

การเตรียมและตรวจสอบผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติกที่เตรียมจาก
พอลิไวนิลคลอไรด์และผงไม้

นางสาวกมลรัตน์ คณาวัง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2550
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PREPARATION AND CHARECTERIZATION OF WOOD PLASTIC COMPOSITES
PREPARED FROM POLY(VINYL CHLORIDE) AND WOOD FLOUR

Miss Kamonrat Kanawang

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Chemical Engineering

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2007

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเตรียมและตรวจสอบผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติกที่เตรียมจากพอลิไวนิลคลอไรด์และผงไม้
โดย	นางสาว กมลรัตน์ คณาวัง
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ ดร. สิริจุฑารัตน์ โคควาวิสารัช
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณ์ฐพร โทณานนท์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศนิริธวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ธวัชชัย ชรินพาณิชกุล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ดร. สิริจุฑารัตน์ โคควาวิสารัช)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณ์ฐพร โทณานนท์)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิจิตรา จงวิศาล)

..... กรรมการ
(คุณ ปรีชา แสงธีระปิติกุล)

กมลรัตน์ คณาวัง. การเตรียมและตรวจสอบผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติกที่เตรียมจาก
 พอลิไวนิลคลอไรด์และผงไม้ (PREPARATION AND CHARECTERIZATION OF
 WOOD PLASTIC COMPOSITES PREPARED FROM POLY(VINYL CHLORIDE AND
 WOOD FLOUR) อ. ที่ปรึกษา : อ. ดร. สิริจุฑารัตน์ โควาริสารัช, 107 หน้า.

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติกที่เตรียมจากพอลิไวนิลคลอไรด์และผงไม้ ไม้พลาสติกที่ผลิตใช้ผงไม้เขตร้อน ได้แก่ ผงไม้สักซึ่งเป็นไม้เนื้ออ่อน และผงไม้เต็งซึ่งเป็นไม้เนื้อแข็ง โดยศึกษาผลของปริมาณและขนาดอนุภาคของผงไม้ที่มีต่อสมบัติเชิงกล สมบัติเชิงความร้อน และสมบัติทางกายภาพ ปริมาณที่ศึกษาคือ 20, 40, 60 และ 80 phr ขนาดของผงไม้แต่ละชนิดที่ใช้ คือ 45, 75, 106, 180 และ 250 ไมครอน การศึกษาพบว่า เมื่อปริมาณผงไม้เพิ่มขึ้น มอดูลัสภายใต้แรงดึง แรงดัดโค้ง และแรงกด ของไม้พลาสติกทั้ง PVC/ผงไม้สัก และ PVC/ผงไม้เต็ง มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากผงไม้มีความแข็งมากกว่า PVC เมตริกซ์ การทนต่อแรงดัดโค้งและการทนต่อแรงกดต่างก็มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อใส่ผงไม้มากขึ้นเช่นกัน แต่การทนต่อแรงดึงและการทนต่อแรงกระแทกมีค่าลดลง เมื่อปริมาณผงไม้มากขึ้น ขนาดอนุภาคของผงไม้ทั้งสองชนิดมีผลต่อสมบัติการทนต่อแรงกระแทกอย่างเห็นได้ชัด เมื่อขนาดอนุภาคผงไม้ใหญ่ขึ้นไม้พลาสติกสามารถทนต่อแรงกระแทกได้เพิ่มขึ้น แต่ขนาดอนุภาคของผงไม้ไม่มีผลต่อการทนต่อแรงดัดและการทนต่อแรงกด ในด้านสมบัติเชิงความร้อนของไม้พลาสติก PVC/ผงไม้สัก และ PVC/ผงไม้เต็งต่างมีค่าอุณหภูมิการสลายตัวต่ำกว่า PVC บริสุทธิ์ เป็นผลมาจากผงไม้มีการสลายตัวในช่วงอุณหภูมิที่ต่ำกว่า PVC บริสุทธิ์ ค่าอุณหภูมิการแปรสภาพแก้วของไม้พลาสติก PVC/ผงไม้สัก และ PVC/ผงไม้เต็ง มีค่าลดลง เมื่อปริมาณผงไม้เพิ่มขึ้น อุณหภูมิการโค้งงอของไม้พลาสติก PVC/ผงไม้สัก และ PVC/ผงไม้เต็ง เพิ่มขึ้นจาก 78 เป็น 81 °C การเพิ่มขึ้นของผงไม้มีผลทำให้ไม้พลาสติกดูดซึมน้ำมากขึ้น เพราะผงไม้มีหมู่ไฮดรอกซิลซึ่งสามารถจับกับหมู่ไฮดรอกซิลของน้ำได้เป็นผลมาจากการเข้ากันได้ของโมเลกุลที่มีขั้ว การเปรียบเทียบผลของชนิดไม้เนื้อแข็งและไม้เนื้ออ่อนที่มีผลต่อสมบัติด้านต่างๆของไม้พลาสติก พบว่า ไม้พลาสติกที่เติมผงไม้เนื้อแข็งสามารถทนต่อแรงกดและแรงกระแทกได้สูงกว่าไม้พลาสติกที่เติมผงไม้เนื้ออ่อน เมื่อเปรียบเทียบกับไม้ที่ขายตามท้องตลาดพบว่าไม้พลาสติกทั้งสองระบบมีค่าสมบัติเชิงกลในด้านการทนต่อแรงดึง การทนต่อแรงดัดโค้ง การทนต่อแรงกดและการทนต่อแรงกระแทกเทียบเท่ากับไม้พลาสติกเชิงพาณิชย์

ภาควิชา วิศวกรรมเคมี.....

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี.....

ปีการศึกษา 2550.....

ลายมือชื่อนิสิต.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

477020562121 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEY WORD: WOOD PLASTIC COMPOSITES / WOOD FLOUR / PVC / PARTICLE SIZES

KAMONRAT KANAWANG : PREPARATION OF WOOD PLASTIC COMPOSITES

PREPARED FROM POLY(VINYL CHLORIDE) AND WOOD FLOUR.

THESIS ADVISOR: SIRIJUTARATANA COVAVISARUCH, 107 pp.

The purpose of this research is to prepare and characterize Wood Plastic Composites (WPC) made from (Poly(vinyl chloride), PVC) and wood flour. WPCs were prepared from wood flours obtained from trees grown in tropical area. Teak flour was selected to represent softwood and Simese Sal (or Selangan batu or Balau) flour was selected to represent hardwood. Specifically the effects imparted by the amount of each wood flour and the influences of their particle sizes on the mechanical and thermal properties of WPCs were evaluated. PVC was used as the matrix while teak flour and balau flour was used as the filler at 20, 40, 60, and 80 phr. Each flour was of various particle sizes with a top cut of 45, 75, 106, 180 and 250 μm . Experimental results showed that the modulus of PVC/teak flour and PVC/balau flour composites increased with greater content of teak flour and balau flour. This was due to the higher stiffness imparted by both types of wood flour. The flexural and compressive strength increased but the tensile strength and the impact strength decreased with increasing flour content. The influences of particle sizes of the wood flour was evident in the impact strength of each WPC. However the particle size of each wood flour did not affect the flexural and compressive strength. Thermal analysis of PVC/wood flour composites of both types indicated that the degradation temperature of the PVC/wood flour was lower than that of the PVC matrix. This was induced by the wood flour whose decomposition temperature was lower than that of the PVC matrix. The glass transition temperature of most PVC/teak flour and PVC/balau flour composites was found to decrease. The heat deflection temperature of the PVC/wood flour composites was raised from 78 to 81 $^{\circ}\text{c}$. The water absorption of the WPCs increased with higher wood flour filler volume. Wood flour contained numerous hydroxyl groups which were available for interaction with water molecules. The PVC/balau flour composite exhibited higher compression and impact properties than the PVC/teak flour. The mechanical properties of the WPCs prepared from Poly(vinyl chloride) and teak or balau flour in the present study were comparable with those of commercially by available WPCs prepared from moderate wood flour.

Department Chemical Engineering..

Student's signature.....

Field of study Chemical Engineering..

Advisor's signature.....

Academic year 2007..

Co-advisor signature.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยความกรุณาเป็นอย่างยิ่งจาก อาจารย์ ดร. สิริ จุฑารัตน์ โคควาวิสารัช ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ท่านกรุณาให้คำปรึกษาแนะนำแนวทางการทำวิจัยและสละเวลาช่วยเหลือ ตรวจสอบข้อผิดพลาด ตลอดจนให้ข้อคิดเห็นในการแก้ไขปัญหาต่างๆ ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งประกอบไปด้วย รศ ดร. ธวัชชัย ชรินพานิชกุล ผศ. ดร. วิจิตรา จงวิศาล, ผศ.ดร. ญัฐพร โทณานนท์ และคุณ ปรีชา แสงธีระปิติกุล ที่ได้กรุณาสละเวลามาเข้าร่วมสอบวิทยานิพนธ์และให้คำแนะนำซึ่งมีส่วนช่วยให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ขึ้น

ขอขอบพระคุณ บริษัท ลีอชาทิมเบอร์ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ฝังไม้

ขอขอบพระคุณ บริษัท ไทยนาม มหาชน(จำกัด) ที่ให้ความอนุเคราะห์ เครื่องมือขึ้นรูป

ขอขอบพระคุณ คุณบุรณินท์ กัมพลพันธ์ วิศวกรพัฒนาผลิตภัณฑ์ บริษัท นวพลาสติกอุตสาหกรรม (สระบุรี) ที่ให้ความอนุเคราะห์วัสดุดิบ เครื่องมือขึ้นรูป

ขอขอบพระคุณโครงการทุน 90 ปี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ให้ความสนับสนุนด้านเงินทุนวิจัย

ขอขอบพระคุณ ห้องปฏิบัติการโพลีเมอร์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือทดสอบสมบัติเชิงกล

ขอขอบคุณ คุณกนกวรรณ พนิชนาพันธ์ ที่ให้คำปรึกษา ตลอดจนความช่วยเหลือจนงานวิจัยสำเร็จไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ คุณ วีระชัย เกียรติอุดมพันธ์ และคุณจกฤกษ์ เสณีตันติกุล นิสิตปริญญาโทปี 3 ที่ช่วยอนุเคราะห์ให้ความสะดวกในการใช้เครื่องมือของห้องปฏิบัติการโพลีเมอร์

ขอขอบคุณพี่ๆเพื่อนๆ และน้องๆที่ให้กำลังใจ ให้คำปรึกษา ช่วยเหลืออีกหลายท่านที่มีได้เอยนามมา ณ ที่นี้

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดาและทุกคนในครอบครัวที่คอยให้กำลังใจและสนับสนุนการวิจัยตลอดมาให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 วัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติก.....	5
2.1.1 เมตริกซ์ (Matrix Materials).....	5
2.1.2 สารตัวเติม (Filler).....	5
2.1.3 สารเติมแต่ง.....	6
2.2 พอลิไวนิลคลอไรด์ (Poly(vinyl chloride):PVC).....	7
2.3 โครงสร้างและสมบัติของไม้.....	9
2.3.1 โครงสร้างและองค์ประกอบของไม้.....	10
2.3.2 สมบัติของไม้.....	14
2.4 กระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก.....	16
2.4.1 การผสมโดยใช้เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่.....	16
2.4.2 กระบวนการขึ้นรูปโดยการอัด.....	18
2.5 การทดสอบสมบัติเชิงกล.....	19
2.5.1 การทดสอบแรงดึง (Tensile Test).....	19
2.5.2 การทดสอบการทนแรงกระแทก (Impact Test).....	21
2.5.3 การทดสอบแรงกด (Compressive Test).....	22
2.5.4 การทดสอบแรงดัด (Flexural Test).....	23

บทที่	หน้า
2.6 การทดสอบสมบัติทางความร้อนของพลาสติก.....	24
2.6.1 Dynamic Mechanical Analysis.....	25
2.6.2 Thermogravimetric Analysis.....	25
2.6.3 Heat Deflection Temperature.....	26
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	27
3 การดำเนินงานวิจัย.....	35
3.1 วัตถุดิบและการเตรียมวัตถุดิบ.....	35
3.1.1 PVC compound.....	35
3.1.2 ผงไม้.....	36
3.2 การดำเนินงานวิจัย.....	37
3.2.1 การบดและการคัดแยกขนาดของผงไม้.....	38
3.2.2 การผสม PVC และผงไม้.....	38
3.2.3 การเตรียมไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ เพื่อการทดสอบ.....	39
3.3 การทดสอบสมบัติเชิงกล.....	40
3.3.1 การทดสอบการดัดโค้ง (Flexural Property).....	40
3.3.2 การทดสอบการทนต่อแรงกระแทก (Impact Property).....	41
3.3.3 การทดสอบการทนต่อแรงกด (Compressive Property).....	42
3.3.4 การทดสอบการทนต่อแรงดึง (Tensile property).....	42
3.4 สมบัติทางความร้อน.....	43
3.4.1 Dynamic Mechanical Analysis.....	43
3.4.2 Thermogravimetric analysis.....	43
3.4.3 Heat Deflection Temperature.....	44
3.5 การตรวจสอบการกระจายตัวของอนุภาคในชิ้นงาน.....	44
3.6 การทดสอบการดูดซึมน้ำของไม้พลาสติก.....	45
3.7 การขึ้นรูปไม้พลาสติก PVC/ผงไม้โดยเครื่องจักรอุตสาหกรรม.....	45
4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	47
4.1 สมบัติการทนต่อแรงดึง (Tensile property).....	48
4.2 สมบัติการทนต่อแรงดัด (Flexural Property).....	56

	หน้า
4.3 สมบัติการทนต่อแรงกระแทก (Impact Property).....	60
4.4 สมบัติการทนต่อแรงกด (Compressive Property).....	63
4.5 สมบัติทางความร้อนของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้.....	66
4.5.1 Dynamic Mechanical Analysis (DMA).....	66
4.5.2 Thermogravimetric Analysis (TGA).....	67
4.5.3 อุณหภูมิการโค้งงอ (Heat Deflection Temperature).....	70
4.6 สมบัติการดูดซึมน้ำ (Water Absorption).....	71
4.7 การตรวจสอบการกระจายตัวของอนุภาคผงไม้ในผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้ พลาสติก PVC/ผงไม้.....	75
4.8 ความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก.....	78
4.9 การวิเคราะห์ราคาของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก.....	80
5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอนะ.....	81
รายการอ้างอิง.....	83
ภาคผนวก.....	87
ภาคผนวก ก.....	88
ภาคผนวก ข.....	104
ภาคผนวก ค.....	106
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	107

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 1.1 การผลิตและการใช้ไม้ภายในประเทศตั้งแต่ปี 2545-2549.....	2
ตารางที่ 2.1 ประเภทของไม้ตามเกณฑ์ของกรมป่าไม้.....	10
ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบต่างๆในไม้เนื้ออ่อนและไม้เนื้อแข็ง.....	11
ตารางที่ 2.3 การจำแนกกลุ่มไม้ตามความถ่วงจำเพาะ.....	15
ตารางที่ 2.4 สมบัติทางด้านความเค้นและความเครียดของพลาสติกประเภทต่างๆ.....	21
ตารางที่ 2.5 สมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้.....	34
ตารางที่ 4.1 แสดงองค์ประกอบของผงไม้ที่ได้จากการทดลองและเปรียบเทียบกับ ค่าที่ได้จากทฤษฎี.....	47
ตารางที่ 4.2 ค่าคุณสมบัติการแปรสภาพแก้วของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ เปรียบเทียบกับ PVC บริสุทธิ์.....	66
ตารางที่ 4.3 คุณสมบัติการโค้งงอของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้.....	70
ตารางที่ ก-1 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบการทนต่อแรงดึงของไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ ที่ผงไม้ อนุภาคนาขนาดต่างๆที่ปริมาณผงไม้ 20 phr.....	88
ตารางที่ ก-2 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบการทนต่อแรงดึงของไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ ที่ผงไม้ อนุภาคนาขนาดต่างๆที่ปริมาณผงไม้ 40 phr.....	89
ตารางที่ ก-3 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบการทนต่อแรงดึงของไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ ที่ผงไม้ อนุภาคนาขนาดต่างๆที่ปริมาณผงไม้ 60 phr.....	90
ตารางที่ ก-4 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบการทนต่อแรงดึงของไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ ที่ผงไม้ อนุภาคนาขนาดต่างๆที่ปริมาณผงไม้ 80 phr.....	91
ตารางที่ ก-5 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบการทนต่อแรงดึงของ PVC บริสุทธิ์.....	92
ตารางที่ ก-6 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบการทนต่อการดัดโค้งของไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ ที่ผง ไม้อนุภาคนาขนาดต่างๆ ที่ปริมาณผง ไม้ 20 phr.....	92
ตารางที่ ก-7 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบการทนต่อการดัดโค้งของไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ ที่ผง ไม้อนุภาคนาขนาดต่างๆ ที่ปริมาณผง ไม้ 40 phr.....	93
ตารางที่ ก-8 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบการทนต่อการดัดโค้งของไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ ที่ผง ไม้อนุภาคนาขนาดต่างๆ ที่ปริมาณผง ไม้ 60 phr.....	94

