโมเลกุลจะมีผลต่อค่า MI เนื่องจากความหนืดที่แตกต่างกันคือ ถ้าน้ำหนักโมเลกุลสูงแล้วความหนืดจะสูงทำให้ MI ต่ำ และถ้าน้ำหนักโมเลกุลต่ำแล้วความหนืดจะต่ำทำให้ MI สูง น้ำหนักโมเลกุลที่สูงกว่า (MI ต่ำกว่า) จะปรับปรุงความทนต่อการหลอมเหลว (Melt strength) ให้ความเหนียว (Toughness) ดีกว่าและ ESCR ที่สูงกว่า อย่างไรก็ตาม น้ำหนักโมเลกุลที่สูงกว่าจะทำให้เวลานำไปใช้งานต้องใช้อุณหภูมิ หรือความดันสูงตามไปด้วยเนื่องจากความหนืดที่เพิ่ม

3. การกระจายของน้ำหนักโมเลกุล (Molecular Weight Distribution; MWD)

การกระจายของน้ำหนักโมเลกุล (MWD) ของ PE จะอยู่ในช่วงแคบหรือกว้าง ขึ้นอยู่กับตัวเร่งปฏิกิริยา และกระบวนการที่ใช้ HDPE ที่มีการกระจายของน้ำหนักโมเลกุลแคบจะให้การโค้งงอ (Warpage) ที่ต่ำ และค่าความทนต่อแรงกระแทกสูง ส่วน HDPE ที่มีการกระจายของน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วงปานกลางถึงกว้าง จะให้ Processability ที่ดีกว่าใน Extrusion process สำหรับ HDPE ที่มีการกระจายของน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วงกว้างจะปรับปรุง Melt strength และความต้านทานต่อการคืบได้ดี การเลือกใช้ให้เหมาะสมต้องเลือกใช้ตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ

4. สารเติมแต่ง (Additives)

สารเติมแต่งที่ใช้ อาจใช้ Antioxidants เพื่อป้องกันการสลายตัวของพอลิเมอร์ในระหว่างอยู่ในกระบวนการขึ้นรูป และในระหว่างการใช้งาน หรือใช้ UV stabilizer เพื่อป้องกันการสลายตัวเนื่องจากแสงอัลตราไวโอเล็ต นอกจากนี้ยังมีสารเติมแต่งชนิดอื่น เช่น สารตัวเติม (Fillers) เพื่อลดต้นทุนการผลิต สารเสริมแรง (Reinforcement) ปรับปรุงสมบัติเชิงกล สารให้ฟอง (Blowing agents) สารหน่วงการติดไฟ (Flame retardants) เป็นต้น

2.6 สารเติมแต่ง (Additives) (อิทธิพล แข็งชัด, ม.ป.ป.)

สารเติมแต่ง คือ สารที่เติมเข้ากับพอลิเมอร์เพื่อปรับปรุงสมบัติบางประการ หรือทำให้สามารถขึ้นรูปได้ง่ายขึ้น หรือทำให้ต้นทุนการผลิตลดลง สารเติมแต่งมีหลายชนิด และหลายรูปแบบ เช่น สารเติมแต่งในรูปของแข็ง ของเหลว อาจเป็นได้ทั้งสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ สารเติมแต่งหนึ่งชนิดอาจทำหน้าที่ได้มากกว่าหนึ่งอย่าง เช่น ช่วยเพิ่มเนื้อของวัสดุ และช่วยเสริมแรงในพอลิเมอร์ การเติมสารเติมแต่งเข้ากับพอลิเมอร์จะต้องเติมในปริมาณที่เหมาะสม เนื่องจากสารเติมแต่งมีผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ หากเติมสารเติมแต่งมากหรือน้อยเกินไป อาจให้ผลในทางลบแก่พอลิเมอร์ได้

สารเติมแต่งที่ดีควรมีสมบัติ ดังนี้

1. ทำหน้าที่ (Function) เป็นสารเติมแต่งที่มีคุณภาพสูง
2. มีเสถียรภาพ (Stability) ที่อุณหภูมิขึ้นรูป และในขณะใช้งาน
3. ไม่เกิดการแพร่ออก (Bleeding หรือ Blooming)
4. ไม่เป็นพิษ (Toxicity)
5. ราคาไม่แพง (Cheap)
6. มีกระจายตัวที่ดี (Good distribution and dispersion) ในพอลิเมอร์

ตัวอย่างสารเติมแต่งที่นิยมสำหรับพอลิเมอร์ เช่น

1. สารเพิ่มเนื้อ หรือสารตัวเติม (Fillers)
2. สารให้สี (Pigments)
3. สารช่วยผสม (Compatibilizers) และสารคู่ควบ (Coupling agents)
4. แอนติออกซิแดนซ์ (Antioxidants)
5. สารเพิ่มเสถียรภาพทางแสงและยูวี (Light & UV Stabilizers Absorbers)
6. สารหล่อลื่น (Lubricants) และสารช่วยกระบวนการผลิต (Processing aids)
7. พลาสติกไซเซอร์ (Plasticizers)
8. สารเพิ่มเสถียรภาพความร้อน (Heat stabilizers)
9. สารเพิ่มความเหนียวติด (Tackifier)
10. สารหน่วงไฟ (Flame retardants)
11. สารลดไฟฟ้าสถิต (Antistatic agents)
12. สารต้านเชื้อราและจุลินทรีย์ (Biocides)

ในที่นี้จะกล่าวถึงสารเติมแต่งที่เกี่ยวข้องกับโครงการพิเศษเพียง 3 ชนิด คือ

1. สารช่วยผสม (Compatibilizers)
2. แอนติออกซิแดนซ์ (Antioxidants)
3. สารหล่อลื่น (Lubricants) และสารช่วยกระบวนการผลิต (Processing aids)

2.6.1 สารช่วยผสม (Compatibilizers) (Folker, M.J. and Hope, P.S., 1997)

ปัจจัยสำคัญในการพัฒนาพอลิเมอร์ผสมนั้น คือ เทคนิคที่ใช้ในการผสมเพื่อให้สามารถเข้ากันได้ โดยทั่วไปการเข้ากันได้ หมายถึง การผสมเข้ากันได้ในระดับโมเลกุลของพอลิเมอร์ที่นำมาผสมกัน ไม่มีการแยกเฟสขององค์ประกอบที่นำมาผสม และสามารถผลิตพอลิเมอร์ผสมให้มีสมบัติที่เหมาะสมกับการใช้งานในรูปแบบต่างๆ ได้ ซึ่งวิธีการผสมให้สามารถเข้ากันได้มีวิธีการต่างๆ ดังนี้

1. การเติมบล็อกหรือกราฟต์โคพอลิเมอร์เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ (Addition of block or graft copolymers)
2. การเติมพอลิเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันหรือส่วนที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาเป็นสารช่วยผสม (Addition of functional polymers)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

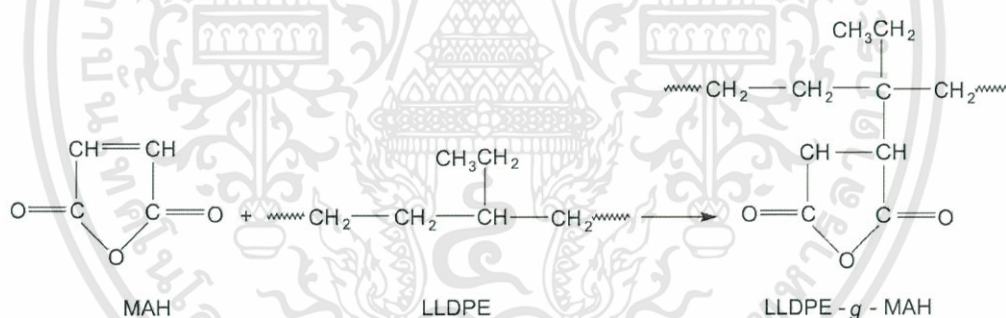
3. การทำให้เกิดปฏิกิริยาในระหว่างการผสม (Reactive blending)

โดยในที่นี้จะขอกล่าวถึงวิธีการผสมที่ใช้ใน โครงการพิเศษนี้เพียงวิธีเดียว คือวิธีการเติมพอลิเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันหรือส่วนที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาเป็นสารช่วยผสม (Addition of functional polymers)

การเติมพอลิเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันหรือส่วนที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาเป็นสารช่วยผสม

(Addition of functional polymers)

การเติมพอลิเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันเพื่อทำหน้าที่เป็นสารช่วยผสม โดยการนำพอลิเมอร์ที่มีลักษณะทางเคมีที่เหมือนกับพอลิเมอร์ที่จะทำการผสมมาดัดแปลง โมเลกุล โดยการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันหรือส่วนที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาลงบน โมเลกุล ซึ่งหมู่ฟังก์ชันที่เพิ่มเข้าไปต้องสามารถเกิดปฏิกิริยากับพอลิเมอร์ชนิดที่สองได้ ตัวอย่างการใช้พอลิเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันเป็นสารช่วยผสม เช่น PE ที่ดัดแปลง โมเลกุลด้วยมาลิกอิกแอนไฮไดรด์ Polyethylene grafted Maleic Anhydride (PE-g-MA) ลักษณะโครงสร้างของ PE-g-MA ดังแสดงในรูปที่ 2.21

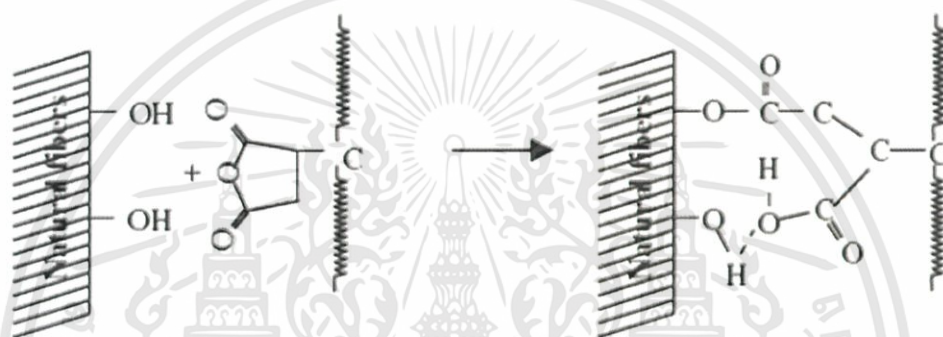


รูปที่ 2.21 ลักษณะโครงสร้างของ PE-g-MA (Jeziórska, R., 2006)

สมบัติโดยทั่วไป PE-g-MA จะมีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่า PE เนื่องจากการตอกกิ่งทำให้น้ำหนักโมเลกุลของ PE ลดลง และทำให้สมบัติทางความร้อนด้อยลงโดยมีอุณหภูมิการหลอมเหลวต่ำกว่า PE (Chaozhong L. *et al.*, 2000)

สาเหตุที่ต้องเติมสารช่วยผสมนี้ เพราะเส้นใยธรรมชาติ และ PE มีการยึดเกาะระหว่างผิวทั้งสองเฟสที่ต่ำ เนื่องจากเส้นใยธรรมชาติมีความเป็นขี้จากหมู่ไฮดรอกซิลของเซลลูโลสในเส้นใย ทำให้มีลักษณะของการชอบน้ำ ในทำนองเดียวกัน PE มีลักษณะของความไม่มีขี้จึงทำให้มีลักษณะของการไม่ชอบน้ำ ดังนั้นการเติม PE-g-MA ที่มีสมบัติทั้งมีขี้ และไม่มีขี้ในตัวเดียวกัน

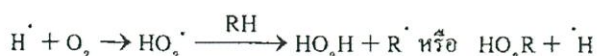
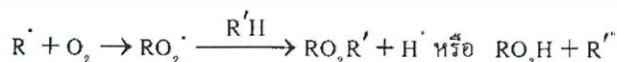
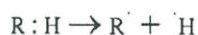
จึงสามารถปรับปรุงการยึดเกาะระหว่างผิวเฟสของเส้นใยธรรมชาติ กับ PE ได้ ดังแสดงกลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่างเส้นใยธรรมชาติกับ PE-g-MA ดังแสดงในรูปที่ 2.22 กล่าวคือ วงแหวนไฮดรอกซิลของ PE-g-MA จะเกิดพันธะโคเวเลนต์กับหมู่ไฮดรอกซิลของเส้นใยธรรมชาติกลายเป็นพันธะเอสเทอร์ นอกจากนี้ยังสามารถเกิดเป็นพันธะไฮโดรเจนได้อีกด้วย (Luo *et al.*, 2002) ในปัจจุบันการใช้ PE-g-MA เป็นที่ยอมรับในอุตสาหกรรมคอมโพสิต และมีการจำหน่ายในเชิงการค้ามากมาย เช่น Epolene™, polybond™ และ Exxelor™ ซึ่งมีปริมาณมาลิกแอนไฮดรายด์ตั้งแต่ 0.1-4.0 % wt เป็นต้น



รูปที่ 2.22 กลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่างเส้นใยธรรมชาติกับ PE-g-MA (Park *et al.*, 2006)

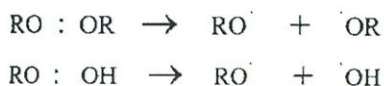
2.6.2 แอนติออกซิแดนซ์ (Antioxidants)

การทำปฏิกิริยาของพอลิเมอร์ในบรรยากาศที่มีออกซิเจนจะเกิดออกซิเจนเป็นแบบอนุมูลอิสระที่เร่งด้วยความร้อน โดยเฉพาะในระหว่างกระบวนการผลิต และในระหว่างอุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลานาน ปฏิกิริยาการเกิดออกซิเดชันเกิดได้เอง (Autooxidation) ดังแสดงในรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 ปฏิกิริยาการเกิดออกซิเดชันได้เอง (สมศักดิ์ วรมงคลชัย, 2547)

การเกิดออกซิเดชันได้เองนี้ ทำให้เกิดเปอร์ออกไซด์ และไฮเปอร์ออกไซด์ขึ้นอย่างรวดเร็ว เกิดความไม่เสถียร และสลายตัวได้เป็นอนุมูลอิสระ ดังแสดงในรูปที่ 2.24 ปฏิริยาการเกิดอนุมูลอิสระ



รูปที่ 2.24 ปฏิริยาการเกิดอนุมูลอิสระ (สมศักดิ์ วรมงคลชัย, 2547)

อนุมูลอิสระที่ได้จะสลายตัวต่อไปเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ประเภทคาร์บอนิล คาร์บอกซิล การเชื่อมโครงสร้างตาข่าย การแตกแยก การเกิดดิสพรอพอชัน และ/หรือ ดีพอลิเมอไรเซชัน ทำให้มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักโมเลกุลที่มีผลต่อสมบัติโดยรวม เช่น การเปลี่ยนแปลงความไม่อิ่มตัวทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสี การเปลี่ยนแปลงความมีขี้ทำให้ความต้านทานทางกระแสไฟฟ้าลดลง และสารที่ถูกออกซิไดซ์ได้ง่ายมีผลต่อการเข้าทำปฏิริยาในทางชีวภาพได้ง่าย เป็นต้น

สารป้องกันการเกิดออกซิเดชัน จัดเป็นสารปรับแต่งเพื่อป้องกันหรือทำให้การเข้าทำปฏิริยาของออกซิเจนช้าลง แบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด คือ

1. สารช่วยการแตกของสายโซ่แบบอนุมูลอิสระ
2. สารป้องกันการสลายตัวของเปอร์ออกไซด์แบบไม่เกิดอนุมูล
3. สารเชิงซ้อนประเภทลดการกระตุ้นของโลหะ

โดยในที่นี้จะขอกล่าวถึงที่เกี่ยวข้องกับ โครงงานพิเศษนี้เพียง 2 ชนิด คือ สารช่วยการแตกของสายโซ่แบบอนุมูลอิสระ และสารป้องกันการสลายตัวของเปอร์ออกไซด์แบบไม่เกิดอนุมูล

1. สารช่วยการแตกของสายโซ่แบบอนุมูลอิสระ (Free-radical chain-breakers)

สารป้องกันการเกิดออกซิเดชันแบบนี้นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางจึงเรียกว่าเป็นสารป้องกันการเกิดออกซิเดชันชนิดปฐมภูมิ (Primary antioxidants) โดยสารพวกนี้จะเข้าทำปฏิริยากับอนุมูลที่แตกแยก แล้วเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ที่เสถียร ดังแสดงในรูปที่ 2.25

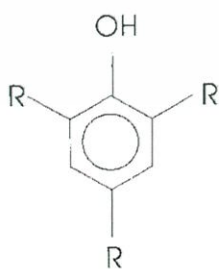


รูปที่ 2.25 การเข้าทำปฏิกิริยาของสารป้องกันการเกิดออกซิเดชันปฐมภูมิ

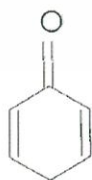
(สมศักดิ์ วรมงคลชัย, 2547)

สารป้องกันการเกิดออกซิเดชันแบบอนุมูล (A^*) เป็นสารที่ไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยา สามารถทำให้เกิดเสถียรภาพได้โดยการเรโซแนนซ์ของพวกอะโรมาติก และปล่อยพลังงานส่วนเกินออกมาได้โดยไม่เกิดอันตราย สารประกอบประเภทการแตกแยกของสายโซ่แบบอนุมูลอิสระ โดยทั่วไปมี 2 ชนิด คือ ฮินเดอร์ฟีโนล (Hindered phenol) และไดเอริลเอมีน (Diaryl amines) โดยในที่นี้จะขอกล่าวถึงที่เกี่ยวข้องกับโครงงานพิเศษนี้เพียง 1 ชนิด คือ ฮินเดอร์ฟีโนล (Hindered phenol)

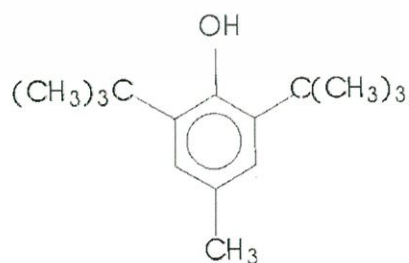
ฮินเดอร์ฟีโนล (Hindered phenol) เป็นกลุ่มไฮดรอกซีอะโรมาติกในฟีโนล ดังแสดงในรูปที่ 2.26ก. มีผลต่อการยับยั้งปฏิกิริยาการแตกแยกของสายโซ่แบบอนุมูลอิสระได้ มีแนวโน้มทำให้เกิดโครงสร้างประเภทควินอยด์ (Quinoid) ดังแสดงในรูปที่ 2.26ข. ที่มีผลต่อการเปลี่ยนสี แต่ถ้าแทนที่วงแหวนเบนซีนตรงตำแหน่งออร์โธ (Ortho) และพารา (Para) จะสามารถป้องกันการเกิดโครงสร้างประเภทควินอยด์ได้ สารแทนที่ในกลุ่มนี้ ได้แก่ ได-เทอร์เชียรี-บิวทิล-พารา-ครีซอล (di-t-butyl-p-cresol) หรือ บิวทิลเลทเต็ด ไฮดรอกซี โทลูอีน (Butylated hydroxy toluene; BHT) ดังแสดงในรูปที่ 2.26ค. สารชนิดนี้นำมาใช้กับพอลิเมอร์ได้เป็นอย่างดี เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิค่อนข้างต่ำ ถ้านำไปใช้ที่อุณหภูมิสูงจะระเหยไวกเกินไป และอาจหมดไปก่อนที่จะได้ใช้ประโยชน์ ด้วยเหตุผลนี้จึงหันมาใช้ฟีโนลที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงขึ้นเพื่อที่จะลดความสามารถในการระเหยลง สารที่นิยมนำมาใช้ได้แก่ ได-ไตร และเตตระฟีโนล สารเหล่านี้นำมาใช้ที่อุณหภูมิสูงๆ ได้ และให้สมบัติที่ดีกว่า BHT



ก. ฮินเดอร์ฟีโนล



ข. ควินอยด์



ค. DTBP หรือ BHT

รูปที่ 2.26 โครงสร้างของสารประกอบฮินเดอร์ฟีโนล (สมศักดิ์ วรมงคลชัย, 2547)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. สารป้องกันการสลายตัวของเปอร์ออกไซด์แบบไม่เกิดอนุมูล (Non-radical peroxide decomposers)

ในบางครั้งการใช้สารช่วยในการแตกตัวของสายโซ่แบบอนุมูลอิสระ ไม่สามารถป้องกันการเกิดเปอร์ออกไซด์ได้ จึงต้องเติมสารปรับแต่งอีกชนิดหนึ่งลงไปเพื่อเป็นกลไกป้องกันขั้นที่สอง สารปรับแต่งชนิดนี้จะสลายเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นด้วยกระบวนการแบบไม่เกิดอนุมูล โดยจะไม่ยับยั้งปฏิกิริยาการเสียดคุณภาพแบบอนุมูลได้ สารปรับแต่งประเภทนี้ ได้แก่ สารอินทรีย์ฟอสไฟต์ (Organic phosphites) และอะลิฟาติกซัลไฟด์ (Aliphatic sulfides) โดยในที่นี้จะขกกล่าวถึงที่เกี่ยวข้องกับโครงการพิเศษนี้เพียง 1 ชนิด คือ สารอินทรีย์ฟอสไฟต์ (Organic phosphites)

สารอินทรีย์ฟอสไฟต์ (Organic phosphites; $(RO)_3P$) นิยมใช้เป็นสารป้องกันการเกิดออกซิเดชันสำหรับพลาสติกโดยอาจใช้เพียงอย่างเดียว หรือใช้ร่วมกับสารช่วยในการแตกตัวของสายโซ่แบบอนุมูลอิสระก็ได้ เช่น อินเดอร์ฟินอลเมื่อใช้ร่วมกับสารอินทรีย์ประเภทฟอสไฟต์ อาจทำหน้าที่ในการสลายเปอร์ออกไซด์ให้เป็นแบบที่ไม่เกิดอนุมูล และจากปฏิกิริยาจะเกิดการออกซิไดซ์ได้เป็นฟอสเฟต ดังแสดงในรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.27 ปฏิกิริยาการเกิดฟอสเฟตจากการสลายเปอร์ออกไซด์

(สมศักดิ์ วรมงคลชัย, 2547)

2.6.3 สารหล่อลื่น (Lubricants) และสารช่วยในกระบวนการผลิต (Processing aids)

สารหล่อลื่นนิยมเรียกเป็นสารแยกส่วน (Parting agents) โดยสามารถเป็นได้ทั้งสารหล่อลื่นภายใน และสารหล่อลื่นภายนอก เช่น นำมาใช้กับผิวของแม่พิมพ์ ทำให้เกิดเป็นฟิล์มบางๆ เกาะที่ผิวของโลหะ ช่วยป้องกันไม่ให้ผิวของโลหะเปียกน้ำ หรือเป็นสารหล่อลื่นในสารประเภทเทอร์โมพลาสติก และเทอร์โมเซตไม่ให้มีปัญหาในเรื่องของการติดแม่พิมพ์ หรืออุปกรณ์ในกระบวนการในการผลิต

1. หน้าที่ของสารหล่อลื่น (Functions of lubricants)

การนำสารหล่อลื่นมาใช้จะช่วยทำให้แรงเสียดทานระหว่าง โมเลกุลลดลง ช่วยปรับปรุงสมบัติการไหลของพอลิเมอร์ ทำให้ลักษณะการไหลดีขึ้น ช่วยลดอุณหภูมิของกระบวนการลง ช่วยให้พอลิเมอร์หลอมเหลวรวมเป็นเนื้อเดียวกับองค์ประกอบอื่นๆ ช่วยประหยัดพลังงาน และเพิ่มผลผลิตในการผลิต นอกจากนี้สารหล่อลื่นยังมีหน้าที่ดังต่อไปนี้

- เม็ดพลาสติกที่มีสารหล่อลื่นอยู่ ทำให้การไหลในอุปกรณ์ป้อนวัสดุเป็นไปด้วยดี
- ควบคุมความร้อนเนื่องจากแรงเสียดทาน และอัตราการหลอมเหลว
- ลดความหนืดของหลอมเหลว และกำลังที่ต้องใช้ ทำให้เกิดการไหลได้อย่างรวดเร็ว
- ลดการบวมของสาย
- ลดการเสียคุณภาพเนื่องจากความเฉือน (Shear degradation)
- ช่วยให้พอลิเมอร์หลุดออกจากอุปกรณ์ทางกระบวนการ เช่น สาย แม่พิมพ์ ได้ง่ายขึ้น
- เพิ่มความเงา

2. สารหล่อลื่นภายใน และสารหล่อลื่นภายนอก

สารหล่อลื่นภายใน สามารถละลายได้ดีในพอลิเมอร์ และทำหน้าที่เหมือนกับสารปรับสภาพพลาสติกจำนวนเล็กน้อย หรือเป็นพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ช่วยทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลแตกออก เกิดการไหลไปมาได้ จึงช่วยลดความหนืดของพอลิเมอร์หลอมเหลวได้

ส่วนสารหล่อลื่นภายนอก จัดเป็นสารที่ละลายเข้ากันได้เพียงกึ่งหนึ่งหรือไม่เข้ากันเลย (Semi-compatible or incompatible) กับพอลิเมอร์ และอยู่ตรงบริเวณผิวของพอลิเมอร์ ในกระบวนการผลิตจะช่วยให้พอลิเมอร์หลุดออกจากอุปกรณ์การผลิต หรือเพื่อลดแรงเสียดทาน และลดการยึดเกาะของผลิตภัณฑ์ในการนำไปใช้ (สมศักดิ์ วรมงคลชัย, 2547)

ตารางที่ 2.5 ลักษณะเฉพาะของสารหล่อลื่นภายใน และสารหล่อลื่นภายนอก

สารหล่อลื่นภายใน	สารหล่อลื่นภายนอก
1. วัสดุที่ใช้เป็นสารหล่อลื่นภายในต้องสามารถเข้ากันได้กับพอลิเมอร์หลักที่ใช้	1. วัสดุที่ใช้เป็นสารหล่อลื่นภายนอกไม่สามารถเข้ากันได้กับพอลิเมอร์หลักที่ใช้
2. สารหล่อลื่นภายในทำให้เกิดแรงระหว่างโมเลกุล	2. สารหล่อลื่นภายนอกมีความสามารถในการละลายได้กับพอลิเมอร์ค่อนข้างต่ำ และเกิดเป็นฟิล์มโมเลกุลเดี่ยวอยู่ระหว่างอนุภาคพอลิเมอร์และผิวโลหะร้อน ทำให้ลดแรงยึดเกาะระหว่างโมเลกุลลง
3. หน้าที่หลักของสารหล่อลื่นภายในคือ การลดความหนืดของหลอมไหล ช่วยให้พอลิเมอร์หลอมไหลได้โดยไม่มีผลต่อการหลอมของสารประกอบ	3. หน้าที่หลักของสารหล่อลื่นภายนอกคือ การลดความเสียดทานระหว่างอนุภาคในกระบวนการหลอม ด้วยเหตุนี้จึงมีผลอย่างมากต่อเวลาที่ใช้ในการหลอมสูตรผสม
4. ภายหลังการหลอม สารหล่อลื่นภายในมีผลต่อสายโซ่ของพอลิเมอร์	4. ภายหลังการหลอม สารหล่อลื่นภายนอกจะอยู่ข้างผิวของพอลิเมอร์หลอมเหลว และมีผลในการเตรียมสารหล่อลื่นด้านผิวโลหะร้อนของอุปกรณ์ในกระบวนการ

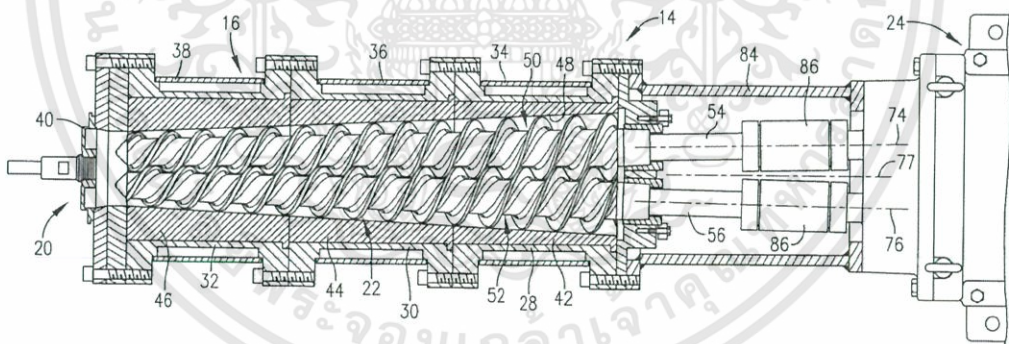
ที่มา : Lutz, J.T., 1989

2.7 การผสมสารเติมแต่งในพลาสติก (นิลบล เผือกบัวขาว, 2550)

วิธีการผสมสารเติมแต่งในพลาสติกที่นิยมใช้กันมี 2 วิธี คือ วิธีผสมองค์ประกอบครั้งเดียว หรือแบบแบช (Batch) และวิธีผสมต่อเนื่อง (Continuous) เครื่องผสมที่ใช้สำหรับผสมแบบแบช ได้แก่ เครื่องบดสองลูกกลิ้ง (Two-rolls mill) และเครื่องผสมภายใน (Internal mixer) ส่วนเครื่องผสมที่ใช้สำหรับผสมแบบต่อเนื่องที่นิยม ได้แก่ เครื่องหลอมอัดรีดทั้งชนิดเกลียวหนอนเดี่ยว และเกลียวหนอนคู่ (Single or Twin-screw extruder) โดยส่วนผสมจะส่งผ่านอย่างต่อเนื่อง ในที่นี้ ขอกล่าวถึงเพียงเครื่องผสมที่ใช้ใน โรงงานพิเศษนี้ คือ เครื่องหลอมอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่

เครื่องหลอมอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ (Twin-screw extruder)

เครื่องหลอมอัดรีด เป็นเครื่องผสมสำหรับผสมฟิลเลอร์หรือสารเติมแต่งอื่นๆ เข้ากับพอลิเมอร์ในลักษณะแบบต่อเนื่อง เพื่อให้ได้สารผสม (Compound) ที่มีลักษณะและสมบัติตามต้องการ นิยมใช้ชนิดเกลียวหนอนคู่มากกว่าชนิดเกลียวหนอนเดี่ยว เนื่องจากเครื่องหลอมอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่มีประสิทธิภาพของการผสมที่ทำให้การกระจายตัวสูงกว่า แสดงภาพตัดขวางของเครื่องหลอมอัดรีด ดังแสดงในรูปที่ 2.28



รูปที่ 2.28 ภาพตัดขวางของเครื่องหลอมอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่

(Hauck, B.W. and Wenger, L.G., 2003)

ตามหลักแล้ว เทอร์โมพลาสติกทุกชนิดสามารถทำการหลอมอัดรีดได้ แต่มีข้อจำกัด คือ พลาสติกนั้นเมื่ออ่อนตัวต้องมีความหนืดสูง เพราะเมื่อพลาสติกผ่านหัวฉีดออกมา ต้องทรงรูปได้ชั่วระยะเวลาหนึ่งไม่ไหลมารวมกัน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเลือกชนิดของพลาสติกให้เหมาะสมกับงานหลอมอัดรีด พลาสติกที่นิยมนำมาผ่านกระบวนการหลอมอัดรีดส่วนใหญ่ ได้แก่ PVC ทั้งชนิดอ่อนและแข็ง ตามมาด้วย PE และ PP นอกจากนี้เพื่อให้การผสมมีประสิทธิภาพสูงสุด ต้องคำนึงถึง

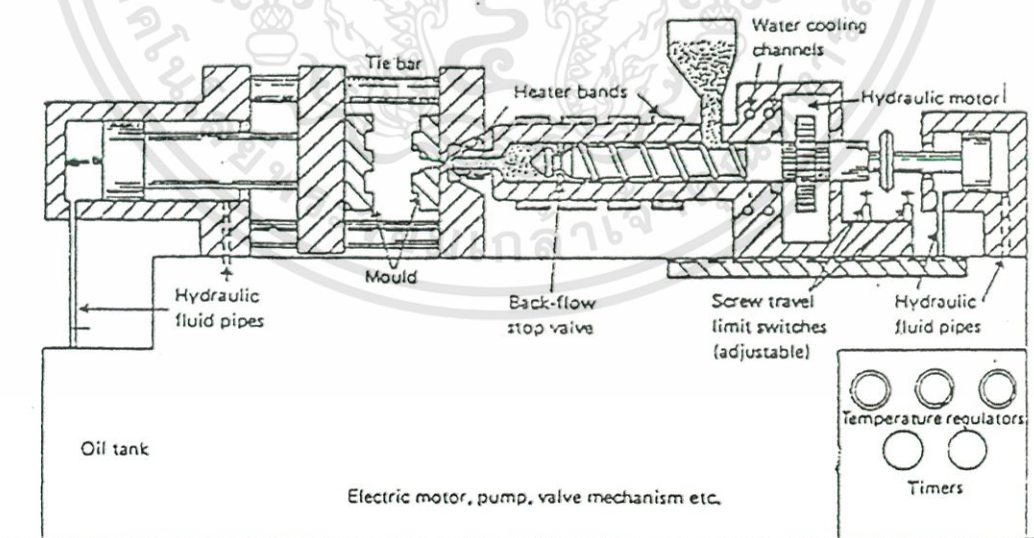
การกำหนดตัวแปรต่างๆ ของเครื่องผสมด้วย ได้แก่ ความเร็วรอบของสกรู (Screw speed) อุณหภูมิ (Temperature) ความดัน (Pressure) ขนาด และความยาวของสกรู (Size) โดยนิยมแสดงด้วย อัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของสกรู (L/D)

2.8 การขึ้นรูป WPC (นิพนธ์ วงศ์พิเศษศิริกุล, 2537)

การขึ้นรูป WPC เป็นการแปรรูปคอมโพสิตที่ได้จากกระบวนการผลิตคอมโพสิต โดยเทคนิควิธีการแปรรูป WPC มีหลากหลายวิธี โดยในที่นี้จะขอล่าถึงเทคโนโลยีการฉีดขึ้นรูป อันเป็นเทคโนโลยีที่ใช้ในโรงงานพิเศษครั้งนี้

เทคโนโลยีการฉีดขึ้นรูป (Injection molding) เป็นเทคโนโลยีการแปรรูปพลาสติกวิธีหนึ่ง ที่นิยมใช้งานกันอย่างกว้างขวาง และสะดวกที่สุดในการเปลี่ยนเม็ดพลาสติก หรือเม็ดคอมโพสิต และอิลาสโตเมอร์ ไปเป็นผลิตภัณฑ์สำเร็จรูป

ข้อดีที่สำคัญของวิธีนี้เมื่อเทียบกับเทคโนโลยีการแปรรูปชนิดอื่นๆ คือ ความสามารถในการผลิตชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อน และมีรายละเอียดมาก ไม่ว่าจะขนาดเล็กหรือใหญ่ จากการใช้แม่พิมพ์ที่มีหลายช่องว่าง และเครื่องจักรที่สามารถทำงานได้อย่างอัตโนมัติ อีกทั้งการที่มีความสะดวกในการป้อนวัตถุดิบ และการยึดจับแม่พิมพ์ (Molding handling) ทำให้สามารถผลิตได้ในอัตราเร็วสูง และใช้แรงงานที่ทำการควบคุมต่ำ ตัวอย่างเครื่องฉีดขึ้นรูป ดังแสดงในรูปที่ 2.29



Single screw injection moulding machine

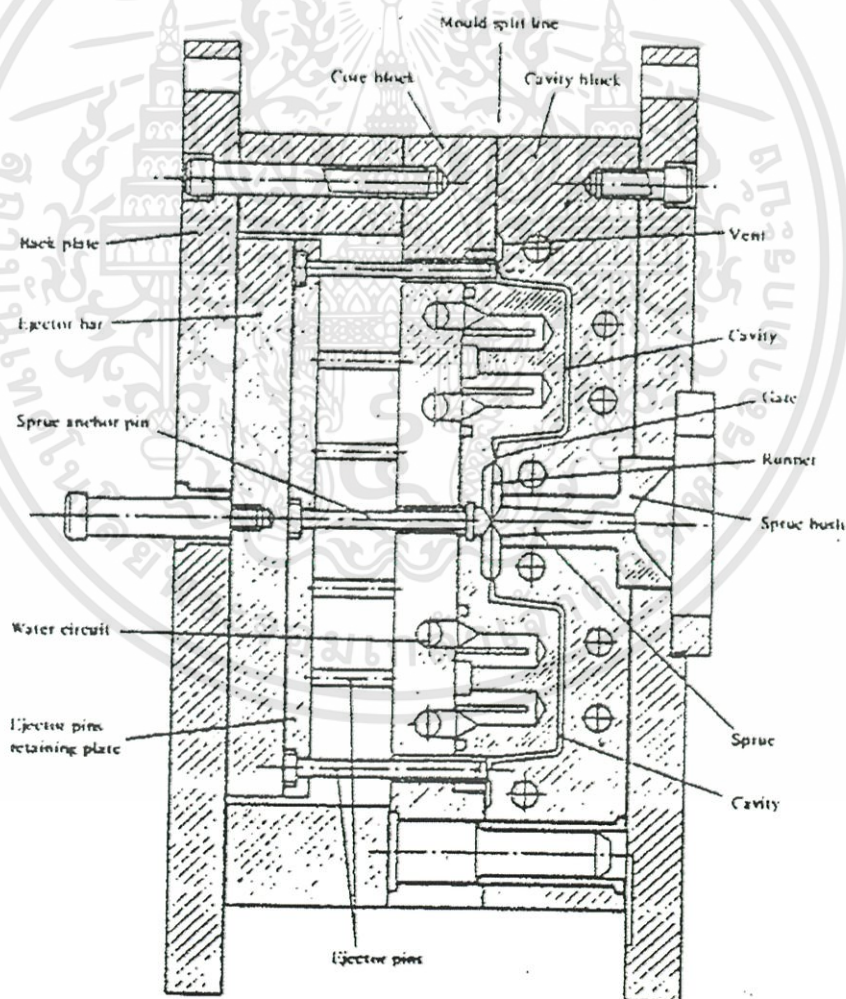
รูปที่ 2.29 เครื่องฉีดขึ้นรูปชนิดเกลียวหนอนคนเดียว (Johannaber F., 1983)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวแปรที่ต้องคำนึงถึงในกระบวนการฉีดขึ้นรูป ได้แก่ สภาพะการทำงาน การออกแบบ เครื่องจักร และแม่พิมพ์ ต้องปรับให้เหมาะสมกับการแปรรูปพลาสติกแต่ละชนิด เช่น เทอร์โมพลาสติก หรือเทอร์โมเซตที่บริสุทธิ หรือการใส่สารเติมแต่งชนิดต่างๆ การใส่สารเสริมแรง และความต้องการในการใช้งานของผลิตภัณฑ์