ตาราง	หน้า
ตารางที่ ข-5 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบสมบัติการดูดซึมน้ำของ PVC บริสุทธิ์.....	105
ตารางที่ ค-1 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบความหนาแน่นของไม้พลาสติก PVC/ผงไม้สัก.....	106
ตารางที่ ค-2 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบความหนาแน่นของไม้พลาสติก PVC/ผงไม้เต็ง.....	106

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของ PVC.....	7
รูปที่ 2.2 โครงสร้างของไม้.....	11
รูปที่ 2.3 โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส.....	12
รูปที่ 2.4 โครงสร้างทางเคมีของเฮมิเซลลูโลส.....	12
รูปที่ 2.5 โครงสร้างทางเคมีของลิกนิน.....	13
รูปที่ 2.6 การจัดเรียงตัวของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินในไม้.....	14
รูปที่ 2.7 เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว.....	17
รูปที่ 2.8 เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่.....	17
รูปที่ 2.9 แสดงลักษณะของเครื่องอัด.....	18
รูปที่ 2.10 ขึ้นทดสอบรูปดัมเบลล์.....	19
รูปที่ 2.11 ลักษณะของกราฟแสดงความเค้นและความเครียดสำหรับพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ.....	20
รูปที่ 2.12 เครื่องทดสอบกระแทก.....	22
รูปที่ 2.13 ลักษณะชิ้นงานทดสอบแบบ Izod.....	22
รูปที่ 2.14 การทดสอบการต้านทานแรงกด.....	23
รูปที่ 2.15 การทดสอบการโค้งงอโดยวิธีใส่แรงกระทำ 3 จุด.....	24
รูปที่ 2.16 Dynamic Mechanical Analysis.....	25
รูปที่ 2.17 Thermogravimetric Analyzer.....	26
รูปที่ 2.18 อุปกรณ์การทดสอบอุณหภูมิการโค้งงอ.....	27
รูปที่ 3.1 PVC Compound.....	35
รูปที่ 3.2 ผงไม้.....	36
รูปที่ 3.3 แผนผังการดำเนินงานวิจัย.....	37
รูปที่ 3.4 แสดงเครื่องมือที่ใช้ในการบดและคัดแยกขนาดของผงไม้.....	38
รูปที่ 3.5 Dry blending.....	38
รูปที่ 3.6 Hydraulic press.....	39
รูปที่ 3.7 ชิ้นงานทดสอบที่อัดขึ้นรูปแล้ว.....	40
รูปที่ 3.8 แสดงการทดสอบการดัดโค้งแบบ 3-point bending.....	41
รูปที่ 3.9 Impact tester.....	41
รูปที่ 3.10 แสดงการทดสอบการกดอัด.....	42
รูปที่ 3.11 การทดสอบแรงดึง.....	42

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 3.12 เครื่อง dynamic mechanical analyzer.....	43
รูปที่ 3.13 เครื่อง Thermogravitic analyzer.....	44
รูปที่ 3.14 เครื่อง Scanning Electron Microscope.....	45
รูปที่ 3.15 เครื่อง Twin Screw Extruder.....	46
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงมอดูลัสภายใต้แรงดึงของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ ที่ขนาดและปริมาณของผงไม้ต่างๆ.....	48
รูปที่ 4.2 กราฟแสดง Ultimate Tensile stress ของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ ที่ขนาดและปริมาณของผงไม้ต่างๆ.....	49
รูปที่ 4.3 แสดงภาพการกระจายตัวของผงไม้สัก ขนาดอนุภาค 45 ไมครอน ที่ปริมาณต่างๆ กำลังขยาย 100.....	52
รูปที่ 4.4 แสดงภาพการกระจายตัวของผงไม้เต็ง ขนาดอนุภาค 45 ไมครอน ที่ปริมาณต่างๆ กำลังขยาย 100.....	53
รูปที่ 4.5 แสดงภาพการยึดติดระหว่างเฟสของผงไม้และเมตริกซ์ PVC ขนาดอนุภาค 250 ไมครอน กำลังขยาย 500.....	54
รูปที่ 4.6 แสดงภาพการกระจายตัวของผงไม้ ขนาดอนุภาค 45 ไมครอน.....	55
รูปที่ 4.7 แสดงภาพการกระจายตัวของผงไม้ ขนาดอนุภาค 250 ไมครอน.....	55
รูปที่ 4.8 กราฟแสดง Flexural Modulus ของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ ที่ขนาดและปริมาณของผงไม้ต่างๆ.....	56
รูปที่ 4.9 กราฟแสดง Ultimate Flexure stress ของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ ที่ขนาดและปริมาณของผงไม้ต่างๆ.....	57
รูปที่ 4.10 กราฟแสดง Ultimate Flexure strain ของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ ที่ขนาดและปริมาณของผงไม้ต่างๆ.....	58
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงค่าการทนแรงกระแทกของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ ที่ขนาดและปริมาณของผงไม้ต่างๆ.....	61
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงมอดูลัสของแรงกดของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ ที่ขนาดและปริมาณของผงไม้ต่างๆ.....	63
รูปที่ 4.13 กราฟแสดง Ultimate Compression stress ของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ ที่ขนาดและปริมาณของผงไม้ต่างๆ.....	64

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 4.14 TGA curve ของ PVC ผงไม้สักและผงไม้เต็ง จากอุณหภูมิห้อง ถึง 800°C ที่อัตรา 10°C/min ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน.....	68
รูปที่ 4.15 TGA curve ของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ จากอุณหภูมิห้อง ถึง 800°C ที่อัตรา 10°C/min ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน.....	69
รูปที่ 4.16 กราฟการดูดซึมน้ำของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ ที่ขนาดและปริมาณของผงไม้ต่างๆ.....	72
รูปที่ 4.17 พฤติกรรมการดูดซึมน้ำของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้สัก.....	73
รูปที่ 4.18 พฤติกรรมการดูดซึมน้ำของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้เต็ง.....	74
รูปที่ 4.19 แสดงภาพถ่ายของไม้สัก.....	75
รูปที่ 4.20 แสดงภาพถ่ายของไม้เต็ง.....	75
รูปที่ 4.21 แสดงภาพถ่ายของไม้สัก ขนาด 45 ไมครอน ปริมาณ 80 phr.....	76
รูปที่ 4.22 แสดงภาพถ่ายของไม้สัก ขนาด 250 ไมครอน ปริมาณ 80 phr.....	76
รูปที่ 4.23 แสดงภาพถ่ายของไม้สัก ขนาด 45 ไมครอน ปริมาณ 80 phr.....	77
รูปที่ 4.24 แสดงภาพถ่ายของไม้สัก ขนาด 250 ไมครอน ปริมาณ 80 phr.....	77
รูปที่ 4.25 กราฟความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก.....	79
รูปที่ 4.26 กราฟแสดงต้นทุนการผลิตผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้.....	80

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การเพิ่มขึ้นของประชากรและการเติบโตทางเศรษฐกิจภายในแต่ละประเทศ รวมทั้งประเทศไทย ทำให้ความต้องการไม้และผลิตภัณฑ์ที่ใช้ไม้เป็นวัตถุดิบหลักเพิ่มขึ้นอย่างมาก ในขณะที่พื้นที่ป่าไม้ลดลง ทำให้ไม้ธรรมชาติมีอยู่อย่างจำกัด เป็นผลให้เกิดสภาวะการขาดแคลนไม้ จึงต้องพึ่งพาการนำเข้าไม้จากต่างประเทศ ส่งผลให้ไม้ธรรมชาติมีต้นทุนสูงขึ้น [1] ดังนั้นการศึกษาเพื่อพัฒนาวัสดุที่จะนำมาใช้ทดแทนไม้ธรรมชาติจึงจำเป็นอย่างยิ่ง จากการศึกษาที่ปัจจุบันพลาสติกมีบทบาทในชีวิตประจำวันของประชากรเป็นอย่างมาก สิ่งของต่างๆรอบตัวล้วนมีพลาสติกเป็นส่วนประกอบทั้งสิ้น นับตั้งแต่เสื้อผ้า ของเด็กเล่น เครื่องมือเครื่องใช้ เครื่องครัว เฟอร์นิเจอร์ เป็นต้น จากอุปสงค์และอุปทานที่เพิ่มขึ้นมากสำหรับผลิตภัณฑ์พลาสติกต่างๆ เช่น ถุงพลาสติก ขวดน้ำพลาสติก กระดาษ พลาสติกกรองแสง ฯลฯ ซึ่งล้วนเป็นผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากพลาสติกทั้งสิ้น ดังนั้นจึงมีการนำพลาสติกมาทำเป็นผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก หรือเรียกสั้นๆว่า “ไม้พลาสติก” การผลิตไม้พลาสติกเป็นเทคโนโลยีที่เกิดขึ้นในวงการอุตสาหกรรมพลาสติกในต่างประเทศมานานแล้ว แต่ไม้พลาสติกยังเป็นผลิตภัณฑ์ค่อนข้างใหม่ในประเทศไทย การผลิตไม้พลาสติกถือว่าเป็นการนำความรู้ของทั้งไม้และพลาสติกมาประสานรวมกัน ทำให้เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ ซึ่งสามารถใช้งานเป็นวัสดุทางวิศวกรรมได้ [2] หลักการทำไม้พลาสติกคือการนำพลาสติกมาผสมกับวัสดุอื่นที่มีความแข็งแรง ทั้งนี้อาจเป็นวัสดุเหลือใช้ เช่น ขี้เลื่อย ผงไม้ เป็นต้น

ไม้พลาสติกมีข้อดีคือ ทนความชื้น ทนต่อการผุกร่อน สามารถต้านทานสารเคมีได้ มีน้ำหนักเบา ปราศจากเสี้ยน สามารถแปรรูปให้อยู่ในสภาพพร้อมใช้ได้ง่ายและรวดเร็ว ด้วยต้นทุนในการแปรรูปที่ต่ำกว่าไม้ธรรมชาติมาก อีกทั้งไม่มีปัญหาเรื่องปลวกและแมลงรบกวนไปถึงการไม่ทำลายป่าไม้ ระบบนิเวศและสิ่งแวดล้อมด้วย ทำให้ไม้พลาสติกมีอัตราการขยายตัวอย่างรวดเร็ว เพราะสามารถใช้แทนไม้ธรรมชาติได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การประยุกต์ใช้งานทางด้านอุตสาหกรรมขึ้นส่วนก่อสร้างและตกแต่งอาคาร-บ้านเรือน ในปีพุทธศักราช 2548 ตลาดไม้พลาสติก มีมูลค่าสูงถึง 1 พันล้านเหรียญสหรัฐในทวีปอเมริกาเหนือ โดยสองในสามของการผลิตถูกใช้ในอุตสาหกรรมขึ้นส่วนก่อสร้างและตกแต่งอาคาร-บ้านเรือน อีกหนึ่งในสามประยุกต์ใช้ในงานอื่นๆ [3]

ไม้พลาสติกที่ผลิตในประเทศไทยนิยมใช้ พอลิไวนิลคลอไรด์ (Poly(vinyl chloride)) หรือที่รู้จักกันในชื่อ PVC เป็นพอลิเมอร์เมตริกซ์ (Matrix) PVC นับเป็นวัตถุดิบที่สำคัญในอุตสาหกรรมการผลิตต่างๆ

เพราะ PVC เป็นพลาสติกประเภท Commodity ซึ่งเป็นกลุ่มพลาสติกที่มีการใช้ในปริมาณสูงที่ประเทศไทยสามารถผลิต PVC ได้มากเป็นอันดับหนึ่งในภูมิภาคอาเซียน จนสามารถตอบสนองของความต้องการทั้งจากภายในประเทศ และมีเหลือในการส่งออก โดยในปีพุทธศักราช 2550 ประเทศไทยมีกำลังการผลิต PVC ประมาณ 860,000 ตันต่อปี [4] มีการใช้ PVC ภายในประเทศ ประมาณ 480,000 ตัน และการส่งออก PVC 370,560 ตันในปีดังกล่าว [4]

วัสดุที่นิยมนำมาใช้เป็นวัสดุเติมในไม้พลาสติก คือ ผงไม้ ตลาตไม้ในปัจจุบันของประเทศไทยส่วนใหญ่นำเข้ามาจากต่างประเทศ ดังแสดงในตารางที่ 1.1 [5] จะเห็นได้ว่าประเทศไทยนำเข้าไม้มากกว่าปริมาณไม้ที่ผลิตได้ภายในประเทศ โดยในปีพุทธศักราช 2549 ประเทศไทยนำเข้าไม้คิดเป็นมูลค่าประมาณ 1.9 พันล้านบาท [5]

ตารางที่ 1.1 การผลิตและการใช้ไม้ภายในประเทศตั้งแต่ปี 2545-2549

หน่วย : 1000 ลูกบาศก์เมตร

พ.ศ.	ปริมาณไม้ที่ผลิตได้	ปริมาณไม้นำเข้า	ปริมาณไม้ส่งออก
2545	33.6	2,565.9	1,562.2
2546	20.2	2,248.3	1,105.9
2547	1.9	2,030.4	1,791.0
2548	8.9	2,335.3	1,369.9
2549	12.9	1,227.3	1,316.1

ดังนั้น เพื่อเป็นการใช้ไม้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดและเป็นการเพิ่มมูลค่าแก่วัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมไม้ งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาการเตรียมผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติกโดยใช้พอลิไวนิลคลอไรด์ (Poly(vinyl chloride), PVC) และใช้ผงไม้เขตร้อนเป็นตัวเติม ได้แก่ ไม้เนื้ออ่อนคือ ไม้สัก และไม้เนื้อแข็งคือ ไม้เต็ง เพราะผงไม้เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากโรงเลื่อยมีราคาถูก มีความแข็งแรง ความหนาแน่นต่ำ และเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากธรรมชาติ จึงน่าจะเป็นวัสดุที่เหมาะสมในการที่จะนำมาเป็นสารเพิ่มเนื้อให้กับพอลิเมอร์เพื่อนำมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก ส่วนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ จะใช้กระบวนการอัดรีด (Extrusion) การทดสอบสมบัติของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ จะครอบคลุมสมบัติเชิงกลและสมบัติเชิงความร้อน โดยศึกษาขนาดของอนุภาคและอัตราส่วนของผงไม้ที่มีต่อผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- i) เพื่อศึกษาและพัฒนาผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติกจาก PVC/ผงไม้
- ii) เพื่อศึกษาอิทธิพลของปริมาณและขนาดอนุภาคของผงไม้เขตร้อนที่มีต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้
- iii) เพื่อศึกษาความสามารถในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ โดยการ scale up และขึ้นรูปโดยใช้เครื่องจักรระดับโรงงานอุตสาหกรรม

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- i) วัสดุประกอบแต่งในงานวิจัยนี้ใช้ Poly(vinyl chloride) เป็นเมตริกซ์และใช้ผงไม้เป็นวัสดุเติม
- ii) วัสดุเติมที่ใช้คือผงไม้เขตร้อนได้แก่ ไม้เนื้ออ่อน คือ ไม้สัก และไม้เนื้อแข็ง คือ ไม้เต็ง
- iii) ผงไม้ที่มีขนาด 45, 75, 108, 180 และ 250 μm และใช้ ผสมกับ Poly(vinyl chloride) ในอัตราส่วน 20, 40, 60 และ 80 phr
- iv) การหลอมผสมและการขึ้นรูปเป็น Profile ไม้พลาสติกเมื่อ scale up จะใช้กระบวนการอัดรีด (Extrusion)
- v) สมบัติเชิงกล (Mechanical Properties) ที่ทดสอบ ได้แก่
 - สมบัติการโค้งงอ (Flexural properties)
 - สมบัติการทนต่อการกระแทก (Impact Properties)
 - สมบัติการทนต่อแรงกด (Compressive Properties)
 - สมบัติการทนต่อแรงดึง (Tensile Properties)
- vi) สมบัติเชิงความร้อน (Thermal Properties) ที่ทดสอบ ได้แก่
 - อุณหภูมิแปรสภาพแก้ว (Glass Transition Temperature)
 - อุณหภูมิการโค้งงอ (Heat Deflection Temperature)
 - อุณหภูมิการเสื่อมสลาย (Decomposition Temperature)
- vii) สมบัติการดูดซึมน้ำ (Water absorption)
- viii) การศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบกราดลำแสง (Scanning Electron Microscope)
- viii) ความหนาแน่นของวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- i) เพื่อสร้างวัสดุทดแทนไม้ธรรมชาติที่มีสมบัติดีในระดับที่สามารถนำไปใช้งานแทนไม้ธรรมชาติได้ในงานเฟอร์นิเจอร์และงานก่อสร้างตกแต่งและชิ้นส่วนรถยนต์ได้
- ii) การใช้ผงไม้ในประเทศที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากโรงเลื่อยสามารถขยายผลเพื่อช่วยลดต้นทุนวัตถุดิบในอุตสาหกรรมการผลิตไม้พลาสติก PVC/ผงไม้
- iii) เพื่อเพิ่มมูลค่าและเพิ่มการหมุนเวียนในการใช้วัสดุเหลือทิ้งจากโรงเลื่อย

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 วัสดุประกอบแต่ง (Composite Materials)

วัสดุประกอบแต่งเป็นการนำวัสดุที่มีสมบัติแตกต่างกันตั้งแต่ 2 ชนิดหรือมากกว่ามาประกอบกันเป็นวัสดุที่มีโครงสร้างใหม่ โดยทั่วไปวัสดุประกอบแต่งประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก คือ เมตริกซ์ (Matrix) สารตัวเติม (Fillers) และสารเติมแต่ง (Additive) [6] ในปัจจุบันมีการศึกษาและพัฒนาผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติกหรือที่เรียกว่า Wood Plastic Composites เพื่อนำมาใช้แทนไม้ธรรมชาติ

ผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก (Wood Plastic Composites) คือ วัสดุประกอบแต่งที่ผลิตขึ้นจากการนำพลาสติกและไม้มาผสมกัน โดยพลาสติกที่ใช้เป็นตัวเมตริกซ์สามารถใช้ได้ทั้ง พลาสติกชนิดเทอร์โมเซต (Thermoset) หรือชนิดเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) โดยความแตกต่างระหว่างเมตริกซ์ทั้งสองชนิดคือ เทอร์โมเซตไม่สามารถนำกลับมาหลอมขึ้นรูปใหม่ได้ แต่เทอร์โมพลาสติกสามารถนำกลับมาหลอมขึ้นรูปใหม่ได้ ทำให้การผลิตผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก นิยมใช้เมตริกซ์ชนิดเทอร์โมพลาสติก ที่นิยมนำมาใช้ส่วนมากได้แก่ พอลิพรอพิลีน (Polypropylene, PP) พอลิเอทิลีน (Polyethylene, PE) และ พอลิไวนิลคลอไรด์ (Poly(vinyl chloride) หรือ PVC และวัสดุเติมที่ใช้ ได้แก่ ไม้ เลื่อย ผงไม้ หรือเส้นใยธรรมชาติอื่นๆ โดยนำไปผ่านกระบวนการขึ้นรูปทางพลาสติกได้แก่ การฉีดและ/หรือรีดขึ้นรูป สมบัติของไม้พลาสติกที่ได้สามารถนำมาตอกตะปู ทาสีได้ อีกทั้งสามารถทนทานความชื้น ด้านทนปลวกและราหรือการกัดกร่อนได้ การประยุกต์ใช้งานของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก อาทิ เช่น งานไม้พื้น งานไม้ระแนง งานฝ้า กรอบประตู หน้าต่าง บานประตูและรั้ว เป็นต้น

2.1.1 เมตริกซ์ (Matrix)

พอลิเมอร์ที่ใช้เป็นเมตริกซ์ส่วนใหญ่เป็นเทอร์โมพลาสติกในเชิงพาณิชย์ซึ่งผลิตได้ง่าย ราคาถูก ตัวอย่างของเทอร์โมพลาสติกที่นิยมใช้ในการผลิตวัสดุประกอบแต่งคือ PE, PP, PVC และไนลอน เป็นต้น ซึ่งเป็นเม็ดพลาสติกที่สำคัญและมีใช้กันอย่างแพร่หลายที่สุด ข้อได้เปรียบของการใช้เทอร์โมพลาสติกที่ดีกว่าเทอร์โมเซต คือ สามารถขึ้นรูปโดยเทคนิคการฉีด (Injection) และการอัดรีด (Extrusion) ที่ใช้กันทั่วไป ทำให้ลดต้นทุนการแปรรูป สามารถผลิตชิ้นงานที่มีคุณภาพสม่ำเสมอและผลิตได้ในปริมาณมากๆ เทอร์โมพลาสติกชนิดอื่นๆ ที่สามารถใช้เป็นเมตริกซ์ เช่น พอลิอิมิด (Polyimide, PI) ที่เป็นทั้งเทอร์โมพลาสติกและเทอร์โมเซต ในการผลิตวัสดุใช้สำหรับอุตสาหกรรมยานอวกาศ เทอร์โมพลาสติก PI แปรรูปได้ง่ายและทนต่อความร้อนสูง ส่วนเทอร์โมเซต PI มีความเหนียวสูง พอลิซัลโฟน (Polysulfone, PSU) ก็เป็นเทอร์โมพลาสติกอีกชนิดหนึ่ง ที่นำมาใช้เป็นเมตริกซ์ได้ [9-10]

2.1.2 สารตัวเติม (Fillers)

สารตัวเติมหมายถึง สารเติมแต่งที่ผสมกับพลาสติก เพื่อจุดประสงค์ในการลดต้นทุนในการผลิตและปรับปรุงสมบัติทางฟิสิกส์ เช่น ความแข็งแรง ความหนาแน่น การหดตัว และเพิ่มการนำไฟฟ้า เป็นต้น โดยทั่วไปสามารถแบ่งสารตัวเติมออกเป็นหลายชนิด ดังนี้คือ

(i) สารตัวเติมที่เป็นโลหะ (Metallic fillers)

มักใช้เพื่อการปรับปรุงสมบัติ เช่น ความแข็ง โมดูลัสความยืดหยุ่น การนำไฟฟ้าและความร้อน และการป้องกันรังสี ตัวอย่างสารกลุ่มนี้ เช่น ตะกั่ว เงิน ทองแดง และอะลูมิเนียม เป็นต้น [7-8]

(ii) สารตัวเติมที่เป็นคาร์บอน (Carbon fillers)

สารตัวเติมที่รู้จักกันดีคือ Carbon black ซึ่งผลิตจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีสถานะเป็นก๊าซหรือของเหลว ในอุตสาหกรรมพลาสติกนิยมใช้ Carbon Black เป็นสีและผลิตพลาสติกนำไฟฟ้า สารตัวเติมอื่นๆที่เป็นคาร์บอน เช่น แกรไฟต์ ซึ่งใช้ในการเตรียมพอลิเมอร์เพื่อใช้ในงานวิศวกรรมและสมรรถนะสูง [7-8]

(iii) สารตัวเติมที่เป็นแก้ว (Glass filler)

สารตัวเติมที่เป็นแก้วสำหรับผสมกับพอลิเมอร์มีหลายรูปแบบ คือ ผงแก้ว (Glass powder) แก้วเม็ดกลม (Glass spheres) และเส้นใยแก้ว (Fiber glass) ผงแก้วนิยมใช้เมื่อต้องการให้พลาสติกมีความแข็งแรงและทนทานต่อการสึกหรอ ซึ่งจะให้ผลพอกๆกับผงโลหะ แต่ผงแก้วจะให้ความใสสูงกว่ามาก เส้นใยแก้วเป็นสารตัวเติมที่คุ้นเคยกันมากที่สุด การเสริมแรงพลาสติกด้วยเส้นใยแก้ว ทำให้สมบัติเชิงกลของพลาสติกดีใกล้เคียงกับ หรือดีกว่าสมบัติของโลหะ จึงทำให้มีการใช้วัสดุชนิดนี้แทนที่โลหะกันอย่างกว้างขวาง [7-8]

(iv) สารตัวเติมอินทรีย์ (Organic fillers)

สารตัวเติมอินทรีย์ที่เข้ากับพลาสติก เช่น ผงไม้ (Wood flour) เส้นใยจากสำลีและปอ ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้กับเทอร์โมเซต นอกจากนี้ยังมีการพัฒนาและผลิตพลาสติกชนิดที่ย่อยสลายได้เนื่องจากชีวภาพ (Biodegradable plastics) จากการใช้แป้งผสมพลาสติก [7-8]

2.1.3 สารเติมแต่ง (Additives)

พลาสติกที่ได้จากกระบวนการการสังเคราะห์ส่วนใหญ่ยังไม่เหมาะแก่การนำมาใช้งานทันที จะต้องทำการเติมสารเติมแต่ง (Additives) เข้าไปเพื่อให้มีคุณสมบัติที่สามารถเข้ากระบวนการขึ้นรูปได้ เรียกว่า พลาสติกผสม (Compound) คุณสมบัติที่สำคัญของสารเติมแต่งคือ ทนต่อความร้อนสูง ทนต่อสารตัวอื่นได้ดี ไม่ระเหย ไม่แยกตัว ไม่ทำให้คุณสมบัติของพลาสติกเปลี่ยนไป ไม่มีกลิ่น เป็นต้น ตัวอย่างสาร Additives ต่างๆ ที่ใส่ใน PVC เพื่อปรับแต่งคุณสมบัติแตกต่างกัน ได้แก่

(i) **สารเพิ่มความเสถียร (Stabilizer)** ความร้อน รั้งสีที่มีพลังงานสูง มีส่วนทำให้พลาสติกเสื่อมสภาพ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องผสมสารเพิ่มความเสถียรลงในพลาสติก เช่น สารประกอบตะกั่ว สารประกอบ Organic ของดีบุก สารประกอบ Epoxy เป็นต้น ตัวอย่างเช่นสารเพิ่มความเสถียรความร้อน (Heat Stabilizer) ที่ใช้กับ PVC มีหน้าที่ป้องกัน HCl แยกตัวออกมาและรวมตัวเป็นก๊าซ HCl ซึ่งจะกลายเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาให้ HCl แยกตัวต่อไป [7-8]

(ii) **สารหล่อลื่น (Lubricant)** เป็นสารเติมแต่งที่ผสมลงในพอลิเมอร์เพียงเล็กน้อยทำหน้าที่ลดการเสียดสีทั้งภายในและภายนอกของพลาสติก

(iii) **สารสี (Colorant)** สารสีมีทั้งแบบไม่ละลายซึ่งเรียกว่า สีฝุ่น(Pigments)และแบบละลายซึ่งเรียกว่า สารสี (Colorant) ใช้สำหรับย้อมสี

(iv) **สารทำให้อ่อนตัว (Softener)** เทอร์โมพลาสติกที่มีคุณสมบัติเป็น Dipolar เช่น PVC สามารถใช้เอสเทอร์ซึ่งมี Dipolar อยู่ในโมเลกุล โดยโมเลกุลของสารทำให้อ่อนตัวจะทำให้โมเลกุลพลาสติกลดลง [7-8]

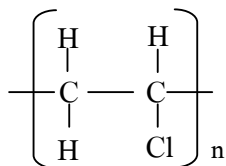
ตามปกติผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติกจะมีสมบัติดีกว่าวัสดุพื้นฐานที่เป็นองค์ประกอบ แต่สมบัติเชิงกลก็ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลัก 2 ประการคือ

i) การกระจายตัวหรือการจัดเรียงตัว (Orientation) สารตัวเติมจะมีการกระจายตัวอยู่ในเมตริกซ์ใน 2 รูปแบบคือ แบบมีทิศทางเป็นระเบียบ (Oriented) และแบบสุ่ม ไม่มีทิศทางแน่นอน (Random) ตามปกติการเรียงตัวของสารตัวเติมพวกเส้นใย จะมีทิศทางเป็นระเบียบในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง จึงเสริมให้เกิดความแข็งแรงในทิศทางของการเรียงตัวนั้นเป็นอย่างมาก [9]

ii) แรงกระทำ ระหว่างผิวสัมผัสของสารตัวเติมกับเมตริกซ์ (Interaction) แรงกระทำระหว่างผิวสัมผัสของสารตัวเติมกับเมตริกซ์นี้ คือความสามารถในการเกาะยึดตัวของสารตัวเติมในเมตริกซ์นั่นเอง [9]

2.2. พอลิไวนิลคลอไรด์ (Poly(vinyl chloride),PVC)

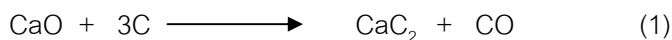
PVC เป็นพลาสติกประเภทเทอร์โมพลาสติก ที่มีลักษณะสายโซ่ตรง การที่มีคลอรีนในโครงสร้างทำให้โครงสร้างของ PVC มีความแข็งแรงมากขึ้นเพราะมีสภาพขั้ว [11,14] โครงสร้างของ PVC แสดงในรูปที่ 2.1 ดังนี้



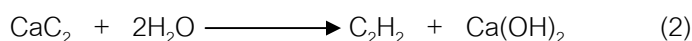
รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของ PVC

โมโนเมอร์ที่ใช้ในการผลิต PVC คือ ไวนิลคลอไรด์โมโนเมอร์ (Vinyl chloride Monomer, VCM) โดยการผลิต VCM ในอุตสาหกรรม มีวิธีการผลิต 2 วิธี ได้แก่

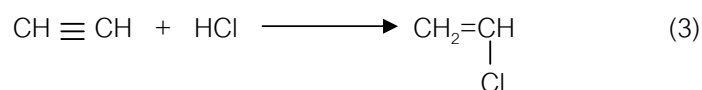
i) การผสมกรดเกลือกับอะเซทิลีน (Acetylene) โดยอะเซทิลีนที่ใช้เป็นวัตถุดิบได้จากการเผาถ่านโค้กกับแคลเซียมออกไซด์ ที่อุณหภูมิประมาณ 3000 องศาเซลเซียส ในเตาไฟฟ้า ดังสมการการเกิดปฏิกิริยา [12]



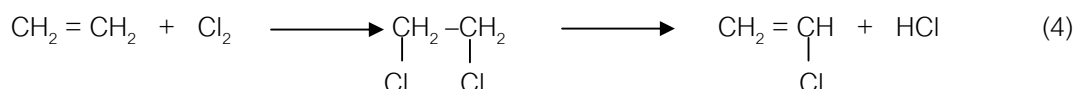
แล้วนำ CaC_2 ไปทำปฏิกิริยากับน้ำ จะได้อะเซทิลีน



นำอะเซทิลีนไปผสมกรดเกลือจะได้ PVC ดังสมการ



ii) การนำเอทิลีน (Ethylene) ทำปฏิกิริยากับคลอรีนในวัฏภาคของเหลว โดยใช้เหล็กคลอไรด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิประมาณ 30-50 องศาเซลเซียสจะได้เอทิลีนไดคลอไรด์ จากนั้นทำดีไฮโดรคลอรีเนต เพื่อเอกรีดไฮโดรคลอริกออกจากกระบวนการ โดยเผาที่อุณหภูมิ 300-600 องศาเซลเซียส [12] ดังแสดงตามสมการ



การมีหมู่คลอรีนเป็นหมู่อิสระบนสายโซ่หลัก ทำให้ PVC มีสมบัติที่แตกต่างจาก PE และ PP ซึ่งมีสายโซ่หลักเป็นคาร์บอนเหมือนกัน อะตอมคลอรีนค่อนข้างใหญ่ จึงไปขัดขวางการจัดเรียงตัวสายโซ่โมเลกุล PVC มีความว่องไวต่อตัวทำละลาย ซึ่งมีความสำคัญต่อการประยุกต์ใช้งาน เนื่องจากการผลิต PVC มักจะผสมพลาสติกไซเซออร์ ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวทำละลาย เพื่อให้พลาสติกนิ่มและยืดหยุ่น เรียกพลาสติกชนิดนี้ว่า PVC นิ่ม (Plasticized PVC) ส่วน PVC ที่ไม่ได้ปรับปรุงสมบัติโดยการใช้ตัวทำละลาย เรียกว่า PVC แข็ง (Rigid PVC)

โดยทั่วไปจะแบ่ง PVC ออกเป็น 2 ชนิด ดังนี้

i) PVC นิ่ม (Plasticized PVC) เป็น PVC ที่มีการเติมพลาสติกไซเซออร์ ทำให้มีความนิ่มและยืดหยุ่น เนื่องจากเกิดการบวมพองในตัวทำละลาย นอกจากนี้โมเลกุลจะลดการเกี่ยวพันกัน และมีการทำลายพันธะเคมีระหว่างโมเลกุล แต่ยังมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลมากพอที่จะทำให้ PVC มีสถานะเป็นของแข็งที่นิ่ม ไม่เปราะและแข็ง [7,14]

ii) PVC แข็ง (Rigid PVC) การมีอะตอมคลอรีนทำให้โมเลกุลของ PVC มีความเป็น อัดแน่นสูง และมีปริมาณผลึกต่ำ แต่อะตอมคลอรีนมีสภาพขั้ว จึงทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล ทำให้ PVC มีความแข็ง มีค่าจุดแปรสภาพแก้ว (Glass transition Temperature, T_g) อยู่ในช่วง 60-85 °C และ อุณหภูมิหลอมเหลว (Melting temperature, T_m) อยู่ในช่วง 170-190 °C ดังนั้นอุณหภูมิการใช้งานของ PVC จะต่ำกว่าค่า T_g เมื่อใช้งาน PVC ที่อุณหภูมิสูงกว่า T_g มีผลทำให้ PVC แข็งมีความแข็งและเปราะ [7,14]