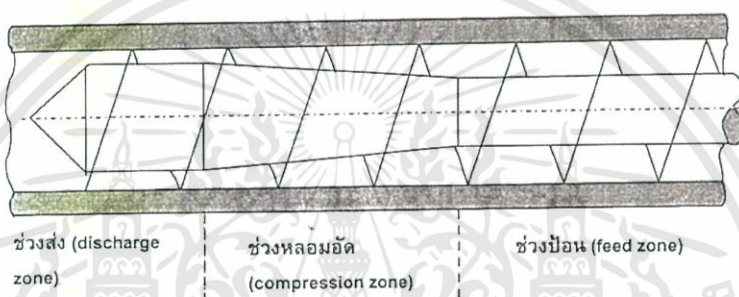
หลักการของกระบวนการฉีดขึ้นรูป

หลักการพื้นฐานในการขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติก คือ วิธีการที่จะผลิตพอลิเมอร์หลอมเหลว ในปริมาณที่กำหนด จากนั้นทำการฉีดพลาสติกหลอมเหลวเข้าไปในแม่พิมพ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.30 ที่ปิดอยู่ เพื่อทำให้เกิดเป็นรูปร่างของชิ้นงานพลาสติกที่ต้องการ หลังจากการหล่อเย็นชิ้นงานแล้ว แม่พิมพ์จะเปิดออก ชิ้นงานจะถูกกระชากออกมาและแม่พิมพ์จะปิดอีกครั้ง เพื่อเตรียมจะเริ่มวัฏจักร ของการฉีดขึ้นรูปใหม่ต่อไป



รูปที่ 2.30 แม่พิมพ์แบบสองส่วนของกระบวนการฉีดขึ้นรูป (Johannaber F., 1983)

กระบวนการฉีดขึ้นรูปสมัยใหม่ส่วนมากจะใช้เกลียวหนอน ดังแสดงในรูปที่ 2.31 ในการหลอมพลาสติกก่อนทำการฉีด (Preplasticising) เพื่อใช้ในการเตรียมพอลิเมอร์หลอมเหลวในปริมาณที่ควบคุมได้ก่อนที่จะผ่านเข้าไปยังช่องว่างของแม่พิมพ์ หลักการนี้จะเหมือนกันกับเครื่องผสมแบบเกลียวหนอนเดี่ยว โดยเกลียวหนอนจะหมุนเพื่อลำเลียง และหลอมพอลิเมอร์ที่พามาจากกรวยป้อนเม็ด ขณะที่พอลิเมอร์หลอมสะสมอยู่ที่ด้านหน้าของกระบอกฉีด เกลียวหนอนจะเคลื่อนถอยหลังตามแนวแกน ในขณะที่เกลียวหนอนยังหมุนอยู่ จนกระทั่งได้น้ำหนักในการฉีด (Shot weight) ตามต้องการ การฉีดขึ้นรูปพลาสติกจะเกิดขึ้นในขณะที่เกลียวหนอนเคลื่อนที่ไปข้างหน้าในลักษณะของกระบอกสูบ (Ram) และเพื่อเป็นการป้องกันการไหลย้อนกลับของพลาสติกหลอมตามร่องของเกลียวหนอน จึงมักใช้แหวนกันการไหลย้อนประกอบอยู่ที่ปลายเกลียวหนอน

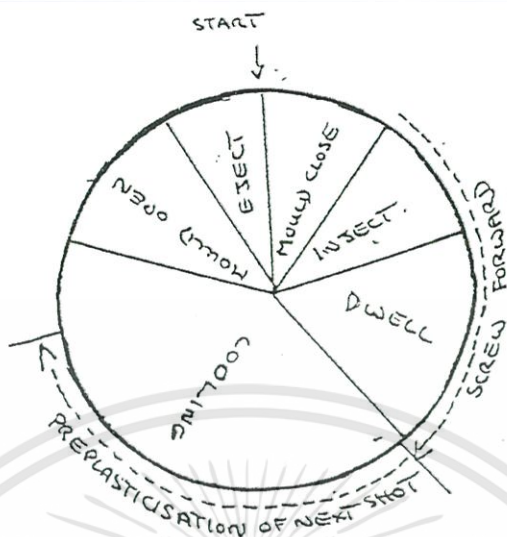


รูปที่ 2.31 ช่วงต่างๆ ของเกลียวหนอน (เจริญ นาคะสรรค์, 2542)

พลาสติกหลอมจะถูกฉีดตรงผ่านหัวฉีดที่ประกบติดกับตอนปลายของกระบอกฉีด ผ่านเข้าไปยังทางเข้าของแม่พิมพ์ แม่พิมพ์จะถูกยึดติดอยู่บนแท่นยึดแม่พิมพ์ซึ่งด้านหนึ่งจะถูกยึดอยู่กับที่ ขณะที่อีกด้านหนึ่งจะเคลื่อนที่ไปมาได้อย่างอิสระตามเฟลา (Tie bar) ทำให้แม่พิมพ์เปิด และปิดได้ แรงดันประกบยึดแม่พิมพ์ถือเป็นสิ่งที่สำคัญมากในการทำให้แม่พิมพ์ปิดอยู่ได้อย่างมั่นคงในระหว่างการฉีดพลาสติกหลอม และในช่วงหล่อเย็นของวัฏจักรการฉีดขึ้นรูป ดังนั้นแรงที่ต้องใช้ในการจะทำให้แม่พิมพ์เปิดออกจึงจำเป็นต้องใช้มากตามไปด้วย

การประกบยึดแม่พิมพ์จะทำได้ด้วยระบบการยึดแบบไฮดรอลิก หรือแบบกลไก หรือใช้ร่วมกันทั้งสองแบบ การหล่อเย็นแม่พิมพ์จะเป็นผลมาจากการถ่ายเทความร้อนจากพอลิเมอร์หลอมที่ร้อนผ่านผนังช่องว่างของแม่พิมพ์ที่เย็น ปรัชญาการนี้จะนำไปสู่ความแตกต่างทางความร้อนอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ในชิ้นงานที่ขึ้นรูป และเป็นผลทำให้เกิดรูปร่างที่แตกต่างกันอย่างมากมายภายในชิ้นงาน

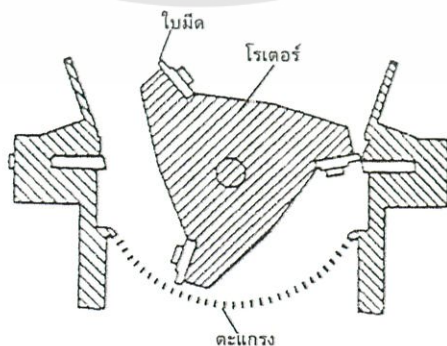
เมื่อทำให้วัสดุแข็งตัวจนถึงจุดหนึ่งที่สามารถถูกกระทุ้งออกจากช่องว่างของแม่พิมพ์ได้โดยไม่เป็นอันตรายจากการบิดเบี้ยวหรือเสียรูป แม่พิมพ์จะถูกเปิดออก และชิ้นงานจะถูกนำออกด้วยกลไกการกระทุ้งที่สร้างขึ้นภายในระบบของแม่พิมพ์ จากนั้นกระบวนการจะถูกเตรียมพร้อมในวัฏจักรการฉีดขึ้นรูปครั้งต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 2.32



รูปที่ 2.32 ขั้นตอนต่างๆ ในวัฏจักรการฉีดขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติก (Johannaber F., 1983)

2.9 เครื่องบดพลาสติก (เจริญ นาคะสรรค์, 2542)

ขนาด และรูปร่างของชิ้นพลาสติกมีความสำคัญต่อกระบวนการแปรรูปพลาสติกเป็นผลิตภัณฑ์ เนื่องจาก ช่องทางการป้อนวัตถุดิบ (พลาสติก) เข้าสู่อุปกรณ์ต่างๆ ในการแปรรูปส่วนใหญ่ต้องการพลาสติกที่มีชิ้นขนาดเล็ก หรือขนาดเป็นเม็ดเล็ก การผลิตคอมพาวด์พลาสติกอาจได้คอมพาวด์ชิ้นใหญ่ หรือก้อนคอมพาวด์ที่มีขนาดใหญ่ จึงจำเป็นต้องใช้เครื่องบดพลาสติก ดังแสดงในรูปที่ 2.33 เพื่อบดพลาสติกที่มีชิ้นขนาดใหญ่ให้มีขนาดเล็กลง และรูปร่างที่เหมาะสมจนสามารถนำไปแปรรูปต่อไปได้ เครื่องบดพลาสติกจะมีส่วนที่เป็นส่วนคัตขนาดของผลิตภัณฑ์หลังจากการบด นิยมออกแบบเป็นตะแกรงเหล็กกล้า ขนาดของผลิตภัณฑ์หลังบดจะขึ้นอยู่กับรูบนตะแกรงคัตขนาด



รูปที่ 2.33 ภาพตัดขวางของเครื่องบดพลาสติก (เจริญ นาคะสรรค์, 2542)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10 การทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical properties testing)

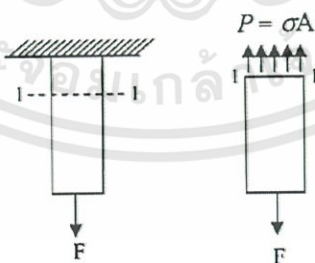
ความแข็งแรงของวัสดุขึ้นอยู่กับความสามารถของวัสดุในการรับแรงกระทำโดยปราศจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง หรือการแตกหัก สมบัติของวัสดุนั้นจะเป็นลักษณะเฉพาะตัวของวัสดุแต่ละชนิด การทดสอบตัวอย่างของวัสดุไม่ว่าจะเป็น โลหะ เซรามิก พอลิเมอร์ และวัสดุผสมชนิดต่างๆ จะต้องทำเป็นรูปทรง และขนาดตามมาตรฐานก่อนที่จะทำการทดสอบ เช่น มาตรฐานสมาคมอเมริกันสำหรับการทดสอบวัสดุ (American Society for Testing and Materials Standard; ASTM) ซึ่งเป็นมาตรฐานที่ยอมรับกันทั่วโลก เป็นต้น

2.10.1 การทดสอบการทนต่อแรงดึง (Tensile testing)

ความทนแรงดึงสามารถอธิบายได้ว่า ขณะที่ดึงวัสดุด้วยแรงภายนอก แรงกระทำจะถ่ายทอดตลอดแนวของชิ้นงานตัวอย่าง ทิศทางการเคลื่อนที่ภายในแกนตามแนวแรงจะมีการต้านกัน การเกิดแรงต้านนี้เกิดขึ้นทั่วบริเวณของชิ้นงานตัวอย่าง จะส่งผลให้เกิดความเค้น (stress) และความเครียด (strain) ขึ้นภายในวัสดุ

ความเค้น (stress) คือ แรงภายนอกที่มากระทำผ่านจุดศูนย์กลางของพื้นที่หน้าตัดของวัสดุนั้น หรือคือแรงภายนอกต่อหน่วยพื้นที่ (สุระเชษฐ รุ่งวัฒนพงษ์, 2536)

การพิจารณาหาค่าความเค้นนั้น เราจะพิจารณาที่อนุภาคหนึ่งที่มีพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ A อยู่ภายใต้แรงดึง F ที่ผ่านจุดศูนย์กลางของวัสดุ ถ้าแรง F มีค่าน้อย วัสดุจะยืดออกไปไม่มาก แล้วจะไม่ยืดออกไปอีก ถ้าตัดวัตถุที่หน้าตัด 1-1 ดังแสดงในรูปที่ 2.34



รูปที่ 2.34 การรับแรงเค้นของวัตถุ (สุระเชษฐ รุ่งวัฒนพงษ์, 2536)

เมื่อวัตถุอยู่ในภาวะสมดุลแล้ว แรงภายนอกที่มากระทำบนวัตถุใดๆ ต้องมีแรงภายในต้าน โดยมีขนาดรวมแล้วเท่ากับแรงภายนอกที่พยายามทำให้เกิดการยืดตัวหรือหดตัวตามแนวแกนวัตถุเป็นแรงต่อหน่วยพื้นที่ แสดงดังสมการที่ 2.1

$$\sigma_1 = \frac{F_1}{A_0} \quad \text{สมการที่ 2.1}$$

เมื่อ F_1 = แรงที่ใช้ในการดึง (N)

A_0 = พื้นที่หน้าตัดเริ่มต้นของชิ้นงาน (m^2)

σ_1 = ความเค้นเนื่องจากการดึงชิ้นงานตัวอย่าง (Nm^{-2} , Pa)

ความเครียด (Strain) คือ อัตราส่วนระหว่างความยาวของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากวัสดุนั้นไม่สามารถรับแรงได้อีกต่อความยาวเดิม ในกรณีของความเครียดดึง (Tensile strain) เมื่อท่อนวัตถุถูกกระทำด้วยแรงดึงตามแนวแกนและเพิ่มแรงดึงขึ้นอย่างช้าๆ ท่อนวัตถุนี้ก็จะเกิดการยืดออกทีละน้อยตามขนาดของแรงดึงที่เพิ่มขึ้นของแรง F ทำให้ท่อนวัตถุยืดออก ขณะที่ท่อนวัตถุยืดออกก็จะเกิดการหดตามแนวตั้งของท่อนวัตถุนั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.35 นิยมรายงานเป็นเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของวัสดุ (Elongation) แสดงดังสมการที่ 2.2 (จินตมัย สุวรรณประทีป, 2547), (สุระเชษฐ รุ่งวัฒนพงษ์, 2536)



รูปที่ 2.35 ความเครียดดึงตามแนวแกน (สุระเชษฐ รุ่งวัฒนพงษ์, 2536)

$$\varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0} \times 100 \quad \text{สมการที่ 2.2}$$

เมื่อ L = ความยาวของชิ้นงาน ณ จุดที่เกิดการแตกหัก

L_0 = ความยาวเริ่มต้นของชิ้นงาน

ε = การยืดตัวของชิ้นงาน ณ จุดขาด (%)

1. การทดสอบแรงดึง (เสกศักดิ์ อัสวะวิสิทธิ์ชัย, 2550)

การทดสอบแรงดึงถือได้ว่าเป็นการทดสอบที่ได้รับความนิยมและเป็นที่ยอมรับมากที่สุดสำหรับการทดสอบสมบัติทางกลพื้นฐานของวัสดุ โดยในการทดสอบจะเป็นการให้แรงในแนวเส้นตรงแก่ชิ้นงานในทิศทางตรงกันข้ามเพื่อสร้างแรงดึงขึ้นในชิ้นงาน ถึงแม้ในทางทฤษฎีการทดสอบประเภทนี้จะสามารถใช้งานในการทดสอบวัสดุได้ทุกประเภท หากแต่ในทางปฏิบัติแล้ว การทดสอบแรงดึงมักจะใช้ในการทดสอบวัสดุประเภทโลหะ และพอลิเมอร์เป็นส่วนใหญ่

โดยทั่วไปแล้วชิ้นงานสำหรับการทดสอบแรงดึงนี้จะอยู่ในรูปของชิ้นงานที่มีลักษณะเรียวยาว (อัตราส่วนระหว่างความยาวและความกว้างมีค่ามาก) และปลายทั้งสองสามารถถูกจับยึดโดยเครื่องทดสอบได้ การใช้ชิ้นงานที่มีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า นั้น มักจะไม่เหมาะต่อการทดสอบ เนื่องจากการที่ชิ้นงานดังกล่าวสามารถที่จะแตกหักหรือขาดในบริเวณใดก็ได้ตลอดความยาวของชิ้นงาน การแตกหักอาจเกิดขึ้นนอกบริเวณที่ทำการวัดความเครียดบนชิ้นงานก็ได้ และยังมีโอกาสสูงที่จะเกิดการแตกหักในบริเวณจับยึดทั้งสองข้างเนื่องมาจากความเสียหายของวัสดุที่เกิดจากแรงบีบที่ใช้จับยึดชิ้นงานจึงทำให้ผลการทดสอบจากการใช้ชิ้นงานรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า นี้ อาจจะมีค่าที่ต่ำกว่าสมบัติที่แท้จริงของวัสดุได้

เพื่อเป็นการแก้ปัญหาดังกล่าว ชิ้นงานทดสอบแรงดึงนั้นจึงถูกกำหนดให้มีลักษณะรูปร่างที่มีพื้นที่หน้าตัดในบริเวณที่ต้องการวัดความเครียดอยู่ในบริเวณกึ่งกลางชิ้นงานและมีขนาดที่เล็กกว่าพื้นที่สำหรับการจับยึดในบริเวณปลาย หรือมีลักษณะคล้ายที่ยกน้ำหนัก (Dumbbell) โดยจะมีพื้นที่หน้าตัดบริเวณกึ่งกลางชิ้นงานเนื่องจากเป็นบริเวณที่มีค่าความเค้นสูงสุด (เนื่องจากมีพื้นที่หน้าตัดต่ำที่สุด) ไม่แตกหักในบริเวณจับยึด อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติแล้วการที่จะทดสอบชิ้นงานเกิดการแตกหักในบริเวณกึ่งกลางนั้นยังขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยอีกด้วยไม่ว่าจะเป็นสภาวะในการทดสอบชิ้นงาน การติดตั้งชิ้นงานและความสมบูรณ์ของอุปกรณ์ เป็นต้น

2. การวิเคราะห์ผลการทดสอบแรงดึง (เสกศักดิ์ อัสวะวิสิทธิ์ชัย, 2550)

โดยพื้นฐานแล้ว สิ่งที่ได้จากการทดสอบแรงดึงจะเป็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ซึ่งสามารถเปลี่ยนให้เป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของชิ้นงานทดสอบที่เกิดขึ้น

มอดูลัส (Modulus)

มอดูลัส หรือมอดูลัสของความยืดหยุ่น (Modulus of elasticity) หรือมอดูลัสของยัง (Young's modulus) คือ ความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุเมื่อมีแรงมากระทำต่อวัสดุ ค่ามอดูลัสหาได้จากอัตราส่วนระหว่างความเค้นต่อความเครียด ดังสมการที่ 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

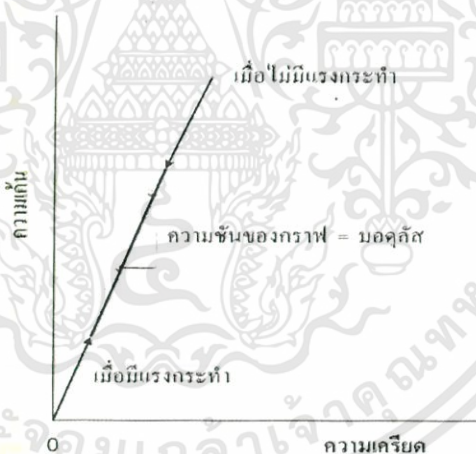
$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad \text{สมการที่ 2.3}$$

เมื่อ E = โมดูลัส (Pa)

$\Delta\sigma$ = ความแตกต่างของความเค้นระหว่างสองตำแหน่งบนเส้นตรง

$\Delta\varepsilon$ = ความแตกต่างของความเครียดระหว่างสองตำแหน่งบนเส้นตรง

ความสัมพันธ์นี้ถูกค้นพบครั้งแรกโดยโรเบิร์ต ฮุก (Robert Hooke) และรู้จักกันดีในนามของกฎของฮุก (Hooke's law) วัสดุใดที่แสดงความสัมพันธ์นี้จะมีการผิดรูปยืดหยุ่น (Elastic deformation) นั่นหมายถึง วัสดุจะมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างกลับมามีสภาพเดิมทุกประการเมื่อหยุดให้แรงกระทำต่อวัสดุ โดยไม่มีการสูญเสียพลังงาน ปกติวัสดุจะมีการผิดรูปยืดหยุ่นชั่วคราวในช่วงความเครียดต่ำเท่านั้น (น้อยกว่าค่าความเครียด 0.1%) ค่าโมดูลัสนี้บางครั้งอาจหมายถึงค่าความแข็งตึง สามารถหาค่าโมดูลัสได้จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดในช่วงแรกที่มีความชันของกราฟมีลักษณะเป็นเส้นตรง ความชันของกราฟนี้เองที่คือค่าโมดูลัส ดังแสดงในรูปที่ 2.36

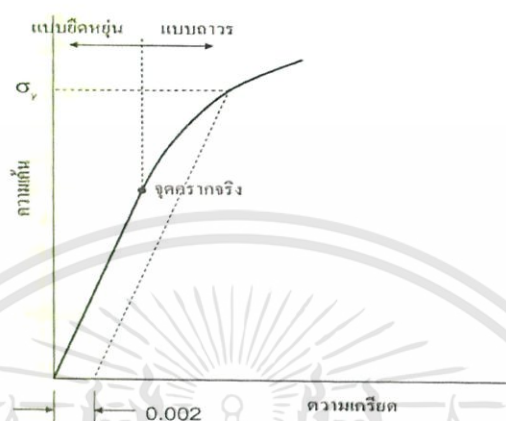


รูปที่ 2.36 การหาค่าโมดูลัสจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด
(เสกศักดิ์ อัสวะวิสิทธิ์ชัย, 2550)

จุดคราก (Yield point)

จุดครากของวัสดุถือได้ว่าเป็นค่าประมาณของจุดที่วัสดุเปลี่ยนสมบัติจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบยืดหยุ่นไปเป็นการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบถาวร โดยทั่วไปสามารถกำหนดจุดครากได้โดยใช้วิธีเยื้องศูนย์กลาง (Offset) วิธีนี้ทำได้โดยการลากเส้นตรงให้ขนานกับกราฟในส่วนที่เป็นเส้นตรงช่วงแรก โดยปกติจะให้เส้นตรงนี้เริ่มจากตำแหน่งที่มีค่าความเครียดเท่ากับ 0.2% (หรือ 0.002)

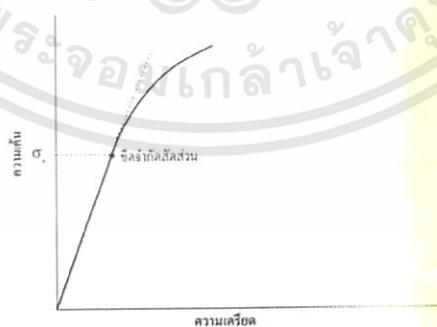
เมื่อเส้นตรงเส้นนี้ตัดกับเส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดที่ตำแหน่งใด (ตำแหน่งนี้จะอยู่ในบริเวณการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบถาวร) ให้ถือว่าจุดตัดนั้นเป็นจุดคราก (yield point) และมีค่าความเค้นจุดคราก ดังแสดงในรูปที่ 2.37



รูปที่ 2.37 กราฟแสดงตำแหน่งจุดครากที่ได้จากวิธีเยื้องศูนย์ (เสกศักดิ์ อัสวะวิสิทธิ์ชัย, 2550)

ขีดจำกัดสัดส่วน (Proportional limit)

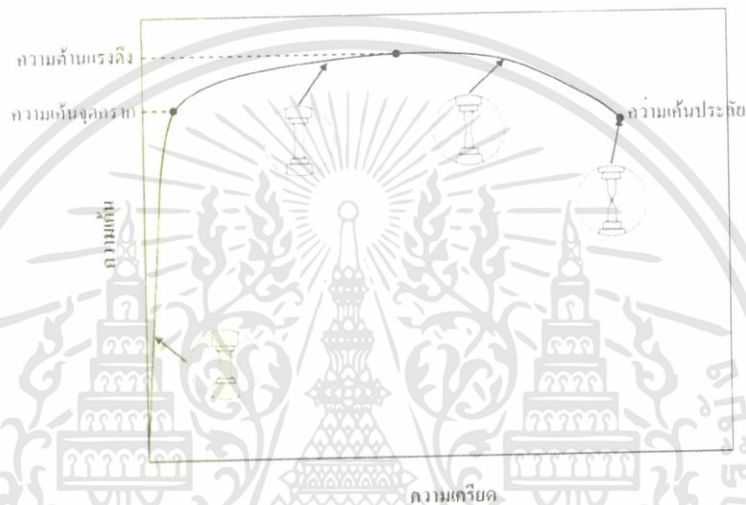
ขีดจำกัดสัดส่วนเป็นการบอกถึงตำแหน่งจุดสุดท้ายของความเค้นบนเส้นกราฟช่วงที่มีความสัมพันธ์แบบแปรผันตรงในกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ดังแสดงในรูปที่ 2.38 โดยความเค้น σ ตำแหน่งนี้ ก็คือ ความเค้นจุดครากนั่นเอง ดังนั้นขีดจำกัดสัดส่วนจึงมีความสำคัญอย่างมากในการบอกถึงค่าความเค้นและความเครียดที่แบ่งระหว่างขีดจำกัดความยืดหยุ่น (Elastic limit) และขีดจำกัดพลาสติก (Plastic limit)



รูปที่ 2.38 กราฟแสดงตำแหน่งของขีดจำกัดสัดส่วน (เสกศักดิ์ อัสวะวิสิทธิ์ชัย, 2550)

ความแข็งแรงดึงของวัสดุ (Tensile strength)

ความแข็งแรงดึงจะเกิดขึ้นหลังเกิดการคราก (Yielding) โดยความเค้นที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องจากแรงดึงที่กระทำอยู่จนถึงจุดสูงสุดของกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด ดังนั้นค่าความแข็งแรงดึง คือ ค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุนั้นๆ สามารถรับได้นั้นเอง บ่อยครั้งที่ค่าความแข็งแรงดึงจะเป็นค่าเดียวกับค่าความเค้นจุดครากหรือค่าความเค้นประลัย (Fracture strength) ซึ่งจะพบได้ในวัสดุเปราะ ดังแสดงในรูปที่ 2.39



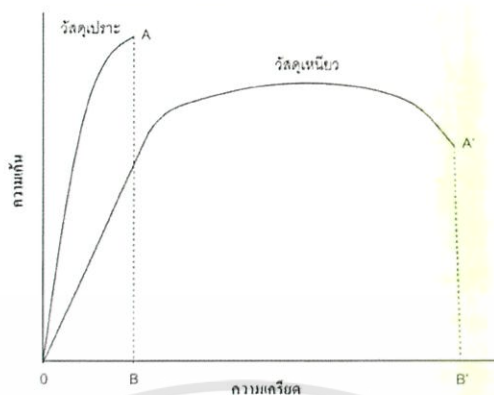
ดังรูป 2.39 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด (เสกศักดิ์ อัสวะวิสิทธิ์ชัย, 2550)

ความเค้นประลัย (Fracture strength)

ความเค้นประลัย คือ ความเค้นที่ชิ้นงานทดสอบเกิดการแตกหัก จุดที่เกิดการแตกหักของวัสดุจะเกิดบริเวณที่ชิ้นงานทดสอบเกิดคอดมาอย่างต่อเนื่องนั่นเอง ดังแสดงในรูปที่ 2.39

ความเหนียว (Ductility)

ความเหนียว คือ การบอกปริมาณขนาดของการผิดรูปในช่วงพลาสติกของวัสดุจนถึงจุดที่วัสดุนั้นเกิดการแตกหัก ซึ่งโดยประมาณแล้วสามารถหาได้จากพื้นที่ใต้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด วัสดุที่มีความเหนียวจะมีพื้นที่ใต้กราฟมากกว่าวัสดุที่มีความเปราะ แสดงดังรูปที่ 2.40 ค่าความเหนียวที่ได้นี้ไม่สามารถใช้ทดแทนค่าความต้านทานต่อแรงกระแทก (impact strength) ของพลาสติกได้เนื่องจากเป็นผลที่ได้จากการทดสอบที่อัตราเร็วค่อนข้างช้ากว่ามาก



รูปที่ 2.40 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของวัสดุเหนียวและวัสดุเปราะ (เสกศักดิ์ อัสวะวิสิทธิ์ชัย, 2550)

2.10.2 การทดสอบการทนต่อแรงดัด (Flexural testing) (Brown R.P., 1988), (Manson, J.A. and Sperling, L.H., 1976)

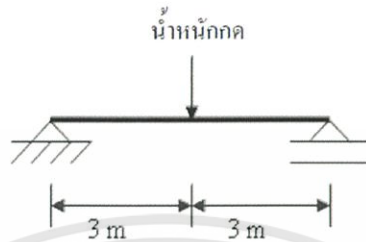
การทดสอบการทนต่อแรงดัด เป็นการวัดแรงที่ต้องการเพื่อให้ชิ้นงานเกิดการงอ ข้อมูลที่ได้มักจะนำไปพิจารณาเลือกวัสดุสำหรับใช้เป็นส่วนที่ต้องรับแรงกดโดยไม่เกิดการงอ เช่น ค่ามอดุลัสของแรงดัด (Flexural modulus) ใช้ในการบ่งบอกถึงความแข็งตัวของวัสดุเมื่อเกิดการดัด โดยทั่วไปการทดสอบนี้เหมาะสำหรับพลาสติกที่มีลักษณะแข็งเปราะ แต่ไม่เหมาะกับการทดสอบพลาสติกที่มีลักษณะอ่อนหรือสามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างภายใต้แรงดัดได้มาก เนื่องจากสมการที่ใช้ในการคำนวณของสภาพการดัดนี้ จะถูกต้องในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างในระดับต่ำ วัสดุแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดแบบเชิงเส้น และอยู่ภายใต้แรงดัดเท่านั้น ดังนั้น โดยทั่วไปมักไม่ใช้ทดสอบที่เกินระดับความเครียด 5 เปอร์เซ็นต์

การทดสอบการทนต่อแรงดัดสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ การทดสอบการทนต่อแรงดัดแบบ 3 จุด (Three point bending) และการทดสอบการทนต่อแรงดัดแบบ 4 จุด (Four point bending) โดยในที่นี้จะขอกล่าวถึงเฉพาะที่เกี่ยวข้องในโครงการพิเศษนี้เท่านั้น คือ การทดสอบการทนต่อแรงดัดแบบ 3 จุด

การทดสอบการทนต่อแรงดัดแบบ 3 จุด (Three point bending)

การทดสอบนี้เป็นการให้แรงกระทำที่จุดกึ่งกลางเท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.41 เหมาะสำหรับการทดสอบพลาสติกที่เปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ต่ำ หัวกดที่ให้แรงกระทำ และชุดรองรับมีลักษณะเป็นใบมีดมน (Round knife edges) หรือเพลลาโลหะแข็งก็ได้ รัศมีของหัวกด และชุดให้แรง

กระทำต้องมีรัศมีอย่างต่ำ 3.2 มิลลิเมตร และรัศมีสูงสุดไม่เกิน 4 เท่าของความหนาชิ้นงานทดสอบ การที่ชุดกดและชุดรองรับต้องมีลักษณะเป็นผิวโค้งที่จุดสัมผัสดังกล่าวเพื่อเป็นการลดความเข้มของความเค้น (Stress concentration) ที่อาจเกิดขึ้นบริเวณจุดสัมผัส สูตรการคำนวณข้อมูลจากการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 2.6



รูปที่ 2.41 การทดสอบ Three point bending (Brown R.P., 1988)

ตารางที่ 2.6 สูตรคำนวณข้อมูลที่ได้จากการทดสอบการทนต่อแรงดัดแบบ 3 จุด

สูตร	พื้นที่หน้าตัดสี่เหลี่ยม
ความเค้น	$\sigma = \frac{3FL}{2Bh^2}$
ความเครียด	$\epsilon = \frac{6Yh}{L^2}$
มอดุลัส	$E = \frac{L^3}{4Bh^3} \left(\frac{F}{Y} \right)$

เมื่อ F = แรงกระทำ
L = ระยะห่างระหว่างจุดรองรับที่ปลายทั้งสองด้าน
h = ความหนา
B = ความกว้าง
Y = ระยะการดัดงอ

ดังนั้น อัตราส่วนระหว่าง F และ Y ในวงเล็บจะเท่ากับความชันในช่วงแรกของกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะการดัดงอของชิ้นงานในช่วงที่กราฟยังเป็นเส้นตรง

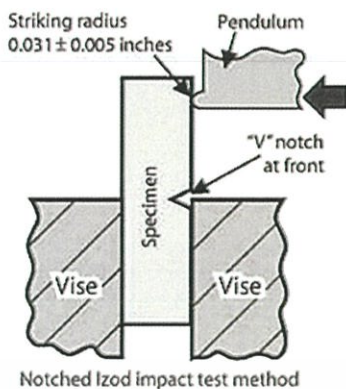
2.10.3 การทดสอบการทนต่อแรงกระแทก (Impact testing) (Manson, J.A. and Sperling, L.H., 1976)

การทดสอบการทนต่อแรงกระแทก เป็นการใช้แรงกระทำเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง กระแทกชิ้นทดสอบให้แตกหักในเวลาอันสั้นเพื่อศึกษาพฤติกรรมของวัสดุเมื่อถูกแรงกระแทก ซึ่งการทดสอบแรงกระแทกตามมาตรฐานสามารถแบ่งย่อยออกเป็น 2 วิธีการ คือ การทดสอบโดยใช้เครื่องมือที่มีค้อนน้ำหนักซึ่งทราบพลังงานในการพุ่งเข้าชนชิ้นงานที่มีขนาดและรูปร่างต่างๆ ตามมาตรฐาน วิธีการนี้เรียกว่าการทดสอบแรงกระแทกแบบลูกตุ้มเหวี่ยง (Pendulum impact test) อีกวิธีหนึ่งเป็นการทดสอบโดยใช้น้ำหนักหรือหัวกระแทก (Impactor test) ซึ่งปล่อยให้ตกอย่างอิสระจาก ความสูงที่ทราบค่าลงสู่ชิ้นงาน แล้วนำมาคำนวณความเค้นกระแทกสูงสุด หรือความแกร่งต่อการกระแทก (Impact strength) การทดสอบแบบนี้เรียกว่าการทดสอบแรงกระแทกแบบอาศัย การตกของน้ำหนัก (Falling weight impact testing) ในที่นี้ขอกล่าวถึงเฉพาะที่เกี่ยวข้องในโครงการงาน พิเศษนี้เท่านั้น คือ การทดสอบแรงกระแทกแบบลูกตุ้มเหวี่ยง

การทดสอบแรงกระแทกแบบลูกตุ้มเหวี่ยง แสดงความสามารถของวัสดุ ในการต้านทาน แรงกระแทกจากการตีด้วยค้อน ซึ่งอยู่ในรูปของพลังงานจลน์ทั้งหมดที่จำเป็นเพื่อให้วัสดุเริ่มเกิด การแตกหัก (Initiate fracture) และดำเนินต่อไปจนกระทั่งวัสดุขาดออกจากกัน การทดสอบนี้ สามารถทำได้อย่างรวดเร็วเป็นการตรวจสอบคุณภาพของวัสดุที่ง่ายสำหรับเปรียบเทียบความ เหนียวของวัสดุ ในการเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบนั้น จะทำการบากชิ้นงานก่อนการ ทดสอบ เนื่องจากรอยบากบนชิ้นงานจะทำหน้าที่เป็นจุดที่แรงกระทำมาสะสมกัน (Stress concentration) ทำให้การเปลี่ยนรูป (Deformation) ของชิ้นงานเกิดขึ้นได้ยากเพราะการแตก ขาดของชิ้นงานจะเกิดที่บริเวณรอยบากเท่านั้น ตามปกติค่าการทนต่อแรงกระแทก จะรายงานใน หน่วยของพลังงานต่อความกว้างของชิ้นงาน เนื่องจากค่าการทนต่อแรงกระแทกขึ้นอยู่กับความ เหนียวของชิ้นงานเช่นกัน ในการเปรียบเทียบค่าการทนต่อแรงกระแทกของชิ้นงานจากวัสดุที่ต่างกัน นิยมรายงานในหน่วยของจุดต่อตารางเมตร (J/m^2)

การทดสอบการทนแรงกระแทกชิ้นงานที่มีรอยบากมี 2 วิธีคือ การทดสอบแรงกระแทก แบบไอซอด (Izod impact test) และการทดสอบแรงกระแทกแบบชาร์ปี (Charpy impact test) ทั้งสองวิธีมีความแตกต่างในแง่ของการปฏิบัติ กล่าวคือ วิธีของชาร์ปีนั้นรอยบากจะอยู่ตรงข้ามกับ ทางเดินของค้อนตี และจะวางตัวอย่างในแกนนอน ส่วนวิธีของไอซอด รอยบากจะอยู่ด้านเดียวกับ ค้อนตี และตัวอย่างจะอยู่ในแกนตั้ง วิธีที่ใช้ในโครงการงานพิเศษนี้คือวิธีแบบ ไอซอด ดังแสดงในรูปที่

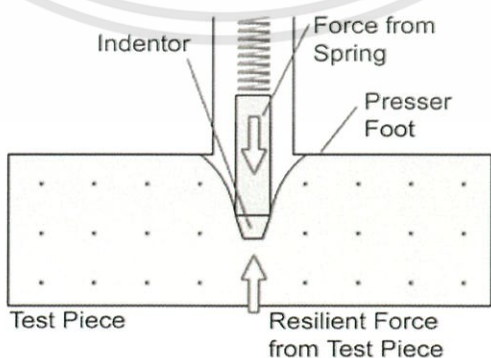
2.42



รูปที่ 2.42 การวางชิ้นงานทดสอบการทนต่อแรงกระแทกแบบ Izod (Strong, A.B., 2000)

2.10.4 การทดสอบความแข็งกด (Hardness testing) ด้วยชอร์ดูโรมิเตอร์ (Shore durome meter)

ความแข็งกดแบบดูโรมิเตอร์เป็นที่รู้จักกันทั่วไปในชื่อว่า ความแข็งแบบชอร์ (Shore hardness) เป็นการทดสอบที่นิยมสำหรับวัสดุที่มีความแข็งไม่สูงมาก เช่น ยาง และพลาสติก การทดสอบแบบนี้มีด้วยกันหลายประเภท ซึ่งการเลือกใช้จะขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่จะนำมาทดสอบแรงกด และลักษณะของหัวกด ในการทดสอบนั้นจะให้แรงกดผ่านอุปกรณ์ลงไปยังชิ้นงานทดสอบและจะให้ความแข็งของสปริงกดเป็นส่วนที่ให้แรงแทนที่จะเป็นน้ำหนักกด โดยหัวทดสอบจะติดอยู่กับสปริงเชิงเส้นซึ่งมีความแข็งที่ผ่านการสอบเทียบและมาตรวัดแล้ว เมื่อทำการทดสอบโดยให้แรงกดแก่อุปกรณ์ทดสอบลงยังชิ้นงานทดสอบ แรงจากสปริงจะส่งไปยังหัวทดสอบ ความลึกที่หัวทดสอบเจาะลงไปชิ้นงานจะมีค่าแปรผกผันกับค่าความแข็งของวัสดุบนมาตรวัดความแข็ง 1 ชอร์จะมีค่าเท่ากับระยะการเคลื่อนที่ในเนื้อชิ้นงาน 0.025 มิลลิเมตร ค่าความแข็งบนหน้าปัดมีค่าตั้งแต่ 0-100 โดยวัสดุที่มีความแข็งมากจะแสดงค่าที่สูงกว่าวัสดุที่มีความแข็งต่ำกว่า โดยทั่วไปแล้วจะกำหนดให้อ่านค่าทดสอบที่ประมาณ 1 ถึง 15 วินาที หลังการกด และต้องมีการระบุเวลาที่ใช้ในการอ่านผลในรายงานผลการทดสอบด้วย