2.2.1 สมบัติของ PVC

PVC ไม่มีสี มีความเป็นผลึกต่ำ มีความแข็งแรงสูง แต่เปราะ เพราะอุณหภูมิที่ใช้งานปกติ ต่ำกว่า T_g มีความเสถียรทางความร้อนต่ำ PVC เป็นพอลิเมอร์ที่ไม่ละลายน้ำเพราะมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลมาก แต่สามารถละลายได้ในสารละลายที่มีความเป็นขั้วอ่อนๆ สมบัติที่สำคัญของ PVC ทั้งสองชนิดคือ ทนต่อการติดไฟ เนื่องจาก PVC มีคลอรีนอะตอมในโครงสร้างทำให้ในขณะเผาไหม้จะเกิด ก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์ ซึ่งมีความหนาแน่นสูงกว่าอากาศมาก จึงเป็นชั้นป้องกันไม่ให้ออกซิเจนเข้าไปในบริเวณเปลวไฟ เมื่อติดไฟแล้วจะสามารถดับด้วยตนเองได้ และ PVC ยังทนทานต่อสารเคมี [11-13]

2.2.2 การนำ PVC ไปใช้งาน

การประยุกต์ใช้งานของ PVC แข็ง สามารถนำไปผลิตเป็นชิ้นงาน profile โดยกระบวนการ อัดรีด (Extrusion) เช่น ท่อแข็ง และเนื่องจาก PVC มีสมบัติทนทานต่อการติดไฟ ทำให้มีการนำ PVC ไป ประยุกต์ใช้งานในหลายรูปแบบที่เกี่ยวข้องกับการทนทานการติดไฟ เช่น ใช้เป็นหุ้มสายไฟและสายเคเบิล ท่อหุ้มสายไฟ เป็นต้น ชิ้นงานจากการเป่า (Blow molding) เช่น ขวดใส่บรรจุแชมพู น้ำมันพืช แกลลอน บรรจุน้ำมัน ผลิตภัณฑ์จากการทำเทอร์โมฟอร์ม (Thermoform) และจากการฉีดเข้าเบ้า (Injection molding) เช่น ข้อต่อท่อน้ำ เป็นต้น การประยุกต์ใช้ PVC นิยม ด้วยการอัดรีด เช่น เคลือบสายไฟและเคเบิล สายน้ำเกลือ ท่อใส่น้ำ หรือขึ้นรูปชิ้นงานด้วยการรีดแผ่น (Calendering) เช่น ทำหนังเทียมหุ้มเบาะ และ วอลเปเปอร์ นอกจากนี้การที่ PVC มีสารอื่นๆ ผสมอยู่ เช่น พลาสติไซเซอร์ ฟิลเลอร์ สี และสารหล่อลื่น เป็นต้น ทำให้ PVC ที่นำไปใช้ไม่เหมาะกับการทำเป็นภาชนะบรรจุอาหาร โดยปริมาณการใช้งาน PVC เมื่อคิด เทียบกับปริมาณการผลิตทั้งหมด พบว่าประมาณหนึ่งในสามของ PVC ที่ผลิตขึ้นทั้งหมดใช้ทำแผ่นฟิล์ม กระเบื้องปูพื้น หนังเทียม ผ้ากันน้ำ และเสื้อกันฝน อีกประมาณหนึ่งในสามใช้ทำท่อ ใช้หุ้มสายเคเบิลและ ลวดไฟฟ้า [11-13]

2.3. โครงสร้างและสมบัติของไม้

ไม้เป็นวัสดุจากธรรมชาติที่มีค่ายัง จัดเป็นวัสดุที่สำคัญในการก่อสร้าง เพราะมีน้ำหนักน้อย ตัดกลึง หรือเปลี่ยนแปลงได้ง่าย มีความสวยงาม ตลอดจนสามารถปรับปรุงคุณภาพให้ดีขึ้น การจำแนกไม้ในประเทศไทยสำหรับใช้ในวงการก่อสร้างคำนึงถึงความแข็งแรงทางกลและความทนทานของไม้เป็นหลัก

กล่าวคือ ไม้เนื้อแข็ง หมายถึง ไม้ที่มีน้ำหนักมาก (ความถ่วงจำเพาะสูง) มีสมบัติเชิงกลและความทนทานดี ไม้เนื้ออ่อน หมายถึง ไม้ที่มีน้ำหนักเบา (ความถ่วงจำเพาะต่ำ) มีสมบัติเชิงกลและความทนทานด้อยกว่า กรมป่าไม้จำแนกไม้ไทยเป็น 3 ประเภท ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ประเภทของไม้ตามเกณฑ์ของกรมป่าไม้ [15]

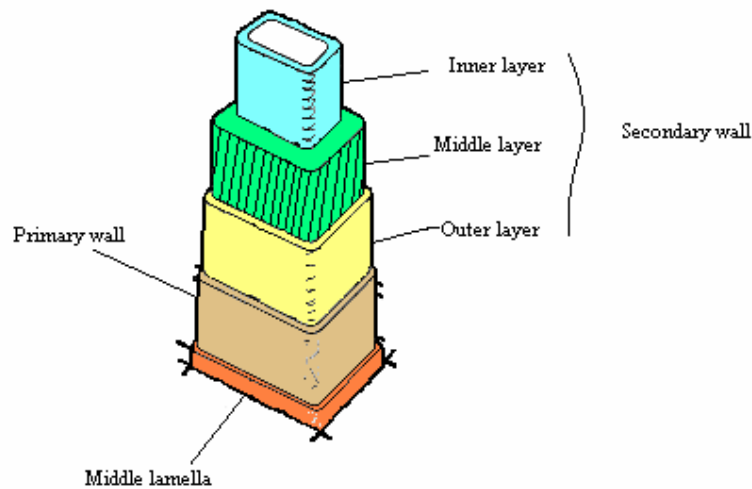
ประเภทของไม้	ความแข็งแรงต่อแรงตัด (กก./ซม. ²)	ความแข็งแรงต่อแรงตัด (ปาสคาล)	ความทนทาน (ปี)
ไม้เนื้อแข็ง	สูงกว่า 1000	สูงกว่า 9.8×10^7	สูงกว่า 6
ไม้เนื้อแข็งปานกลาง	600-1000	5.8×10^7 - 9.8×10^7	2-6
ไม้เนื้ออ่อน	ต่ำกว่า 600	ต่ำกว่า 5.8×10^7	ต่ำกว่า 2

ข้อบัญญัติของกรุงเทพมหานคร จำแนกประเภทไม้ไทยออกเป็น 5 ประเภท ตามความแข็งแรงของสมบัติเชิงกล ดังนี้

- i) ไม้เนื้อแข็งมาก ได้แก่ กระพี้เขาวงม เขลียง ตีนนก บุนนาค
- ii) ไม้เนื้อแข็ง ได้แก่ แดง เต็ง ประดู่ มะค่าโมง รั้ง
- iii) ไม้เนื้อแข็งปานกลาง ได้แก่ กว้าว ตะเคียนทอง ตะแบก ตาเสือ นนทรี
- iv) ไม้เนื้ออ่อน ได้แก่ กระเจา กะบาก ยางแดง สัก อินทนิล
- v) ไม้เนื้ออ่อนมาก ได้แก่ กะท้อน จำปา จิกนม ยมหอม

2.3.1 โครงสร้างและองค์ประกอบของไม้

ไม้โดยทั่วไปประกอบด้วยธาตุหลายชนิด ดังนี้ คาร์บอน 49-50.5% ออกซิเจน 4.35-44.5% ไฮโดรเจน 5.8-6.1% ไนโตรเจน 0.2-0.5 % โดยเส้นใยไม้ (Wood fiber) มีโครงสร้าง ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งประกอบด้วยชั้นต่างๆ หลายชั้น ได้แก่ ผนังชั้นที่ 1 เรียกว่า Primary wall ผนังชั้นที่ 2 เรียกว่า Secondary wall โดยในชั้นของ Secondary wall แบ่งได้อีก 3 ชั้นได้แก่ Inner layer, Middle layer และ Outer layer และผนังชั้นนอกสุด Middle lamella โดยชั้นที่สำคัญที่สุดคือ ชั้น Middle layer ซึ่งมีความหนาแน่นมากที่สุด มีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบมากถึง 50 % และเป็นส่วนที่แสดงความเหนียวภายในโครงสร้างของไม้ [17-18]



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของไม้ (<http://www.doitpoms.ac.uk>)

โดยทั่วไปไม้ประกอบด้วยเซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) ลิกนิน (Lignin) และสารประกอบอื่นๆ เล็กน้อยเช่น เพคติน (Pactin), แป้ง (Starch) ดังแสดงในตารางที่ 2.2

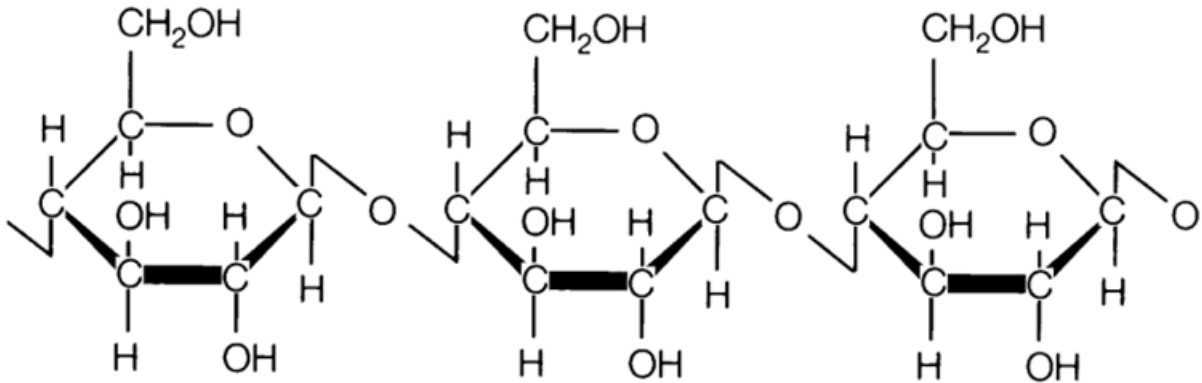
ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบต่างๆในไม้เนื้ออ่อนและไม้เนื้อแข็ง [36]

องค์ประกอบ	ไม้เนื้ออ่อน (% โดยน้ำหนัก)	ไม้เนื้อแข็ง (% โดยน้ำหนัก)
Cellulose	40-45	45-50
Hemicellulose	15-20	15-30
Lignin	24-32	22-30
Extractives	0-5	0-10

องค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญของไม้เนื้อแข็งและไม้เนื้ออ่อน แสดงรายละเอียดดังต่อไปนี้

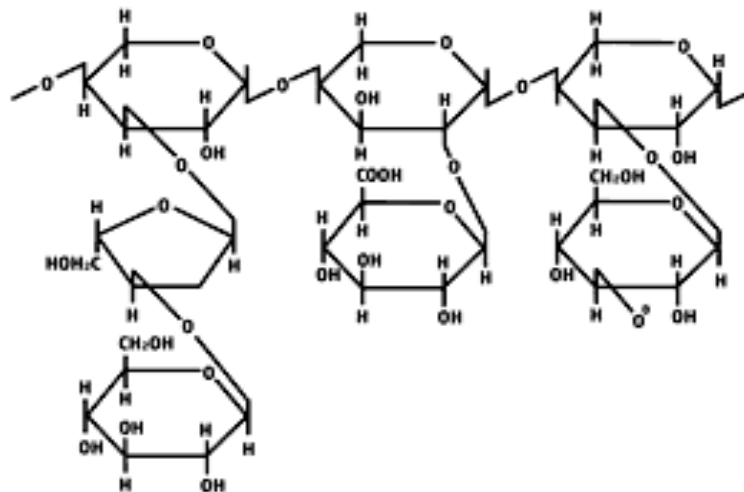
i). **เซลลูโลส (Cellulose)** เป็นสารประกอบพอลิแซคคาไรด์ (Polysaccharides) มีลักษณะเป็นเส้นตรงที่ประกอบด้วยหน่วยซ้ำๆ กัน มีสูตรโมเลกุลทั่วไปคือ $(C_6H_{12}O_6)$ เป็นโครงสร้างในเนื้อเยื่อพืช โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลสแสดง ดังรูปที่ 2.3 เซลลูโลสมีหมู่ไฮดรอกซิลถึง 3 หมู่ สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนได้ แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของเซลลูโลสจึงมีมากและโครงสร้างของเซลลูโลสยังจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ จึงทำให้เซลลูโลสมีความเป็นผลึกสูงมากประมาณร้อยละ 60 – 80 มักจะเกิดการสลายตัวก่อนถึงอุณหภูมิหลอมตัว มีความสามารถในการละลายต่ำ และทนทานต่อสารเคมี โดยสารเคมีที่

สามารถละลายเซลลูโลสได้ เช่น กรดซัลฟิวริก กรดเกลือ เป็นต้น เซลลูโลสธรรมชาติมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยต่างกัน การกระจายน้ำหนักโมเลกุลของเซลลูโลสมีความสำคัญต่อสมบัติทางกายภาพ [17-18]



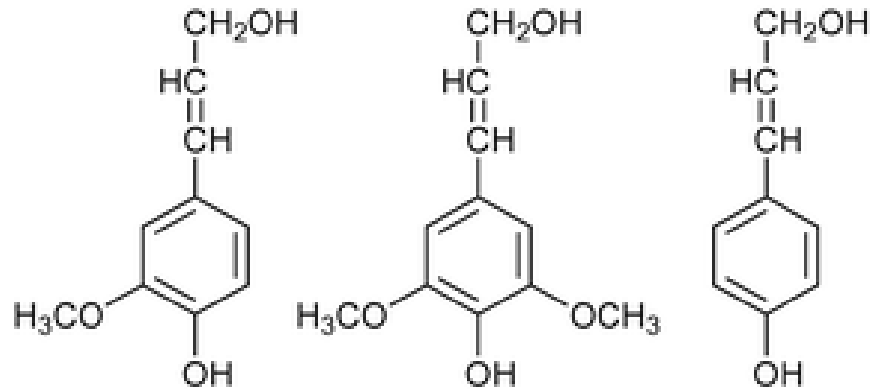
รูปที่ 2.3 โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส (<http://www.greenspirit.org.uk>)

ii). **เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose)** เป็นพอลิแซ็กคาไรด์ที่มีน้ำตาลชนิดต่างๆ หลายชนิดผสมกัน เช่น กลูโคส (Glucose) กาแลกโตส (Galactose) แมนโนส (Mannose) ไชโลส (Xylose) อะราบิโนส (Arabinose) รวมทั้งกรดกลูคูโรนิก (Glucuronic) และกาแลกทูโรนิก (Galacturonic) ซึ่งมีโครงสร้างเป็นอัสตึนฐาน สามารถอมน้ำและพองตัวได้ดี เฮมิเซลลูโลสพบในเนื้อเยื่อของพืชโดยรวมอยู่กับสารอื่นๆ เช่น ลิกนิน เซลลูโลส เป็นโครงสร้างของผนังเซลล์ พบมากในแกลบ ชังข้าวโพด เฮกไซเซน [17-18] สูตรทางเคมีคือ $(C_6H_{12}O_5)_n$ โครงสร้างทางเคมีของเฮมิเซลลูโลสดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 โครงสร้างทางเคมีของเฮมิเซลลูโลส (www.lentinplus.net)

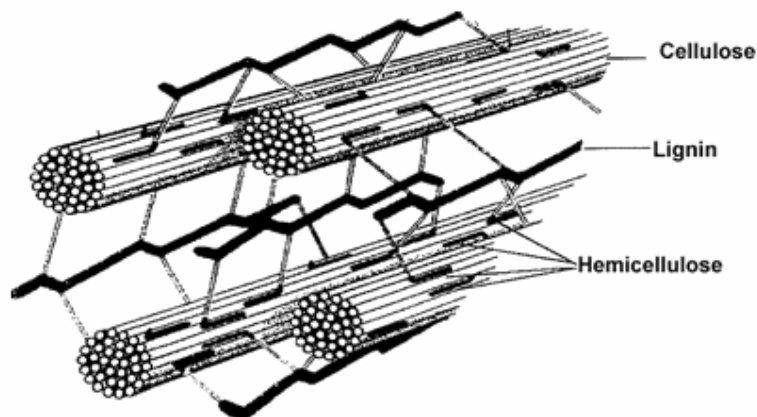
iii). **ลิกนิน (Lignin)** เป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่ประกอบด้วย Phenyl propane units มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ลิกนินเป็นสารที่ประกอบด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจนจับตัวกันเป็นโครงสร้างสามมิติด้วยพันธะอีเทอร์ และพันธะคาร์บอน-คาร์บอน ลิกนินพบมากในส่วนที่เรียกว่า Middle lamella ทำหน้าที่เป็นกาวเชื่อมต่อระหว่างเส้นใย ลิกนินเป็นสารอะโรมาติก จึงไม่ละลายน้ำ ไม่มีความยืดหยุ่น ทำให้พืชที่มีลิกนินมากมีความแข็งแรงทนทาน ลิกนินมีค่าจุดแปรสภาพแก้ว (Glass transition Temperature, T_g) ประมาณ 130-150 องศาเซลเซียส โครงสร้างทางเคมีของลิกนิน [17-18] ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 โครงสร้างทางเคมีของลิกนิน (<http://www.engin.umich.edu>)

iv). **สารสกัดได้ (Extractive)** ส่วนประกอบในไม้หรือพืชที่สามารถละลายได้ในตัวทำละลายอินทรีย์ เช่น อะซีโตน (Acetone) แอลกอฮอล์ไดคลอโรมีเทน (Alcohol Dichloromethane) และคลอโรฟอร์ม (Chloroform) เป็นต้น สารสกัดที่ได้นี้มักเป็นชันสนหรือยางไม้ [18]