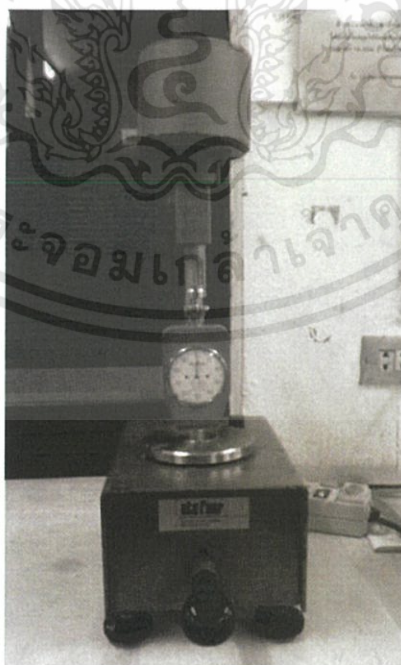
รูปที่ 2.43 หลักการทำงานเครื่องทดสอบความแข็งแบบดูโรมิเตอร์ (Dietzsch, C., 2011)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยทั่วไปค่าความแข็งกดแบบชอร์ในแต่ละสเกลจะไม่ใช้งานจนเต็มค่าในมาตรวัดค่าความแข็งที่ต่ำกว่า 20 และสูงกว่า 90 ถือว่าเป็นค่าที่มีความน่าเชื่อถือต่ำ ซึ่งควรจะเปลี่ยนไปใช้การทดสอบความแข็งในสเกลอื่นที่ต่ำกว่าหรือสูงกว่าถัดไป นอกจากนี้ในการดำเนินการทดสอบนั้นสามารถที่จะใช้มือจับอุปกรณ์ทดสอบโดยตรงหรืออาจใช้แท่นทดสอบ (Operating stand) ช่วยในการทำงานของอุปกรณ์ก็ได้ โดยทั่วไปในการทดสอบ เพื่อให้ได้ค่าที่แน่นอนและมีความแปรปรวนต่ำ ควรจะต้องมีการใช้แท่นทดสอบในการทดสอบ นอกจากนี้การให้แรงกดแก่ชิ้นงานทดสอบ การใช้ค้อนน้ำหนักคงที่ติดตั้งบนอุปกรณ์ทดสอบความแข็งแบบชอร์ จะทำให้ค่าที่ได้มีความแน่นอนมากขึ้น และแปรปรวนต่ำลง โดยค้อนน้ำหนักนี้จะต้องมีน้ำหนักสูงกว่าแรงต้านจากสปริงเชิงเส้นในอุปกรณ์ทดสอบแต่ละประเภท

เครื่องทดสอบความแข็งชอร์ (หัวกดแบบชอร์)

เครื่องทดสอบแบบชอร์มักจะมีลักษณะเป็นอุปกรณ์หน้าปัดขนาดพกพาได้ ทำให้ผู้ทำการทดสอบสามารถใช้มือจับเครื่องทดสอบเพื่อทำการทดสอบบนชิ้นงานหรืออาจนำไปติดตั้งบนฐานทดสอบเพื่อความถูกต้องในการทดสอบมากขึ้นก็ได้ ภายในเครื่องทดสอบแบบชอร์จะประกอบไปด้วยหัวทดสอบซึ่งจะติดอยู่กับสปริงเชิงเส้นซึ่งมีค่าความแข็งที่ผ่านการสอบเทียบแล้ว เมื่อทำการทดสอบโดยให้แรงกดแก่อุปกรณ์ทดสอบลงยังชิ้นงานทดสอบ แรงจากสปริงจะส่งไปยังหัวทดสอบและความลึกที่หัวกดเจาะลงไปยังชิ้นงานจะแสดงบนสเกลของหน้าปัดในลักษณะเข็มวัด หรือตัวเลขดิจิทัลก็ได้ ขึ้นอยู่กับประเภทของเครื่องทดสอบ (จินตมัย สุวรรณประทีป, 2547)



รูปที่ 2.44 เครื่องทดสอบความแข็งชอร์ แบบชอร์ D และฐานทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

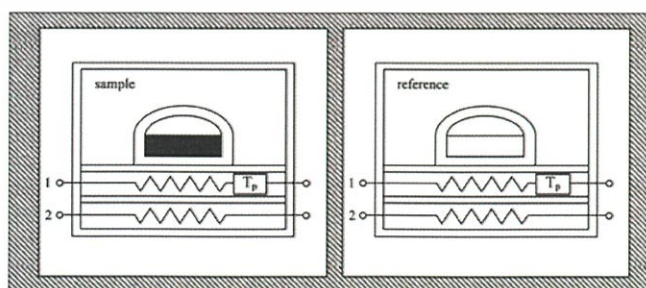
2.11 การทดสอบสมบัติทางความร้อน (Thermal properties testing) (เกศินี เหมวิเชียร และ พิริยาธร สุวรรณมาลา, 2548)

ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimetry; DSC) เป็นเครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อน (Thermal transition) ของสารตัวอย่าง เช่น พอลิเมอร์ ใช้วัดการเปลี่ยนแปลงพลังงาน (การดูดหรือคายพลังงาน) ของสารตัวอย่าง เมื่อถูกเพิ่มหรือลด อุณหภูมิ ในบรรยากาศที่ถูกควบคุม ดังแสดงในรูปที่ 2.57



รูปที่ 2.45 เครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC)
(เกศินี เหมวิเชียร และพิริยาธร สุวรรณมาลา, 2548)

หลักพื้นฐานของ DSC ก็คือ มีถาด 2 ถาด โดยถาดแรกเป็นถาดที่บรรจุสารตัวอย่าง (Sample pan) ถาดที่สองเป็นถาดอ้างอิง (Reference pan) ซึ่งเป็นถาดเปล่า นำไปวางอยู่บนอุปกรณ์ให้ความร้อน (Furnace) ชนิดเดียวกัน ที่วางอยู่ข้าง ๆ กันดังแสดงในรูปที่ 2.45 เมื่อเริ่มการทดลอง Furnace จะเริ่มให้ความร้อนแก่ถาดทั้งสอง โดยเครื่อง DSC จะควบคุมอัตราการเพิ่มอุณหภูมิให้คงที่ (เช่น 10 องศาเซลเซียส ต่อ 1 นาที) แต่ที่สำคัญที่สุดก็คือ เครื่อง DSC จะควบคุมให้ Furnace ทั้งสอง (Furnace ของ Sample pan และของ Reference pan) เพิ่มอุณหภูมิถาดทั้งสองที่วางแยกกัน ด้วยอัตราการเพิ่มความร้อนที่เท่ากันตลอดทั้งการทดลอง



รูปที่ 2.46 การให้ความร้อนแก่ถาดใส่ตัวอย่างของเครื่อง DSC (Larouche, D., et al., 2003)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สาเหตุที่ความร้อนของถาดทั้งสองเพิ่มด้วยอัตราที่ไม่เท่ากัน เนื่องจากถาดทั้งสองมีความแตกต่างกัน นั่นคือ Sample pan มีตัวอย่างพอลิเมอร์อยู่ข้างใน แต่ Reference pan ไม่มี การมีสารตัวอย่างอยู่ข้างในทำให้ Sample pan มีสสารในปริมาณที่มากกว่า Reference pan นั้นหมายความว่า Furnace ต้องให้ความร้อน Sample pan มากกว่าที่ให้ Reference pan เพื่อที่จะคงอัตราการเพิ่มอุณหภูมิให้เท่ากัน ดังนั้น Furnace ที่อยู่ใต้ Sample pan จะต้องทำงานหนักกว่า Furnace ที่อยู่ใต้ Reference pan ต้องให้ความร้อนมากกว่า การวัดความแตกต่างของปริมาณความร้อนจาก Furnace ทั้งสองนี้ คือหน้าที่ของเครื่อง DSC

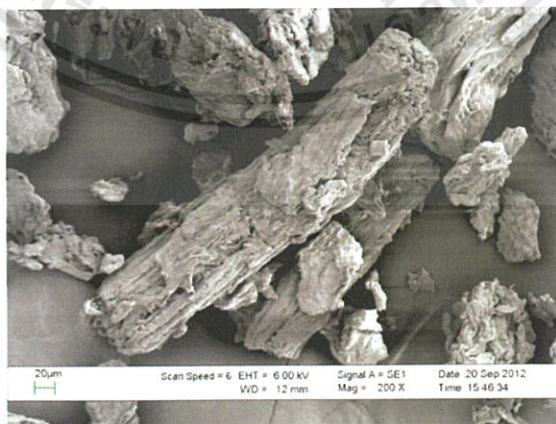
โดยปกติแล้ว การทดสอบสารตัวอย่างทำได้โดยการเพิ่ม หรือลด อุณหภูมิสารตัวอย่างด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิที่คงที่ หรือการรักษาอุณหภูมิสารตัวอย่างไว้คงที่ (Isothermal) เป็นระยะเวลาหนึ่ง (เช่น 200°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง) สำหรับการทดลองส่วนใหญ่แล้ว บรรยากาศในการทดลองมีบทบาทสำคัญต่อผลการทดลองเช่นเดียวกับอุณหภูมิ และอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ โดยส่วนใหญ่แล้วบรรยากาศที่ใช้ในการทดลองมีสองแบบคือ บรรยากาศเฉื่อย (Inert atmosphere) เช่น แก๊สไนโตรเจน และบรรยากาศที่มีแก๊สออกซิเจน (Oxidizing atmosphere) เช่น แก๊สออกซิเจน หรืออากาศ

ความร้อนที่ให้สารตัวอย่าง (Heat flow) มีค่าสอดคล้องกับพลังงานที่ให้สารตัวอย่าง และถูกวัดในหน่วยมิลลิวัตต์ (milliwatts; mW) เมื่อนำค่าพลังงานมาคูณด้วยเวลา ผลลัพธ์ที่ได้คือปริมาณพลังงานที่ถูกแสดงในหน่วย มิลลิวัตต์วินาที (mW·s) หรือ มิลลิจูล (mJ) พลังงานที่ให้สารตัวอย่างมีค่าสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปี (Enthalpy) ของสารตัวอย่าง เมื่อสารตัวอย่างดูดพลังงาน เรียกว่า Enthalpy มีการเปลี่ยนแปลงแบบ Endothermic และเมื่อสารตัวอย่างคายพลังงาน เรียกว่า Enthalpy มีการเปลี่ยนแปลงแบบ Exothermic เมื่อสารตัวอย่างมีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เช่น การหลอมเหลว (Melting) Furnace ต้องให้ความร้อน Sample pan มากกว่าที่ให้ Reference pan เพื่อที่จะคุมอุณหภูมิของ Sample pan และ Reference pan ให้เท่ากัน ความร้อนจะถูกส่งผ่านไปยัง Sample pan มากกว่าหรือน้อยกว่าที่ถูกส่งผ่านไปยัง Reference pan นั้น ขึ้นอยู่กับว่าความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนั้นเป็นแบบ Exothermic หรือแบบ Endothermic

2.12 การศึกษาสัณฐานวิทยาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy; SEM) (นิลนิต เพ็ญบัวขาว, 2550)

การศึกษาสัณฐานวิทยา มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาลักษณะรูปร่างของวัสดุต่างๆ ในบริเวณพื้นผิว และผิวหน้าของรอยแตกหัก (Fracture surface) โดยลักษณะของรอยแตกหักสามารถบ่งบอกได้ว่า ชิ้นงานพอลิเมอร์นั้นมีสมบัติเชิงกลดีหรือไม่ ซึ่งอาจสังเกตได้จากรูปแบบการแตกหักของวัสดุ เช่นถ้ารอยแตกหักของพื้นผิวชิ้นงานมีความราบเรียบสามารถอธิบายได้ว่าพอลิเมอร์นั้นมีการแตกหักแบบวัสดุเปราะคล้ายแก้ว แต่ถ้ารอยแตกหักของพื้นผิวชิ้นงานมีลักษณะเป็นคลื่นไม่เรียบหรือค่อนข้างขรุขระ สามารถอธิบายได้ว่าพอลิเมอร์นั้นมีการแตกหักแบบวัสดุเหนียว เนื่องจากมีการเหนียวรั้งกันระหว่างเนื้อสารกับวัสดุผสมเพื่อด้านทานการแตกหัก นอกจากนี้ยังสามารถทำนายได้ถึงแรงยึดเหนี่ยวของวัสดุโดยพิจารณาจากความต่อเนื่องบริเวณผิวสัมผัสระหว่างพอลิเมอร์กับวัสดุผสม ซึ่งถ้าพอลิเมอร์ และวัสดุผสมมีแรงยึดเหนี่ยวกันอย่างดี บริเวณรอยต่อหรือผิวสัมผัสระหว่างพอลิเมอร์กับวัสดุผสมจะค่อนข้างมีความต่อเนื่องกันหรืออาจแสดงให้เห็นถึงลักษณะการห่อหุ้มวัสดุผสมด้วยเนื้อของพอลิเมอร์ แต่ถ้าบริเวณผิวสัมผัสระหว่างพอลิเมอร์กับวัสดุผสมแยกกันหรือไม่มีความต่อเนื่องกันระหว่างเฟส แสดงว่าไม่มีแรงยึดเหนี่ยวกันที่ดี

หลักการของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดคือ ใช้ลำอิเล็กตรอนสแกนไปบนพื้นผิวของชิ้นงานตัวอย่าง ซึ่งทำให้เกิดการกระเจิงของอิเล็กตรอน (Scattered Electron) และเกิดสัญญาณ เพื่อใช้ในการสร้างภาพที่สามารถเห็นความลึก มีประโยชน์มากในการศึกษาเกี่ยวกับพื้นผิวของพอลิเมอร์ เนื่องจากมีกำลังขยายสูงและเป็นภาพสามมิติ การประยุกต์ใช้เทคนิคนี้มีหลากหลาย เช่น ศึกษาการพองหรือการแตกออกของวัสดุที่ใช้เคลือบผิว การแยกเฟสในพอลิเมอร์ผสม ลักษณะการแตกของผิวหน้าระหว่างวัสดุและสารที่ใช้ยึดติด และประสิทธิภาพการยึดติดระหว่างพอลิเมอร์กับสารตัวเติม เป็นต้น ตัวอย่างภาพที่ได้จาก SEM ดังแสดงในรูปที่ 2.46



รูปที่ 2.47 ภาพที่ได้จากเครื่องSEM

2.13 การศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กุลชนานู ประเสริฐสิทธิ์ และคณะ ทำการศึกษาโดยนำเปลือกลูกตาลส่วนที่หุ้มเนื้อมาสกัดในสภาวะที่ต่างกัน เพื่อศึกษาปัจจัยของอุณหภูมิ ระหว่าง 30 50 และ 60 องศาเซลเซียส เวลาสกัด ระหว่าง 30 60 และ 120 นาที อัตราส่วนระหว่างเปลือกลูกตาลกับตัวทำละลาย ระหว่าง 1:8 1:10 และ 1:15 w/v และชนิดของตัวทำละลาย ระหว่างน้ำกลั่นและเอทานอลเข้มข้น 95% สารสกัดที่ได้ถูกวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด น้ำตาลรีดิคซ์ และน้ำตาลที่ไม่ถูกรีดิคซ์ ซึ่งคาดว่าจะจะเป็นฟรีไบโอติกส์ จากนั้นนำไปยืนยันความเป็นฟรีไบโอติกส์ด้วยการทดสอบการเจริญของโปรไบโอติกส์ ซึ่งพบว่า สารที่สกัดได้มีความเป็นฟรีไบโอติกส์ โดยสามารถส่งเสริมการเจริญของ *Lactobacillus plantarum* กระบวนการสกัดควรดำเนินการที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส โดยระยะเวลาที่เหมาะสมอาจจะนานกว่า 120 นาที อัตราส่วนระหว่างเปลือกลูกตาลกับตัวทำละลายอาจสูงกว่า 1:15 w/v และจะต้องศึกษาการใช้เอทานอลที่มีความเข้มข้นอื่นๆ เป็นตัวทำละลายจึงจะสามารถสรุปสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดได้ (กุลชนานู ประเสริฐสิทธิ์ และคณะ, 2551)

ฉันททิพ คำนวนทิพย์ และคณะ ทำการศึกษาแนวทางในการใช้ใยมะพร้าวมาผลิตเป็นฉนวนความร้อน โดยใช้น้ำยางธรรมชาติเป็นสารเชื่อมประสาน โดยมีการปรับปรุงผิวของเส้นใยมะพร้าวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้น 5 และ 10% (w/v) การผลิตแผ่นฉนวนใช้ปริมาณของน้ำยางธรรมชาติต่อเส้นใยมะพร้าวในอัตราส่วนโดยน้ำหนัก 2:1 และ 3:1 และศึกษาถึงกระบวนการทำให้ยางคงรูปโดยการใช้เตาอบความร้อน (Hot oven) เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding) จากผลการทดลอง พบว่า เส้นใยมะพร้าวที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จะจับยึดกับน้ำยางธรรมชาติได้ดีขึ้น ฉนวนความร้อนที่ได้จากกระบวนการทำให้ยางคงรูปโดยการใช้เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding) จะมีความหนาแน่นสูงกว่าฉนวนที่ได้จากกระบวนการทำให้ยางคงรูปโดยเตาอบความร้อน (Hot oven) แผ่นฉนวนความร้อนจากใยมะพร้าวที่มีน้ำยางธรรมชาติเป็นสารเชื่อมประสานที่ขึ้นรูปด้วยการอัดและการอบขึ้นรูป มีค่าการนำความร้อนค่อนข้างต่ำและใกล้เคียงกัน และจากการทดลอง พบว่า แผ่นฉนวนความร้อนที่มีอัตราส่วนน้ำยางต่อใยมะพร้าว 2:1 จะมีค่าความหนาแน่นและค่าการนำความร้อนต่ำกว่าแผ่นฉนวนความร้อนที่ขึ้นรูปด้วยอัตราส่วนน้ำยางต่อใยมะพร้าว 3:1 (ฉันททิพ คำนวนทิพย์ และคณะ, 2551)

ประชุม คำพูน และคณะ ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลในด้าน การต้านทานแรงดึง การทนต่อแรงกระแทก การต้านทานการโค้งงอ และความแข็งแรงของผิวไม้พลาสติกคอมโพสิต ซึ่งแผ่นไม้พลาสติกคอมโพสิตนี้ประกอบไปด้วยพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่ผ่านการใช้งานแล้วกับผงขี้เลื่อยไม้ยางพาราที่ซึ่งผ่านการร่อนด้วยตะแกรงความละเอียด 18 และ 40 ช่องต่อตารางนิ้ว (mesh)

ที่อัตราส่วน 70:30 60:40 และ 50:50 โดยการเพิ่มปริมาณของสารประสานตั้งแต่ร้อยละ 0 1 และ 2 ตามลำดับ พบว่า อัตราส่วนผสมของโพลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่ผ่านการร่อนด้วยตะแกรงเบอร์ 40 ช่องต่อตารางนิ้ว (mesh) และสารประสานที่อัตราส่วนร้อยละ 2 ในอัตราส่วน 70:30 มีแนวโน้มที่จะทำให้แผ่นไม้พลาสติกคอมโพสิตนี้มีสมบัติเชิงกลที่สูงที่สุด ทั้งในด้านการทนต่อแรงดึง การทนต่อแรงกระแทก และการต้านทานการโค้งงอ และที่อัตราส่วนผสม 50: 50 จะให้ค่าความแข็งที่ผิวของแผ่นไม้พลาสติกคอมโพสิตสูงที่สุด (ประชุม คำพุ่ม และคณะ, 2550)

กลางเดือน โพนนา และคณะ ทำการศึกษาและผลิตวัสดุไม้พลาสติกคอมโพสิตจากไม้ปาเล็มและพลาสติกเหลือใช้ โดยจะนำผงไม้ปาเล็มมาผสมกับเศษผงพลาสติกพอลิเอทิลีนที่มีความหนาแน่นสูง (HDPE) ซึ่งได้มาจากขวดน้ำดื่มขวดที่ใช้แล้วและมีการใช้สารเติมแต่งคือ มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (MA) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นสารช่วยผสม โดยวัตถุดิบทั้งหมดจะถูกผสมกันในอัตราส่วนระหว่างผงไม้กับ HDPE และ MA ที่ 50:47:03 40:57:03 และ 30:67:03 โดยน้ำหนัก ทำการขึ้นรูปด้วยวิธีอัดร้อนที่อุณหภูมิ 130 150 และ 170 องศาเซลเซียส ความดัน 2500 psi แล้วนำไปทดสอบสมบัติเชิงกลตามมาตรฐานของ ASTM โดยจะใช้ตัวอย่างในการทดสอบจำนวน 5 ชิ้น ตัวอย่างต่อการทดสอบ ซึ่งผลการทดลองพบว่า ความแข็ง ความแข็งแรงคด ความแข็งแรงดึง ความแข็งแรงกด และการดูดซับพลังงานแรงกระแทกของไม้พลาสติกมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณสัดส่วนการเพิ่มขึ้นของเศษพลาสติกและอุณหภูมิในการขึ้นรูป โดยที่สัดส่วน 30:67:03 อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส มีสมบัติเชิงกลดีที่สุด (กลางเดือน โพนนา และคณะ, 2554)

พจนีย์ ศรธรรมลี และคณะ ทำการศึกษา WPC จากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ผสมกับเส้นใยสั้นของผักตบชวาที่เตรียมโดยการสกัดทางเคมี โดยใช้สารช่วยผสมคือ พอลิเอทิลีน กราฟท์ มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (PE-g-MA) ทำการศึกษาระบบต่างๆ ที่มีผลต่อสมบัติของไม้พลาสติกคอมโพสิต ได้แก่ ปริมาณสารช่วยผสม ปริมาณเส้นใยในคอมโพสิต ขนาดของเส้นใยผักตบชวา ฯลฯ ทำการเตรียมคอมโพสิตด้วยเทคนิคการผสมแบบหลอมเหลว ด้วยเทคนิคอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว (Single-screw extrusion) และขึ้นรูปด้วยเทคนิคฉีดขึ้นรูป (Injection molding) จากนั้นทำการศึกษสมบัติต่างๆ ของคอมโพสิตที่เตรียมได้ เช่น สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสัณฐานวิทยา จากการทดลองเมื่อใช้สารช่วยผสม PE-g-MA ผสมในคอมโพสิต พบว่า สมบัติเชิงกลของคอมโพสิตดีขึ้น และปริมาณสารช่วยผสมที่เหมาะสมให้ความแข็งแรงดึงสูงสุดคือ 3% โดยน้ำหนัก ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) โมดูลัส (Modulus) ความแข็งกด (Hardness) และองศาความเป็นผลึก (% Crystallinity) เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยผักตบชวา ส่วนค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) และความแข็งแรงกระแทก (Impact strength) มีค่าลดลง ขนาดเส้นใยที่เหมาะสมคือ 50-80 mesh (180-300 μm) ค่าการดูดซับน้ำ (Water absorption, %WA) ของคอมโพสิตลดลงเมื่อใส่สารช่วยผสม อย่างไรก็ดี %WA มีค่า

เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยในคอมโพสิตและเมื่อใช้เส้นใยขนาดสั้น จากการศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) ยืนยันผลการทดลอง คือ สารช่วยผสม PE-g-MA ช่วยเพิ่มการยึดเกาะ (พจนีย์ ศรธรรมลี และคณะ, 2545)

นิรมล อุดมอ่าง และธีรวัฒน์ เทพใจกาศ ทำการวิจัยการสกัดเส้นใยจากกากสับปะรดแล้วนำไปเสริมในผลิตภัณฑ์อาหาร ได้แก่ เครื่องดื่มเบเกอรี่ และไส้กรอก วิธีการสกัดเส้นใยเริ่มจากการนำวัตถุดิบกากสับปะรดจากโรงงานทำน้ำสับปะรด โดยนำกากสับปะรดมาล้างและปั่นละเอียดแช่ในอะซิโตน 80 % นาน 2 ชั่วโมง สกัดด้วยน้ำเย็น 18-20 °C นาน 2 ชั่วโมง จากการศึกษาสภาวะการสกัดที่เหมาะสมคือ น้ำร้อนอุณหภูมิ 90 °C และใช้ อีดีทีเอ 1.0 % สกัดนาน 2 ชั่วโมง กรอง แล้วอบแห้งเป็นผงอุณหภูมิ 60 °C เส้นใยที่ได้มีองค์ประกอบและคุณสมบัติดังนี้ ความชื้น 7.87 % เถ้า 1.77 % เส้นใย 32.02 % และเยื่อใย 81.08 % มีความสามารถในการอุ้มน้ำ 10.47 เท่า จากการทดลองเสริมเส้นใยดังกล่าวในผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มเนคต้าเทียมกลิ่นรสส้ม พบว่า อัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างเส้นใยต่อน้ำคือน้ำต่อเนคต้า เท่ากับ 1:40:25 การเสริมเส้นใยในลูกก็พบว่า ใช้เส้นใยละเอียด 30 เมช ปริมาณ 6 % ได้ลูกที่ผู้ทดสอบชิมต้องการ และการทดลองเสริมเส้นใยในไส้กรอกเวียดนาม พบว่า ใช้เส้นใยละเอียด 30 เมช ปริมาณ 3 % ได้ไส้กรอกที่มีลักษณะที่ดี (นิรมล อุดมอ่าง และธีรวัฒน์ เทพใจกาศ, ม.ป.ป.)

ชุตินา วณิชยธนอม และคณะ ทำการศึกษาคอมโพสิตพอลิแลคติกแอซิด (Poly Lactic Acid; PLA) ผสมเส้นใยมะพร้าว (Coir) เส้นใยมะพร้าวที่ใช้คือเส้นใยมะพร้าวเบอร์ 1 และเบอร์ 2 การศึกษาจะเน้นผลของปริมาณเส้นใยมะพร้าว โดยใช้ปริมาณของเส้นใยมะพร้าว 10% 20% และ 30% โดยน้ำหนัก ขนาดของเส้นใยมะพร้าว และผลของการเติมสารช่วยผสม (Compatibilizer) ได้แก่ พอลิแลคติกแอซิดต่อกิ่งมาเลอิกแอนไฮดรไรด์ (PLA-g-MA) ในปริมาณ 3% โดยน้ำหนัก พลาสติก และเติมสารเติมแต่ง (Additives) อื่นๆ ได้แก่ Processing aids-Enhance, Processing aids-WF 107, Antioxidant-Anox[®] 20 และ Antioxidant-Alkanox[®] 240 ในปริมาณ 5 1.5 0.05 และ 0.05 % โดยน้ำหนักพลาสติก ตามลำดับ พอลิเมอร์ผสมเตรียมได้จากเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two roll mill) และขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด (Injection molding) จากนั้นทำการศึกษาสมบัติต่างๆ ได้แก่ สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสัณฐานวิทยา จากสัณฐานวิทยา พบว่าเส้นใยมะพร้าวมีการกระจายตัวที่ไม่ดีในวัฏภาคของ PLA ทั้ง PLA/Coir no.1 และ PLA/Coir no.2 เมื่อใส่สารช่วยผสม PLA-g-MA จะเห็นได้ว่าการยึดติดกันของเส้นใยมะพร้าวกับวัฏภาค PLA ส่งผลให้สมบัติเชิงกล PLA/Coir no.1 และ PLA/Coir no.2 มีค่าความแข็งแรงดึง ค่าความแข็งแรงกด ค่าความแข็งแรงกระแทก และเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ที่ใกล้เคียงกัน ส่วนค่ามอดุลัส PLA/Coir no.2 จะมีค่าสูงกว่า PLA/Coir no.1 เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยมะพร้าว พบว่า มีความแข็งแรงดึง ค่าความแข็งแรงกด ค่าความแข็งแรงกระแทก และเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด มีค่าลดลง

แต่ค่ามอดูลัสมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเติมสารช่วยผสม PLA-g-MA ใน PLA ทั้ง PLA/Coir no.1 และ PLA/Coir no.2 พบว่า มีสมบัติดีขึ้นทุกประการ จากการศึกษาสมบัติทางความร้อน พบว่า อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Tg) ของ PLA/Coir no.1 และ PLA/Coir no.2 มีค่าใกล้เคียงกัน แต่ค่าองศาความเป็นผลึก (Degree of crystallinity) ของ PLA/Coir no.1 มีค่าสูงกว่า PLA/Coir no.2 เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยมะพร้าว พบว่า ค่าองศาความเป็นผลึกของ PLA/Coir no.1 และ PLA/Coir no.2 มีค่าลดลง เมื่อใส่สารช่วยผสมทำให้ค่าองศาความเป็นผลึกมีค่าเพิ่มขึ้น (ชุตินา วิชัยฉนวน และคณะ, 2552)

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้แนวทางในการทำโครงการพิเศษ ดังนี้ ในการสกัดน้ำตาลควรรใช้ น้ำเป็นตัวทำละลาย โดยอัตราส่วนกากเส้นใยต่อน้ำเป็น 1:15 w/v ด้วยการต้มในสภาวะอุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ในการปรับปรุงพื้นผิวกากเส้นใยควรรใช้สารละลาย NaOH เข้มข้น 5% และ 10% (w/v) เป็นตัวสกัด ในการอบกากเส้นใยสับปะรดให้แห้งใช้สภาวะอุณหภูมิ 60 °C ทำการผลิต WPC จากพลาสติก HDPE ผสมกับเส้นใยธรรมชาติ ควรเติมสารช่วยผสม PE-g-MA ในปริมาณ 3% โดยน้ำหนักพลาสติก และเติมสารเติมแต่ง (Additives) อื่นๆ ได้แก่ Processing aids-Enhance, Processing aids-WF 107, Antioxidant-Anox[®] 20 และ Antioxidant-Alkanox[®] 240 ในปริมาณ 5 1.5 0.05 และ 0.05 % โดยน้ำหนักพลาสติก ตามลำดับ ทำการขึ้นรูป WPC ด้วยเทคนิคฉีดขึ้นรูป (Injection molding) ทำการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อสมบัติของ WPC ได้แก่ ผลของการเติมสารช่วยผสม ผลของการปรับปรุงเส้นใย ผลของอัตราส่วนการผสม เป็นต้น โดยศึกษาสมบัติต่างๆของ WPC ที่เตรียมได้ คือ สมบัติเชิงกลตามมาตรฐาน ASTM สมบัติทางความร้อน และสัณฐานวิทยา

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. พลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง เกรดฉีด (H5818J)
บริษัท SCG Plastics Co., Ltd. สมบัติบางประการของ HDPE ที่ใช้ในงานวิจัยนี้
แสดงดังตารางที่ 3.1
2. กากเส้นใยสับประดเกรด HP บริษัท Tipco F&B Co., Ltd. ดังแสดงในรูปที่ 3.1 (ก)
3. กากเส้นใยสับประดเกรด PFF บริษัท Tipco F&B Co., Ltd. ดังแสดงในรูปที่ 3.1 (ข)
4. Compatibilizer Polyethylene grafted Maleic Anhydride (PE-g-MA)
บริษัท Behn Meyer Chemical (T) Co., Ltd.
5. Processing aids.Enhance[®] บริษัท Behn Meyer Chemical (T) Co., Ltd.
6. Processing aids.Ultra Plast[®] WF 102 บริษัท Behn Meyer Chemical (T) Co., Ltd.
7. Phenolic antioxidant (Anox[®] 20) บริษัท Behn Meyer Chemical (T) Co., Ltd.
8. Phosphite antioxidant (Alkanox[®] 240) บริษัท Behn Meyer Chemical (T) Co., Ltd.
9. สารมาตรฐานกลูโคส reagent grade บริษัท Carlo Erba., Ltd.
10. กรดซัลฟูริก reagent grade บริษัท Carlo Erba., Ltd.
11. ฟีนอล reagent grade บริษัท Carlo Erba., Ltd.
12. โซเดียมไฮดรอกไซด์ reagent grade บริษัท Carlo Erba., Ltd.



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.1 ลักษณะของกากเส้นใยสับประด (ก) เกรด PFF และ (ข) เกรด HP

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กากเส้นใยสับปะรดเกรด PFF ย่อมาจาก Pineapple Fruit Fiber เป็นกากเส้นใยสับปะรดเหลือทิ้งที่ได้จากสายพานการผลิตน้ำสับปะรดโดยตรง ในขั้นต้นกากเส้นใยมีลักษณะจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดประมาณ 5-10 เซนติเมตร เมื่อผ่านกระบวนการตีแยกเส้นใยในการศึกษาครั้งนี้แล้วได้เป็นกากเส้นใยสับปะรดที่มีรูปร่างเป็นเส้นใยสั้น รวมอยู่กับเศษของตาสับปะรดที่ติดค้างมาจากกระบวนการคั้นน้ำสับปะรด

กากเส้นใยสับปะรดเกรด HP เป็นชื่อเกรดทางการค้าของกากเส้นใยสับปะรดเกรด PFF ที่ผ่านกระบวนการบดละเอียด และสกัดด้วยแอลกอฮอล์จากโรงงานผู้ผลิต ทำให้ได้กากเส้นใยสับปะรดที่มีลักษณะเป็นผง

ตารางที่ 3.1 สมบัติบางประการของ HDPE

สมบัติ	ค่าที่ได้จากการทดสอบ	หน่วย	วิธีทดสอบ
Melt flow rate (190 °C, 2.16 kg)	28	g/10 min	ASTM D1238
Density	0.960	g/cm ³	ASTM D1505
Vicat softening point @ 10 N, 50 °C/hr	116	°C	ASTM D1525
Melting point	131	°C	ASTM D2117
Tensile strength @ yield	260	kg/cm ²	ASTM D638
Tensile strength @ break	230	kg/cm ²	ASTM D638
Elongation @ break	20	%	ASTM D638
Stiffness	9,500	kg/cm ²	ASTM D747
Flexural modulus	14,200	kg/cm ²	ASTM D790
Notched izod impact strength	2 (C) *	kg.cm/cm	ASTM D256
Durometer hardness	62	Shore D	ASTM D2240

* C = Complete Break

หมายเหตุ : ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. ตู้อบ (Oven) บริษัท Fisher Scientific Co., Ltd.
2. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง (Analytical balance) บริษัท Sartorius Mechatronics (T) Co., Ltd.
3. เครื่องชั่ง 2 ตำแหน่ง (Industrial balance) บริษัท Denver Instrument Company Co.
4. เครื่องผสมชนิดเกลียวทวนอกคู่ (Twin-screw extruder)
บริษัท Brabender® GmbH & Co.KG
5. เครื่องบดเม็ดพลาสติก (Grinder) บริษัท Bosco Engineering Co., Ltd.
6. เครื่องฉีดขึ้นรูป (Injection molding machine)
บริษัท Comos Machinery Enterprises, Ltd.
7. เครื่องทดสอบเนกประสงค์ (Universal testing machine) บริษัท Ametek, Inc.
8. เครื่องวัดความทนทานต่อแรงกระแทกแบบไอซอด (Izod impact tester)
บริษัท Yasuda Seiki Seisakusho, Ltd.
9. เครื่องทดสอบความแข็งกด (Shore D durometer hardness tester)
บริษัท Yasuda Seiki Seisakusho, Ltd.
10. เครื่องบาก (Specimen Preparation Machine) บริษัท Yasuda Seiki Seisakusho, Ltd.
11. เครื่องทดสอบสมบัติทางความร้อน (Differential Scanning Calorimeter; DSC)
บริษัท PerkinElmer Instruments Co., Ltd.
12. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM)
บริษัท Leo Electron Microscopy Ltd.
13. เครื่องวัดการดูดกลืนแสง (UV-Vis Spectrophotometer)
บริษัท Thermo Fisher Scientific, Inc.
14. ตู้ดูดควัน (Fume hood) บริษัท Science technology Co., Ltd.
15. เครื่องเขย่า (Sieve Shaker) บริษัท Retsch Co., Ltd.
16. เครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuge) บริษัท Sanyo Co., Ltd.

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การเตรียมวัสดุดิบ

3.3.1.1 การเตรียมกากเส้นใยสับปรดเกรด PFF

- 1) นำกากเส้นใยเกรด PFF ชั้นต้น ตีแยกกากเส้นใยด้วยเครื่องบด
- 2) คัดขนาดให้ได้ขนาดเล็กกว่า 12 mesh ด้วยตะแกรงร่อน
- 3) อบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หรือจนมีน้ำหนักคงที่ เก็บในเดซิเคเตอร์ เพื่อป้องกันความชื้น

3.3.1.2 การเตรียมกากเส้นใยสับปรดเกรด HP

- 1) คัดขนาดให้ได้ขนาดเล็กกว่า 20 mesh ด้วยตะแกรงร่อน
- 2) อบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หรือจนมีน้ำหนักคงที่ เก็บในเดซิเคเตอร์ เพื่อป้องกันความชื้น

3.3.1.3 การเตรียม HDPE

- 1) อบ HDPE อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หรือจนมีน้ำหนักคงที่ เก็บในเดซิเคเตอร์ เพื่อป้องกันความชื้น

3.3.2 การปรับปรุงกากเส้นใยสับปรดเกรด HP

3.3.2.1 การปรับปรุงกากเส้นใยด้วยการต้มน้ำ

- 1) ต้มกากเส้นใยด้วยน้ำในอัตราส่วนกากเส้นใยต่อน้ำ 1:15 w/v โดยใช้อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วตั้งทิ้งไว้ 10 นาที
- 2) กรองแยกกากเส้นใยออกจากน้ำต้มสกัด และเก็บตัวอย่างน้ำต้มสกัดเพื่อตรวจน้ำตาลรวมด้วยวิธีฟินอล-ซัลฟูริก (Phenol-sulfuric method)
- 3) ล้างกากเส้นใยด้วยน้ำในอัตราส่วน 1:15 w/v โดยวิธีล้างน้ำผ่าน
- 4) นำกากเส้นใยไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จนแห้ง เพื่อเตรียมทำ WPC
- 5) ทำการปรับปรุงกากเส้นใยเช่นเดียวกับข้อ 1-4 แต่เปลี่ยนเวลาต้มเป็นเวลา 2 และ 3 ชั่วโมง ตามลำดับ

3.3.2.2 การปรับปรุงกากเส้นใยด้วยการต้มสารละลาย NaOH

- 1) ต้มกากเส้นใยด้วยสารละลายสารละลาย NaOH 5% w/v ในอัตราส่วนกากเส้นใยต่อสารละลาย 1:15 w/v โดยใช้อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วตั้งทิ้งไว้ 10 นาที
- 2) กรองแยกกากเส้นใยออกจากสารละลาย NaOH
- 3) ล้างกากเส้นใยด้วยน้ำ เก็บน้ำล้างไปตรวจ pH ล้างจนน้ำล้างมีค่า pH เป็นกลาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 4) นำกากเส้นใยไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จนแห้ง เพื่อเตรียมทำ WPC
- 5) ทำการปรับปรุงกากเส้นใยเช่นเดียวกับข้อ 1-4 แต่เปลี่ยนความเข้มข้นสารละลาย NaOH เป็น 10% และ 15% w/v ตามลำดับ

3.3.3 การเตรียม WPC

ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนผสมระหว่าง HDPE กับกากเส้นใยสับประดเกรด HP

อัตราส่วนที่	HDPE : กากเส้นใย (โดยน้ำหนัก)
1	100:0
2*	80:20
3	70:30
4	60:40
5	50:50

หมายเหตุ : อัตราส่วนการผสมหลักในการทดลองทุกการทดลองใช้อัตราส่วนที่ 2 ยกเว้นการทดลองศึกษาอัตราส่วนผสมระหว่าง HDPE กับกากเส้นใยใช้อัตราส่วนที่ 1-5

ตารางที่ 3.3 สูตรผสมที่ใช้ในการทดลอง

สาร	ปริมาณสาร (ส่วนในร้อยละ)
HDPE	100
กากเส้นใยสับประด	ตามตารางที่ 3.1
Processing aids-Enhance	5
Processing aids-WF 102	1.5
Antioxidant-Anox [®] 20	0.05
Antioxidant-Alkanox [®] 240	0.05
สารช่วยผสม PE-g-MA	0,3

ที่มา : ชุตินา วนิชย์ถนอม, 2552

3.3.3.1 การเตรียม WPC จากกากเส้นใยสับประดเกรด HP เพื่อศึกษาผลของการเติมสารช่วยผสม PE-g-MA

แบบที่ 1 การเตรียม WPC โดยไม่เติมสารช่วยผสม

1) ผสม HDPE กับกากเส้นใยเป็นคอมพาวด์ ด้วยอัตราส่วนที่ 2 ตามตารางที่ 3.2 และใช้สูตรผสมตามตารางที่ 3.3 แต่ไม่ใส่สารช่วยผสม ด้วยเครื่องผสมชนิดเกลียวหนอนคู่ (Twin-screw extruder) อุณหภูมิในการผสม 165 160 155 และ 150 องศาเซลเซียส ตามระยะสกรูรอบในการผสม 8 รอบ/นาที

2) บดย่อยคอมพาวด์ด้วยเครื่องบดพลาสติก

3) นำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อกำจัดความชื้น

4) ขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องฉีดขึ้นรูป (Injection molding machine) โดยปรับสภาพการฉีดให้เหมาะสมเพื่อให้ได้ชิ้นงานที่สมบูรณ์ที่สุด สภาวะในการฉีดดังแสดงในภาคผนวก ค

แบบที่ 2 การเตรียม WPC โดยเติมสารช่วยผสม PE-g-MA

ทดลองเช่นเดียวกับแบบที่ 1 แต่เติมสารช่วยผสม PE-g-MA 3 ส่วนในร้อยละ

3.3.3.2 การเตรียม WPC จากกากเส้นใยสับประดเกรด HP เพื่อศึกษาผลของการปรับปรุงกากเส้นใยสับประดเกรด HP

แบบที่ 1 การเตรียม WPC จากกากเส้นใยที่ปรับปรุงด้วยการต้มน้ำ

ทดลองเช่นเดียวกับข้อ 3.3.3.1 แบบที่ 2 แต่เปลี่ยนเป็นกากเส้นใยที่ผ่านการปรับปรุงด้วยการต้มน้ำที่เวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมง ตามลำดับ

แบบที่ 2 การเตรียม WPC จากกากเส้นใยที่ปรับปรุงด้วยการต้มสารละลาย NaOH

ทดลองเช่นเดียวกับข้อ 3.3.3.1 แบบที่ 2 แต่เปลี่ยนเป็นกากเส้นใยที่ผ่านการปรับปรุงด้วยการต้มสารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 5% 10% และ 15% w/v ตามลำดับ

3.3.3.3 การเตรียม WPC จากกากเส้นใยสับประดเกรด HP เพื่อศึกษาอัตราส่วนผสมระหว่าง HDPE กับกากเส้นใย

ทดลองเช่นเดียวกับข้อ 3.3.3.1 แบบที่ 2 แต่เปลี่ยนเป็นใช้อัตราส่วนผสมระหว่าง HDPE กับกากเส้นใยตามตารางที่ 3.2

3.3.3.4 การเตรียม WPC จากกากเส้นใยเกรด HP และเกรด PFF เพื่อศึกษาชนิดของกากเส้นใย

ทดลองเช่นเดียวกับข้อ 3.3.3.1 แบบที่ 2 โดยใช้ชนิดกากเส้นใยเกรด HP และเกรด PFF

3.4 การทดสอบสมบัติต่างๆ

3.4.1 ศึกษาผลของการปรับปรุงกากเส้นใย

3.4.1.1 การวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลรวม (Total sugar) ด้วยวิธีฟินอล-ซัลฟูริก (Phenol-sulfuric method)

ตัวอย่าง

น้ำต้มสกัดจากการปรับปรุงกากเส้นใยสับประรดเกรด HP ด้วยการต้มที่เวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมง

สารเคมี

1. กรดซัลฟูริกเข้มข้น
2. ฟีนอล 5% โดยน้ำหนัก เตรียมโดยชั่งฟีนอล 5 กรัม เติมน้ำกลั่น 95 กรัม
3. สารละลายมาตรฐานกลูโคส เตรียมโดยชั่งมาตรฐานกลูโคส 0.0400 กรัม ละลายในน้ำกลั่น ปรับปริมาตรสุดท้ายเป็น 100 มิลลิลิตร ได้ความเข้มข้น 400 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร นำมาเจือจางให้ได้ความเข้มข้นตั้งแต่ 0-80 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร แสดงดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานกลูโคส

ลำดับที่	สารละลายมาตรฐานกลูโคส (400 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร) (ไมโครลิตร)	น้ำกลั่น (ไมโครลิตร)	สารละลายมาตรฐาน กลูโคส (ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร)
1	0	1,000	0
2	25	975	10
3	50	950	20
4	100	900	40
5	125	875	50
6	200	800	80

ที่มา : ประวิทย์ วงศ์คงคาเทพ, 2544

วิธีการทดลอง

1. แยกตะกอนแขวนลอยออกจากตัวอย่างน้ำต้มสกัดด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยง
2. ปิเปตส่วนใสของตัวอย่างน้ำต้มสกัด และสารละลายมาตรฐานกลูโคส (ความเข้มข้น 0-80 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร) ปริมาตร 1.0 มิลลิลิตร ใส่หลอดทดลอง เติมน้ำฟีนอล 5% 1.0 มิลลิลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เติมกรดซัลฟูริกเข้มข้น 5 มิลลิลิตร ลงไปอย่างรวดเร็ว โดยปล่อยให้กรดลงไปผิวหน้าของของเหลวโดยตรง

4. ตั้งหลอดทดลองทิ้งไว้ 10 นาที จากนั้นเขย่าแล้วนำมาบ่มในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 25-30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10-20 นาที

5. วัดการดูดกลืนแสงความยาวคลื่น 490 นาโนเมตรด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer

6. นำค่าการดูดกลืนแสงไปเทียบกับกราฟมาตรฐานกลูโคส เพื่อหาความเข้มข้นของกลูโคสในสารละลายตัวอย่าง หรือคำนวณได้จากสูตร

$$\text{ความเข้มข้นของกลูโคส (กรัมต่อลิตร)} = \frac{(\text{ค่าการดูดกลืนแสงที่ 490 นาโนเมตร}) \times (\text{อัตราการเจือจาง})}{(\text{ความเข้มข้นของกราฟมาตรฐาน}) \times 1,000}$$

3.4.1.2 ศึกษาสัณฐานวิทยา (Morphology)

ทำการศึกษากาเกล็นไฮสับปะรดเกรด PFF ที่ไม่ผ่านการปรับปรุง และเกรด HP ที่ผ่าน และไม่ผ่านการปรับปรุงด้วยการต้มน้ำ และต้มสารละลาย NaOH โดยทำการเคลือบผิวเส้นใยที่ศึกษาด้วยทอง แล้วนำไปส่องดูรูปร่าง และพื้นผิวของเส้นใยด้วยเครื่อง SEM ที่กำลังขยาย 200 เท่า

3.4.2 ศึกษาสมบัติของ WPC

3.4.2.1 ศึกษาสมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

1. การทดสอบแรงดึง (Tensile test)

ทดสอบด้วยเครื่องทดสอบเอนกประสงค์ (Universal testing machine) วัดค่าความแข็งแรงดึง เบอร์เซนต์การยืด ณ จุดขาด และค่ามอดูลัส ตามมาตรฐาน ASTM D638 ใช้ชิ้นงานทดสอบรูปดัมเบลล์ ทำการทดสอบ 12 ชิ้นต่อสูตร สภาวะที่ใช้ทดสอบเป็นดังนี้

ความเร็วดึง (Crosshead speed)	100	มิลลิเมตรต่อนาที
ระยะห่างของชิ้นงาน (Gauge length)	30	มิลลิเมตร
น้ำหนักสูงสุดที่รับแรง (Load cell)	5	กิโลนิวตัน

2. การทดสอบความแข็งแรงกระแทก (Impact test)

ทดสอบด้วยเครื่องวัดความทนทานต่อแรงกระแทกแบบไอซอด (Izod impact tester) ตามมาตรฐาน ASTM D256 บากชิ้นงานรูปตัว V (V Notch) ลึก 0.1 นิ้ว ทำการทดสอบ 12 ชิ้นต่อสูตร

3. ทดสอบความแข็งกด (Hardness test)

ทดสอบหาความแข็งกด ตามมาตรฐาน ASTM D2240 ด้วยเครื่อง Durometer แบบ Shore D บนฐานทดสอบ ชิ้นงานทดสอบมีความหนาไม่ต่ำกว่า ¼ นิ้ว พื้นผิวเรียบ กดเป็นเวลา 5 วินาที รายงานค่าเฉลี่ย 15 จุดโดยไม่ซ้ำจุดเดิมต่อ 1 ชิ้นงาน ทำการทดสอบชิ้นงาน 12 ชิ้นต่อสูตร

4. ทดสอบความแข็งแรงโค้งงอ (Flexural test)

ทดสอบด้วยเครื่องทดสอบเอนกประสงค์ (Universal testing machine) วัดค่าความแข็งแรงโค้งงอ และมอดูลัสโค้งงอ ใช้การทดสอบแบบ 3 จุด ตามมาตรฐาน ASTM D790 ทดสอบชิ้นงาน 12 ชิ้นต่อสูตร สภาวะที่ใช้ทดสอบเป็นดังนี้

ความเร็วกด (Compression speed)	20	มิลลิเมตรต่อนาที
ระยะห่างของขารองรับชิ้นงาน (Span length)	40	มิลลิเมตร
น้ำหนักสูงสุดที่รับแรง (Load cell)	5	กิโลนิวตัน

3.4.2.2 ศึกษาสมบัติทางความร้อน (Thermal properties)

โดยใช้เครื่อง DSC ชั่งน้ำหนักตัวอย่างประมาณ 5-10 มิลลิกรัม ให้มีน้ำหนักที่แน่นอนใส่ในอลูมิเนียมแพน ให้ความร้อนด้วยอัตรา 10 องศาเซลเซียสต่อนาที จากอุณหภูมิห้องจนถึง 150 องศาเซลเซียส จากนั้นลดอุณหภูมิด้วยอัตรา 10 องศาเซลเซียสต่อนาที จนถึงอุณหภูมิห้อง ศึกษาอุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) อุณหภูมิตกผลึก (T_c) และค่าองศาความเป็นผลึก (Degree of Crystallinity; % X_c) ของ HDPE ใน WPC สามารถคำนวณได้จากสูตร

$$X_c (\%) = \frac{\Delta H_m / \phi_{HDPE}}{\Delta H_m^\circ}$$

โดยที่ ΔH_m คือ ค่าเอนทาลปี (Enthalpy) ของการหลอมเหลว HDPE ใน WPC

ΔH_m° คือ ค่าเอนทาลปีของการหลอมเหลว HDPE ที่มีความเป็นผลึก 100 %

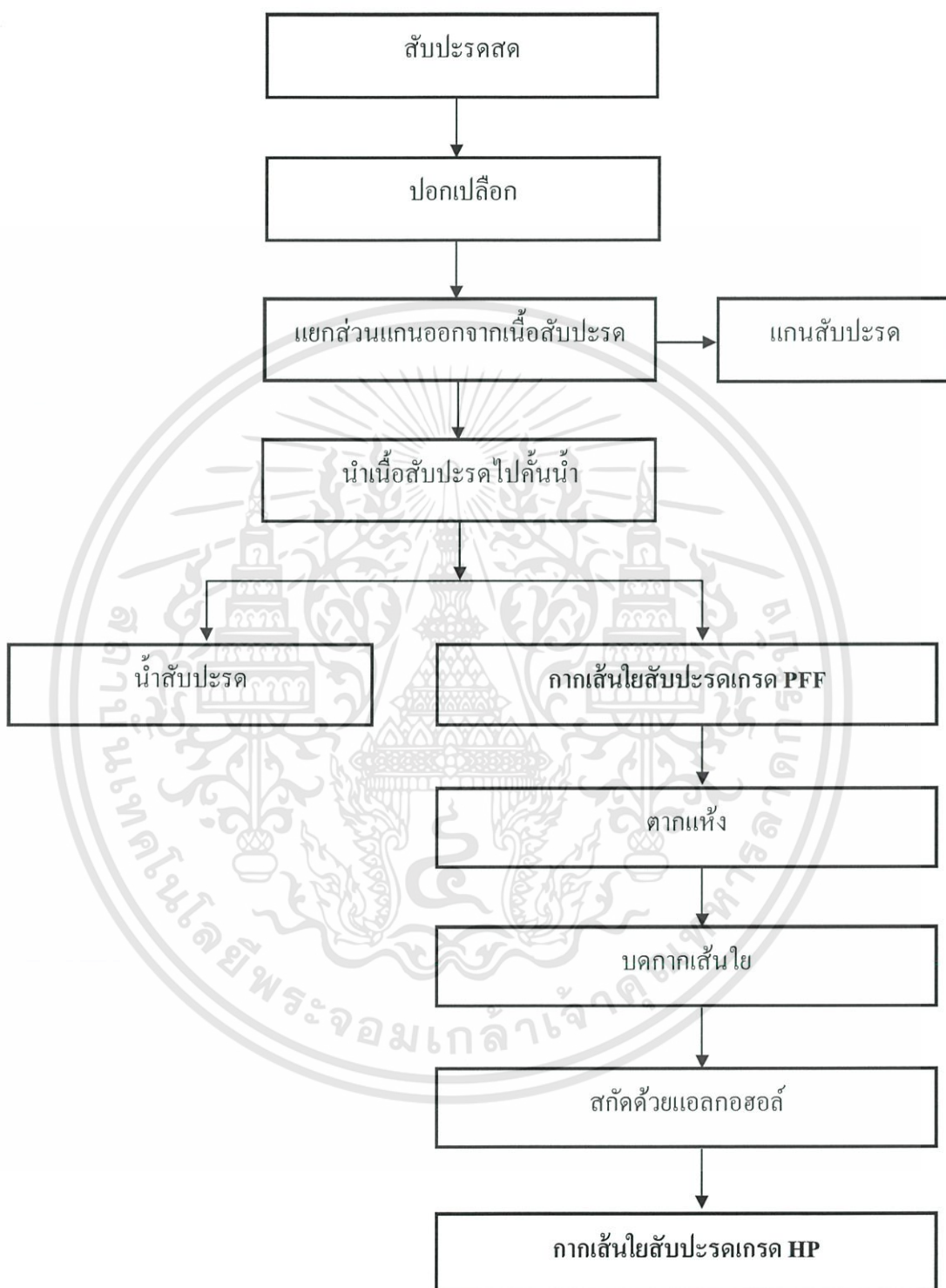
ซึ่งมีค่าเท่ากับ 293 J/g (Jacqueline I.K, 1986)

ϕ_{HDPE} คือ อัตราส่วนโดยน้ำหนักของ HDPE ใน WPC

3.4.2.3 ศึกษาสัณฐานวิทยา (Morphology)

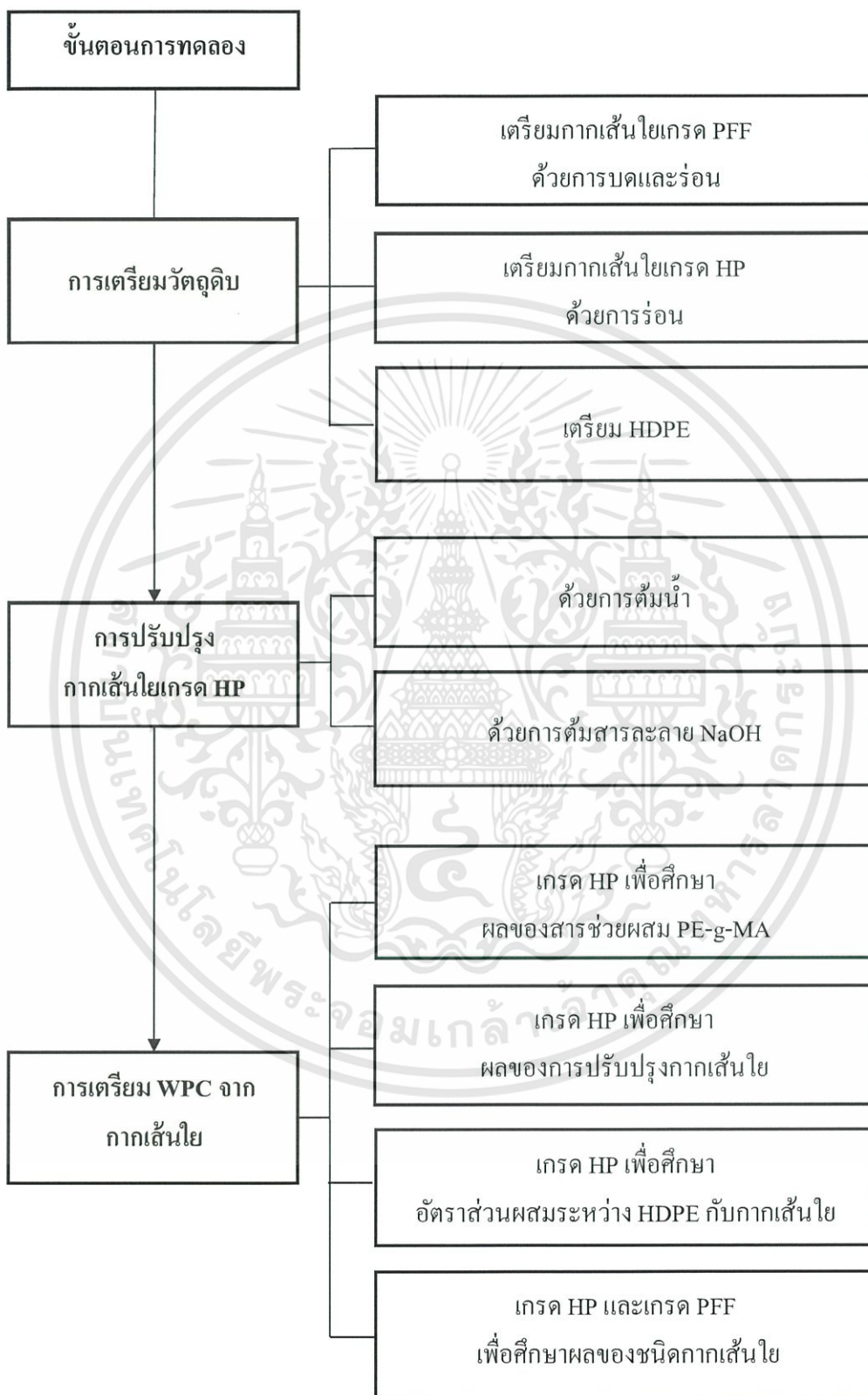
โดยใช้เครื่อง SEM แช่ชิ้นงานตัวอย่างในไนโตรเจนเหลว (Liquid nitrogen) เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นทำการหักอย่างรวดเร็ว เคลือบพื้นผิวที่ต้องการศึกษาด้วยทอง แล้วนำไปส่องดูพื้นผิวบริเวณที่เกิดการแตกหัก (Fractured surface) ด้วยเครื่อง SEM ศึกษาการยึดเกาะระหว่างกาเส้นใยกับพอลิเมอร์ ที่กำลังขยาย 200 และ 500 เท่า และศึกษาการกระจายตัวของกาเส้นใยใน HDPE ที่กำลังขยาย 100 เท่า

แผนผังที่ 3.1 ขั้นตอนการผลิตน้ำสับปรดที่มาของกากเส้นใยสับปรด



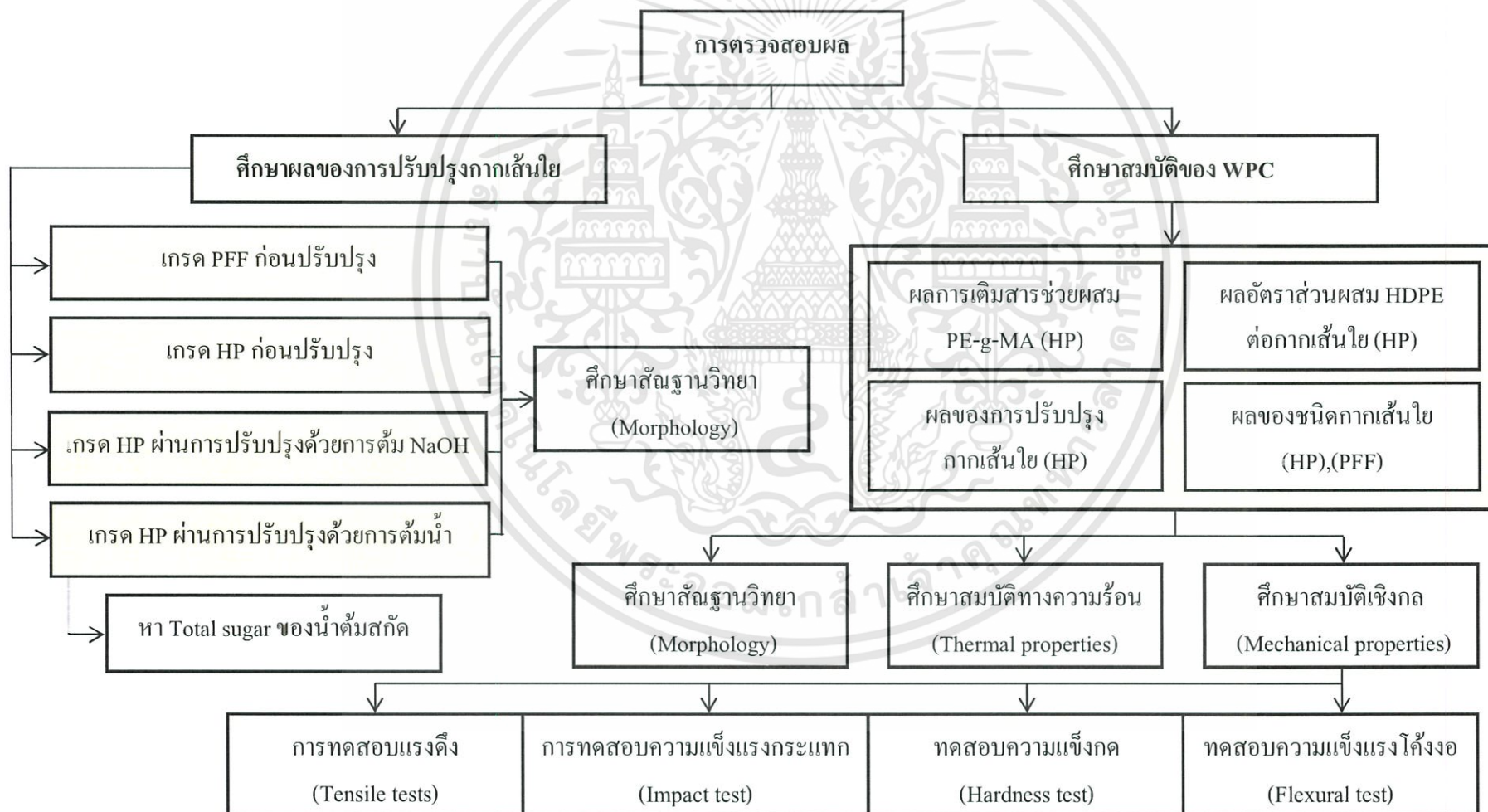
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผนผังที่ 3.2 ขั้นตอนการทดลองผลิต WPC จากกากเส้นใยสับปะรด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผนผังที่ 3.3 ขั้นตอนการตรวจสอบผล การปรับปรุงกากเส้นใยสับปะรด และสมบัติของ WPC



ผลการวิจัยและอภิปรายผล

4.1 การศึกษาผลของการปรับปรุงกากเส้นใยสับปะรด

กากเส้นใยสับปะรดที่นำมาใช้ในโครงการพิเศษนี้มี 2 เกรด คือ เกรด PFF ซึ่งเป็นกากเส้นใยที่ออกมาจากสายการผลิตน้ำสับปะรดโดยตรงจากโรงงานผลิตน้ำผลไม้ (บริษัท Tipco F&B Co., Ltd.) มีลักษณะเป็นกลุ่มก้อนเส้นใยที่จับตัวกันอย่างหลวมๆ และเกรด HP เป็นกากเส้นใยที่บริษัท Tipco F&B Co., Ltd. ผลิตขึ้น เพื่อเป็นสารเติมแต่งสำหรับอุตสาหกรรมอื่นๆ เช่น อุตสาหกรรมเครื่องสำอาง เป็นต้น โดยนำกากเส้นใยเกรด PFF มาบด และสกัดด้วยแอลกอฮอล์ มีลักษณะเป็นผงเส้นใย

4.1.1 การวิเคราะห์กากเส้นใยสับปะรด

ทำการศึกษาขนาด ความชื้น และสัณฐานวิทยา ของกากเส้นใยสับปะรดเกรด PFF และเกรด HP

4.1.1.1 การวิเคราะห์กากเส้นใยสับปะรดเกรด PFF

1.) การศึกษาขนาดของกากเส้นใยเกรด PFF

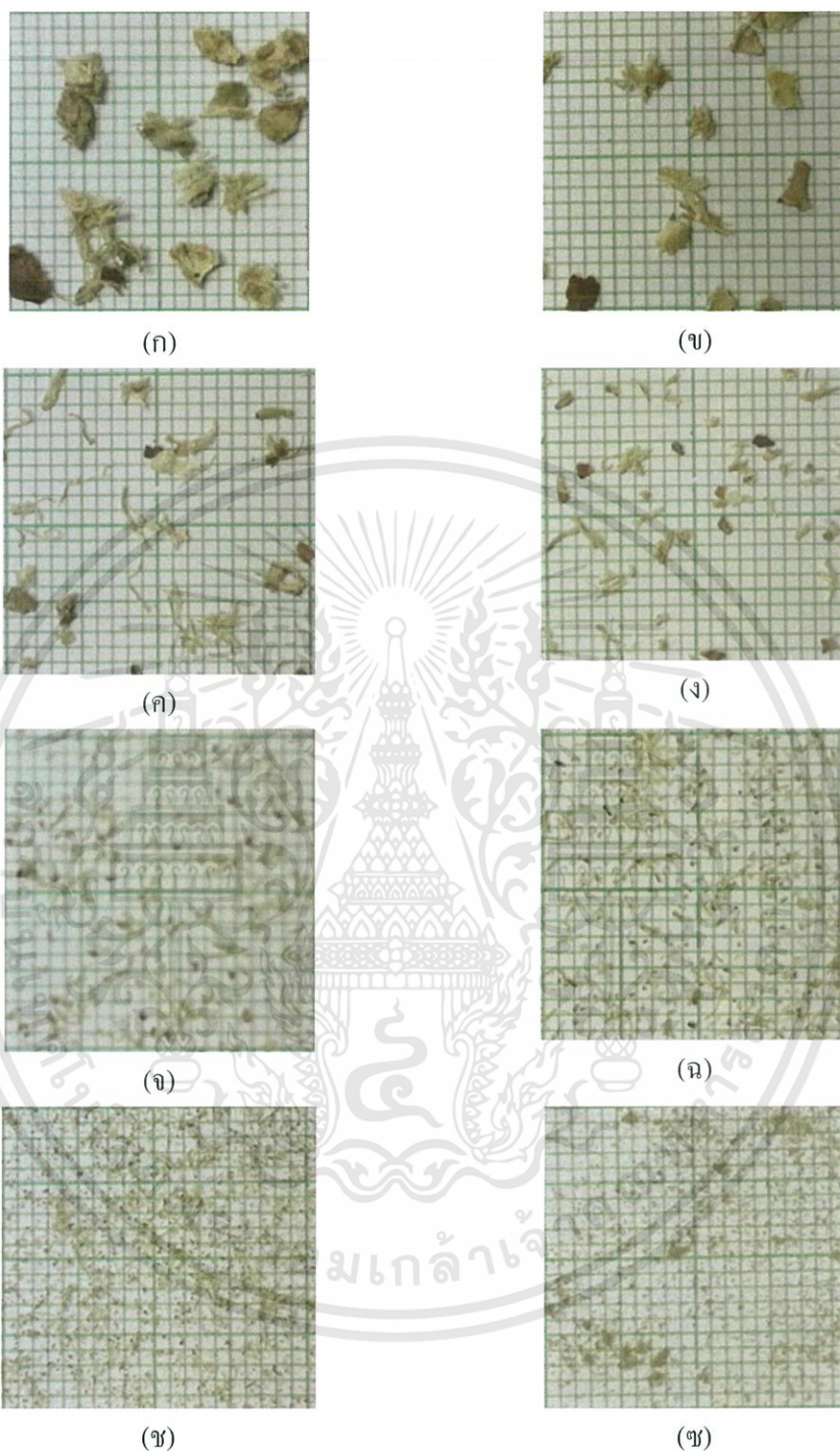
จากการเตรียมกากเส้นใยสับปะรดเกรด PFF โดยการบด และร่อนด้วยตะแกรงร่อนขนาด 10 12 20 35 50 100 และ 325 mesh ได้ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.1 พบว่า กากเส้นใยเกรด PFF ส่วนใหญ่มีขนาดของกากเส้นใยอยู่ในช่วง 10-20 mesh โดยมีอยู่ในช่วง 12-20 mesh มากที่สุด คิดเป็น 59.03 % ของน้ำหนักกากเส้นใยทั้งหมด เนื่องจากประสิทธิภาพของเครื่องบดกากเส้นใยเกรด PFF มีลักษณะรูปร่างเป็นเส้นยาว ทำให้ติดค้างอยู่บนตะแกรงร่อนในช่วงขนาดนี้ อีกทั้งกากเส้นใยเกรด PFF เป็นกากเส้นใยที่ยังไม่ผ่านกระบวนการสกัดปรับปรุงใดๆ มีองค์ประกอบของกากเส้นใยที่ไม่ใช่เซลลูโลสจับตัวกันอยู่บนเซลลูโลสมาก ทำให้กากเส้นใยมีขนาดใหญ่ จับตัวกันเป็นกลุ่มก้อน และอาจเป็นผลจากปริมาณความหนาแน่นของกากเส้นใยที่ติดค้างอยู่บนตะแกรงร่อน ทำให้กากเส้นใยที่มีขนาดเล็กกว่า ไม่สามารถผ่านรูของตะแกรงร่อนลงมาได้ภายในช่วงเวลาการเขย่าคัดขนาดที่ทำการทดลอง กากเส้นใยเกรด PFF ที่นำมาใช้ใน

การศึกษาอยู่ในช่วงขนาดเล็กกว่า 12 mesh เนื่องจากที่ช่วงขนาดใหญ่กว่า 12 mesh เป็นเปลือกตาของสับประค

ตารางที่ 4.1 สมบัติของกากเส้นใยสับประคเกรด PFF

ตัวอย่าง	ความชื้น (%)	ขนาดตะแกรง (mesh)	ขนาดรูตะแกรงเฉลี่ย (μm)	ปริมาณโดยน้ำหนักเฉลี่ย (%)	หมายเหตุ
กากเส้นใย สับประค เกรด PFF	7.16	< 10	> 2,000	4.18	เปลือกตา
		10	2,000	12.71	
		12	1,700	59.03	
		20	850	12.39	
		35	500	6.11	
		50	300	3.97	
		100	150	1.47	
		325	45	0.14	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 รูปร่าง และขนาดของกากเส้นใยสับปะรดเกรด PFF ที่ร้อนด้วยตะแกรงร้อนขนาดต่างๆ

(ก) < 10 mesh (ข) 10 mesh (ค) 12 mesh (ง) 20 mesh (จ) 35 mesh (ฉ) 50 mesh
(ช) 100 mesh และ (ซ) 325 mesh

2.) การศึกษาความชื้นของกากเส้นใยสับเกรด PFF

จากการทดลองหาค่าความชื้นของกากเส้นใยเกรด PFF ได้ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.1 พบว่า กากเส้นใยเกรด PFF มีความชื้น 7.16 ± 0.13 % ของน้ำหนักกากเส้นใยทั้งหมด จะเห็นได้ว่ากากเส้นใยเกรด PFF มีความชื้นต่ำ เมื่อเทียบกับกากเส้นใยเกรด HP คาดว่า เพราะกากเส้นใยเกรด PFF ยังไม่ผ่านการปรับปรุงใดๆ ทำให้ลิกนิน และสารแทรกต่างๆ เช่น แวกซ์ และสารโมเลกุลขนาดเล็กอื่นๆ ยึดเกาะที่เซลลูโลส ทำให้มีบริเวณพื้นผิวเซลลูโลสน้อย เซลลูโลสจึงสามารถดูดซับน้ำ และไอน้ำในบรรยากาศได้น้อย

3.) การศึกษาสัณฐานวิทยา (Morphology)

จากการศึกษาสัณฐานวิทยาของกากเส้นใยสับเกรด PFF ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.2 พบว่า กากเส้นใยสับเกรด PFF มีลักษณะรูปร่างเป็นเส้นยาว พื้นผิวมีลักษณะค่อนข้างเรียบ เนื่องจากมีองค์ประกอบของเส้นใยธรรมชาติ คือ ลิกนิน เฮมิเซลลูโลส และสารแทรกอื่นๆ จับตัวอยู่บน โครงสร้างของเซลลูโลส



รูปที่ 4.2 SEM Micrograph กำลังขยาย 200X แสดงสัณฐานวิทยาของกากเส้นใยสับเกรด PFF

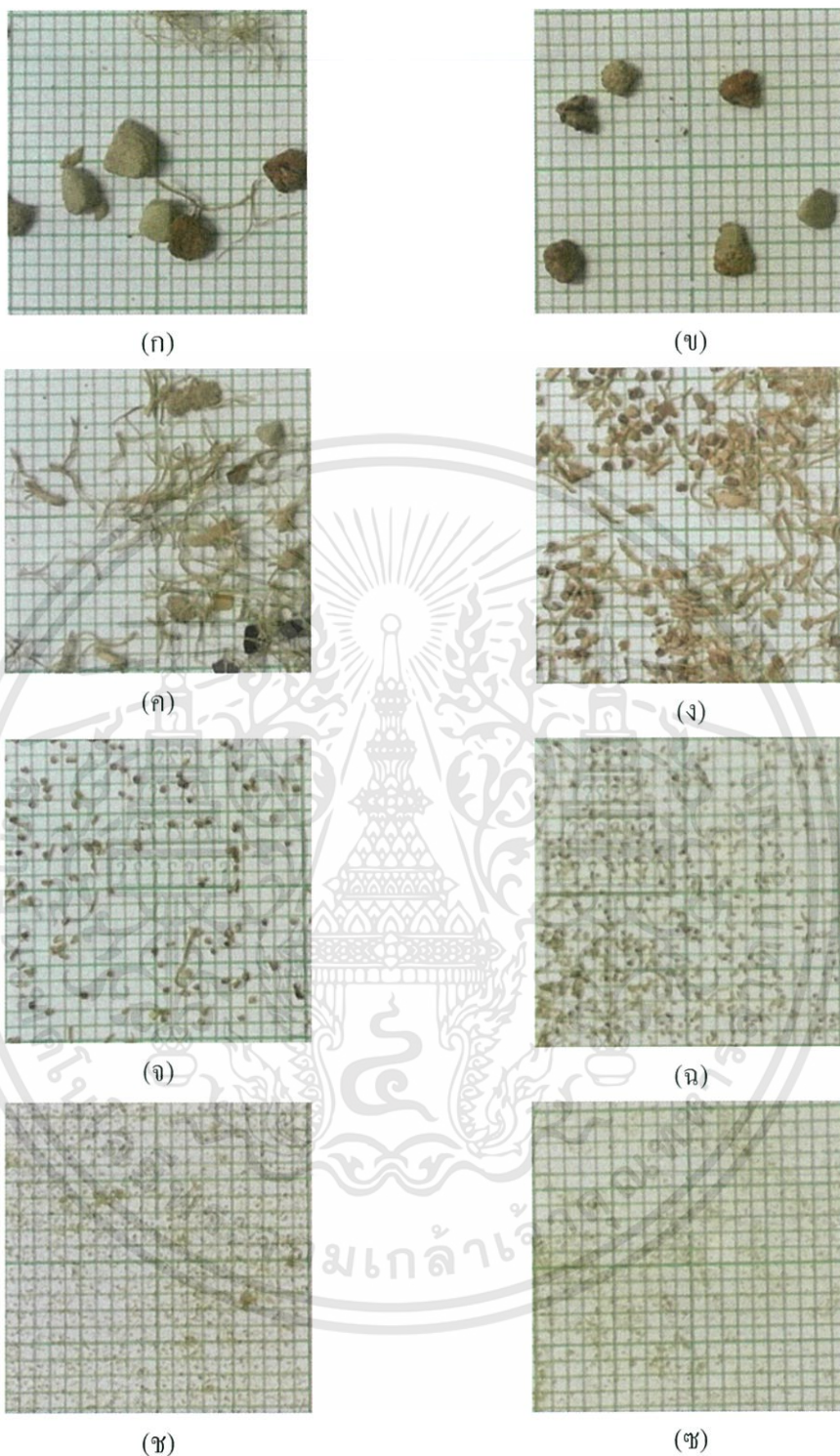
4.1.1.2 การวิเคราะห์กากเส้นใยสับประดเกรด HP