ไม้แต่ละชนิดจะมีอัตราส่วนระหว่างเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินไม่เท่ากัน ขึ้นกับ ชนิดและอายุของไม้ โดยไม้ที่มีลิกนินมากจะมีความแข็งสูง สำหรับไม้ชนิดเดียวกัน ไม้ที่มีอายุมากจะมีปริมาณลิกนินมาก การจัดเรียงตัวของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินในไม้ ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การจัดเรียงตัวของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินในไม้ (<http://www.life.ku.dk>)

2.3.2 สมบัติของไม้

ไม้เกิดจากต้นไม้หลายชนิด สมบัติในด้านต่างๆ ที่จะนำมาใช้ประโยชน์จึงมีความแตกต่างกัน ไม้แต่ละชนิดย่อมเหมาะสมกับงานแต่ละอย่าง สมบัติของไม้ที่จำเป็นสำหรับการใช้พิจารณาเลือกไม้เพื่อใช้ในงานก่อสร้าง ได้แก่

i.) **ความชื้น** หมายถึง น้ำที่มีอยู่ในไม้ มีความสัมพันธ์ต่อสมบัติของไม้ในด้านต่างๆ ปริมาณความชื้นในไม้ แสดงเป็นค่าร้อยละของน้ำหนักของเนื้อไม้แท้ๆ ตามปกติไม้จะมีความชื้นอยู่ในตัวเสมอ ความชื้นอาจมีค่าแตกต่างกันระหว่างร้อยละ ๖๐-๓๐๐ โดยสามารถคำนวณความชื้นได้ดังสมการ

$$\text{ปริมาณความชื้น(\%)} = \frac{\text{น้ำหนักไม้ที่มีความชื้น} - \text{น้ำหนักไม้ที่อบแห้งด้วยเตาอบ}}{\text{น้ำหนักไม้ที่อบแห้งด้วยเตาอบ}} \times 100$$

การเลือกไม้ควรพยายามให้ไม้มีปริมาณความชื้นใกล้เคียงกับปริมาณความชื้นที่สภาวะใช้งานจริง เพื่อป้องกันไม่ให้ไม้ยี้ดหรือหดตัวมาก ซึ่งจะทำให้ไม้บิด โก่งโค้งงอ เกิดการเสียรูป [15]

ii.) **ความหนาแน่นและความถ่วงจำเพาะ** เป็นสมบัติเกี่ยวกับน้ำหนักและปริมาตรของไม้ โดยมีปัจจัยขึ้นกับน้ำหรือปริมาณความชื้น ความถ่วงจำเพาะของไม้มีค่าความแตกต่างตามชนิดหรือประเภทของเนื้อไม้ จากการศึกษาพบว่าไม้ไทยมีค่าความถ่วงจำเพาะตั้งแต่ 0.5 ถึง 1.2 เป็นส่วนใหญ่ ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 การจำแนกกลุ่มไม้ตามความถ่วงจำเพาะ [15]

กลุ่มไม้	ถ.พ.	ชนิดไม้
1	0.9	เขลิง แดง เต็ง บุนนาค พลวง มะค่าแต้ รัง ฯลฯ
2	0.8	กราด ตะเคียนหนู ประดู่ พะยอม สักขี้ควาย ฯลฯ
3	0.7	กระเจา กะบาก ตะเคียนทอง ตะแบก ฯลฯ
4	0.6	กัวร์ พญาไม้ สัก อินทผล ฯลฯ

iii.) **ความแข็งแรง** หมายถึง ความสามารถของไม้ที่จะรับน้ำหนักหรือแรงภายนอก เช่น แรงน้ำ แรงลม น้ำหนักสิ่งของหรือแรงที่กระทำ เป็นสมบัติสำคัญที่จะต้องพิจารณาเมื่อนำไม้มาใช้ก่อสร้าง บ้านเรือน หรืองานอื่นๆ ในลักษณะเดียวกัน แรงที่กระทำต่อไม้ที่ใช้ในงานก่อสร้าง แยกได้เป็น 3 ประเภท คือ **แรงดึง** ซึ่งมีผลทำให้ไม้แยกออกจากกัน เช่น ไม้ที่ใช้ยึดโยงต่างๆ **แรงบีบ** มีผลให้ไม้บีบตัวเข้าหากัน และ **แรงเชือด** มีผลทำให้ไม้ส่วนหนึ่งไถลเลื่อนเคลื่อนออกไปจากส่วนข้างเคียง ไม้ที่ใช้งานบางกรณี เช่น ในลักษณะ คาน ได้รับแรงทั้ง 3 ประเภทเข้ากระทำพร้อมๆ กัน กล่าวคือ รับแรงบีบทางด้านบนหรือด้านโค้งเข้า แรงดึงทางด้านล่างหรือด้านโค้งออกและแรงเชือด ตามแนวยาวของคาน นอกจากนี้ ยังมีสมบัติที่เกี่ยวข้องกับความแข็งแรงอยู่อีก 3 อย่าง คือ ความยากง่ายในการทำให้ไม้เสียรูป เรียกว่า **ความดื้อ** หรือ **ความยืดหยุ่น** ความยากง่ายในการทำให้ไม้แตกหักออกจากกัน เรียกว่า **ความเหนียว** หรือ **ความเปราะ** และความสามารถต้านทานต่อความชื้นขุ่นจนจะไซ เรียกว่า **ความแข็ง** คุณสมบัติทั้งสามนี้ รวมเรียกว่า สมบัติเชิงกลของไม้ ค่าสมบัติเชิงกลที่ได้จากการทดลอง ใช้เป็นเกณฑ์ ในการเปรียบเทียบคุณสมบัติไม้ ทำให้สามารถเลือกใช้ไม้ได้ตามความเหมาะสม วิศวกรได้อาศัยใช้ในการคำนวณ กำหนดขนาดตัวไม้ที่ใช้เป็นส่วนต่างๆ ของอาคาร [21-22]

iv.) **ความทนทาน** หมายถึง ความสามารถในการต่อต้านหรือต้านทานการทำลายไม้ที่สำคัญ คือ **รา** ซึ่งเป็นพืชชั้นต่ำ ทำให้ไม้ผุ หรือเสียสี **มอด** และ **ปลวก** เป็นแมลงซึ่งอาศัยกินสารในไม้หรือเนื้อไม้เป็นอาหาร การที่จะทำให้ไม้มีความทนทานแตกต่างกันนั้น เนื่องจากปัจจัย 2 ประการ คือ **ความแน่น** และ **สารแทรกในเนื้อไม้** ไม้ที่มีความแน่นสูง หรือมีช่องรูอุดตัน ย่อมให้น้ำและอากาศถ่ายเทได้ยาก จึงมีความทนทานสูงกว่าไม้ที่เบาหรือมีโครงสร้างโปร่ง แต่ที่สำคัญที่สุด คือ ชนิดและปริมาณสารแทรกที่มีในเนื้อไม้ เกี่ยวกับความทนทานของไม้นี้ สามารถแบ่งสภาพแวดล้อมของสถานที่นำไม้ไปใช้เป็น 6 สภาพ คือ **ในร่ม** หมายถึง เป็นที่พ้นจากแดดฝน ไม่มีโอกาสถูกน้ำซ้่าซาก **กลางแจ้ง** ถูกแดดถูกฝนได้ตามกาลเวลา แต่จะไม่เปียกชื้นอยู่นาน **ที่แฉะชื้น** คือ ใช้ติดดินหรือที่เปียกชุ่มอยู่เสมอเป็นเวลานานๆ ในน้ำจืดและน้ำเค็ม เช่น เสาเขื่อน สะพาน หรือเรือ และ **ใช้ได้ดิน** เช่น เสาเข็ม ไม้ที่ใช้ในร่มจัดว่าอยู่ในที่ปลอดภัยที่สุด กล่าวคือ ไม่มีโอกาสผุหรือขึ้นรา ถ้าเป็นแก่นก็มักปลอดภัยจากมอด หากไม่มีมาตรการป้องกันปลวกที่ดีก็อาจได้รับอันตรายจากปลวกได้ ไม้ที่ใช้กลางแจ้งและที่แฉะชื้น มีความ

ล่อแหลมต่ออันตรายจากกรามอด และ ปลวกน้อยมากตามลำดับ ไม้ที่จมอยู่ใต้น้ำปลอดภัยจากกรามอด และปลวก แต่ยังมีเพียงทำลายได้อยู่ ไม้ที่อยู่ใต้ดินในระดับลึกกว่าดินผิวพื้นระดับที่มีซากพืช หรืออยู่ใต้ระดับน้ำในดินจะปลอดภัยจากตัวการทำอันตรายทั้งปวง [21-22]

2.4 กระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก

การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติกสามารถขึ้นรูปได้หลายวิธี เช่นเดียวกับการขึ้นรูปพลาสติกทั่วไป ในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่เป็นเครื่องมือในการขึ้นรูปขึ้นงานโพรไฟล์ (Profile) และใช้การอัดขึ้นรูป (Compression Molding) เพื่อเตรียมชิ้นงานทดสอบสมบัติเชิงกลต่างๆ โดยก่อนที่จะทำการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติกจะต้องทำการผสมแห้งวัตถุดิบเสียก่อน ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

(i) การผสม (Mixing) การผสมเป็นการกวนสารเติมแต่งกับพลาสติกให้คลุกเคล้ากัน ส่วนใหญ่มักจะเป็นการผสมของแข็งหลายชนิดเข้าด้วยกัน การผสมทำให้เกิดการกระจายตัวของอนุภาคของวัสดุต่างชนิดกัน ให้เข้ากันอย่างทั่วถึง แต่ยังคงแยกอนุภาคของสารแต่ละชนิดให้เห็นอย่างชัดเจน ศัพท์เทคนิคที่ใช้แทนการผสมในลักษณะนี้ มีหลายคำคือ Extensive mixing, Blending, Mixing และ Distributive mixing

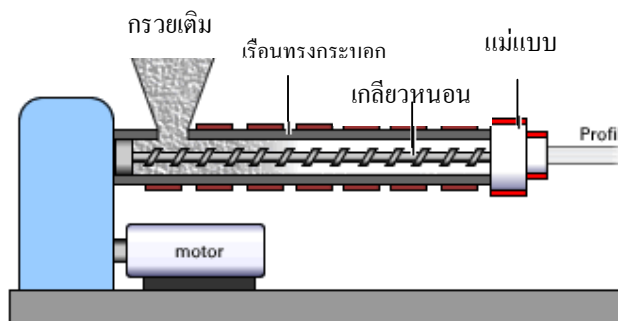
(ii) การคอมปาวด์ เป็นการผสมพลาสติกและสารเติมแต่งชนิดต่างๆเข้าด้วยกัน แต่ทำให้การกระจายตัวของอนุภาคสารเติมแต่งในพลาสติกเป็นเนื้อเดียวกัน จึงมักเรียกการผสมแบบนี้ว่าการพลาสติกเคท (Plasticating) ซึ่งทั้งสารเติมแต่งและพลาสติกที่นำมาผสมกันจะเกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางฟิสิกส์เป็นการผสมที่อาศัยแรงเฉือนในการบดผสมองค์ประกอบชนิดต่างๆ เข้าด้วยกัน ในขณะที่ทำการผสมพลาสติกจะอยู่ในสภาวะหลอม ดังนั้นการคอมปาวด์เป็นการผสมในระดับที่ละเอียดกว่าการผสมธรรมดา การคอมปาวด์แบบต่อเนื่อง เป็นการคอมปาวด์โดยใช้เครื่องอัดรีด (Extruder) ซึ่งเครื่องอัดรีดที่ใช้ในการเตรียมคอมปาวด์พลาสติก มี 3 ชนิด คือ เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว (Single screw extruder) เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ (Twin screw extruder) และ เครื่องอัดรีดหลายเกลียวหนอน (Multi screw extruder) โดยทั่วไปในการเตรียมคอมปาวด์พลาสติกมักจะใช้เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่เป็นหลัก [6,8,23]

ตามหลักแล้วเทอร์โมพลาสติกทุกชนิดสามารถทำการอัดรีดขึ้นรูปได้ แต่มีข้อจำกัดว่าพลาสติกนั้นเมื่ออ่อนตัวจะต้องมีความหนืดสูง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเลือกชนิดของพลาสติกที่เหมาะสมสำหรับงานอัดรีดพลาสติกที่นำมาเข้ากระบวนการอัดรีดขึ้นรูป ส่วนใหญ่จะเป็น PVC PE และ PP

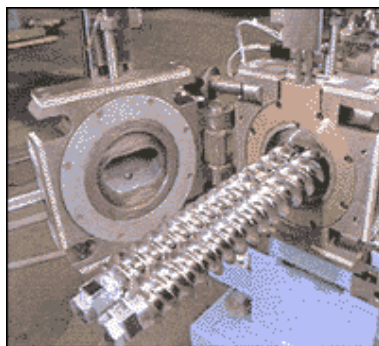
2.4.1 การผสมโดยใช้เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่

เครื่องอัดรีด (Extruder) ประกอบด้วย เกลียวหนอน (Screw) อยู่ในเรือนทรงกระบอก

(Barrel) เกลียวหนอนหมุนอัดหลอมและผสมพลาสติกซึ่งเติมลงมาจากกรวยเติม (Hopper) ประกอบอยู่ด้านบนกระบอกลอดและดันพลาสติกเหลวออกไปผ่านหัวใด เครื่องอัดรีดอย่างเดียวยังไม่ใช่เครื่องผลิตชิ้นงานที่สำเร็จ เพราะเป็นเพียงส่วนประกอบเดียวของระบบ Extrusion ซึ่งยังต้องมีเครื่องมือสร้างรูปทรงที่เรียกว่า หัวตาย(Die) ประกอบเข้ากับเครื่องอัดรีด เครื่องปรับขนาด ชุดหล่อเย็น เครื่องดึง เครื่องม้วน และเครื่องตัด จึงจะครบทั้งระบบ เครื่องอัดรีดมีทั้งแบบเกลียวหนอนเดี่ยวและแบบเกลียวหนอนหลายตัวอยู่ในกระบอกลอดเดียวกัน แต่ที่นิยมนำมาขึ้นรูปพลาสติก ได้แก่ แบบเกลียวหนอนคู่ (Twin Screw Extruder) หลักการของเครื่องคือ มีเกลียวหนอนสองตัวหมุนอยู่ในเรือนทรงกระบอกลอด ทำการอัดหลอม และผสมพลาสติกซึ่งเติมลงมาทางด้านบนของกระบอกลอด และดันออกทางด้านหน้า กระบอกลอดอัดพลาสติกซึ่งติดตั้งหัวตาย ที่มีลักษณะเป็นช่องรีดพลาสติกออกมาเป็นเส้นหรือแผ่นโดยมีรูปหน้าตัดตามรูปหัวตาย เครื่องรีดแบบเกลียวหนอนคู่ประกอบด้วย เกลียวหนอน กระบอกลอด (Cylinder) มอเตอร์ เพื่อทดความเร็ว เครื่องทำความร้อน (Heater) และกรวยเติมสาร (Hopper)



รูปที่ 2.7 เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว (Single Screw Extruder)



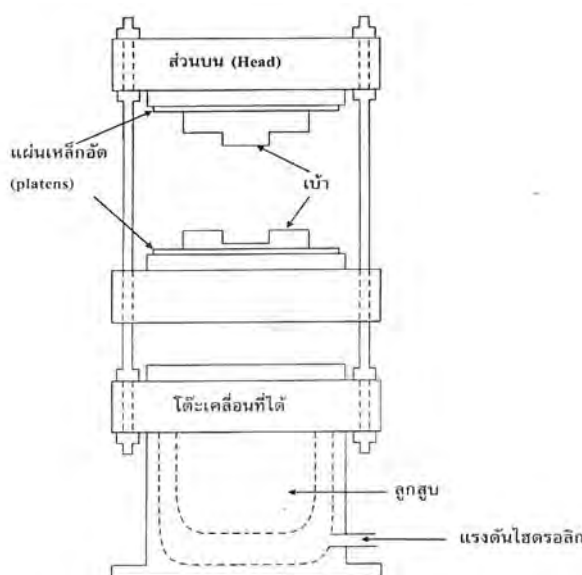
รูปที่ 2.8 เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ (Twin Screw Extruder)