1.) การศึกษาขนาดของกากเส้นใยสับประดเกรด HP

จากการทดลองการเตรียมกากเส้นใยสับประดเกรด HP โดยการร่อนด้วยตะแกรงร่อนขนาด 10 12 20 35 50 100 และ 325 mesh ได้ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.2 พบว่า กากเส้นใยสับประดเกรด HP ส่วนใหญ่มีขนาดอยู่ในช่วง 50-325 mesh โดยมีขนาดอยู่ในช่วง 100-325 mesh มากที่สุด คิดเป็น 59.63 % ของน้ำหนักกากเส้นใยทั้งหมด เนื่องจากกากเส้นใยเกรด HP มีลักษณะเป็นผง ทำให้สามารถผ่านตะแกรงร่อนที่มีขนาดรูใหญ่ลงมาได้ อีกทั้งกากเส้นใยเกรด HP ผ่านกระบวนการปรับปรุงด้วยแอลกอฮอล์ องค์ประกอบที่ไม่ใช่เซลลูโลส เช่น สารแทรก ถูกสกัดออกจากเซลลูโลสไปบ้างแล้ว ทำให้กากเส้นใยมีขนาดเล็กลง กากเส้นใยสับประดเกรด HP ที่นำมาใช้ในการศึกษา อยู่ในช่วงขนาดเล็กกว่า 20 mesh เนื่องจากช่วงขนาดใหญ่กว่า 20 mesh กากเส้นใยจับตัวกันในลักษณะกลุ่มก้อนแข็ง อาจเป็นตะกอนของกากเส้นใยในกระบวนการสกัดด้วยแอลกอฮอล์ ซึ่งไม่ใช่ลักษณะของสารเสริมแรงที่ต้องการศึกษา และอาจส่งผลให้เกิดความเสียหายแก่เครื่องมือได้

ตารางที่ 4.2 สมบัติของกากเส้นใยสับประดเกรด HP

ตัวอย่าง	ความชื้น (%)	ขนาดตะแกรง (mesh)	ขนาดรูตะแกรงเฉลี่ย (μm)	ปริมาณโดยน้ำหนัก (%) เฉลี่ย	หมายเหตุ
กากเส้นใย สับประด เกรด HP	20.46	< 10	> 2,000	0.02	} ตะกอน กากเส้นใย
		10	2,000	0.01	
		12	1,700	0.04	
		20	850	0.14	
		35	500	2.57	
		50	300	21.00	
		100	150	59.63	
325	45	16.60			



รูปที่ 4.3 รูปร่างและขนาดของกากเส้นใยสับปรดเกรด HP ที่ร้อนด้วยตะแกรงร้อนขนาดต่างๆ

(ก) $< 10 \text{ mesh}$ (ข) 10 mesh (ค) 12 mesh (ง) 20 mesh (จ) 35 mesh (ฉ) 50 mesh

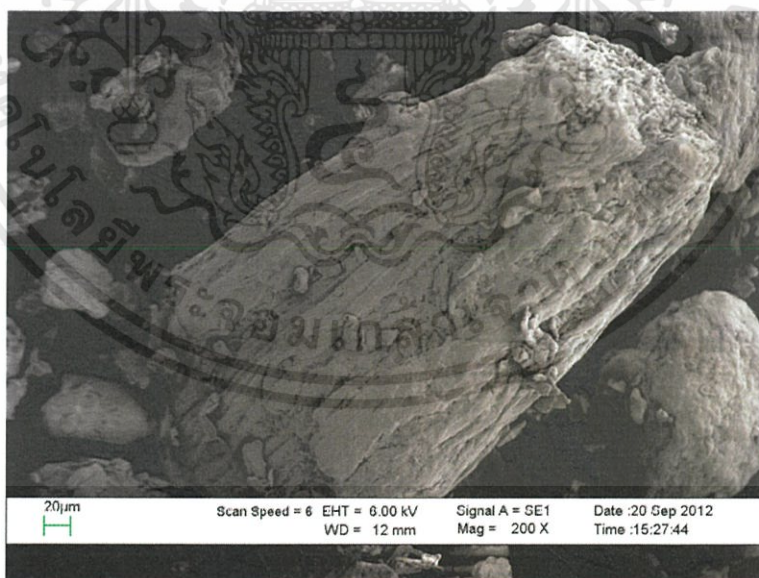
(ช) 100 mesh และ (ซ) 325 mesh

2.) การศึกษาความชื้นของกากเส้นใยสับประดเกรด HP

จากการทดลองหาความชื้นของกากเส้นใยสับประดเกรด HP ได้ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.2 พบว่า กากเส้นใยเกรด HP มีความชื้น 20.46 ± 0.04 % ของน้ำหนักกากเส้นใยทั้งหมด จะเห็นได้ว่ากากเส้นใยเกรด HP มีความชื้นมาก เมื่อเทียบกับเกรด PFF เนื่องจากกากเส้นใยสับประดเกรด HP ผ่านการสกัดด้วยแอลกอฮอล์ ทำให้สารแทรกต่างๆ เช่น แวกซ์ และสารโมเลกุลขนาดเล็กอื่นๆ ถูกสกัดออกจากเซลลูโลส ทำให้มีบริเวณพื้นผิวของเซลลูโลสมากขึ้น เซลลูโลสจึงสามารถดูดซับน้ำ และไอน้ำในบรรยากาศได้มากขึ้น และอีกเหตุผลหนึ่งคือกากเส้นใยเกรด HP มีขนาดเล็ก มีพื้นผิวสัมผัสมากกว่าเกรด PFF สามารถสัมผัสกับน้ำ และไอน้ำในบรรยากาศได้มากขึ้น

3.) การศึกษาสัณฐานวิทยา (Morphology)

การศึกษาสัณฐานวิทยาของกากเส้นใยสับประดเกรด HP ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.4 พบว่า กากเส้นใยเกรด HP มีลักษณะรูปร่างสั้น พื้นผิวกากเส้นใยมีลักษณะขรุขระเล็กน้อย เนื่องจากผ่านการสกัดด้วยแอลกอฮอล์ ทำให้สารแทรกต่างๆ เช่น แวกซ์ และสารขนาดเล็กอื่นๆ ถูกสกัดออกจากเซลลูโลส



รูปที่ 4.4 SEM Micrograph กำลังขยาย 200X แสดงสัณฐานวิทยาของกากเส้นใยสับประดเกรด HP

4.1.2 การศึกษาการปรับปรุงกากเส้นใยสับประดเกรด HP

4.1.2.1 การศึกษาการปรับปรุงกากเส้นใยสับประดเกรด HP ด้วยการต้มน้ำ

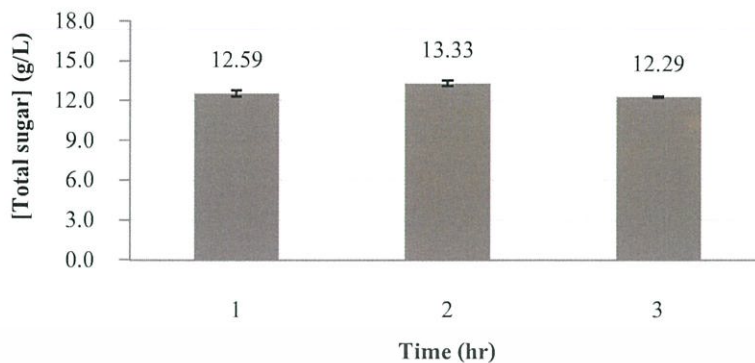
เนื่องจากการทดลองขั้นต้น ทำการทดลองผสมคอมพาวด์พลาสติกโดยไม่เติมสารเติมแต่งอื่นๆ นอกจากกากเส้นใยสับประดเกรด HP เป็นตัวเสริมแรง พบว่า คอมพาวด์ที่ได้มีสีดำนวล มีกลิ่นไหม้ สันนิษฐานขั้นต้นว่ากากเส้นใยเกรด HP อาจมีน้ำตาลเป็นส่วนประกอบ เมื่อผสมคอมพาวด์ที่อุณหภูมิสูง น้ำตาลเกิดการไหม้ ด้วยเหตุนี้จึงทำการปรับปรุงกากเส้นใย ด้วยการต้มน้ำในอัตราส่วนกากเส้นใยต่อน้ำ เท่ากับ 1:15 (w/v) ด้วยอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมงเพื่อสกัดน้ำตาลออกจากกากเส้นใย เนื่องจากน้ำตาลสามารถละลายได้ในน้ำ

1.) การศึกษาปริมาณน้ำตาลรวม (Total sugar)

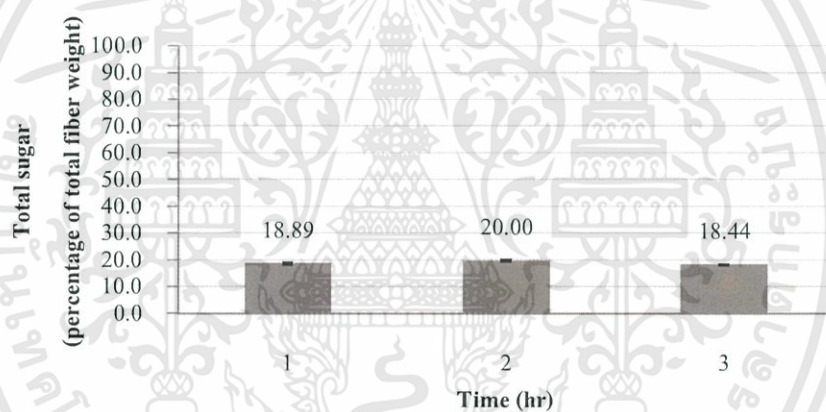
ทำการทดสอบหาปริมาณน้ำตาลรวมในน้ำต้มสกัดกากเส้นใยที่เวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมง เพื่อหาปริมาณน้ำตาลรวมที่ถูกสกัดออกจากกากเส้นใย

จากรูปที่ 4.5-4.6 กราฟแสดงปริมาณน้ำตาลรวมในน้ำต้มสกัด เป็นกรัมต่อลิตร และเป็นเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักกากเส้นใยทั้งหมด พบว่า มีน้ำตาลอยู่ในน้ำต้มสกัด โดยปริมาณน้ำตาลรวมในน้ำต้มสกัดที่เวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมง มีค่าใกล้เคียงกัน คาดว่าน้ำตาลอาจจะละลายออกจากกากเส้นใยหมดแล้วในเวลาก่อน 1 ชั่วโมง

อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณากากเส้นใยสับประดเกรด HP ที่ผ่านการสกัดแอลกอฮอล์มาก่อน ควรจะมีปริมาณน้ำตาลรวมน้อย เนื่องจากน้ำตาลเป็นสารประกอบที่สามารถละลายได้ดีในสารละลายมีขี้ และแอลกอฮอล์เป็นตัวทำละลายที่มีขี้ แต่กลับพบว่า ปริมาณน้ำตาลรวมในน้ำต้มสกัด มีปริมาณค่อนข้างสูง อาจเป็นผลมาจากสีของน้ำต้มสกัดที่มีสีเหลืองน้ำตาล ซึ่งเป็นสีที่ใกล้เคียงกับสีของอนุพันธ์เอสเทอร์ที่มาจากการรวมตัวกันของสารประกอบเฟอพิวราด กับสารฟินอล ที่มีสีส้มเหลือง แม้ว่าจะทำการปั่นเหวี่ยงแยกสารแขวนลอยออกแล้ว น้ำต้มสกัดยังคงมีสีรบกวนอยู่ เมื่อทำการวิเคราะห์สีของอนุพันธ์เอสเทอร์ในช่วงความยาวคลื่นที่ศึกษา จึงอาจรบกวนการวิเคราะห์ให้คลาดเคลื่อนในแนวโน้มเพิ่มขึ้น ผลของปริมาณน้ำตาลรวมในน้ำต้มสกัดจึงอาจมากกว่าปริมาณน้ำตาลรวมที่มีอยู่จริงในกากเส้นใยสับประดเกรด HP



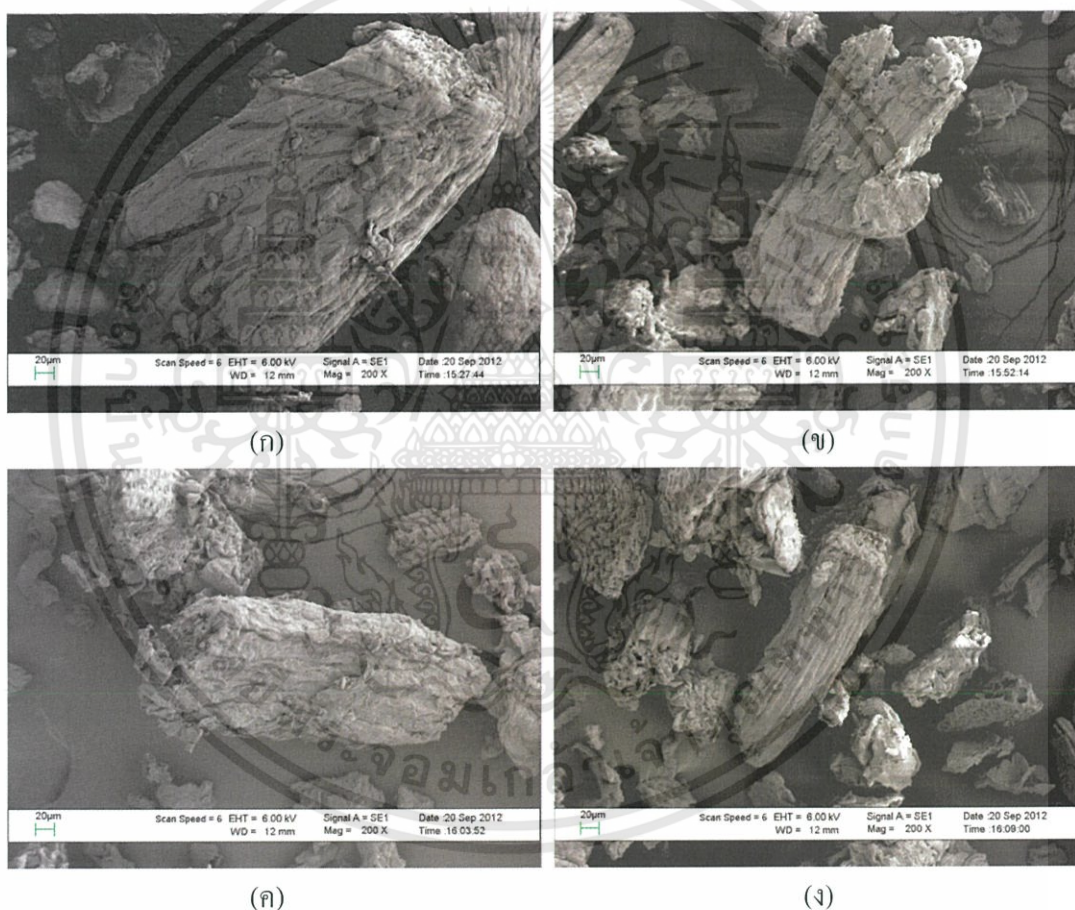
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำตาลรวมในน้ำต้มสกัด (g/L) กับเวลาที่ใช้ต้มสกัดกากเส้นใยสับประดเกรด HP



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำตาลรวมในน้ำต้มสกัด (% ของน้ำหนักกากเส้นใยทั้งหมด) กับเวลาที่ใช้ต้มสกัดกากเส้นใยสับประดเกรด HP

2.) การศึกษาสัณฐานวิทยา (Morphology)

ศึกษาลักษณะพื้นผิวของกากเส้นใย ดังแสดงในรูปที่ 4.7 พบว่า พื้นผิวของกากเส้นใยเกรด HP ที่ผ่าน และไม่ผ่านการปรับปรุงด้วยการต้มน้ำที่เวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมง มีความขรุขระใกล้เคียงกัน เนื่องจากการปรับปรุงในสภาวะดังกล่าว ทำให้สารแทรกถูกสกัดออก ซึ่งสารแทรกเป็นสารที่มีปริมาณเล็กน้อย ทำให้ไม่ส่งผลกับความขรุขระของพื้นผิวกากเส้นใยมาก ผลของการปรับปรุงกากเส้นใยเกรด HP ด้วยการต้มน้ำที่เวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมง ไม่ส่งผลมากนักต่อการเพิ่มความขรุขระบนพื้นผิวกากเส้นใย



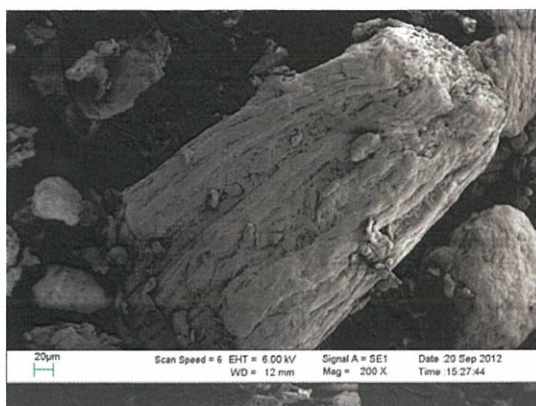
รูปที่ 4.7 SEM Micrographs กำลังขยาย 200X แสดงสัณฐานวิทยาของกากเส้นใยสับประรดเกรด HP ที่ปรับปรุงด้วยการต้มน้ำที่เวลาต่างๆ (ก) 0 ชั่วโมง (ข) 1 ชั่วโมง (ค) 2 ชั่วโมง และ (ง) 3 ชั่วโมง

4.1.2.2 การศึกษาการปรับปรุงกากเส้นใยสับประดเกรด HP ด้วยการต้มสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

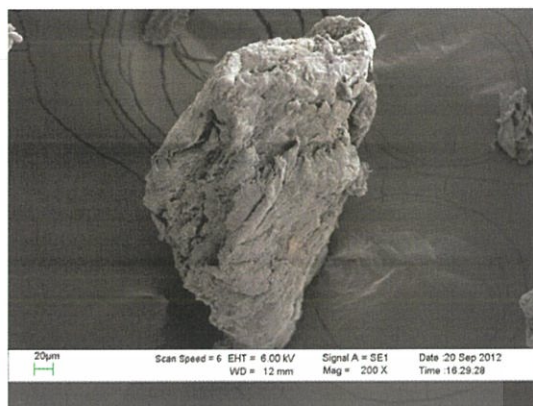
สารเสริมแรงธรรมชาติใน WPC ที่ดีควรมีอัตราส่วนเซลลูโลสมาก แต่องค์ประกอบของเส้นใยธรรมชาติโดยทั่วไป มีลิกนิน เฮมิเซลลูโลส และสารแทรกต่างๆ อยู่ร่วมกับเซลลูโลสด้วย จึงทำการปรับปรุงกากเส้นใยสับประดเกรด HP เพื่อช่วยให้พื้นผิวของกากเส้นใยมีส่วนของเซลลูโลสมากยิ่งขึ้น โดยการต้มในสารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 5% 10% และ 15% (w/v) เนื่องจากลิกนิน และเฮมิเซลลูโลสสามารถถูกละลายออกได้ด้วย NaOH และยังเป็นสารเคมีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น อุตสาหกรรมผลิตกระดาษ ในกระบวนการสกัดลิกนินออกจากเยื่อไม้ เป็นต้น

1.) การศึกษาสัณฐานวิทยา (Morphology)

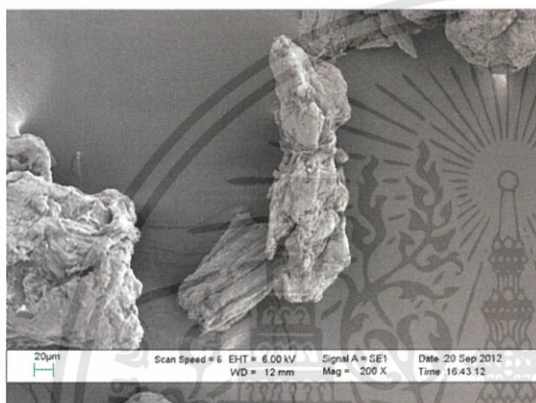
ศึกษาลักษณะพื้นผิวของกากเส้นใย ดังแสดงในรูปที่ 4.8 พบว่า พื้นผิวของกากเส้นใยเกรด HP ที่ผ่าน และไม่ผ่านการปรับปรุงด้วยการต้มสารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 5% 10% และ 15% (w/v) มีความขรุขระใกล้เคียงกัน เนื่องจากการปรับปรุงในสภาวะดังกล่าว ทำให้ลิกนิน และเฮมิเซลลูโลสที่ยึดเกาะบริเวณพื้นผิวเซลลูโลสถูกสกัดออกในปริมาณเล็กน้อย ทำให้ไม่ส่งผลกับความขรุขระของพื้นผิวกากเส้นใยมาก ผลของการปรับปรุงกากเส้นใยเกรด HP ด้วยการต้มสารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 5% 10% และ 15% (w/v) ไม่ส่งผลมากนักต่อการเพิ่มความขรุขระบนพื้นผิวกากเส้นใย



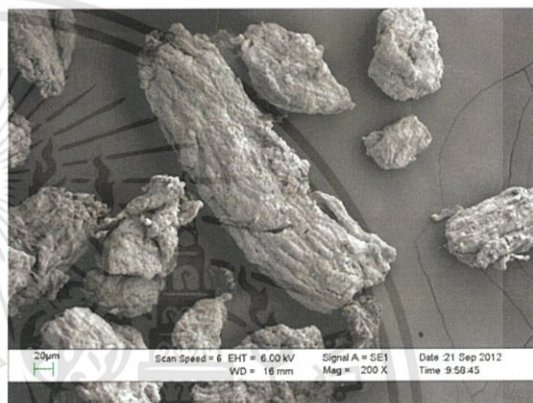
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 4.8 SEM Micrographs กำลังขยาย 200X แสดงลักษณะของกากเส้นใยสับปรดเกรด HP ที่ปรับปรุงด้วยการต้มสารละลาย NaOH ที่เปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นต่างๆ (% w/v) (ก) 0 % (ข) 5 % (ค) 10 % และ (ง) 15 %

4.2 การศึกษาสมบัติของ WPC

WPC ที่ได้จากการศึกษาในครั้งนี้ ทำการศึกษาผลของการเติมสารช่วยผสม ผลของการปรับปรุงกากเส้นใย ผลของอัตราส่วนผสมระหว่าง HDPE กับกากเส้นใย และผลของชนิดกากเส้นใย โดยสมบัติของ WPC ที่ทำการศึกษา ได้แก่ สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และ สันฐานวิทยา

4.2.1 การศึกษาสมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

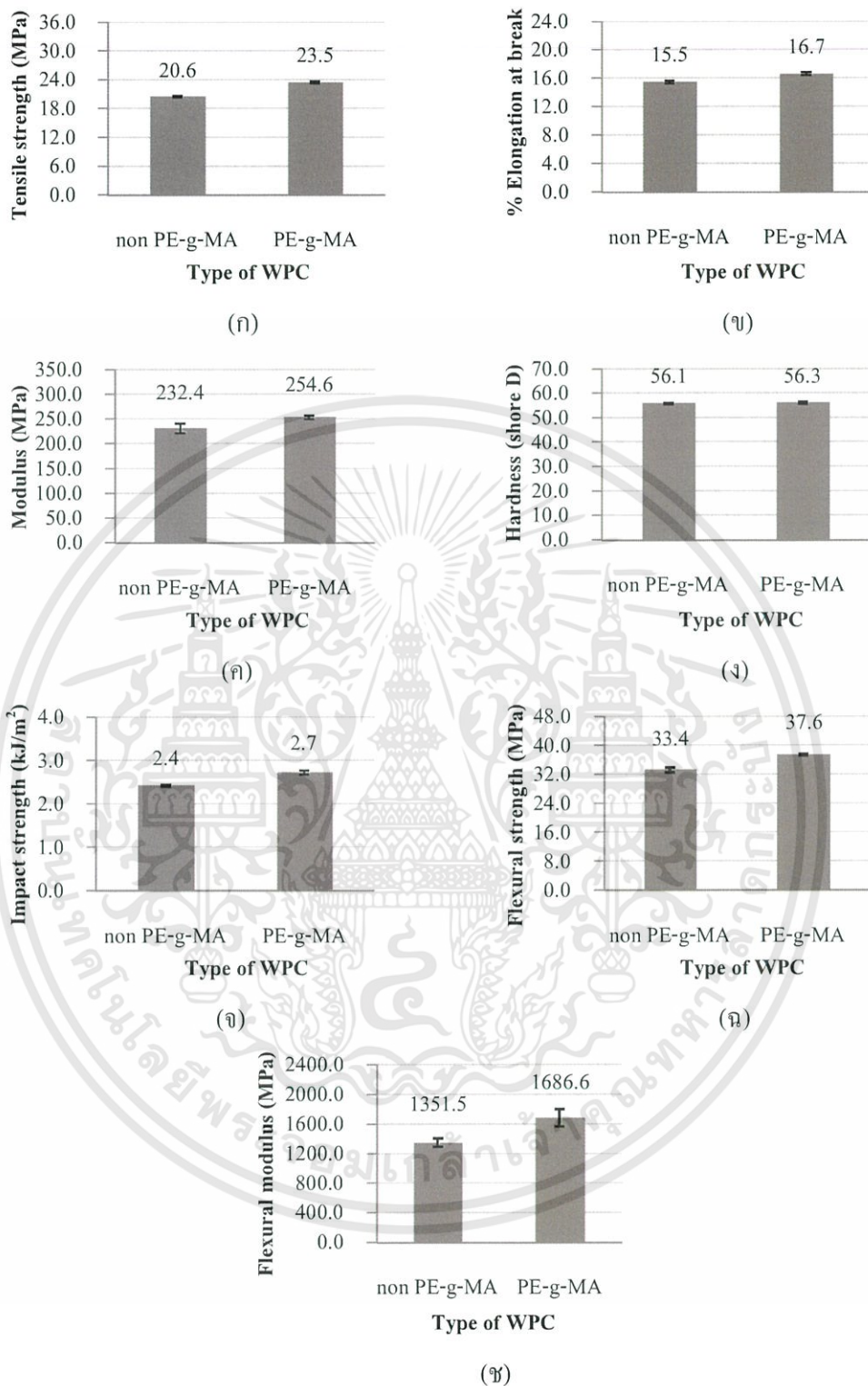
สมบัติเชิงกลที่ทำการศึกษา ได้แก่ สมบัติทางแรงดึง (ความแข็งแรงดึง เปรอร์เซ็นต์ การยืด ฉ ด จุดขาด และค่ามอดุลัส) ความแข็งกด ความแข็งแรงกระแทก และสมบัติความโค้งงอ (ความแข็งแรงโค้งงอ และมอดุลัสโค้งงอ)

1.) การศึกษาผลของการเติมสารช่วยผสม

สารช่วยผสม คือ สารที่ช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างพลาสติกเมตริกซ์กับเส้นใยธรรมชาติ เนื่องจากสมบัติการมีขั้วและไม่มีขั้วในตัวเดียวกันของสารช่วยผสม ช่วยทำให้พลาสติกเมตริกซ์ที่ไม่มีขั้วสามารถยึดเกาะกับเส้นใยที่มีขั้วได้ดีขึ้น

ทำการศึกษสมบัติเชิงกลของ WPC ที่เตรียมจาก HDPE กับกากเส้นใยเกรด HP ที่เติมและไม่เติมสารช่วยผสม PE-g-MA 3% ของน้ำหนัก HDPE

จากรูปที่ 4.9 พบว่า ความแข็งแรงดึง เปรอร์เซ็นต์การยืด ฉ ด จุดขาด มอดุลัส ความแข็งแรงกระแทก ความแข็งแรงโค้งงอ และมอดุลัสโค้งงอ มีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนความแข็งกดมีค่าใกล้เคียงกัน สรุปว่าสมบัติเชิงกลโดยรวมมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากผลของการเติมสารช่วยผสมทำให้การยึดเกาะระหว่างพลาสติกเมตริกซ์ กับเส้นใยในบริเวณรอยต่อดีขึ้น ทั้งสองวัสดุมีความเข้ากันได้มากขึ้น การส่งต่อแรงที่กระทำจากภายนอกผ่านพลาสติกเมตริกซ์สู่เส้นใยสามารถทำได้ดียิ่งขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการรับแรงของ WPC โดยรวมมีค่าเพิ่มขึ้น และจากหลายงานวิจัย เช่น พจนีย์ ศรธรรมลี และคณะ, 2545 ได้สรุปว่าการเติมสารช่วยผสม ทำให้ WPC มีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติเชิงกลของ WPC กับการเติมสารช่วยผสม PE-g-MA (ก) ความแข็งแรงดึง (ข) เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (ค) โมดูลัส (ง) ความแข็งกด (จ) ความแข็งแรงกระแทก (ฉ) ความแข็งแรงโค้งงอ และ (ช) โมดูลัสโค้งงอ

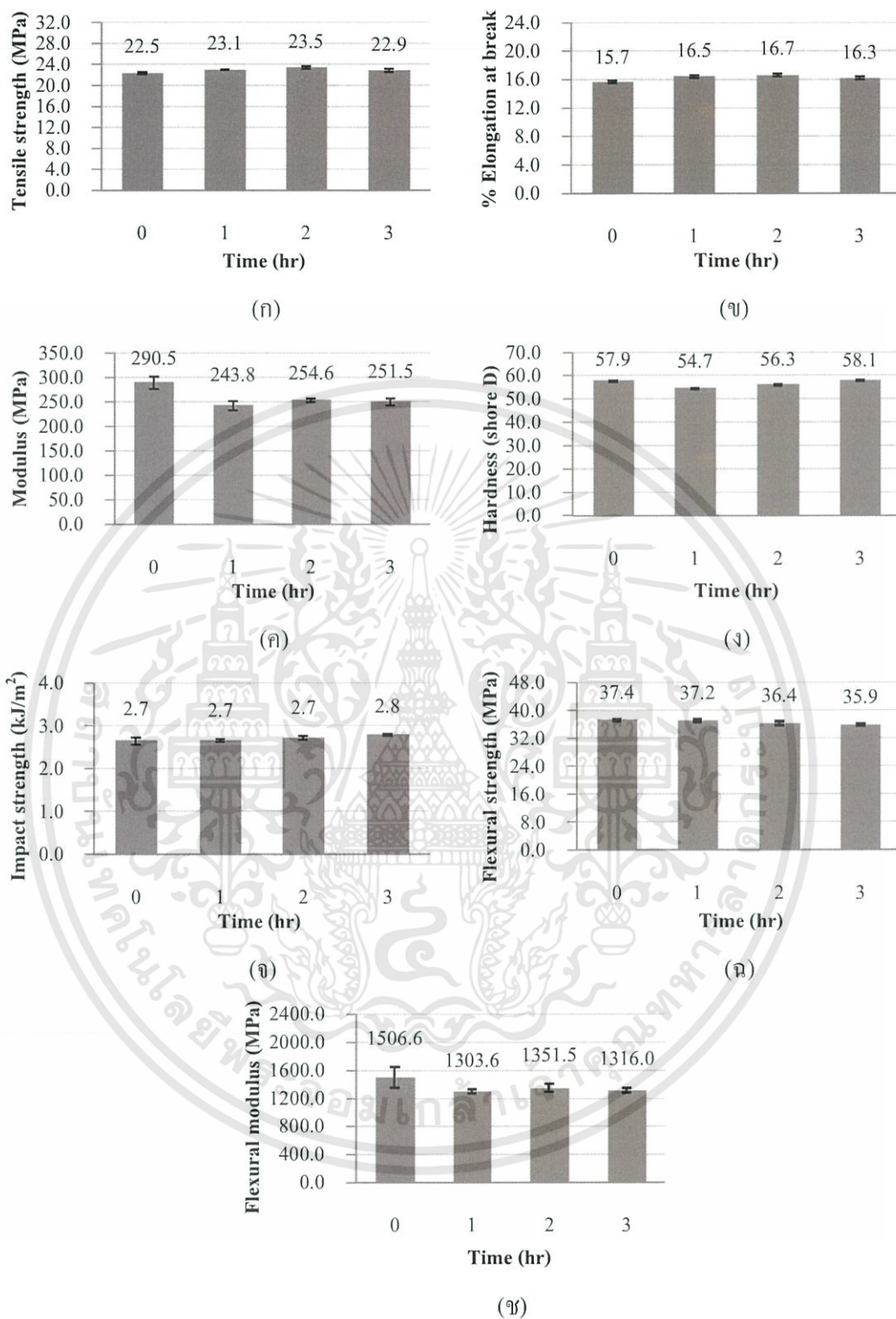
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.) การศึกษาผลของการปรับปรุงกากเส้นใยสับประดเกรด HP

การปรับปรุงกากเส้นใย จะทำให้ได้เส้นใยธรรมชาติที่มีอัตราส่วนเซลลูโลสเพิ่มมากขึ้น รวมทั้งทำให้พื้นผิวของเส้นใยมีความขรุขระมากยิ่งขึ้น และเส้นใยสามารถการกระจายตัวใน WPC ได้ดี ทำให้สมบัติเชิงกลของ WPC มีค่าเพิ่มขึ้น

ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลของ WPC ที่เตรียมจาก HDPE กับกากเส้นใยเกรด HP ที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับปรุงด้วยการต้มน้ำ และต้มสารละลาย NaOH

จากรูปที่ 4.10-4.11 พบว่า ความแข็งแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ความแข็งกด และความแข็งแรงโค้งงอ มีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนความแข็งแรงกระแทกมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และมอดุลัส และมอดุลัสโค้งงอ มีค่าลดลงเล็กน้อย สรุปว่าสมบัติเชิงกลโดยรวมมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากกากเส้นใยที่ผ่าน และไม่ผ่านการปรับปรุงด้วยการต้มน้ำและต้มสารละลาย NaOH มีความขรุขระที่พื้นผิวกากเส้นใยใกล้เคียงกัน ทำให้การยึดเกาะระหว่างพลาสติกเมตริกซ์กับกากเส้นใยมีลักษณะใกล้เคียงกัน การส่งต่อแรงที่กระทำจากภายนอกผ่านพลาสติกเมตริกซ์สู่เส้นใยจึงทำได้ใกล้เคียงกัน ส่งผลให้ความสามารถในการรับแรงของ WPC โดยรวมมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้น การปรับปรุงกากเส้นใยเกรด HP ด้วยวิธีการต้มน้ำ และต้มสารละลาย NaOH ในสภาวะดังกล่าว ไม่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของ WPC อย่างมีนัยสำคัญ

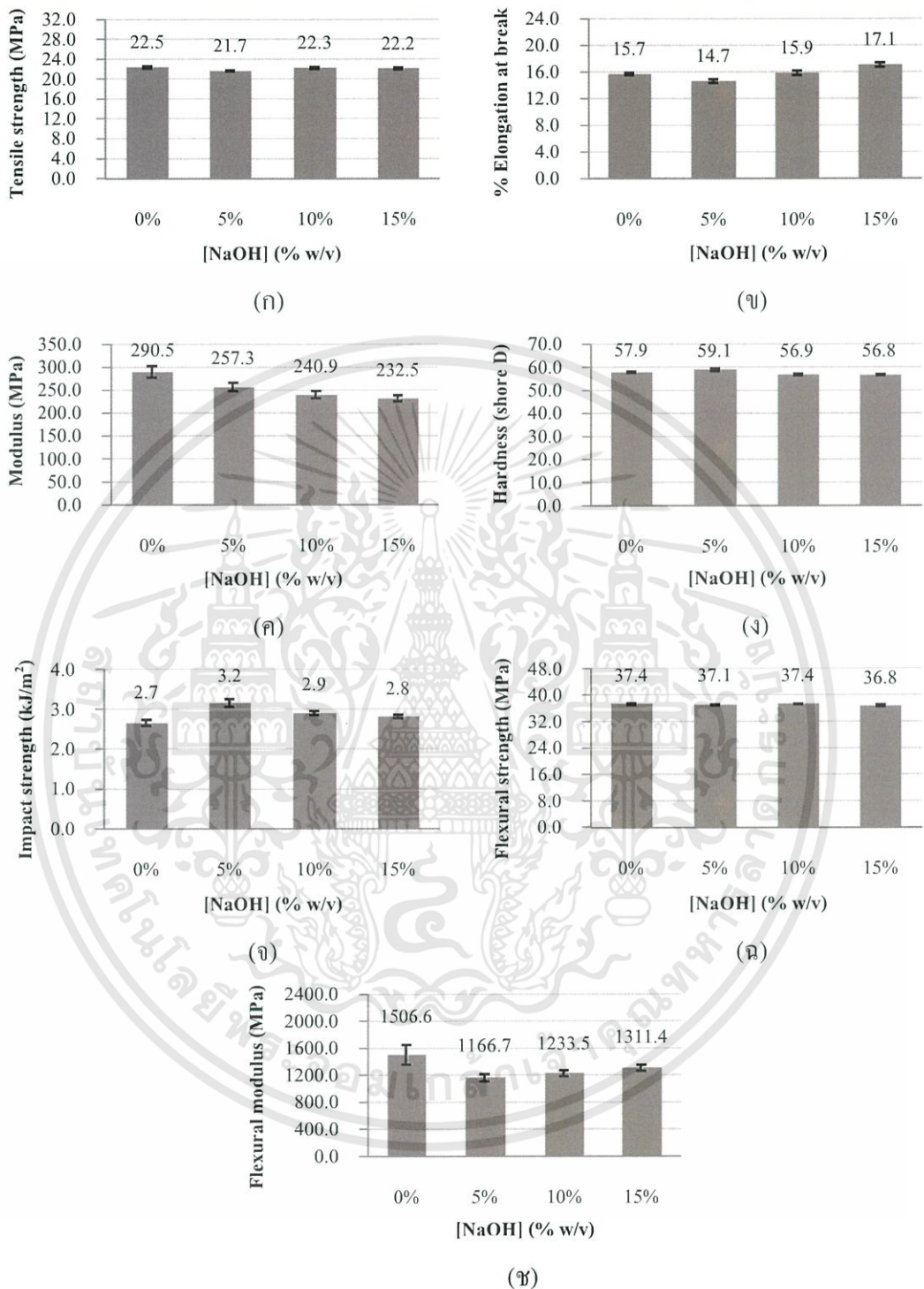


รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติเชิงกลของ WPC กับเวลาในการต้มน้ำ

(ก) ความแข็งแรงดึง (ข) เปรอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (ค) มอดุลัส

(ง) ความแข็งกด (จ) ความแข็งแรงกระแทก (ฉ) ความแข็งแรงโค้งงอ และ

(ช) มอดุลัสโค้งงอ



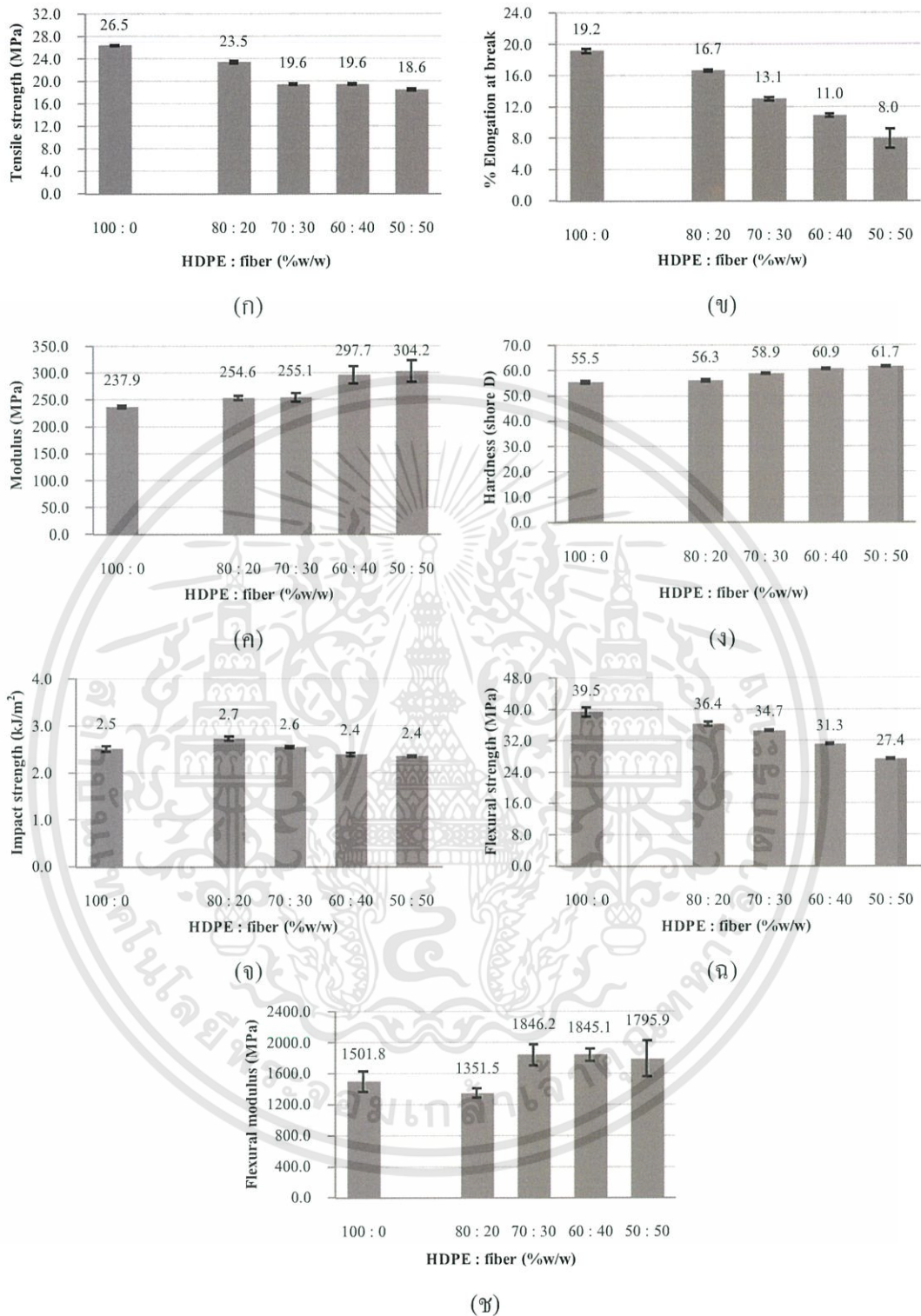
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติเชิงกลของ WPC กับเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH (ก) ความแข็งแรงดึง (ข) เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (ค) โมดูลัส (ง) ความแข็งกด (จ) ความแข็งแรงกระแทก (ฉ) ความแข็งแรงโค้งงอ และ (ช) โมดูลัสโค้งงอ

3.) การศึกษาผลของอัตราส่วนผสมระหว่าง HDPE กับกากเส้นใยสับเกรด HP

เส้นใยธรรมชาติมีสมบัติในการเสริมแรงให้กับพลาสติกเมทริกซ์ เมื่อเพิ่มอัตราส่วนเส้นใยมากขึ้น อาจทำให้ WPC มีสมบัติเชิงกลที่ดีมากขึ้น และยังเป็น การลดต้นทุนในการผลิต WPC เนื่องจากเส้นใยธรรมชาติมีราคาถูก หาง่าย เมื่อเทียบกับพลาสติก หรือสารเติมแต่งอื่นๆ

ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลของ WPC ที่เตรียมจาก HDPE กับกากเส้นใยเกรด HP ในอัตราส่วน 100:0 80:20 70:30 60:40 และ 50:50 (% w/w)

จากรูปที่ 4.12 พบว่า ความแข็งแรงดึง เปรอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ความแข็งแรงกระแทก และค่าความแข็งแรงโค้งงอ มีแนวโน้มลดลง เมื่อเพิ่มอัตราส่วนกากเส้นใยมากขึ้น เนื่องจากการกระจายตัวของกากเส้นใยในพลาสติกเมทริกซ์เกิดได้ไม่ดี เกิดจุดบกพร่อง (Defect) ของชิ้นงานมากขึ้น อีกทั้งกลุ่มก้อนกากเส้นใยเกิดการขัดขวางความต่อเนื่องของพลาสติกเมทริกซ์ การส่งต่อแรงที่กระทำจากภายนอกผ่านพลาสติกเมทริกซ์สู่เส้นใยจึงทำได้แยลง ส่งผลให้การรับแรงของ WPC มีแนวโน้มลดลง ส่วนมอดูลัส ความแข็งกด และมอดูลัสโค้งงอ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของกากเส้นใยมากขึ้น เนื่องจากกากเส้นใยสับเกรดเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงมากกว่าพลาสติกเมทริกซ์ HDPE และมีความสามารถในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ยากกว่า ทำให้ WPC มีมอดูลัส ความแข็งกด และมอดูลัสโค้งงอ เพิ่มสูงขึ้นตามกฎของของผสม (Rule of mixture)



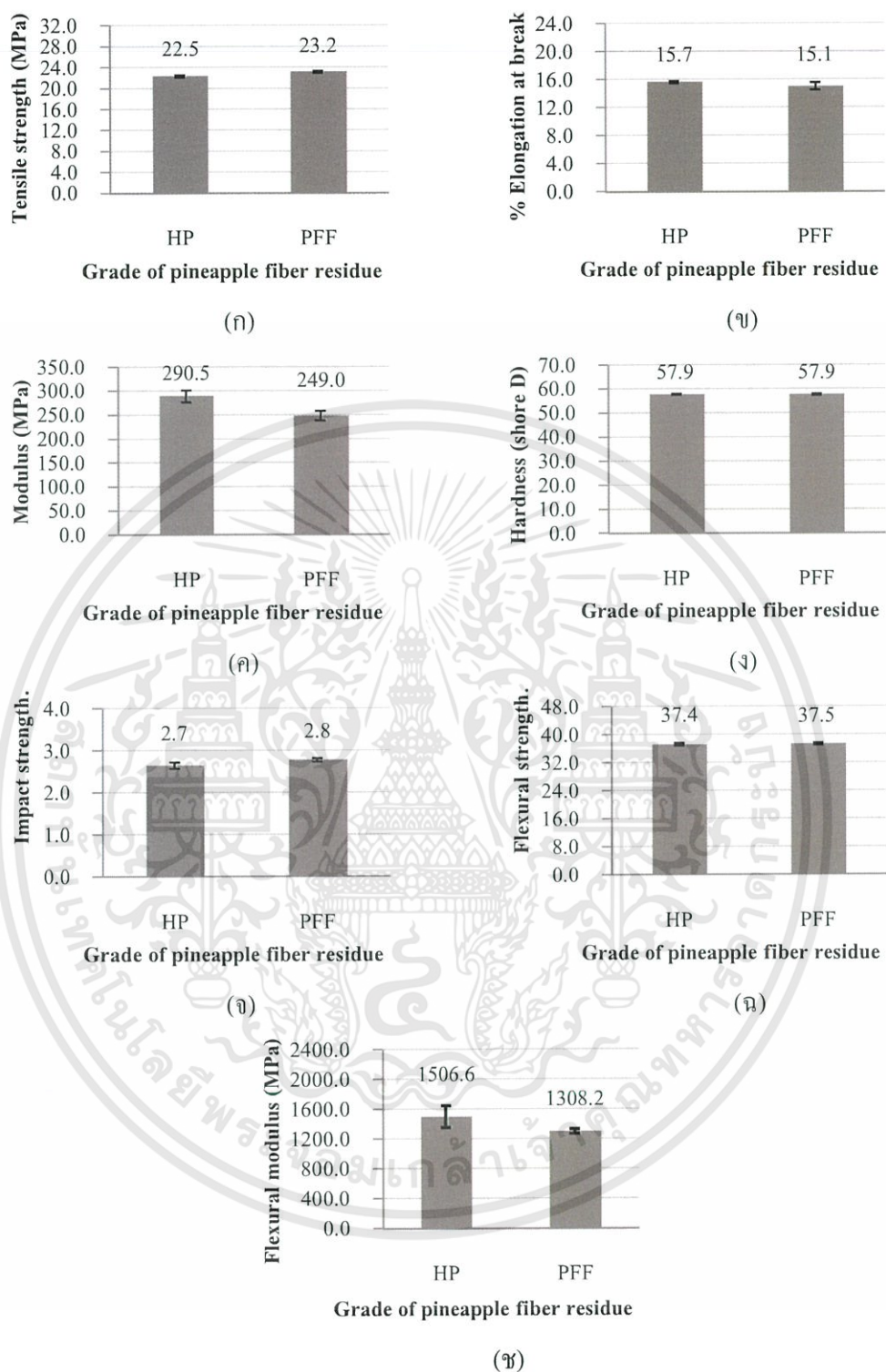
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติเชิงกลของ WPC กับอัตราส่วนผสมระหว่าง HDPE กับกากเส้นใยสับปะรดเกรด HP (% w/w) (ก) ความแข็งแรงดึง (ข) เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (ค) มอดุลัส (ง) ความแข็งกด (จ) ความแข็งแรงกระแทก (ฉ) ความแข็งแรงโค้งงอ และ (ช) มอดุลัสโค้งงอ

4.) การศึกษาผลของชนิดของกากเส้นใยสับประรด

กากเส้นใยสับประรดจากโรงงานผลิตน้ำผลไม้มี 2 เกรดที่มีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน คือ เกรด HP ที่มีลักษณะเป็นผงเส้นใย และเกรด PFF ที่มีลักษณะเป็นเส้นใยสั้น ลักษณะของสารเสริมแรงสามารถส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของ WPC ได้

ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลของ WPC ที่เตรียมจาก HDPE กับกากเส้นใยเกรด HP และเกรด PFF ที่มีขนาดเล็กกว่า 20 และ 12 mesh ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.13 พบว่า ความแข็งแรงดึง เปรอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ความแข็งกด ความแข็งแรงกระแทก และความแข็งแรงโค้งงอ มีค่าใกล้เคียงกัน แสดงว่าลักษณะของเส้นใยทั้ง 2 ชนิดไม่ส่งผลแตกต่างกัน ส่วนมอดุลัส และมอดุลัสโค้งงอของกากเส้นใยเกรด HP มีค่ามากกว่า เกรด PFF เนื่องจากกากเส้นใยเกรด HP มีลักษณะเส้นใยเป็นผง จึงมีพื้นที่ผิวสัมผัสมากกว่ากากเส้นใยเกรด PFF ที่มีลักษณะเป็นเส้นใยสั้น เมื่อทำการผสมเป็นคอมพาวด์ กากเส้นใยเกรด PFF อาจเกิดการเกี่ยวพันกันเป็นกลุ่มก้อนใหญ่ ส่งผลให้เกิดรอยตำหนิบนชิ้นงาน และไปขัดขวางความต่อเนื่องของพลาสติกเมทริกซ์ เมื่อมีแรงกระทำจากภายนอก WPC จากกากเส้นใยเกรด PFF จึงเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ง่ายกว่า WPC จากกากเส้นใยเกรด HP



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติเชิงกลของ WPC กับชนิดของกากเส้นใย สับปะรดเกรด HP และเกรด PFF (ก) ความแข็งแรงดึง (ข) เเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (ค) มอดุลัส (ง) ความแข็งกด (จ) ความแข็งแรงกระแทก (ฉ) ความแข็งแรงโค้งงอ และ (ช) มอดุลัส โค้งงอ

4.2.2 การศึกษาสมบัติทางความร้อน (Thermal properties)

การทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง DSC ทำการศึกษาอุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) เป็นค่าที่บ่งบอกถึงอุณหภูมิที่ทำให้พลาสติกเมทริกซ์ HDPE ใน WPC เกิดการหลอมเหลวผลึก โดยอุณหภูมิการหลอมเหลวผลึกจะแปรผันตรงกับขนาดของผลึกพลาสติก ศึกษาอุณหภูมิการเริ่มตกผลึกใหม่ ($T_{c,onset}$) เป็นค่าที่บ่งบอกถึงอุณหภูมิที่ทำให้พลาสติกเมทริกซ์ HDPE ใน WPC เริ่มเกิดการตกผลึกใหม่อีกครั้ง และศึกษาองศาความเป็นผลึก (Degree of Crystallinity; $\%X_c$) เป็นค่าที่บ่งบอกถึงปริมาณผลึกของพลาสติกเมทริกซ์ HDPE ใน WPC

จากการทดสอบสมบัติทางความร้อนของ WPC ในด้านผลของการเติมสารช่วยผสม PE-g-MA ผลของการปรับปรุงกากเส้นใย ผลของอัตราส่วนระหว่าง HDPE กับกากเส้นใยสับปะรด และผลของชนิดกากเส้นใยสับปะรด แสดงดังตารางที่ 4.3 พบว่า อุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) อุณหภูมิเริ่มตกผลึก (T_c) และค่าองศาความเป็นผลึก ($\%X_c$) มีค่าไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก อาจกล่าวได้ว่าปริมาณ และขนาดผลึกของพลาสติกเมทริกซ์ HDPE ใน WPC ของทุกสูตร มีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้น การเติมสารช่วยผสม PE-g-MA การปรับปรุงกากเส้นใย การเพิ่มอัตราส่วนผสมของกากเส้นใย และชนิดของกากเส้นใย ไม่ส่งผลต่อสมบัติทางความร้อนของ WPC เนื่องมาจากกากเส้นใยสับปะรดที่ใช้ไม่มีพฤติกรรมเป็นสารก่อผลึก (Nucleating agent)

ตารางที่ 4.3 อุณหภูมิเริ่มหลอมเหลวผลึก (T_m onset) อุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) อุณหภูมิเริ่มตกผลึก (T_c onset) อุณหภูมิการตกผลึก (T_c) และค่าองค์ประกอบเป็นผลึก ($\%X_c$) ของ WPC

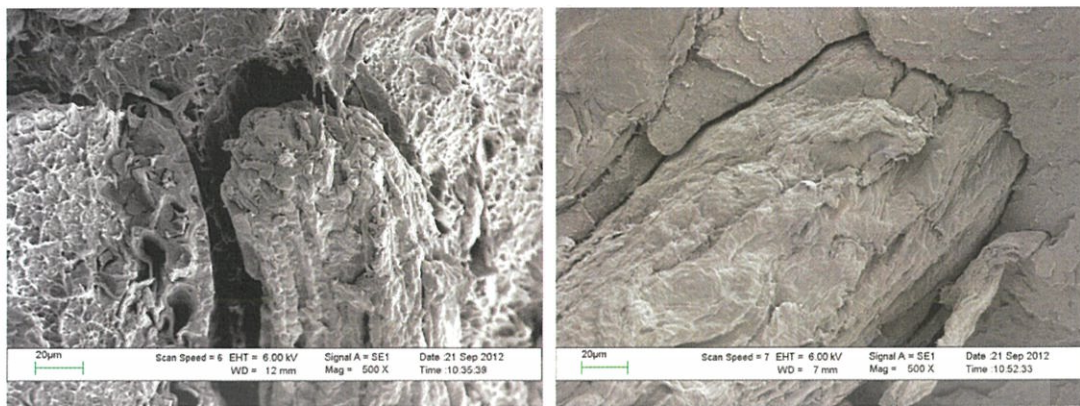
สูตร WPC	$T_{m\text{ onset}}$ ($^{\circ}\text{C}$)	T_m ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{c\text{ onset}}$ ($^{\circ}\text{C}$)	T_c ($^{\circ}\text{C}$)	X_c (%)
HDPE	123.7	128.4	118.9	116.5	56.2
HDPE+HP non PE-g-MA	122.8	128.5	119.2	117.1	57.8
HDPE+HP PE-g-MA	122.2	127.1	118.8	117.1	53.3
HDPE+HP treat H ₂ O 0 hr	122.8	128.0	119.0	116.6	57.6
HDPE+HP treat H ₂ O 1 hr	122.6	128.9	119.4	116.9	57.4
HDPE+HP treat H ₂ O 2 hr	122.2	127.1	118.8	117.1	53.3
HDPE+HP treat H ₂ O 3 hr	123.0	128.3	118.9	116.9	54.2
HDPE+HP treat [NaOH] 0 %	122.8	128.0	119.0	116.6	57.6
HDPE+HP treat [NaOH] 5 %	122.6	128.9	119.4	116.9	57.4
HDPE+HP treat [NaOH] 10 %	122.2	127.1	118.8	117.1	53.3
HDPE+HP treat [NaOH] 15 %	123.0	128.3	118.9	116.9	54.2
HDPE : HP = 100 : 0	123.7	128.4	118.9	116.5	56.2
HDPE : HP = 80 : 20	122.2	127.1	118.8	117.1	53.3
HDPE : HP = 70 : 30	123.1	127.0	119.3	117.4	60.1
HDPE : HP = 60 : 40	123.0	128.0	119.4	117.2	53.3
HDPE : HP = 50 : 50	122.9	128.0	119.5	117.4	56.8
HDPE+HP	122.8	128.0	119.0	116.6	57.6
HDPE+PPF	122.5	127.8	119.3	117.3	51.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 การศึกษาสัณฐานวิทยา (Morphology)

1.) การศึกษาผลของการเติมสารช่วยผสม

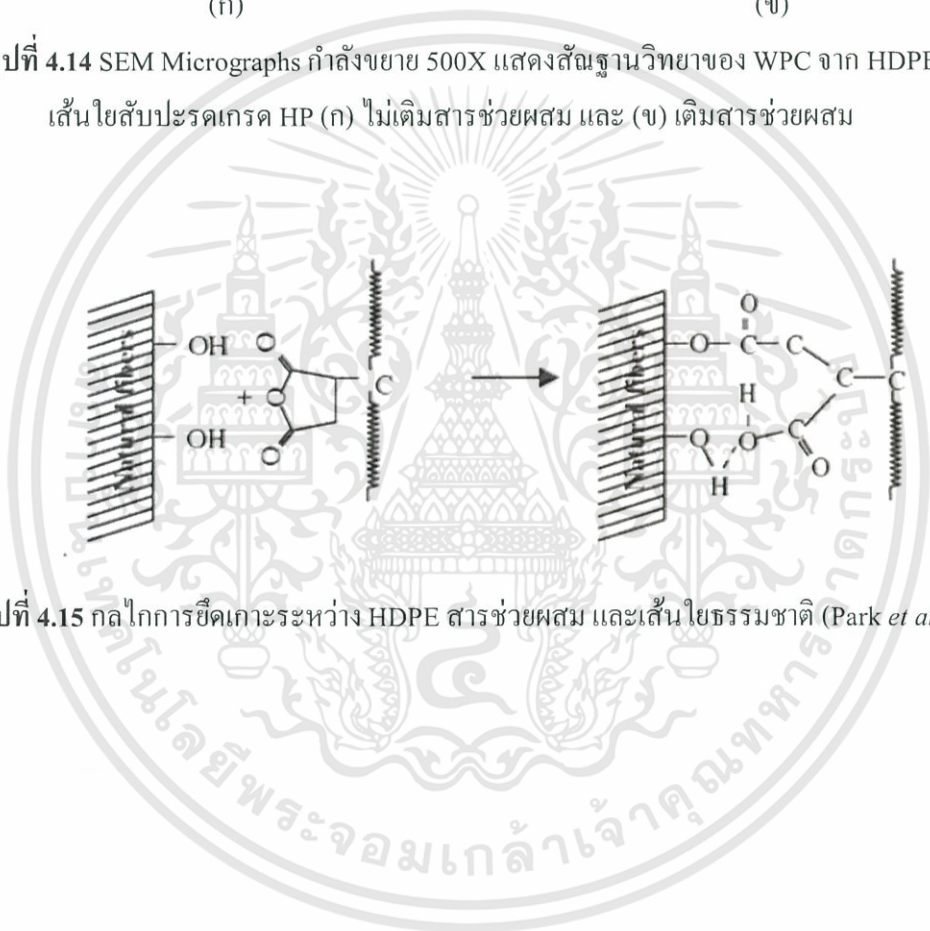
ทำการศึกษาพื้นผิวหน้าตัดของ WPC ที่หักด้วยความรวดเร็วด้วยเครื่อง SEM ที่กำลังขยาย 500 เท่า ในด้านผลของการเติม และไม่เติมสารช่วยผสม PE-g-MA ตรวจสอบการยึดเกาะของสองวัสดุระหว่างพลาสติกเมตริกซ์ HDPE กับกากเส้นใยสับประดเกรด HP ใน WPC ดังแสดงในรูปที่ 4.14 พบว่า WPC ที่ไม่เติมสารช่วยผสม มีการยึดเกาะระหว่างพลาสติกเมตริกซ์กับเส้นใยต่ำ เกิดช่องว่างระหว่างพลาสติกเมตริกซ์กับเส้นใยมาก เนื่องจากเส้นใยมีองค์ประกอบเป็นเซลลูโลส ซึ่งเป็นส่วนประกอบที่มีขี้เนื่องจากหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ของเซลลูโลส ในขณะที่พลาสติกเมตริกซ์ HDPE เป็นสารประกอบไม่มีขี้ ทำให้สองวัสดุมีความเข้ากันได้ต่ำ จึงเกิดช่องว่างระหว่างสองวัสดุมาก ในขณะที่ WPC ที่เติมสารช่วยผสม มีการยึดเกาะระหว่างพลาสติกเมตริกซ์กับเส้นใยได้ดีขึ้น ช่องว่างระหว่างพลาสติกเมตริกซ์กับเส้นใยน้อยกว่าใน WPC ที่ไม่เติมสารช่วยผสม เนื่องจากสารช่วยผสม PE-g-MA เป็นพอลิเมอร์ HDPE ที่ถูกตัดแปลงต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ให้มีหมู่ฟังก์ชันวงแหวนไฮไดรด์ที่มีขี้ ในขณะที่ตัวโครงสร้างหลักของ HDPE ยังคงไม่มีขี้ข้อยู่เช่นเดิม ลักษณะนี้จึงทำให้ PE-g-MA เป็นสารประกอบที่มีขี้และไม่มีขี้ข้อยู่ในตัวเดียวกัน เมื่อเติมลงใน WPC วงแหวนไฮไดรด์จึงเกิดพันธะโควาเลนต์กับหมู่ไฮดรอกซิลของเซลลูโลส กลายเป็นพันธะเอสเทอร์ และอาจเกิดพันธะไฮโดรเจนร่วมด้วยได้ ในแขนอีกข้างของวงแหวนไฮไดรด์ที่เปิดออก และโครงสร้าง HDPE หลักของสารช่วยผสมเกิดต่อเชื่อมโยงเข้ากับพลาสติกเมตริกซ์ HDPE ของ WPC ด้วยเหตุนี้เองทำให้ช่องว่างระหว่างพลาสติกเมตริกซ์กับเส้นใยแคบลง สองวัสดุมีความเข้ากันได้มากขึ้น



(ก)

(ข)

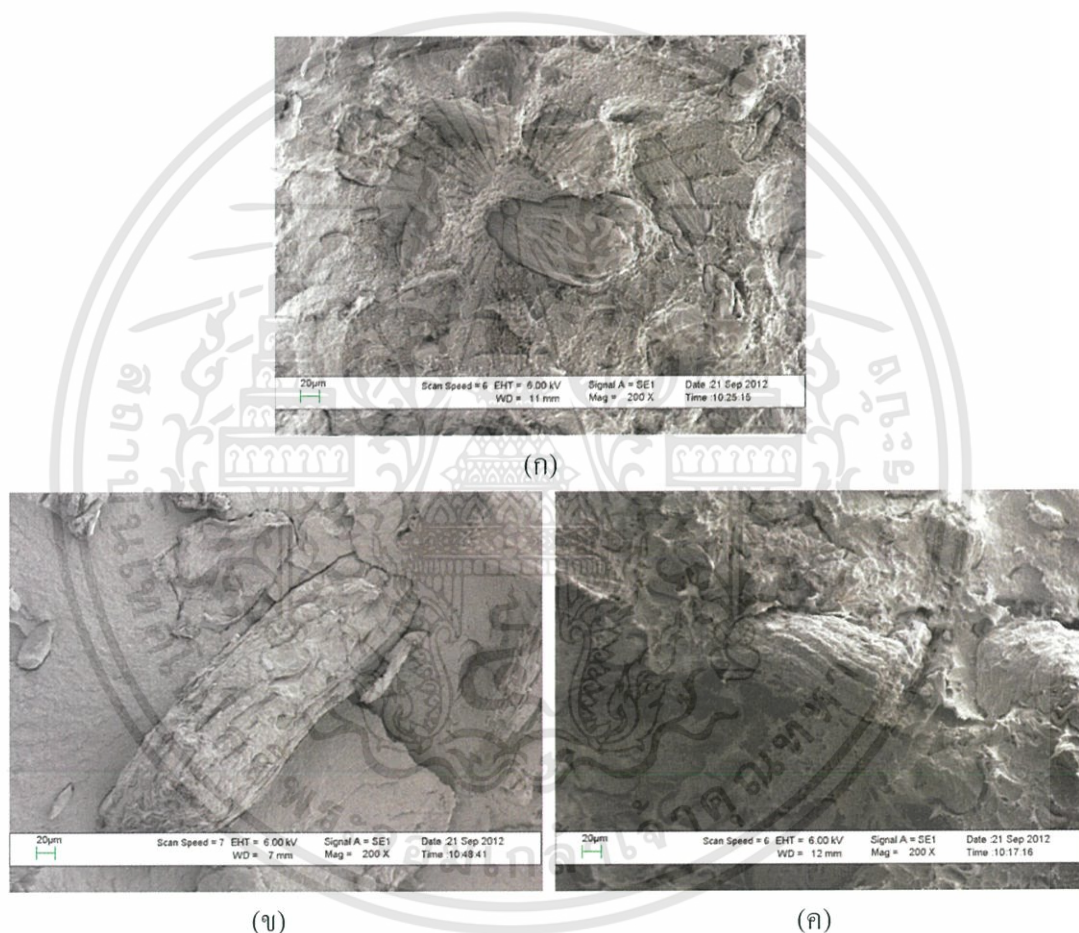
รูปที่ 4.14 SEM Micrographs กำลังขยาย 500X แสดงสัณฐานวิทยาของ WPC จาก HDPE กับกากเส้นใยสับปรดเกรด HP (ก) ไม่เติมสารช่วยผสม และ (ข) เติมสารช่วยผสม



รูปที่ 4.15 กลไกการยึดเกาะระหว่าง HDPE สารช่วยผสม และเส้นใยธรรมชาติ (Park *et al.*, 2006)

2.) การศึกษาผลของการปรับปรุงกากเส้นใยสับประดเกรด HP ด้วยการต้มน้ำ และการต้มสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

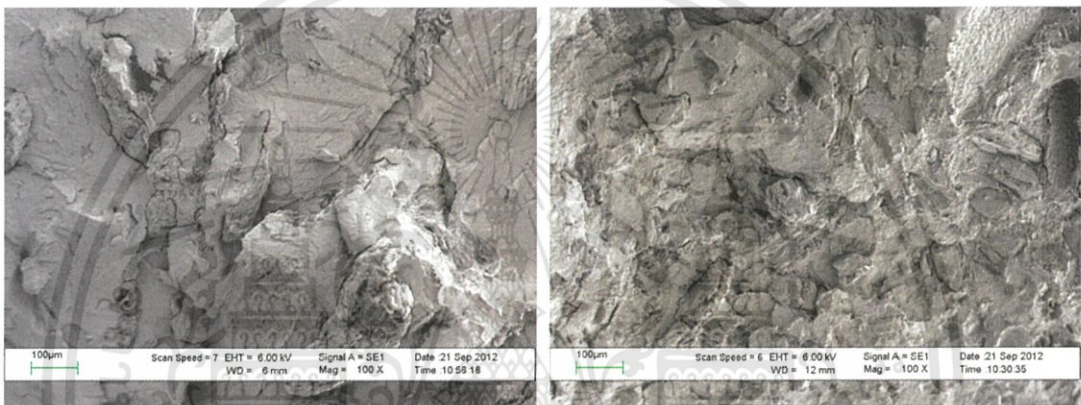
ทำการศึกษาพื้นผิวหน้าตัดของ WPC ที่หักด้วยความรวดเร็วด้วยเครื่อง SEM ที่กำลังขยาย 200 เท่า ในด้านผลของการปรับปรุง และไม่ปรับปรุงกากเส้นใยด้วยการต้มน้ำ และต้มสารละลาย NaOH ตรวจสอบการยึดเกาะระหว่างเส้นใยกับพลาสติกเมตริกซ์ ดังแสดงในรูปที่ 4.16 พบว่า การยึดเกาะระหว่างพลาสติกเมตริกซ์กับกากเส้นใยที่ปรับปรุง และไม่ปรับปรุงมีการยึดเกาะที่ใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.16 SEM Micrographs กำลังขยาย 200X แสดงลักษณะฐานวิทยาของ WPC จาก HDPE กับกากเส้นใยสับประดเกรด HP (ก) HP ไม่ผ่านการปรับปรุง (ข) HP ปรับปรุงด้วยการต้มน้ำ และ (ค) HP ปรับปรุงด้วยการต้มด้วยสารละลาย NaOH

3.) การศึกษาผลของอัตราส่วนผสมระหว่าง HDPE กับกากเส้นใยสับปรดเกรด HP

ทำการศึกษาพื้นผิวหน้าตัดของ WPC ที่หักด้วยความรวดเร็วด้วยเครื่อง SEM ที่กำลังขยาย 100 เท่า ในด้านผลของอัตราส่วนผสมระหว่างพลาสติกเมทริกซ์กับเส้นใย ตรวจสอบการกระจายตัวของกากเส้นใยในพลาสติกเมทริกซ์ สูตร WPC ที่ทำการศึกษาคือ 80:20 และ 60:40 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.17 พบว่า เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของกากเส้นใยมากขึ้น การกระจายตัวของกากเส้นใยในพลาสติกเมทริกซ์แย่ง เส้นใยบางส่วนเกิดการเกาะกันเป็นกลุ่ม ทำให้เกิดจุดบกพร่องขึ้นบนชิ้นงานมากขึ้น



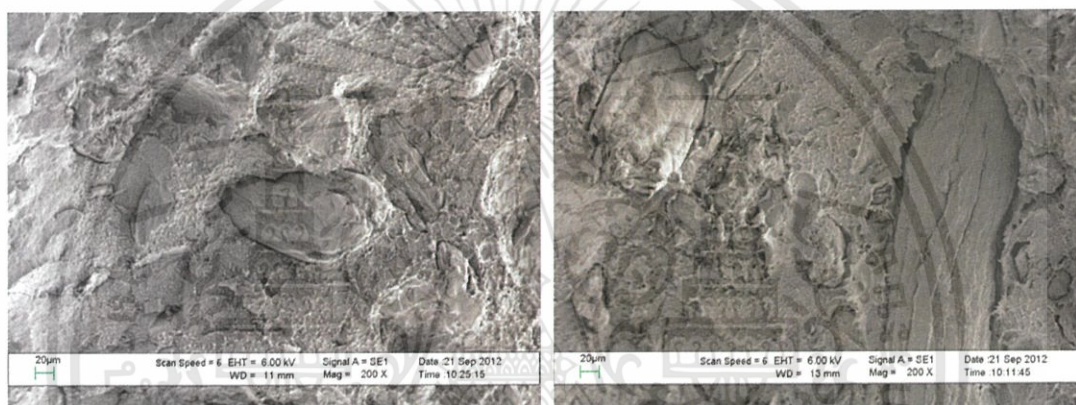
(ก)

(ข)

รูปที่ 4.17 SEM Micrographs กำลังขยาย 100X แสดงสัณฐานวิทยาของ WPC จาก HDPE กับกากเส้นใยสับปรดเกรด HP ในอัตราส่วนผสมต่างๆ (ก) 80:20 และ (ข) 60:40

4.) การศึกษาผลของชนิดของกากเส้นใยสับปะรด

ทำการศึกษาพื้นผิวหน้าตัดของ WPC ที่หักด้วยความรวดเร็วด้วยเครื่อง SEM ที่กำลังขยาย 200 เท่า ในด้านผลของชนิดเส้นใยเกรด HP และเกรด PFF ตรวจสอบการยึดเกาะของพลาสติกเมตริกซ์ กับกากเส้นใยทั้งสองชนิด ดังแสดงในรูปที่ 4.18 พบว่า การยึดเกาะของพลาสติกเมตริกซ์ กับกากเส้นใยทั้งสองชนิดมีลักษณะใกล้เคียงกัน WPC จากกากเส้นใยสับปะรดเกรด HP พลาสติกเมตริกซ์ห่อหุ้มกากเส้นใยที่มีลักษณะเป็นเส้นใยสั้นๆ ส่วน WPC จากกากเส้นใยสับปะรดเกรด PFF พลาสติกเมตริกซ์ห่อหุ้มกากเส้นใยที่มีลักษณะเป็นเส้นใยยาว



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.18 SEM Micrographs กำลังขยาย 200X แสดงลักษณะพื้นผิวหน้าตัดของ WPC จาก HDPE กับกากเส้นใยสับปะรดเกรดต่างๆ (ก) HP และ (ข) PFF

สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษา WPC ระหว่างพลาสติกเมตริกซ์ HDPE กับกากเส้นใยสับปะรด จากโรงงานน้ำผลไม้ กากเส้นใยสับปะรดที่นำมาใช้มี 2 เกรด คือ เกรด PFF และเกรด HP โดยใช้เส้นใยเกรด HP ในการศึกษาเป็นหลัก การศึกษาแบ่งออกเป็น 2 ตอน คือ การศึกษาผลของการปรับปรุงกากเส้นใยด้วยการต้มน้ำ และต้มสารละลาย NaOH และการศึกษาสมบัติของ WPC ในด้านผลของการเติม และไม่เติมสารช่วยผสม PE-g-MA ผลของการปรับปรุงกากเส้นใย ผลของอัตราส่วนระหว่าง HDPE กับกากเส้นใย และผลของชนิดกากเส้นใย จากการศึกษาสามารถสรุปผลการวิจัยได้ ดังนี้

- การวิเคราะห์กากเส้นใย พบว่า กากเส้นใยเกรด HP มีลักษณะเป็นผงเส้นใย รูปร่างสั้น ช่วงขนาดที่เหมาะสมในการผลิต WPC คือ ช่วงขนาดเล็กกว่า 20 mesh ที่อบไล่ความชื้นแล้ว ส่วนกากเส้นใยเกรด PFF มีลักษณะเป็นเส้นใยสั้น ช่วงขนาดที่เหมาะสมในการผลิต WPC คือ ช่วงขนาดเล็กกว่า 12 mesh ที่อบไล่ความชื้นแล้ว

- การศึกษาผลของการปรับปรุงกากเส้นใยเกรด HP ด้วยการต้มน้ำ และต้มสารละลาย NaOH พบว่า การปรับปรุงกากเส้นใยด้วยการต้มน้ำทำให้สารแทรก เช่น น้ำตาลถูกสกัดออกจากกากเส้นใย ระยะเวลาในการต้มสกัดที่ได้ผลดีอาจใช้เวลาน้อยกว่า 1 ชม. ส่วนการปรับปรุงกากเส้นใยด้วยการต้มสารละลาย NaOH ทำให้ลิกนินถูกสกัดออกจากกากเส้นใยในปริมาณเล็กน้อย ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ในการต้มสกัดที่ได้ผลดีอาจใช้ความเข้มข้นมากกว่า 15% w/v อย่างไรก็ตาม สันฐานวิทยาด้านความขรุขระของกากเส้นใยที่ผ่าน และไม่ผ่านการปรับปรุง มีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน จึงสรุปว่า ไม่จำเป็นต้องปรับปรุงกากเส้นใยเกรด HP ก่อนนำมาผลิต WPC

- การศึกษาสมบัติของ WPC ด้านผลของการเติม และไม่เติมสารช่วยผสม PE-g-MA พบว่า เมื่อใส่สารช่วยผสม สมบัติเชิงกลโดยรวมของ WPC มีค่าดีขึ้น การยึดเกาะระหว่างพลาสติกเมตริกซ์กับกากเส้นใยดีขึ้น ช่องว่างระหว่างสองวัฏภาคแคบลง จึงสรุปว่า ควรเติมสารช่วยผสม PE-g-MA ในการผลิต WPC จากกากเส้นใยสับปะรดเกรด HP

- การศึกษาสมบัติของ WPC ด้านผลของการปรับปรุงกากเส้นใยสับปะรด พบว่า สมบัติเชิงกลโดยรวมของ WPC จากกากเส้นใยสับปะรดที่ผ่าน และไม่ผ่านการปรับปรุงมีค่าใกล้เคียงกัน

การยึดเกาะระหว่างพลาสติกเมตริกซ์กับกากเส้นใยมีลักษณะใกล้เคียงกัน จึงสรุปว่า ไม่จำเป็นต้องปรับปรุงกากเส้นใยเกรด HP ก่อนนำมาผลิต WPC

- การศึกษาสมบัติของ WPC ด้านผลของอัตราส่วนระหว่าง HDPE กับกากเส้นใย พบว่า เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของกากเส้นใย สมบัติเชิงกลในการรับแรงของ WPC มีแนวโน้มลดลง การกระจายตัวของกากเส้นใยแฉ่ง จึงสรุปว่า กากเส้นใยสับประดเกรด HP มีประสิทธิภาพในการเสริมแรงต่ำ หน้าที่หลักของกากเส้นใยทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มเนื้อให้กับ WPC อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมในการผลิต WPC ขึ้นอยู่กับสมบัติของ WPC ที่ต้องการ