ลักษณะทิศทางการหมุนของเกลียวหนอนคู่ มี 2 ลักษณะคือ เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ที่มีเกลียวหนอนหมุนในทิศเดียวกัน (co-rotating twin screw extruder) จะใช้งานเกี่ยวกับการทำเม็ดพลาสติก และ เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ที่มีเกลียวหนอนหมุนสวนทางกัน (counter-rotating

twin screw extruder) นิยมใช้กันมากในงานอัดรีดทั่วไป เช่น ทำแผ่นพลาสติกในรูปพรรณตันและกลวง

2.4.2 กระบวนการขึ้นรูปโดยการอัด (Compression Molding Process)

กระบวนการขึ้นรูปโดยการอัด ใช้เครื่องอัดแม่พิมพ์ที่ไม่มีความซับซ้อน ส่วนประกอบหลักของเครื่อง คือ แผ่นเหล็กอัด (Platens) จำนวนสองชุด ซึ่งแผ่นหนึ่งสามารถเคลื่อนที่ขึ้นลงได้ อีกแผ่นจะถูกยึดติดกับที่ ทำให้สามารถทำการปิด และเปิดแม่พิมพ์ได้เนื่องจากแม่พิมพ์ถูกยึดติดกับแผ่นเหล็กทั้งสองแผ่นนี้ ส่วนประกอบอื่นๆคือ อุปรกรณ์ให้ความร้อน ระบบไฮดรอลิก ลักษณะของเครื่องขึ้นอัดขึ้นพลาสติกโดยการอัด ดังแสดงในรูปที่ 2.9



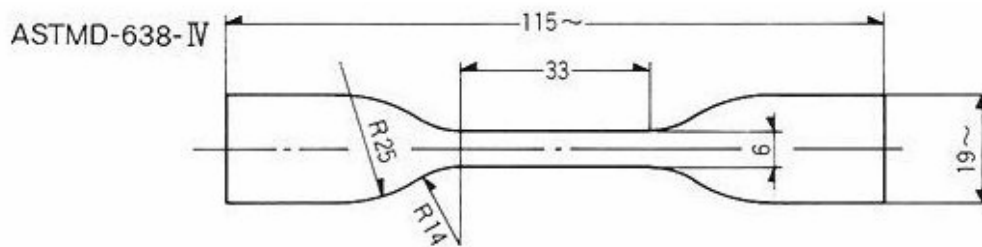
รูปที่ 2.9 แสดงลักษณะของเครื่องอัด

การแปรรูปโดยการอัด เริ่มจากการยัดแม่พิมพ์ติดกับแผ่นเหล็กอัด (Platens) ทั้งสองแผ่น แล้วให้ความร้อน โดยทั่วไปอุณหภูมิของแม่พิมพ์สำหรับการอัด อยู่ในช่วง 140-200° C หลังจากนั้นเติมคอมปาวด์ที่ได้ผสมกับสารเติมแต่งชนิดต่างๆ และได้เตรียมให้อยู่ในลักษณะผงหรือเม็ด โดยเติมปริมาณของคอมปาวด์ให้เหมาะสมกับขนาดของชิ้นงาน หลังจากนั้นปิดแม่พิมพ์ โดยใช้แรงอัดที่เหมาะสม เนื่องจากคอมปาวด์ร้อนขึ้นจะเกิดการอ่อนตัว และการใช้แรงอัดทำให้วัสดุเกิดการไหลเข้าในช่องว่างของแม่พิมพ์ ในขณะที่เดียวกันจะเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยง หลังจากปล่อยให้เกิดปฏิกิริยาเวลาระยะหนึ่ง เปิดแม่พิมพ์เอาชิ้นงานออกขณะร้อน [23]

2.5 การทดสอบสมบัติเชิงกลของพลาสติก

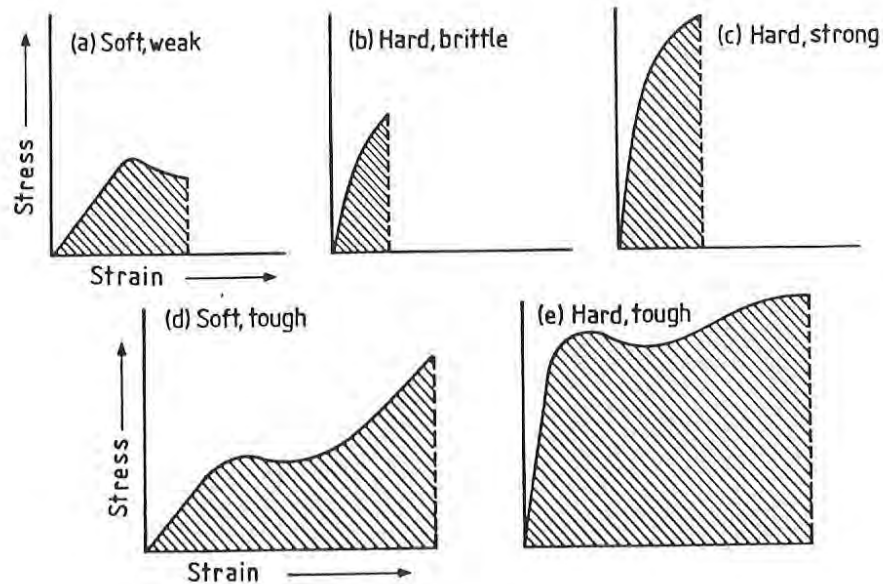
2.5.1 การทดสอบแรงดึง (Tensile Test)

การทดสอบแรงดึงเป็นการให้แรงในแนวเส้นตรงในทิศทางตรงข้ามกันแก่ชิ้นงานเพื่อสร้างแรงดึงในชิ้นงาน ชิ้นงานสำหรับการทดสอบแรงดึงจะอยู่ในรูปของชิ้นงานที่มีลักษณะเรียวยาว และปลายทั้งสองสามารถถูกจับยึดโดยเครื่องทดสอบได้ การใช้งานที่มีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าไม่เหมาะต่อการทดสอบ ทั้งนี้เนื่องจากชิ้นงานดังกล่าว สามารถจะแตกหักหรือขาดในบริเวณใดก็ได้ตลอดความยาวของชิ้นงาน เนื่องจากขนาดของพื้นที่หน้าตัดเท่ากัน ทำให้ผลการทดสอบจากการใช้ชิ้นงานรูปร่างสี่เหลี่ยมผืนผ้านี้อาจจะมีค่าต่ำกว่าสมบัติที่แท้จริงของวัสดุได้ ดังนั้นชิ้นงานทดสอบแรงดึงจึงถูกกำหนดให้มีลักษณะรูปร่างที่มีพื้นที่หน้าตัดในบริเวณที่ต้องการวัดความเครียดอยู่บริเวณตรงกึ่งกลางชิ้นงานและมีขนาดเล็กกว่าพื้นที่สำหรับการจับยึดในบริเวณปลาย หรือมีลักษณะคล้ายที่ยกน้ำหนัก (Dumbbell) [23,26] ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ชิ้นทดสอบรูปดัมเบลล์ (Dumbell)

การออกแบบชิ้นงานทดสอบเช่นนี้ก็เพื่อให้ชิ้นงานเกิดการแตกหักในบริเวณกึ่งกลางชิ้นงาน เนื่องจากเป็นบริเวณที่มีค่าความเค้นสูงที่สุด (เนื่องจากมีพื้นที่หน้าตัดต่ำที่สุด) และจากข้อมูลทดสอบแรงดึงทำให้สามารถทราบสมบัติความยืดหยุ่น [23] การแปรรูปถาวร (Plastic deformation) ความแข็งแรง ณ จุดคราด (Yield Strength) และความเหนียว (Toughness) สำหรับการทดสอบพลาสติกแข็ง หรือพลาสติกที่มีความหนามากกว่า 1.0 มม. ตามมาตรฐาน ASTM D 638 กำหนดชิ้นทดสอบควรมีความกว้างไม่ต่ำกว่า 5 มม. จำนวนที่จะทำการทดสอบ ถ้าตัวอย่างเป็น Isotropic ควรใช้ตัวอย่างอย่างน้อย 5 อย่าง แต่ถ้าเป็น anisotropic ควรใช้ตัวอย่าง 10 ตัวอย่าง โดยใช้เครื่อง Universal Testing Machine ในการทดสอบ ผลของการทดสอบจะแสดงผลในรูปกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียด ดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ลักษณะของกราฟแสดงความเค้นและความเครียดสำหรับพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ [28]

ความเค้น-ความเครียดสำหรับวัสดุพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ จะมีลักษณะของกราฟแตกต่างกันไป ดังแสดงในรูปที่ 2.11 โดยรายละเอียดแต่ละกราฟแสดงความเค้นและความเครียดอธิบายดังนี้ [23]

- Soft and weak ; พอลิเมอร์มีค่ามอดุลัส และความเค้น ณ จุดครากต่ำ, มีค่าความแข็งแรงต่ำ และมีค่าความเครียด ณ จุดขาดปานกลาง
- Hard and brittle ; พอลิเมอร์มีค่ามอดุลัสสูง แต่มีค่าความเครียด ณ จุดขาดต่ำ
- Hard and strong ; พอลิเมอร์มีค่ามอดุลัสและความเค้น ณ จุดครากสูง, มีค่าความแข็งแรงสูง แต่มีค่าความเครียด ณ จุดขาดปานกลาง
- Soft and tough ; พอลิเมอร์มีค่ามอดุลัส ต่ำ, มีค่าความแข็งแรงต่ำ และมีค่าความเค้นและความเครียด ณ จุดขาดสูง
- Hard and tough ; พอลิเมอร์มีค่ามอดุลัสสูง, มีค่าความแข็งแรงสูง และมีค่าความเครียด ณ จุดขาดสูง

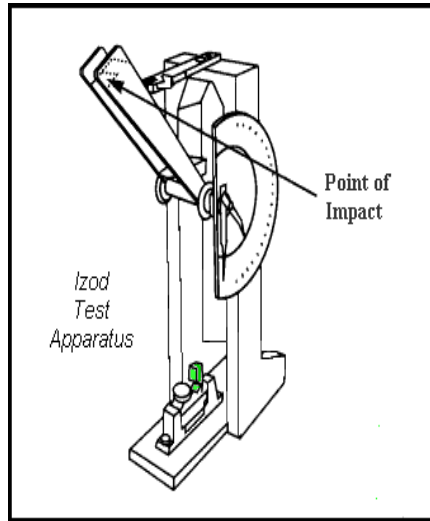
ซึ่งสามารถสรุปสมบัติทางด้านความเค้นและความเครียดของพลาสติกประเภทต่างๆดังตารางที่

ตารางที่ 2.4 สมบัติทางด้านความเค้นและความเครียดของพลาสติกประเภทต่างๆ [23]

ประเภทของพลาสติก	มอดูลัส	ความเค้น ณ จุดคราก	ความเค้นสูงสุด	ระยะการยืดตัว ณ จุดขาด
นิ่มและไม่แข็งแรง	ต่ำ	ต่ำ	ต่ำ	ปานกลาง
นิ่มและเหนียว	ต่ำ	ต่ำ	ปานกลาง	สูง
แข็งเปราะ	สูง	ไม่ชัดเจน	ปานกลาง	ต่ำ
แข็งแรง	สูง	สูง	สูง	ปานกลาง
แข็งและเหนียว	สูง	สูง	สูง	สูง

2.5.2 การทดสอบแรงกระแทก (Impact Test)

แรงกระแทก (Impact strength) มิได้เป็นการวัดแรงเค้น (Stress) ที่ทำให้ชิ้นงานพลาสติกที่ทดสอบแตกขาด แต่เป็นการชี้ถึงความสามารถในการดูดซับพลังงานของชิ้นงานพลาสติกที่ทดสอบก่อนเกิดการแตกหัก (Fracture) การทดสอบแรงกระแทกมี 2 รูปแบบคือ แบบให้น้ำหนักตกลงบนชิ้นงานตัวอย่าง (Falling mass test) และแบบค้อนตี (Pendulum tests) นิยมทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 256 ซึ่งทำให้ได้ข้อมูลสำหรับคำนวณปริมาณพลังงานของค้อนที่เหวี่ยงไปที่ชิ้นงานพลาสติก ผลที่ได้คือพลังงานหรืองานที่ตัวอย่างดูดซับไว้ก่อนที่ชิ้นงานจะขาดออกจากกัน การทดสอบการทนแรงกระแทกแบบค้อนตีมีอยู่ 2 วิธี คือ วิธีของ Charpy และวิธีของ Izod โดยเป็นการทดสอบการทนแรงกระแทกของชิ้นงานที่มีรอยบาก ความแตกต่างของทั้งสองวิธีในแง่การปฏิบัติ คือ วิธีของ Charpy นั้นรอยบากจะอยู่ด้านตรงข้ามกับทางเดินของค้อนตีและชิ้นงานพลาสติกที่ทดสอบจะวางในแนวแกนนอน ส่วนวิธีของ Izod รอยบากจะอยู่ด้านเดียวกับค้อนตี และชิ้นงานพลาสติกที่ทดสอบจะวางในแนวแกนตั้ง ดังแสดงในรูปที่ 2.12 โดยในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการทดสอบแบบ Izod จะวางชิ้นงานทดสอบไว้รับแรงกระแทกจากการเหวี่ยงของลูกตุ้ม เมื่อลูกตุ้มกระทบชิ้นทดสอบ ลูกตุ้มจะเสียพลังงานไปจำนวนหนึ่งในการทำให้ชิ้นทดสอบหัก ค่าพลังงานที่เสียไปนี้ก็คือ ค่า Impact Energy มีหน่วยเป็น ฟุต-ปอนด์ หรือ จูล โดยวางชิ้นทดสอบไว้ในแนวตั้งและให้ลูกตุ้มกระทบกับด้านที่มีรอยบาก ชิ้นทดสอบจะเป็นแท่งยาว มีพื้นที่ภาคตัดขวางเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส และมีรอยบากอยู่ตรงกลาง ดังแสดงในรูปที่ 2.13 รอยบากนี้จะทำเป็นรูปตัว V, U หรือรูปรูปอกญแจ มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบคือ ASTM D 256 โดยชิ้นงานมีขนาด 64 x 12.7 x 3.2 มม. (2½ x ½ x 1/8 นิ้ว) หนา 3.2 มม. (0.125 นิ้ว)

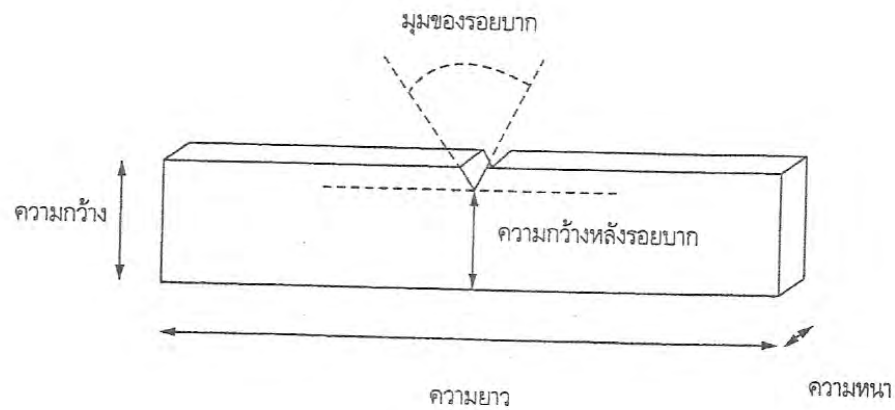


(a) แบบค้อนตี วิธีของ Izod
(Asia.matweb.com)



(b) แบบค้อนตี วิธีของ Charpy
(www.qualitest-inc.com)

รูปที่ 2.12 เครื่องทดสอบแรงกระแทก



รูปที่ 2.13 ลักษณะชิ้นงานทดสอบแบบ Izod

2.5.3 การทดสอบแรงกด (Compressive Test)

การทดสอบแรงกดมีลักษณะคล้ายกับการทดสอบแรงดึงเพียงแต่ลักษณะแรงที่ใช้ในการทดสอบนั้นเกิดขึ้นในทิศทางตรงข้ามกันเท่านั้น โดยในการทดสอบจะเป็นการให้แรงในแนวเส้นตรงแก่ชิ้นงานที่ทดสอบในทิศทางตรงข้ามที่วิ่งเข้าหากันเพื่อสร้างแรงอัดขึ้นในชิ้นงาน โดยทั่วไปแล้ว ลักษณะของชิ้นทดสอบแรงอัดสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภทหลัก ได้แก่ ชิ้นทดสอบหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า ชิ้น

ทดสอบหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส ทรงกระบอกตัน และท่อทรงกระบอก แต่ไม่ว่าจะเป็นชิ้นงานรูปทรงใดก็ตาม บริเวณพื้นผิวที่สัมผัสแผ่นกดจะต้องขนานกัน ผลการทดสอบ จะได้อยู่รูปของแรงกด (Compressive Strength) และมอดูลัสของแรงกด (Compressive Modulus) รูปการทดสอบแรงกดดังแสดงในรูปที่ 2.14 มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบแรงกดสำหรับพอลิเมอร์คือ ASTM D 695 โดยชิ้นงานที่ใช้ทดสอบมีขนาด กว้าง 12.7 มม. ยาว 25.4 มม. และหนา 12.7 มม. การทดสอบประเภทนี้เหมาะสำหรับพลาสติกแข็งเปราะ เนื่องจากความต้านทานแรงกดสูงสุดจะคำนวณได้อย่างแน่นอนสำหรับพลาสติกที่เกิดการแตกหักอย่างฉับพลันที่การเปลี่ยนแปลงรูปร่างต่ำเท่านั้น แต่ในกรณีของพลาสติกที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแต่ไม่แตกหักอย่างฉับพลัน แรงกดสูงสุดจะมีค่าไม่แน่นอนแต่จะขึ้นกับข้อกำหนดของการทดสอบว่าจะกำหนดว่าจะถือจุดใดเป็นจุดเสียหายของวัสดุในการทดสอบ ซึ่งอาจจะกำหนดเป็นค่าความต้านทานแรงกดที่ความเครียดค่าหนึ่งก็ได้ เช่นที่ 4% หรือ 5% ความเครียดเป็นต้น นอกจากนี้พลาสติกบางประเภทเมื่อทดสอบด้วยเทคนิคการกดจะไม่เกิดการแตกหัก แต่จะมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือมีส่วนสูงลดลงเรื่อยๆ จนแบนราบและจะมีผลทำให้แรงกดกลับมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการส่งผ่านแรงระหว่างแผ่นกดทั้งสองข้างมีได้มากขึ้น ลักษณะเช่นนี้จะได้แรงกดอย่างแท้จริง [23,25]



รูปที่ 2.14 การทดสอบการต้านทานแรงกด (www.testdandproven.com)

2.5.4 การทดสอบแรงดัดโค้ง (Flexural Test)

การทดสอบแรงดัดโค้ง เป็นอีกวิธีหนึ่งสำหรับการทดสอบแบบอัตราเร็วคงที่ซึ่งนิยมใช้ในการทดสอบพลาสติก โดยในการทดสอบแรงดัดโค้งชิ้นงานจะได้รับแรงที่ไม่สม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัด (Non-uniform tension) เนื่องจากในสถานะที่ชิ้นงานถูกดัดโค้งนั้น ชิ้นงานทดสอบจะได้รับแรงดัดบนพื้นผิวหนึ่ง และได้รับแรงอัดบนพื้นผิวด้านตรงข้าม สมบัติในการต้านทานการโค้งงอจะแสดงในรูปค่าการดัดโค้งสูงสุดซึ่งเกิดขึ้นที่ผิวนอกของชิ้นงานเมื่อเริ่มเกิดการแตกหัก โดยวิธีที่นิยมใช้ทดสอบการดัดโค้ง ได้แก่ วิธีใส่แรงกระทำ 3 จุด (Three-pointed bending) ดังแสดงในรูปที่ 2.15 มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบการโค้งงอคือ ASTM D 790



รูปที่ 2.15 การทดสอบการโค้งงอโดยวิธีใส่แรงกระทำ 3 จุด (www.testdandproven.com)

วิธีทดสอบการดัดโค้งแบบ 3 จุด เป็นการให้แรงกระทำที่จุดกึ่งกลางของชิ้นงานทดสอบและจุดรองรับในทิศทางตรงกันข้ามบริเวณปลายทั้งสองด้านที่มีระยะห่างจากจุดกึ่งกลางเท่ากัน เหมาะสำหรับการทดสอบพลาสติกที่เปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ดี หักกดที่ให้แรงกระทำและชุดรองรับมีลักษณะเป็นใบมีดมน (Round knife edges) หรือเพลาโลหะแข็งก็ได้ รัศมีของหัวกดและชุดให้แรงกระทำต้องมีรัศมีอย่างน้อย 3.2 มิลลิเมตร และมีรัศมีสูงสุดไม่เกิน 4 เท่าของความหนาชิ้นงานทดสอบสำหรับหัวกดและ 1.5 เท่าของความหนาชิ้นงานทดสอบสำหรับชุดรองรับ การที่ชุดกดและชุดรองรับต้องมีลักษณะเป็นผิวโค้งที่จุดสัมผัสดังกล่าวเพื่อเป็นการลดความเข้มของความเค้น (Stress concentration) ที่อาจจะเกิดขึ้นในบริเวณจุดสัมผัสดังกล่าว และอาจทำให้ชิ้นงานเกิดการแตกหักในบริเวณจุดสัมผัสนั้น นอกจากนี้ระยะห่างระหว่างจุดรองรับทั้งสองสามารถกำหนดได้จากอัตราส่วนของระยะห่างระหว่างจุดรองรับทั้งสองกับความหนาของชิ้นงานทดสอบโดยมีค่าได้ระหว่าง 16:1 ถึง 60:1

2.6 การทดสอบสมบัติทางความร้อนของพลาสติก

การวิเคราะห์ทางความร้อน (Thermal Analysis) เป็นเทคนิคในการวัดพารามิเตอร์ทางกายภาพของสารตัวอย่างเมื่อได้รับความร้อนตลอดช่วงอุณหภูมิที่ทำการวิเคราะห์ ในงานวิจัยนี้จะทำการวิเคราะห์ทางความร้อนโดยใช้เทคนิค Dynamic Mechanical Analysis หรือ DMA, Thermogravimetry analysis หรือ TGA และ Heat deflection temperature หรือ HDT

2.6.1 Dynamic Mechanical Analysis

เป็นเทคนิคที่ใช้ศึกษาพฤติกรรมของพอลิเมอร์และใช้หาสมบัติความยืดหยุ่น (Viscoelastic) โดยให้แรงแกว่งตัวในเทอมของ ความเค้น (Stress) ตลอดช่วงอุณหภูมิที่ทำการวิเคราะห์ และดูการเปลี่ยนรูปของวัสดุเมื่อได้รับแรงนั้น โดยแสดงผลออกมาในเทอมของ ความเครียด (Strain) ศึกษาค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น (Elastic modulus) โมดูลัสความหนืด (Viscous modulus) และสัมประสิทธิ์ของการ Damping ($\tan \delta$) เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ, ความถี่ หรือเวลา ผลของการทดสอบมักจะอยู่ในรูปของกราฟระหว่าง Storage modulus หรือ G' , Loss modulus หรือ G'' , และ $\tan \delta$ กับอุณหภูมิ DMA สามารถแสดงการแปรเปลี่ยนสภาพของพลาสติก เช่น Glass transition ได้ ขนาดของชิ้นงานคือ $76 \times 13 \times 3$ mm การทดสอบ DMA มีมาตรฐาน ASTM D 4065-94 ซึ่งเป็นการกำหนดความถี่ของการสั่นคงที่ 1Hz ขณะเพิ่มอุณหภูมิแก่พอลิเมอร์ที่ทดสอบ



รูปที่ 2.16 Dynamic Mechanical Analyzer

2.6.2 Thermogravimetric Analysis (TGA)

Thermogravimetric Analysis หรือ TGA เป็นเทคนิคหนึ่งในการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของวัสดุ โดยการวัดการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักพลาสติกเมื่อได้รับความร้อนภายใต้บรรยากาศที่ควบคุม การทำงานจะเริ่มขึ้นเมื่อพอลิเมอร์ซึ่งบรรจุภายในภาชนะรองรับ (Sample pan) ได้รับความร้อน

จากเตาภายใต้บรรยากาศที่ควบคุม เมื่อถึงอุณหภูมิที่เหมาะสม องค์ประกอบในพอลิเมอร์จะสลายตัวเป็นผลให้น้ำหนักรวมของพอลิเมอร์ลดลงในขณะที่ให้ความร้อนและองค์ประกอบในพอลิเมอร์มีการสลายตัวนี้ เครื่อง TGA จะบันทึกค่าอุณหภูมิและค่าน้ำหนักไปพร้อมกันและแสดงผลออกมาในรูปแบบกราฟ TGA curve รูปเครื่องมือวิเคราะห์ TGA [29] ดังแสดงในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 Thermogravimetric Analyzer

หลักการทำงานของเครื่อง Thermogravimetric Analyzer เครื่อง TGA โดยทั่วไปจะประกอบด้วยส่วนสำคัญ 4 ส่วนคือ

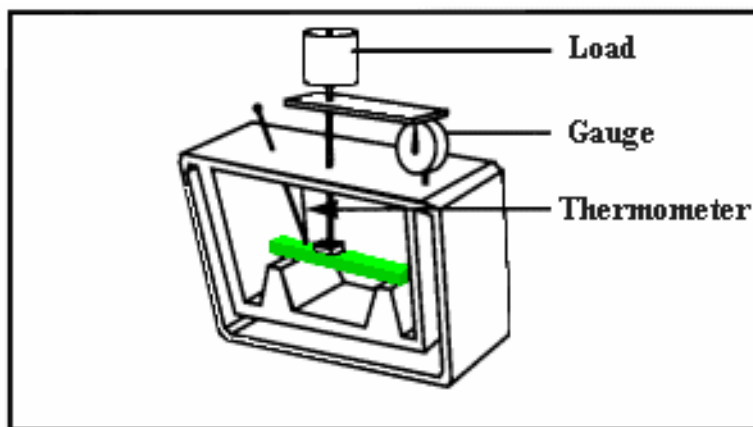
1. ส่วนวัดน้ำหนัก (Balance)
2. เตาเผาให้ความร้อน (Furnace)
3. ส่วนวัดอุณหภูมิ (Thermocouple)
4. ส่วนควบคุมบรรยากาศภายในระบบ (Gas control)

TGA เป็นเทคนิคที่มีประโยชน์มากในการศึกษาเสถียรภาพของวัสดุ นั่นคือบอกได้ว่าวัสดุสามารถทนความร้อนได้มากแค่ไหน มีการสลายตัวที่อุณหภูมิเท่าใด และมีองค์ประกอบเท่าใด

2.6.3 อุณหภูมิการโค้งงอ (Heat deflection temperature หรือ Heat distortion temperature)

อุณหภูมิการโค้งงอภายใต้ภาวะแรงกดเป็นสมบัติที่สำคัญ ของวัสดุประกอบแต่งพอลิเมอร์ เพื่อทราบว่าจะสามารถนำวัสดุประกอบแต่งพอลิเมอร์ ไปใช้ได้ที่อุณหภูมิสูงถึงเท่าใดก่อนเกิดการโค้งงอ เปลี่ยนสภาพ อุณหภูมิดังกล่าวเกี่ยวข้องกับจุดแปรสภาพแก้ว (Glass Transition Temperature, T_g) และสามารถเปลี่ยนแปลงได้เมื่อมีการใส่สารเติมแต่ง (Additives) ลงในวัสดุประกอบแต่งพอลิเมอร์

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบอุณหภูมิในการโค้งงอ คือ อ่างน้ำมัน (Oil Bath) ซึ่งอยู่ภายในห้องให้ความร้อน (Heating Chamber) ซึ่งสามารถควบคุมอุณหภูมิได้ ชิ้นงานขนาดความยาว 127 มม. กว้าง 12.7 มม. หนา 6.35 มม. จะถูกวางอยู่บน Support Span ใน Oil Bath โดยมีอุปกรณ์วัดอุณหภูมิที่ชิ้นงาน 2 จุด การทดสอบอุณหภูมิในการดัดโค้งใช้วิธีใส่แรงกระทำ 3 จุด (Three-point Bending) พร้อมให้ความร้อนกับชิ้นงานทดสอบ เมื่อจุดกึ่งกลางของชิ้นงานเกิดการโค้งงอถึง 2.54 มม. ค่าอุณหภูมิ ณ จุดนี้เราเรียกว่า อุณหภูมิในการโค้งงอ



รูปที่ 2.18 อุปกรณ์การทดสอบอุณหภูมิการโค้งงอ (www. Analis.be.com)

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปี 2001 E. H. Bakraji และคณะ [30] ได้ทดลองเตรียม Wood-Plastic Composites (WPC) โดยใช้ไม้ในประเทศซีเรีย(Syria) 5 ชนิดอันได้แก่ White poplar, Cypress, White willow, Swamp Mahogany และ Walnut โดยไม้แต่ละชนิดจะมีความหนาแน่นต่างกัน นำมาผสมกับโมโนเมอร์ 3ชนิดคือ อะคริเลไมด์ (Acrylamide:AM), บิวทิลเมทาอะคริเลต (Butylmethacrylate:BMA), สไตรีน (Styrene:ST) โดยใช้เมทานอลเป็นตัวทำละลาย ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันถูกเหนี่ยวนำให้เกิดปฏิกิริยาดัวยรังสีแกมมา (^{60}Co) ที่ปริมาณความเข้มข้น 10 20 และ 30 kGy ด้วยอัตราเร็ว 3.5 kGy/h จากนั้นจึงวัดน้ำหนักพอลิเมอร์ (Polymer loading) และทดสอบการต้านทานแรงกด (Compressive strength) คณะผู้วิจัยพบว่า เมื่อศึกษาผลของปริมาณรังสีที่มีต่อ Polymer loading ของ WPC โดยเลือกศึกษาจากไม้ 2 ชนิดคือ White poplar ที่มีความหนาแน่น 340 kg/m^3 (ความหนาแน่นต่ำสุด) และ Walnut ที่มีความหนาแน่น 580 kg/m^3 (ความหนาแน่นสูงสุด) โดยใช้โมโนเมอร์ 2 ชนิดคือ AM และ ST พบว่า เมื่อปริมาณรังสีเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่า Polymer loading มีค่าเพิ่มขึ้น และจากการทดสอบการต้านทานแรงกด พบว่า ค่าการต้านทานแรงกดของ WPC เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับโมโนเมอร์ที่ยังไม่ได้ผสม โดย WPC ระหว่าง AM และไม้ทั้ง 5 ชนิดจะมีค่าการ

ต้านทานแรงกดเพิ่มขึ้นมากถึง 110% เมื่อเทียบกับBMA และ ST ที่มีค่าเพิ่มขึ้น 52% และ 10% ตามลำดับ โดยการที่ค่า Compression strength เพิ่มขึ้นทำให้ WPC ที่เตรียมได้เหมาะที่จะนำไปใช้ประโยชน์ในการเป็นสิ่งก่อสร้างที่ต้องการความแข็งแรง

ปีเดียวกัน M. N. Ichazo และคณะ [31] ได้ทดลองเตรียมวัสดุประกอบแต่งด้วยกระบวนการอัดรีดขึ้นรูปโดยใช้ Polypropylene เป็นตัว Matrix ผสมกับผงไม้ซึ่งผงไม้ที่ใช้เป็นไม้เนื้อแข็งประกอบด้วย Mahogany, Cedar, Pine, Oak และ Saki-saki และใช้ Maleate เป็นตัว Compatibilizers และผงไม้ที่ใช้มีขนาด 20 แล 40 Mesh และผสมกันในอัตราส่วน 50/50 โดยน้ำหนัก โดยผงไม้ที่จะนำไปเป็นวัสดุเติมใน PP จะถูกปรับแต่ง ด้วยสารประสาน 2 ชนิดได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ และโซเลน โดยนำผงไม้แช่ในโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นเวลา 30 นาทีและ 1 ชั่วโมง และแช่ในสารละลาย 10% Silane เป็นเวลา 30 นาที คณะผู้วิจัยศึกษาผลของสารประสาน (coupling agent) ที่มีผลต่อสมบัติเชิงกล สัณฐานวิทยา และสมบัติการดูดซึมน้ำ จากการทดลองพบว่า การนำผงไม้แช่ในโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลาย 10% Silane มีแนวโน้มที่จะทำให้ค่าแรงดึง (Tensile strength) และ มอดูลัสความยืดหยุ่นภายใต้แรงดึง (Tensile modulus) เพิ่มขึ้น จากสัณฐานวิทยาพบว่า วัสดุประกอบแต่งจาก PP-ผงไม้ ที่ผงไม้ถูกนำไปแช่ในสารละลาย 10% silane มีการจับกันระหว่างพอลิเมอร์กับผงไม้ดีขึ้น ยังทำให้การกระจายตัวดีขึ้นอีกด้วย ส่วนการแช่ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ มีผลทำให้การกระจายตัวดีขึ้นเพียงอย่างเดียว เมื่อนำผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติกไปแช่น้ำเวลา 30 วัน พบว่าที่ขนาดอนุภาคของผงไม้เท่ากัน การดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณผงไม้มากขึ้น เมื่อขนาดอนุภาคใหญ่ขึ้น การดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น แต่ในความเป็นจริงอนุภาคเล็กควรจะดูดซึมน้ำได้มากกว่าเพราะมีพื้นที่ผิวมากกว่า ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นอาจเกิดจากการรวมตัวของอนุภาคขนาดเล็กกลายเป็นขนาดใหญ่ทำให้การดูดซึมน้ำน้อยกว่า