- การศึกษาสมบัติของ WPC ด้านผลของชนิดกากเส้นใยสับประดเกรด HP และเกรด PFF พบว่า สมบัติเชิงกลโดยรวมของ WPC จากกากเส้นใยเกรด HP มีค่าดีกว่าเกรด PFF เล็กน้อย การยึดเกาะระหว่างพลาสติกเมตริกซ์กับกากเส้นใยมีลักษณะใกล้เคียงกัน จึงสรุปว่า ควรใช้กากเส้นใยสับประดเกรด HP ในการผลิต WPC

- การศึกษาสมบัติทางความร้อนของ WPC ทุกสูตร พบว่า อุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) อุณหภูมิเริ่มตกผลึก (T_{onset}) และองค์ความเป็นผลึก ($\%X_c$) มีค่าใกล้เคียงกัน จึงสรุปว่า กากเส้นใยสับประดเกรด HP ไม่เป็นสารก่อผลึก และไม่รบกวนสมบัติทางความร้อนของ WPC

5.2 ข้อเสนอแนะ

- ควรศึกษาวิธีการตีแยกเส้นใยเกรด PFF แบบอื่น ที่ทำให้ได้ขนาดของเส้นใยที่มีความยาวมากขึ้น เช่น การแยกกลุ่มเส้นใยด้วยการแช่น้ำ

- ควรศึกษาวิธีการปรับปรุงกากเส้นใยในสถานะอื่นๆ เพิ่มเติม เช่น การเพิ่มอุณหภูมิ การลดอัตราส่วนเส้นใยต่อสารสกัด การใช้สารสกัดชนิดอื่น เช่น อะซิโตน อีทีเอ เป็นต้น รวมทั้งศึกษาการปรับปรุงกากเส้นใยเกรด PFF ด้วย

- ควรทำการวิเคราะห์ปริมาณ ลิกนิน เฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส และสารแทรกอื่นๆ เพิ่มเติม

- ควรศึกษาชนิด และปริมาณสารช่วยผสมเพิ่มเติม รวมทั้งการใส่สารตัวเติมประเภทอื่นๆ รวมด้วย

- ควรศึกษาการใช้พลาสติกชนิดอื่น รวมทั้งศึกษาการนำพลาสติกรีไซเคิล (Plastic recycle) มาผลิตเป็น WPC ด้วย

เอกสารอ้างอิง

- กลางเดือน โพนนา, ญัฐชญาภา ธนวัฒนาศิริกุล และ ธเนศ รัตนวิไล. 2554. **วัสดุไม้พลาสติกจาก ไม้ปาล์มและ HDPE**. โครงการวิจัย วิศวกรรมสาร มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ปีที่ 38 ฉบับที่ 3. หน้า 285-296.
- กุลชนาฐ ประเสริฐสิทธิ์, สุพจน์ นวลละออง, ผกามาศ เจษฎ์พัฒนานนท์ และ ราม แยมสังข์. 2551. **การสกัดสารฟีนอลจากเปลือกลูกตาล**. โครงการงานวิจัย การประชุมวิชาการ ทางวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 6. 8-9 พฤษภาคม 2551. หน้า 167-172.
- เกศินี เหมวิเชียร และ พิริยาธร สุวรรณมาลา. 2548. **การทดสอบสมบัติของพอลิเมอร์ ตอนที่ 1 เครื่องดีฟเฟอร์เนี่ยลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์**. [Online]. Available. <http://www.tint.or.th/nkc/nkc51/nkc5102/nkc5102t.html> : สืบค้นวันที่ 15 ตุลาคม 2555.
- จินตมัย สุวรรณประทีป. 2547. **การทดสอบสมบัติทางกลของพลาสติก**. กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี
- เจริญ นาคะสรรงค์. 2542. **กระบวนการแปรรูปพลาสติก PLASTIC PROCESSING**.
ปัตตานี : มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี
- ฉันททิพ คำนวนทิพย์, ประณม ตรีชาติ, ประจักษ์ พานคำ และ เอกภพ เครื่องวงษ์. 2551. **แผ่นฉนวน ความร้อนจากใยมะพร้าวและน้ำยางธรรมชาติ**. โครงการงานวิจัย การประชุมวิชาการข่างงาน วิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี 2551. 20-22 ตุลาคม 2551. หน้า 812-817.
- ชลลดา ฤตวิรุฬห์. 2544. **เอกสารประกอบการสอนวิชาหัวข้อที่น่าสนใจในอุตสาหกรรม**. กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- ชุติมา วนิชย์ถนอม, ตรีชาดา นำภานนท์ และ ปัญญา นาด ขัตติวงษ์. 2552. **การศึกษาคอมโพสิต พอลิแลคติกแอซิด/เส้นใยมะพร้าว:ผลของขนาดเส้นใย และสารช่วยผสม**. โครงการงานพิเศษ วิทยาศาสตร์บัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- ธงชัย เนมขุนทด. 2530. **สับประรด**. กรุงเทพฯ : เรื่องแสงการพิมพ์
- นิพนธ์ วงศ์วิเศษศิริกุล. 2537. **ปฏิบัติการเทคโนโลยีพอลิเมอร์ 2**. กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- นิรมล อุดมอ่าง และ ชีรวัฒน์ เทพใจกาศ. ม.ป.ป. การสกัดเส้นใยจากกากตับประรด และการใช้
 ประโยชน์. โครงการวิจัย การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 39.
 นิลุลล เพื่อกบัวขาว. 2550. สมบัติเชิงกล และสัณฐานวิทยาของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่
 ผ่านกระบวนการขึ้นรูปใหม่โดยมีแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารเติมแต่ง. วิทยานิพนธ์
 วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระเจ้าเกล้าพระนครเหนือ
 ประชุม คำพูด, ประกาศ วันทอง และ อมเรศ บกสุวรรณ. 2550. แผ่นวัสดุผสมจากโพลีเอทิลีน
 ความหนาแน่นสูง และผงขี้เลื่อยไม้ยางพารา. โครงการวิจัย การประชุมวิชาการทาง
 วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 5. 10-11 พฤษภาคม 2550.
 หน้า 64-67.
- ประวิทย์ วงศ์คงคาเทพ, วรสิทธิ์ โทจำปา และ สาโรจน์ ศิริสันตนิยกุล. 2544. วิศวกรรมเคมี ชีวภาพ
 พื้นฐาน. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- ปิยะวรรณ เจียวก๊ก และพงศ์ศักดิ์ แพน้อย. 2543. การศึกษาพอลิเมอร์คอมโพสิต
 ไม้เทียมจากพอลิพรอพิลีนและไม้ยูคาลิปตัส. โครงการพิเศษ วิทยาศาสตร์บัณฑิต
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 ปีนสุภา ปิตรีกษ์สกุล. 2551. คอมโพสิตไม้-พลาสติกวัสดุใหม่สำหรับงานก่อสร้าง. วารสาร
 รามคำแหง ฉบับวิศวกรรมศาสตร์. 2(1)
- พจนีย์ ศรธรรมลี และ ชีรพัฒน์ อุดมโฮศ. 2545. การศึกษาไม้เทียมพอลิเมอร์คอมโพสิตจากกาก
 เส้นใยผักตบชวาและพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำที่ใช้พอลิเอทิลีน-กราฟท์-มาเลอิก
 แอนไฮดรไรด์เป็นสารช่วยผสม. โครงการวิจัย การประชุมการป่าไม้ ประจำปี 2545.
 หน้า 108-122.
- พิมพ์พร วัชรารักษ์กุล. 2549. ปริมาณน้ำตาลในผลไม้ไทย. กรุงเทพฯ : มโน พรินต์ติ้งแอน
 พับลิชชิ่ง
- พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และ คณะ. 2549. การอยู่รอดของแบคทีเรียโพรไบโอติกที่ผ่านกระบวนการ
 ปรับตัวต่อกรดและไมโครเอนแคปซูลเลขันในน้ำสลัดระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำ.
 กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- เพ็ญศรี อติวรรณพัฒน์. 2540. เคมีของไม้และการผลิตเยื่อไม้และกระดาษ. กรุงเทพฯ
- วิภาณจน์ ฉัตรสกุลวิไล. ม.ป.ป. ลิกนิน-แทนนิน. กรุงเทพฯ : กรมโรงงานอุตสาหกรรม

วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา. 2542. วิทยาศาสตร์เส้นใย **Fiber science**. กรุงเทพฯ : ศูนย์

หนังสือจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คันสนีย์ เกษตรสินสมบัติ. 2555. **ประโยชน์ของสับปะรด**. [Online]. Available.

<http://www.gotoknow.org/blogs/posts/148587> : สืบค้นวันที่ 15 ตุลาคม 2555.

สมศักดิ์ วงมงคลชัย. 2547. **สารปรับแต่งพอลิเมอร์**. กรุงเทพฯ : บั๊กเน็ต

สุระเชษฐ รุ่งวัฒนพงษ์. 2536. **กลศาสตร์ของแข็ง**. กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดดูเคชั่น

เสกศักดิ์ อัสวะวิสิทธิ์ชัย. 2550. **การทดสอบแรงดึง**. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์แห่ง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

อรพิน ภูมิภมร. 2523. **คาร์โบไฮเดรตในอาหาร : โพลีแซ็กคาไรด์**. กรุงเทพฯ :

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อิทธิพล แจ่มชัด. ม.ป.ป. **เอกสารประกอบการสอนสารเติมแต่งในพอลิเมอร์**. กรุงเทพฯ :

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

American Society for Testing and Materials [ASTM]. 2012. **D2240 : Standard Test Methods for Rubber Property Durometer Hardness.**

American Society for Testing and Materials [ASTM]. 2012. **D256 : Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics.**

American Society for Testing and Materials [ASTM]. 2012. **D638 : Standard Test Methods for Tensile Properties of Plastic.**

American Society for Testing and Materials [ASTM]. 2012. **D790 : Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials.**

Atiqullah, M. and Hamid, S.H. 1995. **Role of Blending Technology in Polyethylene Recycling.**

Macromolecular Science. Reviews in Macromolecular Chemistry and Physics. 495-498.

Bledzki, A.K. and Gassan, J. 1999. **Composites reinforced with cellulose based fiber.** Prog.

Polym. Sci. 24, 221-274.

Browning, B.L. 1967. **Methods of wood chemistry.** New York : Interscience Publishers. 2,

785-793.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Brown R.P. 1988. **Handbook of Plastic Test Method**. New York : [n.p.]. 148-160.
- Chaozhong, L., *et al.* 2000. **Morphology, Thermal Behavior, and Mechanical Properties of PA6/UHMWPE Blends with HDPE-g-MAH as a Compatibilizing Agent**. *J.Appl.Polym.Sci.* 75(2), 232-238.
- Chubukovc, P., *et al.* 2009. **Applied Catalysis B : Environmental : Correlations for photocatalytic activity and spectral features of the absorption band edge of TiO₂ modified by thiourea**. 91, 460-469.
- Clyne, T.W. and Hull, D. 1996. **An Introduction to Dcomposite Material**. [n.p.]
- Dietzsch, C., 2011. **How To Maximize “Street Tire” Grip on Dirt**. [Online].Available. <http://www.onedirt.com/news/how-to-maximize-street-tire-grip-on-dirt/#comments> : สืบค้นวันที่ 15 ตุลาคม 2555.
- De, S.K. and White, J.R. 1996. **Short fiber-polymer composite**. England : Woodhead Publishing
- Dubois, M., *et al.* 1956. **Colorimetric Method for Determination of Sugar and Related substances**. *Analytical Chemistry*. 28, 350-356.
- Folker, M.J. and Hope, P.S. 1997. **Polymer blends and alloys**. London : Chapman & Hall
- Fried, J.R. 1995. **Polymer Science and Technology**. [n.p.] : Prentice-Hall. 290-294.
- Gazianter Universitesi. 2010. **Composites**. [Online].Available. www.gantep.edu.tr/erklig/me429/introduction : สืบค้นวันที่ 6 พฤศจิกายน 2555.
- Gupta, V.B. and Kothari, V.K., 1997. **Manufactured Fiber Technology**. Chapman & Hall
- Harris, M.E. and Walker, B.J. 2010. **Chemical Education**. 87, 147.
- Hauck, B.W. and Wenger, L.G. 2003. **Twin screw extruder with conical non-parallel converging screws**. Kansas : USA
- Inder, M.S. and Malcolm, R.B.Jr. 2008. **Bioengineering and Molecular Biology of Plant Pathways : Biochemistry and Molecular Biology of Cellulose Biosynthesis in Plants: Prospects for Genetic Engineering**. Texas : The University of Texas at Austin. 1, 135-160.

- Jacqueline, I.K. 1986. **Encyclopedia of Polymer Science and Engineering**. New York : John & Sons, Inc. 10.
- Jang, B.Z. 1994. **Advanced Polymer Composite**. New York : ASTM International
- Jeziórska, R. 2006. **Maleic anhydride grafted LLDPE modified polyamide and fabrics waste containing PET blends**. Pigment & Resin Technology. 35, 3-11.
- Johannaber, F. 1983. **Injection molding machines : user's guide**. New York : Carl Hanser
- Karen, K.Y.L., Ralph M.P. and Terrance R.S., 1999. **Thermoplastic Polyolefin Roofing Membranes**. Construction Technology Update No. 30. Ottawa : National Research Council of Canada
- Larouche, D., Laroche, C. and Bouchard, M., 2003. **Analysis of differential scanning calorimetric measurements performed on a binary aluminium alloy**. Acta Materialia. 51(8), 2161-2170.
- Liam M. 2008. **Second-generation biofuels may offer a way forward**. [Online]. Available. <http://www.engineeringnews.co.za/article/secondgeneration-biofuels-may-offer-a-way-forward-2008-10-31> : สืบค้นวันที่ 6 พฤศจิกายน 2555.
- Lou, X., *et al.* 2002. **Kudzu fiber-reinforced polypropylene composite**. J.Appl.Polym.Sci. 85, 1961-1969.
- Lutz, J.T. 1989. **Thermoplastic Polymer Additive**. New York : Marcel Dekker
- Manson, J.A. and Sperling, L.H. 1976. **Polymer Blend and Composite**. New York : Plenum Press. 38-41.
- Mathews, F.L. and Rawlings, R.D. 1994. **Composite Materials**. Engineering and Science. [n.p.]
- Miller, R.B. 1981. **Wood as an Engineering Material**. Wood handbook. Madison : Forest Products Laboratory, 1-4.
- Park, J.M., *et al.* 2006. **Interfacial evaluation of modified jute and hemp fiber/polypropylene (PP)-maleic anhydride polypropylene copolymer (PP-MAPP) composite using micromechanical technique and nondestructive acoustic emission**. Compos. Sci. Technol. 66, 2686-2699.

Salvado, J., Montane, D. and Farriol, X. 1998. **Fractionation of wheat straw by steam explosion pretreatment and alkali delignification, Cellulose pulp and by product from hemicellulose and lignin.** Journal of wood chemistry and Technology. 18(2), 171-191.

Strong, A.B. 2000. **Plastics : Materials and Processing.** Prentice Hall

Trostyankaya, E.B. 1995. **Polymeric matrices in Fiber – Reinforced Composite Materials.** Polymer Matrix Composites. London : Chapman&Hall

University of Minnesota. 1998. **Formation and chemistry of Wood. Chemical Composition of Wood.** [Online]. Available. <http://ifbholz.ethz.ch/natureofwood/pc/ch/ch11.html> : สืบค้นวันที่ 15 ตุลาคม 2555.

Wade, L.G., 2003. **Organic Chemistry.** New jersey : Person education international





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ผลการทดสอบทางกายภาพของกากเส้นใยสับปะรด

ตารางที่ ก-1 การร่อนหาขนาดของกากเส้นใยสับปะรดเกรด HP โดยใช้ตะแกรงร่อน

ตะแกรง (mesh)	ขนาดรูตะแกรงเฉลี่ย (mm)	น้ำหนัก (g)	ปริมาณโดยน้ำหนัก (%)	หมายเหตุ
< 10	> 2.00	0.09	0.02	ตะกอน กากเส้นใย
10	2.00	0.04	0.01	
12	1.70	0.18	0.04	
20	0.850	0.69	0.14	
35	0.500	12.69	2.57	
50	0.300	103.65	21.00	
100	0.150	294.35	59.63	
325	0.045	81.96	16.60	
		493.65	100.00	

ตารางที่ ก-2 การร่อนหาขนาดของกากเส้นใยสับปะรดเกรด PFF โดยใช้ตะแกรงร่อน

ตะแกรง (mesh)	ขนาดรูตะแกรงเฉลี่ย (mm)	น้ำหนัก (g)	ปริมาณโดยน้ำหนัก (%)	หมายเหตุ
< 10	> 2.00	20.84	4.18	เปลือกตา
10	2.00	63.29	12.71	
12	1.70	294.02	59.03	
20	0.850	61.70	12.39	
35	0.500	30.44	6.11	
50	0.300	19.79	3.97	
100	0.150	7.30	1.47	
325	0.045	0.69	0.14	
		498.07	100.00	

ตารางที่ ก-3 การหาเปอร์เซ็นต์ความชื้นของกากเส้นใยสับประดเกรด HP

ครั้งที่	น้ำหนักเส้นใย (g)		% ความชื้น
	ก่อนอบ	หลังอบ	
1	10.0101	7.9572	20.51
2	10.0232	7.9705	20.48
3	10.0852	8.0295	20.38
	% ความชื้นเฉลี่ย		20.5 ± 0.0

ตารางที่ ก-4 การหาเปอร์เซ็นต์ความชื้นของกากเส้นใยสับประดเกรด PFF

ครั้งที่	น้ำหนักเส้นใย (g)		% ความชื้น
	ก่อนอบ	หลังอบ	
1	10.0529	9.3079	7.41
2	10.1237	9.4095	7.05
3	10.2788	9.5588	7.00
	% ความชื้นเฉลี่ย		7.2 ± 0.1

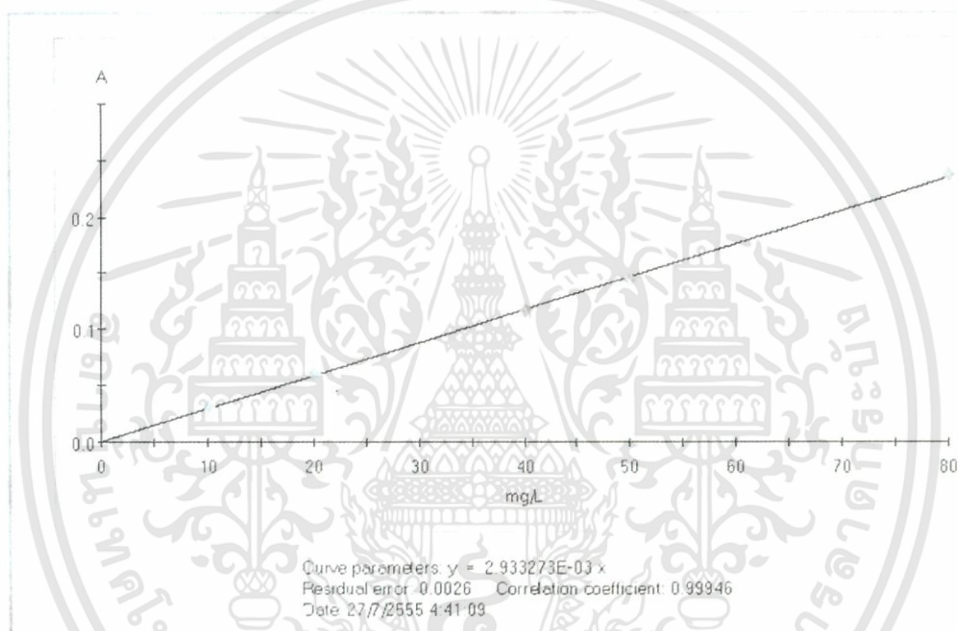
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ผลการตรวจวัดปริมาณน้ำตาลรวม ด้วยวิธีฟีนอล-ซัลฟิวริก จากเครื่อง UV-Vis

Spectrophotometer

Method: k 27-07-12-01.mqa (490 nm)
 Last modified: 27/7/2555 4:41:26 by USER-1\Student
 Spectrophotometer: GENESYS 10S UV-Vis
 Serial number:
 Firmware: 4.003



Standards

No.	Concentration [mg/L]	Ordinate [A]	Error [A]	Used
1	10.00	0.031	0.002	Yes
2	20.00	0.060	0.001	Yes
3	40.00	0.116	-0.002	Yes
4	50.00	0.143	-0.004	Yes
5	80.00	0.237	0.003	Yes

รูปที่ ข-1 กราฟมาตรฐานกลูโคส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-1 การหาปริมาณน้ำตาลรวมในน้ำต้มสกัดเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร (mg/L)

เวลาในการต้มกากเส้นใย ด้วยน้ำ (ชั่วโมง)	ปริมาณน้ำตาลรวม (mg/L)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
1	12,341	12,375	13,057	12,591 ± 233
2	13,513	12,920	13,568	13,334 ± 207
3	12,191	12,334	12,354	12,293 ± 51

ตารางที่ ข-2 การหาปริมาณน้ำตาลรวมเป็นเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักกากเส้นใยทั้งหมด

เวลาในการต้มกากเส้นใย ด้วยน้ำ (ชั่วโมง)	ปริมาณน้ำตาลรวม (% ของน้ำหนักกากเส้นใยทั้งหมด)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
1	18.51	18.56	19.59	18.9 ± 0.4
2	20.27	19.38	20.35	20.0 ± 0.3
3	18.29	18.50	18.53	18.4 ± 0.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

สภาวะที่ใช้ในการฉีดขึ้นรูป WPC ด้วยเครื่อง Injection molding

TIME PROGRAMING

DIE CLS/OPN TIME	:	30	MELTING TIME	:	200
SID-COR ACT TIME	:	30	DECOMPRS TIME	:	0
1 ST STG ING TIME	:	30	COOLING TIME	:	200
2 ND STG ING TIME	:	30	EJECTOR COUNT	:	1
3 RD STG ING TIME	:	30	SCW FWD TIME	:	1
EJECT FWD DLYTIME	:	0	SCW BWD TIME1	:	0
MELTING DLY TIME	:	0	SCW BWD TIME2	:	0
EJE BKD DLY TIME	:	0	ALARM TIME	:	200

PRESSURE PROGRAMING

DIE CLSPRESR	:	50	DECOMP PRESR	:	33
CLS LOW PRESR	:	50	PLUNGER PRESR	:	40
CLS HI PRESR	:	80	EJECTOR PRESR	:	30
DIE OPN PRESR	:	25	SCW-IN PRESR	:	0
1 ST INJ PRESR	:	xx*	DIE ADJ PRESR	:	60
2 ND INJ PRESR	:	xx*			
3 RD INJ PRESR	:	xx*			
MELTING PRESR	:	60			

หมายเหตุ : (xx) คือ ค่าที่มีการเปลี่ยนแปลงตามความเหมาะสมในการฉีด WPC แต่ละสูตรแสดงดัง

ตาราง ก-1

PROGRAMING FLOW SPEED

RAPID CLS SPD	:	30	1 ST STG INJ STD	:	60
HIGHT CLS SPD	:	20	2 ND STG INJ SPD	:	60
CLAMING SPD	:	15	3 RD STG INJ SPD	:	60
DIE OPN SPD	:	5	MEL TING SPD	:	40
RAPID OPN SPD	:	20	DECOMP SPD	:	20
DIE OPN SLW 2	:	10	EJECTOR SPD	:	20
PLUNGER SPD	:	20	SCREW IN SPD	:	0
DIE ADJ SPD	:	25	DIE CHANG SPD	:	0

PROGRAMING TEMPERATURES

	PROGRAMED TEMP	CURRENT TEMP
NOZZLE	:	160
ZONE 1	:	155
ZONE 2	:	150
ZONE 3	:	0
ZONE 4	:	0
ZONE 5	:	0
ZONE 6	:	0

ตารางที่ ก-1 ความดันของหน่วย Injection ที่ปรับจนได้ชิ้นงานที่สมบูรณ์

สูตร WPC	Pressure		
	1 ST INJ	2 ND INJ	3 RD INJ
HDPE	28	28	28
HDPE+HP non PE-g-MA	30	30	30
HDPE+HP PE-g-MA	30	30	30
HDPE+HP treat H ₂ O 0 hr	30	30	30
HDPE+HP treat H ₂ O 1 hr	35	35	35
HDPE+HP treat H ₂ O 2 hr	35	35	35
HDPE+HP treat H ₂ O 3 hr	35	35	35
HDPE+HP treat [NaOH] 0%	30	30	30
HDPE+HP treat [NaOH] 5%	35	35	35
HDPE+HP treat [NaOH] 10%	35	35	35
HDPE+HP treat [NaOH] 15%	35	35	35
HDPE:HP = 100:0	28	28	28
HDPE:HP = 80:20	30	30	30
HDPE:HP = 70:30	35	35	35
HDPE:HP = 60:40	40	40	40
HDPE:HP = 50:50	44	44	44
HDPE+Fiber HP	30	30	30
HDPE+Fiber PFF	34	34	34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical properties) ของ WPC สูตรต่างๆ

ตารางที่ ง-1 สมบัติทางแรงดึง ได้แก่ ความแข็งแรงดึง เบอร์เซ้นต์การยืด ณ จุดขาด และมอดุลัสของ WPC สูตรต่างๆ

สูตร WPC	Tensile strength (MPa)	% Elongation at break	Modulus (MPa)
HDPE	26.5 ± 0.1	19.2 ± 0.3	238 ± 3
HDPE+HP non PE-g-MA	20.6 ± 0.1	15.5 ± 0.2	232 ± 10
HDPE+HP PE-g-MA	23.5 ± 0.2	16.7 ± 0.2	255 ± 4
HDPE+HP treat H ₂ O 0 hr	22.5 ± 0.2	15.7 ± 0.2	291 ± 12
HDPE+HP treat H ₂ O 1 hr	23.1 ± 0.1	16.5 ± 0.2	244 ± 9
HDPE+HP treat H ₂ O 2 hr	23.5 ± 0.2	16.7 ± 0.2	255 ± 4
HDPE+HP treat H ₂ O 3 hr	22.9 ± 0.3	16.3 ± 0.2	252 ± 7
HDPE+HP treat [NaOH] 0%	22.5 ± 0.2	15.7 ± 0.2	291 ± 12
HDPE+HP treat [NaOH] 5%	21.7 ± 0.1	14.7 ± 0.3	257 ± 9
HDPE+HP treat [NaOH] 10%	22.3 ± 0.2	15.9 ± 0.3	241 ± 8
HDPE+HP treat [NaOH] 15%	22.2 ± 0.1	17.1 ± 0.3	233 ± 6
HDPE:HP = 100:0	26.5 ± 0.1	19.2 ± 0.3	238 ± 3
HDPE:HP = 80:20	23.5 ± 0.2	16.7 ± 0.2	255 ± 4
HDPE:HP = 70:30	19.6 ± 0.1	13.1 ± 0.2	255 ± 8
HDPE:HP = 60:40	19.6 ± 0.1	11.0 ± 0.2	298 ± 16
HDPE:HP = 50:50	18.6 ± 0.2	8.0 ± 1.2	304 ± 20
HDPE+Fiber HP	22.5 ± 0.2	15.7 ± 0.2	291 ± 12
HDPE+Fiber PFF	23.2 ± 0.2	15.1 ± 0.5	249 ± 10

ตารางที่ ง-2 ความแข็งกด และความแข็งแรงกระแทกของ WPC สูตรต่างๆ

สูตร WPC	Hardness (shore D)	Impact strength (kJ/m ²)
HDPE	55.5 ± 0.5	2.5 ± 0.1
HDPE+HP non PE-g-MA	56.1 ± 0.3	2.4 ± 0.0
HDPE+HP PE-g-MA	56.3 ± 0.4	2.7 ± 0.0
HDPE+HP treat H ₂ O 0 hr	57.9 ± 0.3	2.6 ± 0.1
HDPE+HP treat H ₂ O 1 hr	54.7 ± 0.3	2.7 ± 0.0
HDPE+HP treat H ₂ O 2 hr	56.3 ± 0.4	2.7 ± 0.0
HDPE+HP treat H ₂ O 3 hr	58.1 ± 0.3	2.8 ± 0.0
HDPE+HP treat [NaOH] 0%	57.9 ± 0.3	2.6 ± 0.0
HDPE+HP treat [NaOH] 5%	59.1 ± 0.6	3.2 ± 0.1
HDPE+HP treat [NaOH] 10%	56.9 ± 0.3	2.9 ± 0.1
HDPE+HP treat [NaOH] 15%	56.8 ± 0.3	2.8 ± 0.0
HDPE:HP = 100:0	55.5 ± 0.5	2.5 ± 0.0
HDPE:HP = 80:20	56.3 ± 0.4	2.7 ± 0.0
HDPE:HP = 70:30	58.9 ± 0.2	2.6 ± 0.0
HDPE:HP = 60:40	60.9 ± 0.3	2.4 ± 0.0
HDPE:HP = 50:50	61.7 ± 0.2	2.4 ± 0.0
HDPE+Fiber HP	57.9 ± 0.3	2.7 ± 0.1
HDPE+Fiber PFF	57.9 ± 0.4	2.8 ± 0.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

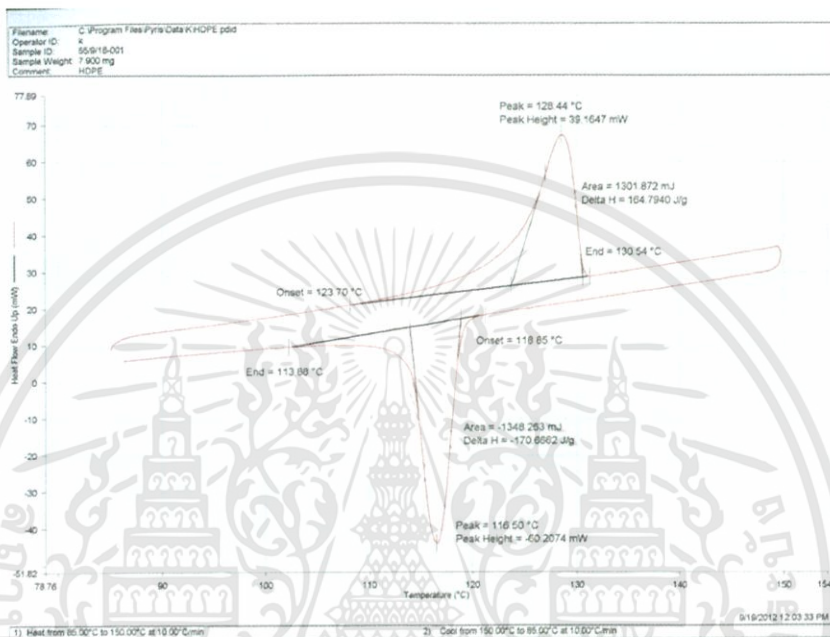
ตารางที่ 3-3 สมบัติการโค้งงอ ได้แก่ ความแข็งแรงโค้งงอ และมอดุลัสโค้งงอ ของ WPC สูตรต่างๆ

สูตร WPC	Flexural stress (MPa)	Flexural modulus (MPa)
HDPE	39.5 ± 1.2	1,502 ± 131
HDPE+HP non PE-g-MA	33.4 ± 0.6	1,352 ± 58
HDPE+HP PE-g-MA	37.6 ± 0.2	1,687 ± 115
HDPE+HP treat H ₂ O 0 hr	37.4 ± 0.3	1,507 ± 148
HDPE+HP treat H ₂ O 1 hr	37.2 ± 0.4	1,304 ± 31
HDPE+HP treat H ₂ O 2 hr	36.4 ± 0.6	1,352 ± 58
HDPE+HP treat H ₂ O 3 hr	35.9 ± 0.2	1,316 ± 33
HDPE+HP treat [NaOH] 0%	37.4 ± 0.3	1,507 ± 148
HDPE+HP treat [NaOH] 5%	37.1 ± 0.2	1,167 ± 53
HDPE+HP treat [NaOH] 10%	37.4 ± 0.1	1,234 ± 44
HDPE+HP treat [NaOH] 15%	36.8 ± 0.2	1,311 ± 47
HDPE:HP = 100:0	39.5 ± 1.2	1,502 ± 131
HDPE:HP = 80:20	36.4 ± 0.6	1,352 ± 58
HDPE:HP = 70:30	34.7 ± 0.2	1,846 ± 135
HDPE:HP = 60:40	31.3 ± 0.2	1,845 ± 78
HDPE:HP = 50:50	27.4 ± 0.2	1,796 ± 231
HDPE+Fiber HP	37.4 ± 0.3	1,507 ± 148
HDPE+Fiber PFF	37.5 ± 0.2	1,308 ± 27

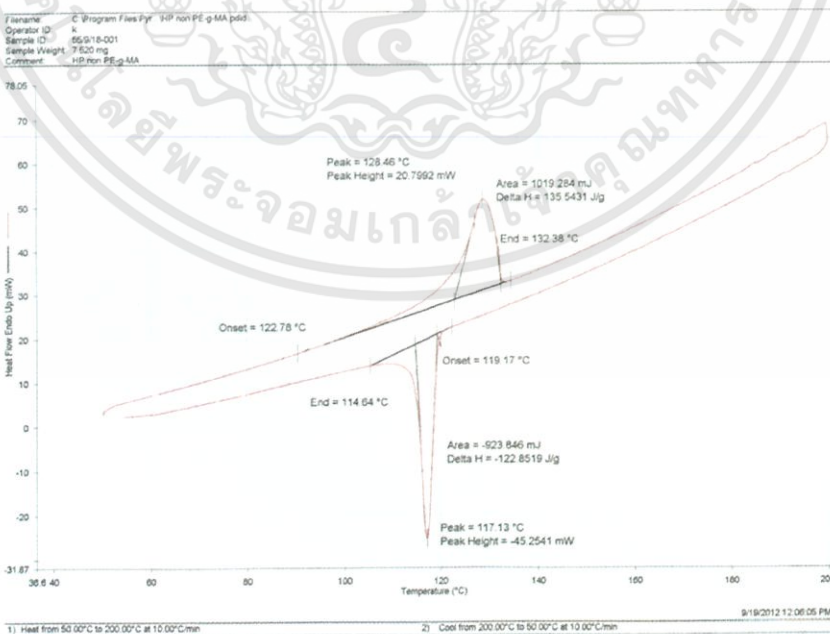
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ

ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อน (Thermal properties) ด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC)

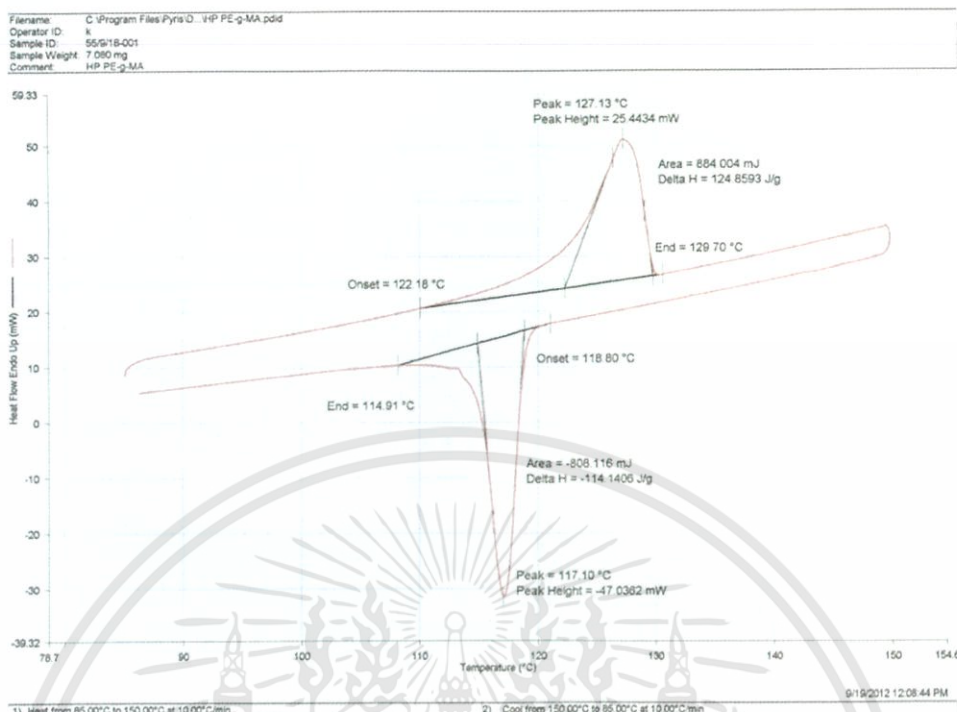


รูปที่ จ-1 กราฟแสดงสมบัติทางความร้อนของ HDPE หรือ WPC สูตร HDPE:HP = 100:0

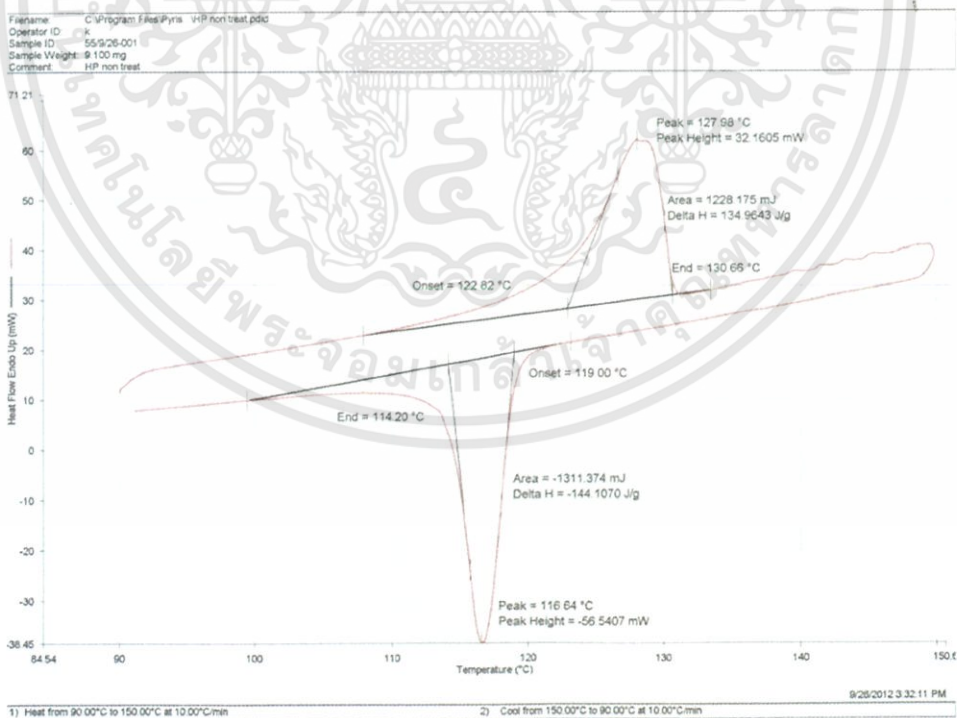


รูปที่ จ-2 กราฟแสดงสมบัติทางความร้อนของ WPC สูตร HDPE+HP non PE-g-MA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

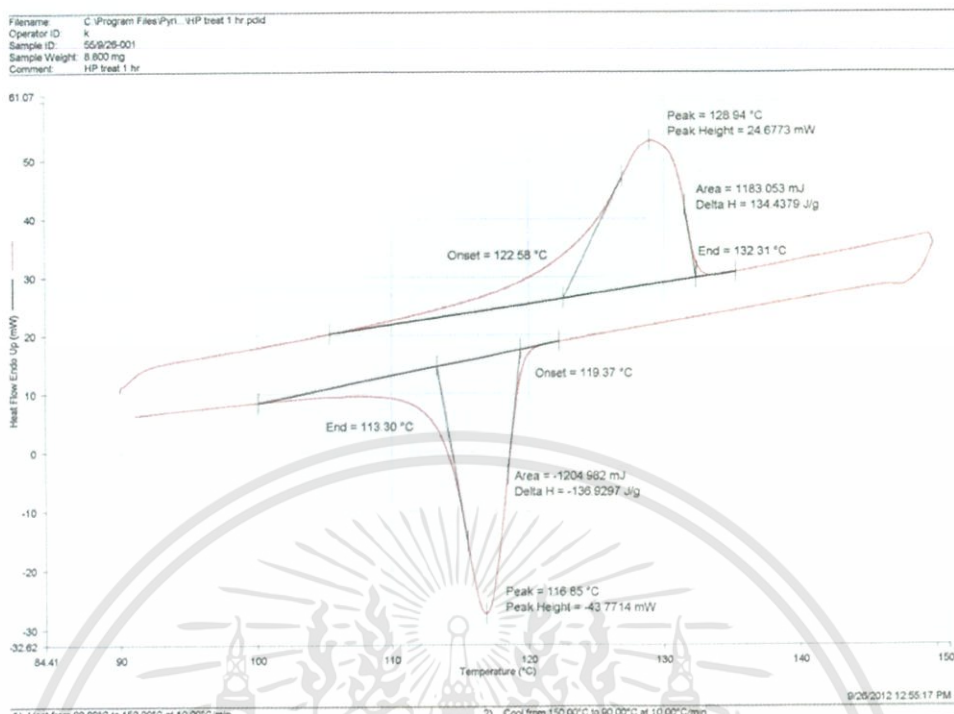


รูปที่ ๓-3 กราฟแสดงสมบัติทางความร้อนของ WPC สูตร HDPE+HP PE-g-MA

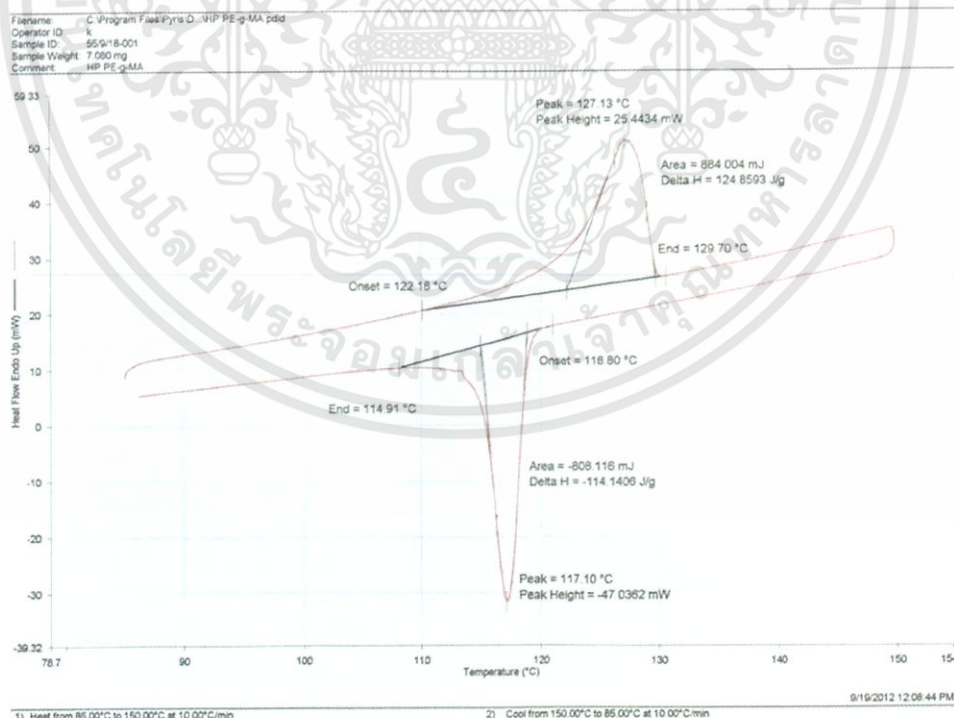


รูปที่ ๓-4 กราฟแสดงสมบัติทางความร้อนของ WPC สูตร HDPE+HP treat H₂O 0 hr หรือ HDPE+HP treat [NaOH] 0%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

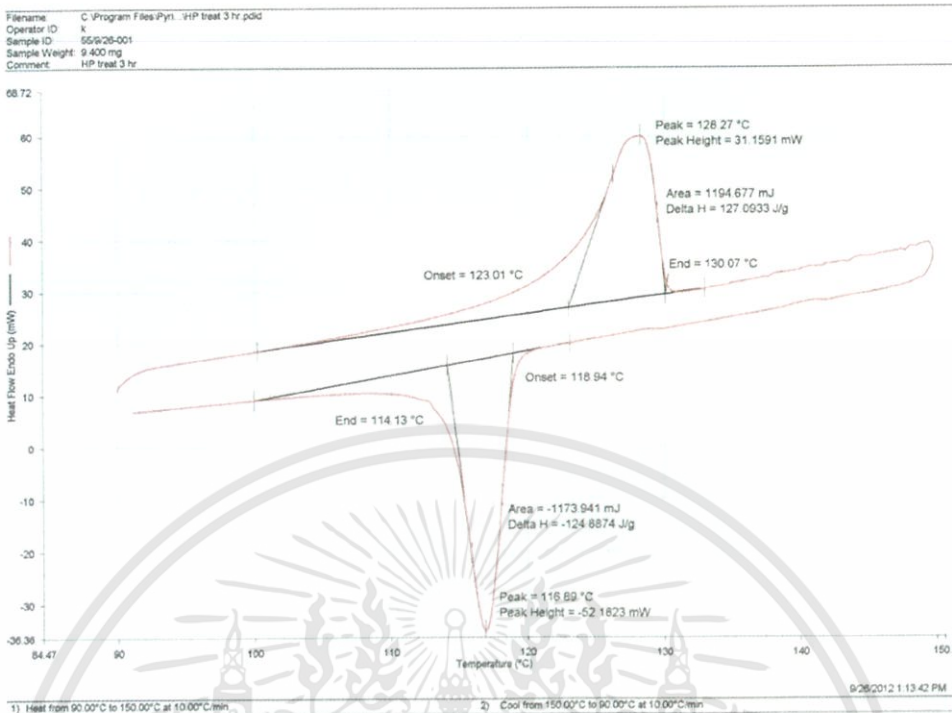


รูปที่ ๕-5 กราฟแสดงสมบัติทางความร้อนของ WPC สูตร HDPE+HP treat H₂O 1 hr

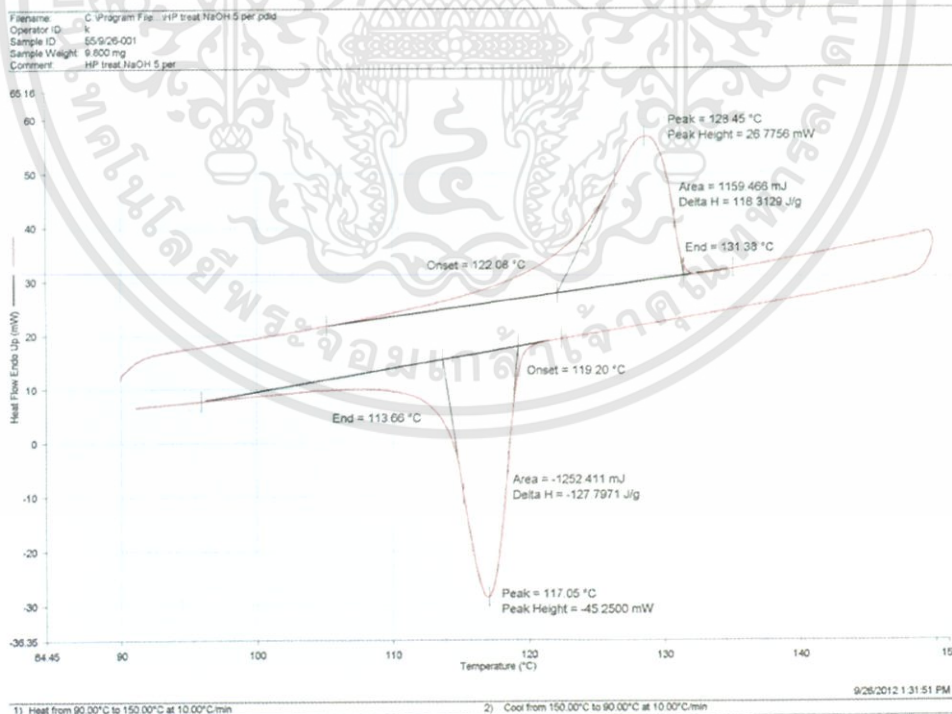


รูปที่ ๕-6 กราฟแสดงสมบัติทางความร้อนของ WPC สูตร HDPE+HP treat H₂O 2 hr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

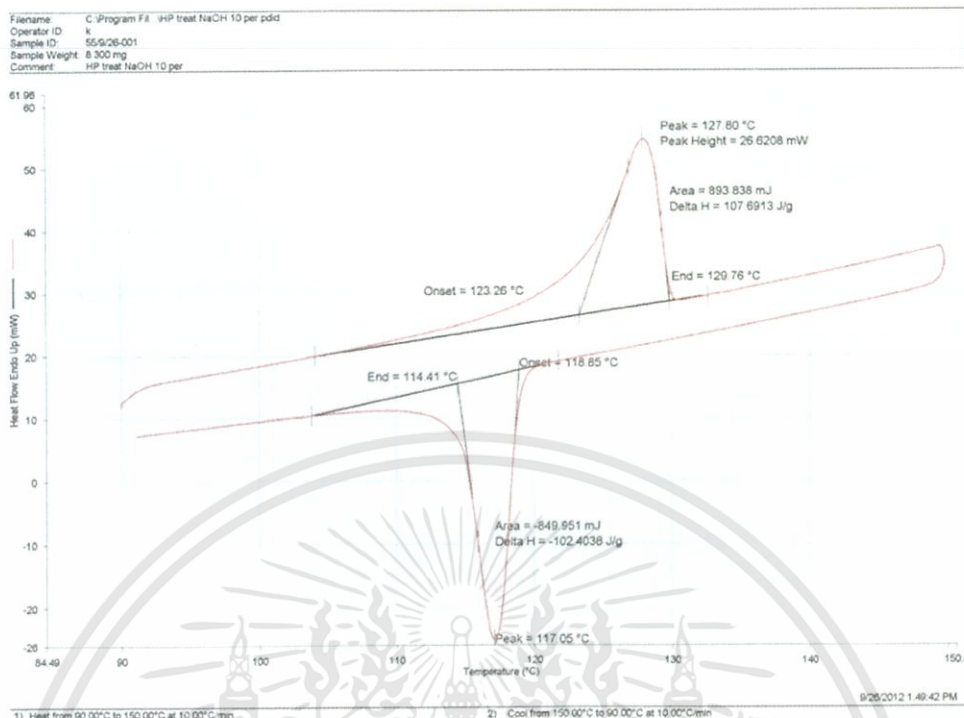


รูปที่ ๗-7 กราฟแสดงสมบัติทางความร้อนของ WPC สูตร HDPE+HP treat H₂O 3 hr

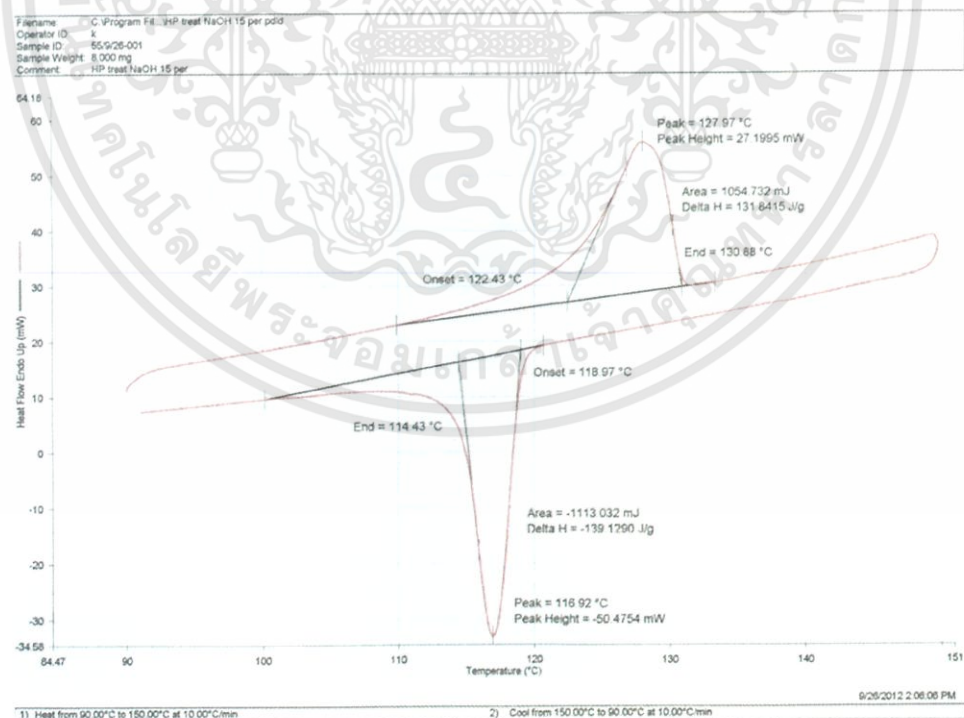


รูปที่ ๗-8 กราฟแสดงสมบัติทางความร้อนของ WPC สูตร HDPE+HP treat [NaOH] 5%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

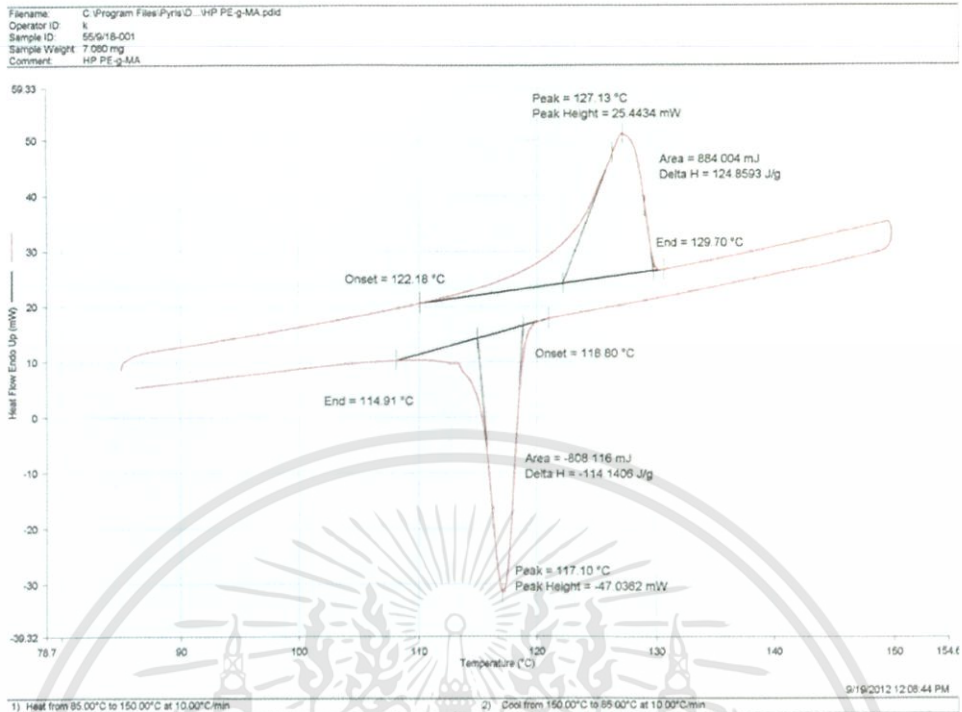


รูปที่ ๙-9 กราฟแสดงสมบัติทางความร้อนของ WPC สูตร HDPE+HP treat [NaOH] 10%

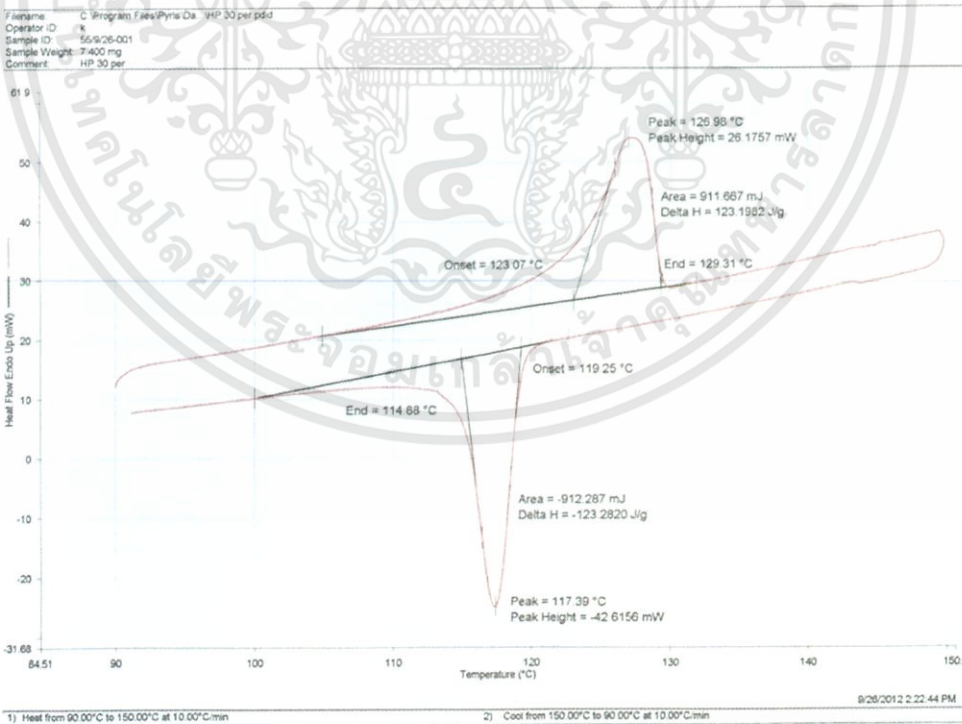


รูปที่ ๙-10 กราฟแสดงสมบัติทางความร้อนของ WPC สูตร HDPE+HP treat [NaOH] 15%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

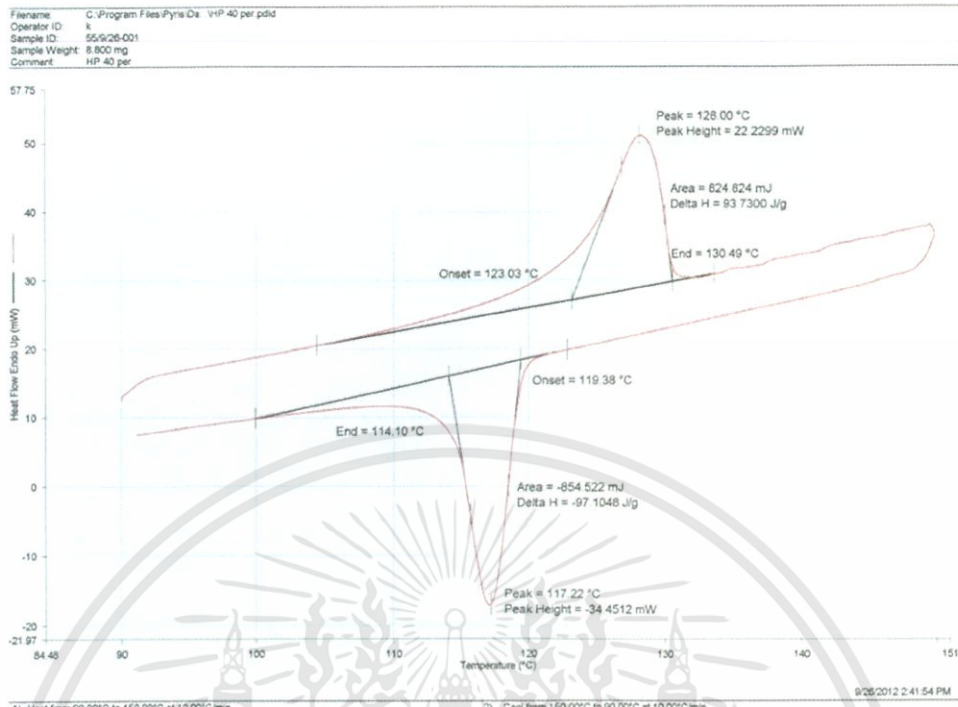


รูปที่ ๑-11 กราฟแสดงสมบัติทางความร้อนของ WPC สูตร HDPE:HP = 80:20

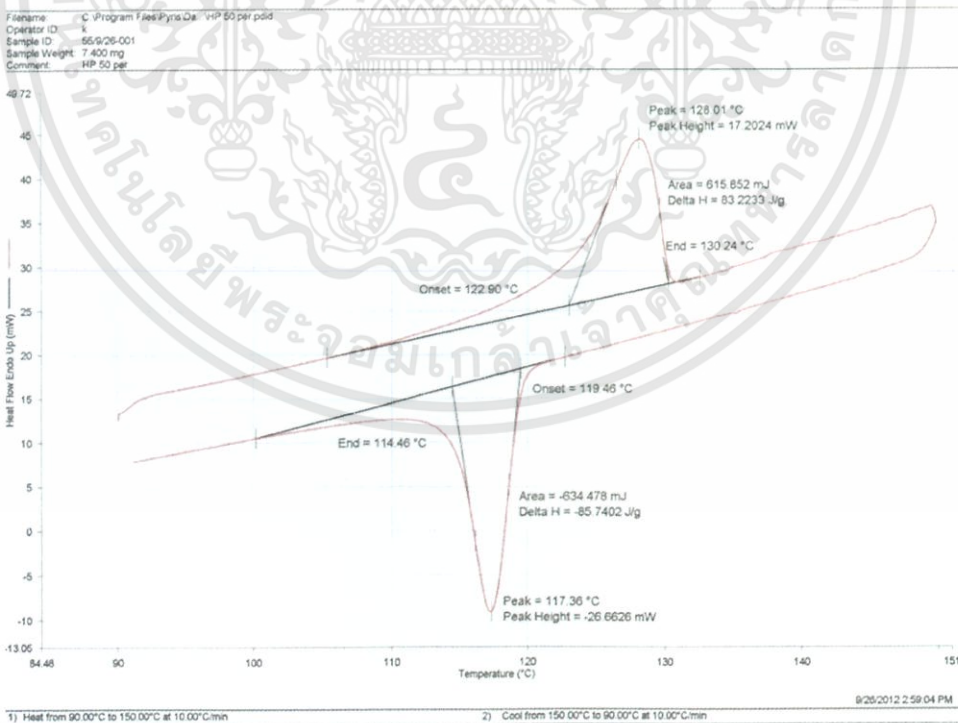


รูปที่ ๑-12 กราฟแสดงสมบัติทางความร้อนของ WPC สูตร HDPE:HP = 70:30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

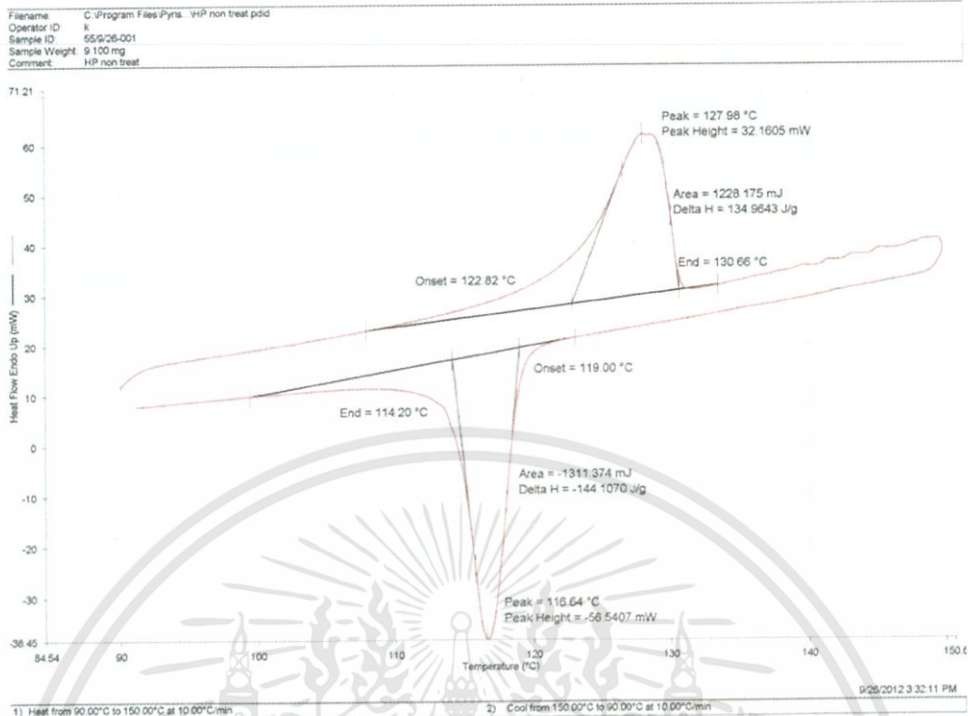


รูปที่ ๑-13 กราฟแสดงสมบัติทางความร้อนของ WPC สูตร HDPE:HP = 60:40

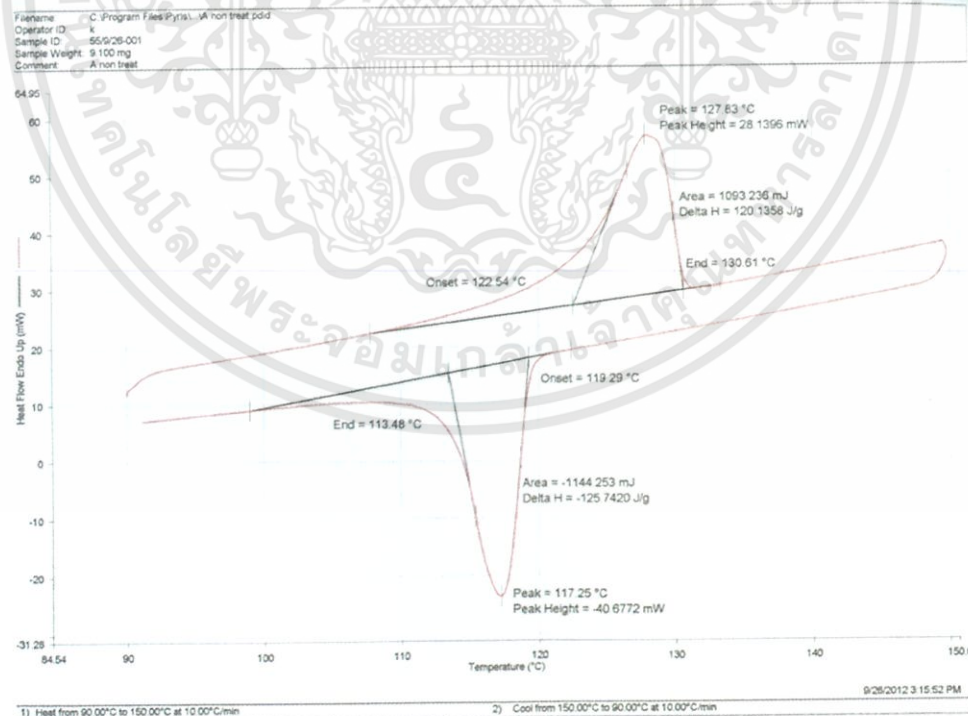


รูปที่ ๑-14 กราฟแสดงสมบัติทางความร้อนของ WPC สูตร HDPE:HP = 50:50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ๑-15 กราฟแสดงสมบัติทางความร้อนของ WPC สูตร HDPE+Fiber HP



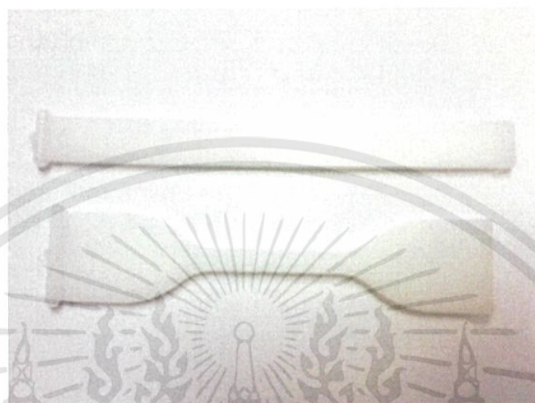
รูปที่ ๑-16 กราฟแสดงสมบัติทางความร้อนของ WPC สูตร HDPE+Fiber PFF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ฉ

รูปของ WPC สูตรต่างๆ ที่ผลิตได้จากงานวิจัยนี้

1. พลาสติก HDPE ที่ใช้ในการศึกษา



HDPE

2. WPC จากการศึกษาผลของการเติมสารช่วยผสม



HDPE+HP non PE-g-MA

HDPE+HP PE-g-MA

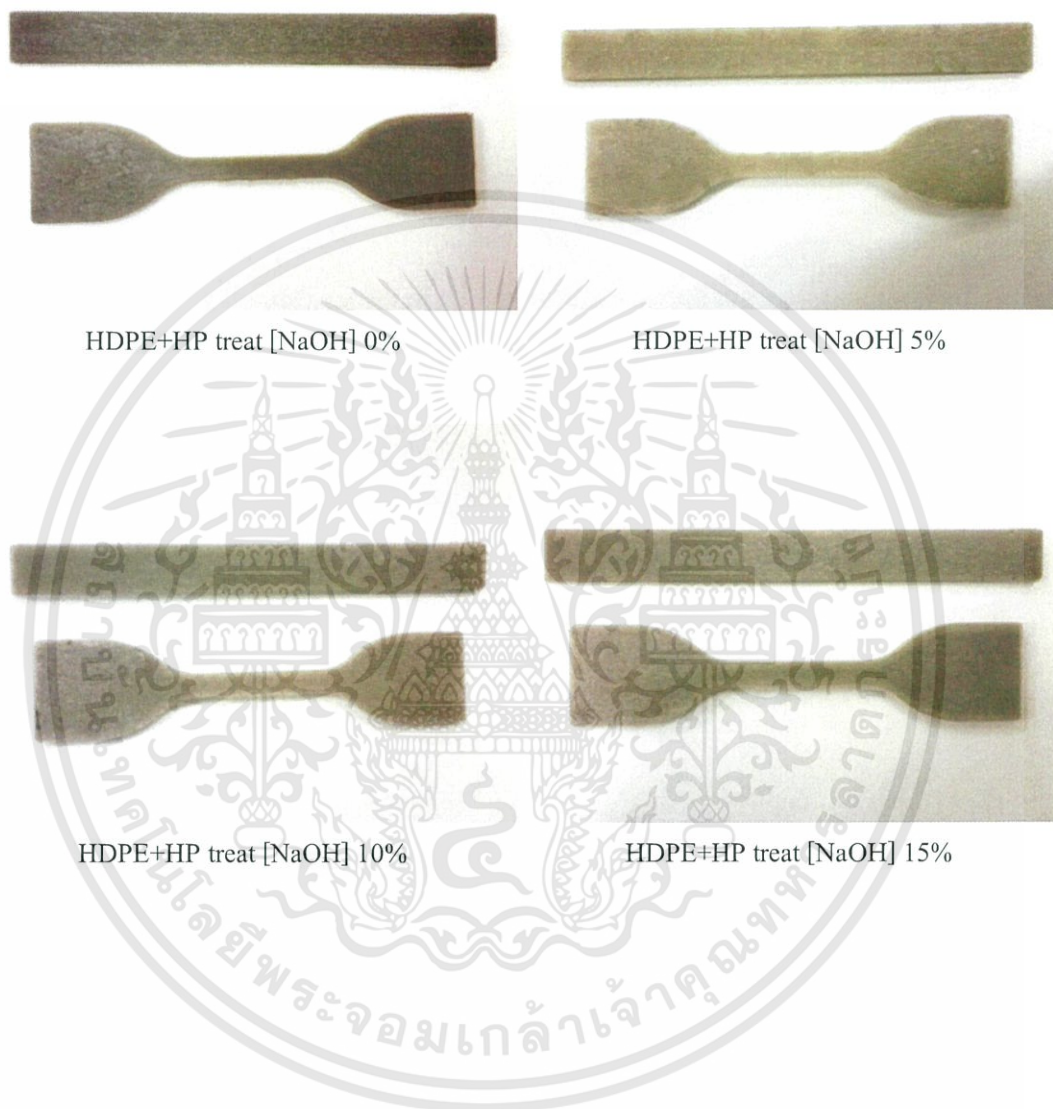
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. WPC จากการศึกษารูปผลของการปรับปรุงกากเส้นใยสับประดเกรด HP ด้วยการต้มน้ำ

HDPE+HP treat H₂O 0 hrHDPE+HP treat H₂O 1 hrHDPE+HP treat H₂O 2 hrHDPE+HP treat H₂O 3 hr

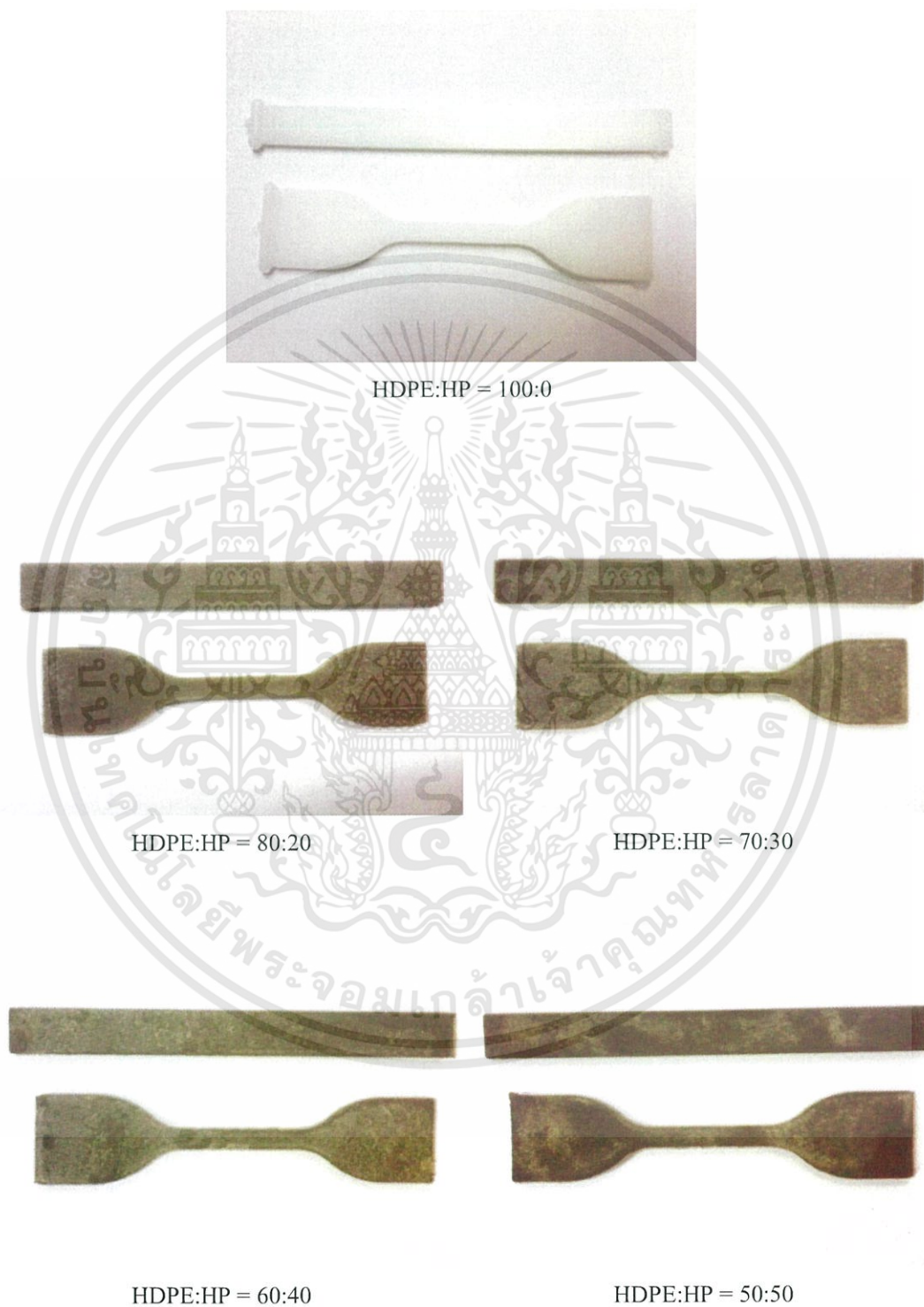
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. WPC จากการศึกษาผลของการปรับปรุงกากเส้นใยสับประดเกรด HP ด้วยการต้มสารละลาย NaOH



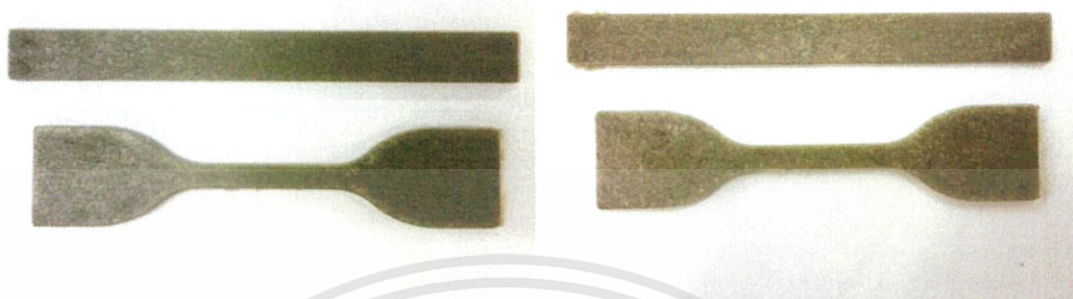
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. WPC จากการศึกษารสผลของอัตราส่วนผสมระหว่าง HDPE กับกากเส้นใยสับประดเกรด
HP



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. WPC จากการศึกษาผลของชนิดกากเส้นใยลัมบ์ประดเกรด HP และเกรด PFF



HDPE+Fiber HP

HDPE+Fiber PFF



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้