ปี 2003 N. M. Stark และคณะ [32] ทำการทดลองผลิตผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติกที่เตรียมจากพอลิพรอพิลีน (Polypropylene;PP) กับเส้นใยไม้สน โดยเส้นใยไม้ที่ใช้มีขนาด 35, 70, 120 และ 325 mesh ผสมในอัตราส่วน 40 % โดยน้ำหนัก นำมาศึกษาผลของขนาดเส้นใยที่มีต่อสมบัติเชิงกล ในด้านการทนต่อแรงดัดโค้ง การทนต่อแรงดึงและการทนต่อแรงกระแทกของไม้พลาสติก จากการทดลองพบว่า เมื่อ aspect ratio ของเส้นใยมีอัตราส่วนเพิ่มขึ้น มีผลทำให้ค่าแรงโค้งงอ (Flexural strength) และแรงดึง (Tensile strength) เพิ่มขึ้น ในทางเดียวกันเมื่อขนาดของเส้นใยเพิ่มขึ้นค่าการทนต่อแรงกระแทกมีค่าเพิ่มขึ้น จากนั้นทำการเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติกที่เตรียมจากเส้นใยไม้กับผงไม้ โดยผสมกับ PP ในอัตราส่วน 20 % และ 40% โดยน้ำหนัก จากการศึกษา พบว่า ค่าสมบัติเชิงกลในด้านความแข็งแรงและมอดูลัสของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติกที่ทำจากเส้นใยมีค่า

มากกว่าผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติกที่ทำจากผงไม้แสดงว่า เมื่อ aspect ratio มากทำให้สมบัติเชิงกลดีขึ้น ค่า aspect ratio ของเส้นใยมีผลเล็กน้อยต่อสมบัติการทนต่อแรงกระแทก

ปี 2004 S. E. Selke และคณะ [33] ได้ทำการสรุปงานวิจัยจำนวนหนึ่งที่เป็นการศึกษาวัสดุประกอบแต่งจากไม้ผสมกับพลาสติกจำพวก Polyolefins โดยงานวิจัยที่เกิดขึ้นส่วนมากใช้กระบวนการขึ้นรูปโดยใช้ Twin-screw extruder และสามารถแบ่งการทดลองได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้ คือ การเตรียมโดยใช้พลาสติกที่ยังไม่ได้ใช้งานกับพลาสติกที่ใช้งานแล้ว จากงานวิจัยพบว่า วัสดุประกอบแต่งจากพลาสติกที่ใช้แล้วได้แก่ Low density Polyethylene(LDPE), High density Polyethylene(HDPE), Polypropylene (PE), Polyethylene terephthalate (PET) และ Polyester เมื่อผสมกับผงไม้พบว่า HDPE ที่ใช้แล้วทนต่อแรงดึงได้สูงกว่าของ HDPE ที่ยังไม่ได้ใช้เล็กน้อย และกับพลาสติกชนิดอื่นๆ ก็ให้ผลการทดลองเช่นเดียวกัน แสดงว่าความแตกต่างระหว่างพลาสติกที่ใช้แล้วกับยังไม่ได้ใช้ในการเป็นตัวเมตริกซ์มีผลน้อยมากในการนำมาทำเป็นวัสดุประกอบแต่ง นอกจากนี้ผงไม้และพลาสติกมีการยึดติดกันที่ไม่ดีนัก จึงมีงานวิจัยจำนวนหนึ่งศึกษาถึงเรื่องการทำให้อายุการใช้งานระหว่างผงไม้และพลาสติกดีขึ้น โดยมีการเติมสาร Additive ที่โมเลกุลมีขั้วอยู่ในโครงสร้าง โดยสารตัวหนึ่งที่สามารถเพิ่มการยึดติดกันระหว่าง HDPE/ Wood flour Composites ได้แก่ Maleate anhydried

ปี 2005 C. F. Kuan และคณะ [34] ได้เตรียมวัสดุประกอบแต่งระหว่าง Linear low-density Polyethylene (LLDPE) กับ ผงไม้ (Wood flour) โดยใช้เทคนิค Water-crosslinking เพื่อให้สมบัติทางกายภาพดีขึ้น โดยศึกษาผลของ Crosslinking time ที่มีผลต่อสมบัติเชิงกล และผลของการเติมสารประสานลงในวัสดุประกอบแต่ง โดยทดลองนำผงไม้ต้นเมเปิลมาปรับแต่งด้วยสารประสาน Vinyltrimethoxysilane และนำไปผสมกับ LLDPE ในปริมาณ 10%, 20% และ 30% โดยน้ำหนัก ด้วยกระบวนการอัดรีดขึ้นรูป จากนั้นนำชิ้นงานตัวอย่างแช่ลงในน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 0.5, 1, 2, และ 4 ชั่วโมง เพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยา Water-crosslinking แล้วนำมาทดสอบสมบัติเชิงกล จากการทดลองพบว่า เมื่อปริมาณของผงไม้และเวลาในการเกิด Water-crosslinking เพิ่มขึ้น แรงโค้งงอ (Flexural strength) เพิ่มขึ้นจาก 11.2 MPa เป็น 26.6 MPa, แรงดึง (Tensile strength) เพิ่มขึ้นจาก 14.7 MPa เป็น 27.5 MPa และมอดุลัสการโค้งงอ (Flexural modulus) เพิ่มขึ้นจาก 213.8 MPa เป็น 614.6 MPa อย่างไรก็ตามการยืดภายใต้แรงดึง (Tensile Elongation) และแรงกระแทก (Impact strength) ลดลงเมื่อปริมาณของผงไม้และเวลาในการเกิด water-crosslinking เพิ่มขึ้นเนื่องจาก ผงไม้ที่เติมเข้าไปเป็นสารอินทรีย์ที่มีความแข็งเมื่อเทียบกับ LLDPE จากภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบกราดลำแสง (Scanning Electron Microscopy) แสดงให้เห็นว่าวัสดุประกอบแต่งที่มีสารประสาน Silane และกระบวนการ Water-crosslinking จะเกิดพันธะระหว่างผงไม้และตัว Matrix ดีขึ้น และศึกษาอุณหภูมิการโค้งงอของวัสดุภายใต้ความร้อน พบว่า

เมื่อเติมผงไม้ลงไป 30% โดยน้ำหนัก ค่า อุณหภูมิการโค้งงอเพิ่มขึ้นจาก 55.7 °C เป็น 79.1 °C เมื่อปรับปรุงพื้นผิวของผงไม้ด้วยสารประสานค่าอุณหภูมิการโค้งงอจะเพิ่มขึ้นจาก 55.7 °C เป็น 83.2 °C

S. T. Georgopoulos และคณะ [35] ศึกษาการใช้ Lignocellulosic fibrous plant เป็นวัสดุเติมในเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic polymer) อันได้แก่ Low-density polyethylene (LDPE) ด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบอัดรีด เส้นใยธรรมชาติที่ใช้ศึกษาคือ ไม้ยูคาลิปตัส, ชั่งข้าวโพดบด และ Brewery's gain โดยการทดลองแบ่งเป็น 2 กลุ่มคือ 1. กลุ่มที่เส้นใยธรรมชาติไม่ถูกปรับแต่งพื้นผิวและ 2. กลุ่มที่เส้นใยธรรมชาติถูกปรับแต่งพื้นผิวโดยใช้กระบวนการ Isothermal hydrolysis และใช้ปริมาณของเส้นใยธรรมชาติที่ 10-50 phr จากนั้นนำมาทดสอบสมบัติเชิงกล จากการทดลองพบว่า เมื่อคณะผู้วิจัยเติมเส้นใยธรรมชาติลงใน LDPE จะทำให้ค่า Tensile strength ลดลง ค่า Young modulus เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของเส้นใยธรรมชาติเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นการเพิ่มความแข็ง จากผลการทดลองดังกล่าวทำให้คณะผู้วิจัยสรุปได้ว่าสมบัติทางกายภาพของ LDPE/เส้นใยธรรมชาติ จะมีค่าต่ำกว่าสมบัติทางกายภาพ LDPE แต่สมบัติเชิงกลมีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อเราเติมเส้นใยธรรมชาติเข้าไปจะทำให้วัสดุมีความแข็งมากขึ้นแต่ก็มีความเปราะเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน อย่างไรก็ตามการปรับปรุงพื้นผิวโดยใช้กระบวนการทางกายภาพหรือทางเคมีก่อนที่จะทำการผสมกับเมตริกซ์ทำให้การยึดติดกันระหว่างเมตริกซ์และวัสดุเติมดีขึ้นส่งผลดีต่อสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก

A. K. Bledzki และคณะ [36] ศึกษาการเตรียมวัสดุประกอบแต่งจากผงไม้และ Polypropylene (PP) โดยใช้ Maleic anhydride เป็นตัวประสาน และศึกษาผลของชนิดของผงไม้ที่นำมาทำการทดลองคือ ไม้เนื้ออ่อนและไม้เนื้อแข็ง และศึกษากระบวนการในการขึ้นรูป ได้แก่ Two-roll mill, High-speed mixer และ Twin-screw extruder จากการศึกษาประเภทของไม้ ผู้วิจัยได้ศึกษาความแตกต่างในเทอมขององค์ประกอบของผงไม้และการดูดซึมน้ำ พบว่า การดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณผงไม้เพิ่มขึ้น เนื่องจากการยึดติดกันระหว่างเมตริกซ์กับวัสดุเติมไม่ค่อยดี ทำให้มีช่องว่างที่น้ำสามารถซึมเข้าไปได้ โดยที่ไม้เนื้อแข็งดูดซึมน้ำมากกว่าไม้เนื้ออ่อนเล็กน้อย จากการนำผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติกมาทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่า การเตรียมวัสดุประกอบแต่งด้วยกระบวนการในการขึ้นรูปทั้ง 3 วิธีนั้น พบว่า ผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก WF/PP มีสมบัติเชิงกลที่ดีและมีค่าการดูดน้ำต่ำเมื่อเตรียมด้วยกระบวนการ Twin-screw extruder ในสภาวะอากาศแห้ง (Dry condition) การใช้ Maleic anhydride ช่วยทำให้สมบัติเชิงกลของวัสดุประกอบแต่งดีขึ้น แต่ในสภาวะอากาศชื้น (Wet condition) จะทำให้สมบัติการทนต่อแรงดึงและสมบัติการโค้งงอลดลง เนื่องจากว่าการใช้ Compatibilisers ทำให้พื้นผิวของผงไม้ไม่มีความไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) มากขึ้น จากการตรวจสอบทางสัณฐานวิทยาพบว่า การแตกหักของผงไม้ เกิดจากเมื่อ

เตรียมวัสดุประกอบแต่งด้วยกระบวนการ Two-roll mill และ extruder แต่การแตกหักของผงไม้เนื้อไม้ไม่มีผล ต่อสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก WF/PP มากนัก

M. Bengtsson และคณะ [37] ศึกษาการใช้ไซเลนช่วยให้เกิดการยึดติดกันของพันธะของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติกที่เตรียมจากผงไม้และ Polyethylene (PE) โดยใช้ Vinyltrimethoxysilane เป็นสารประสาน ผงไม้ที่นำมาวิจัยได้จากไม้เนื้ออ่อนชนิด ไม้สน โดยผงไม้มีขนาดอนุภาค 1000, 315, 100, 50 และ 20 ไมโครเมตร นำมาขึ้นรูปด้วยกระบวนการ Twin-screw extruder จากการทดสอบสมบัติเชิงกล และศึกษาผลของการยึดติดกันของพันธะของวัสดุ พบว่า ผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติกที่ผงไม้ถูกปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารประสาน มีค่าแข็งแรงมากขึ้น เมื่อปริมาณผงไม้เพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้ามทำให้ค่า Strain at break ลดลงแต่ผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติกที่ผงไม้ไม่ได้ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารประสาน มีค่าแรงดึง (Tensile strength) ลดลงเมื่อปริมาณของผงไม้มากขึ้น อาจจะเป็นผลมาจากการยึดติดกันของผงไม้และตัว PE เพิ่มขึ้น จากฐานฐานวิทยาพบว่า การยึดติดกันของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติกผงไม้/PE ที่ใช้ตัวประสานดีขึ้น เมื่อเทียบกับผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติกผงไม้/PE ที่ไม่ใช้ตัวประสาน

ในปี 2006 C. F. Kuan และคณะ [38] ศึกษาการนำผงไม้มาเป็นตัวเสริมให้กับ Poly(butylene succinate) (PBS) โดยใช้เทคนิค Water-crosslinking เพื่อให้สมบัติทางกายภาพดีขึ้น และใช้ตัวประสานเพื่อช่วยในการยึดติด ขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดรีด ผู้วิจัยได้นำ ผงไม้ต้นเมเปิล มาผสมกับ PBS โดยเติม Vinyltrimethoxysilane เป็นตัวประสาน (เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อทำให้ปฏิกิริยาเกิดดีขึ้น) นำมาผสมกันด้วยกระบวนการอัดรีด จากนั้นนำชิ้นงานตัวอย่างแช่ลงในน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 0.5, 1, 2, และ 4 ชั่วโมง เพื่อทำให้เกิด Water-crosslinking reaction และนำมาทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่า จากการทำ Water-crosslinking reaction จะสามารถทำให้สมบัติเชิงกลของวัสดุประกอบแต่งเพิ่มขึ้น ในด้านสมบัติการโค้งงอ การทนต่อแรงกระแทกและแรงดึง หลังจากทำปฏิกิริยา Water-crosslinking พบว่า ค่าเสถียรทางความร้อน (Thermal stability) และอุณหภูมิการโค้งงอ (Heat deflection temperature) ของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติกมีค่าเพิ่มขึ้น หลังจากทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 4 ชั่วโมง อุณหภูมิการสลายตัวของวัสดุที่ปริมาณผงไม้ 30 phr มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 376.2 °C เป็น 396.3°C และค่า Heat deflection temperature เพิ่มขึ้นจาก 93.1 °C เป็น 105.1°C อีกทั้งการเพิ่มขึ้นของเวลาในการเกิดปฏิกิริยา Crosslinking ทำให้การสลายตัวได้ทางชีวภาพของวัสดุลดลง การทดสอบสมบัติเชิงกล พบว่า ค่าแรงดึง (Tensile strength) และ ค่าแรงดัดโค้ง (Flexural strength) มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณผงไม้เพิ่มขึ้น เนื่องจากในงานวิจัยนี้เติมผงไม้ลงในเมตริกซ์ที่มีขั้วทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น การยึดติดกันดีขึ้น

M. Bengtsson และคณะ [39] ศึกษาวิธีการเตรียม Wood Plastic Composites จาก High density polyethylene (HDPE) กับผงไม้ที่ได้จากไม้เนื้ออ่อน คือ ต้นสน โดยใช้ Silane เป็นตัวประสาน ในปริมาณของสารละลาย Silane ที่ 0%, 2%, 3%, 4% และ 6% โดยใช้กระบวนการขึ้นรูปแบบอัดรีด และนำมาศึกษาสมบัติเชิงกลพบว่า เมื่อปริมาณของ Silane ที่เติมลงไปผสมมีความเข้มข้นมาก (4% และ 6%) จะทำให้ผิวหน้าของวัสดุประกอบต่าง HDPE/ผงไม้ มีความขรุขระ และเมื่อทดสอบสมบัติการต้านทานความโค้งงอ พบว่าวัสดุประกอบต่าง HDPE/ผงไม้ ที่ทำ Silane crosslinked มีความเหนียวมากขึ้น เมื่อเราใช้ Silane เป็นตัวประสาน เพื่อเพิ่มการยึดติดของผงไม้และ PE จะทำให้ค่าการทนแรงกระแทก มีแนวโน้มที่ดีขึ้น เมื่อเทียบกับวัสดุประกอบต่างที่ไม่ใช้ตัวประสาน

H. S. Yang และคณะ [40] ทำการเตรียมผลิตภัณฑ์ประกอบต่างไม้พลาสติกที่เตรียมจาก PP โดยใช้ผงเกลบและผงไม้ขนาด 80-100 mesh เป็นวัสดุเติม ที่ปริมาณผงไม้ 10, 20, 30 และ 40% โดยน้ำหนัก นำมาศึกษาสมบัติเชิงกล ได้แก่ สมบัติแรงดึง (Tensile properties) สมบัติการทนแรงกระแทก (Impact properties) และการกระจายตัวของอนุภาคของผลิตภัณฑ์ประกอบต่างไม้พลาสติกและศึกษาผลจากการขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดรีดโดยใช้แบบสกรูเดี่ยว (Single screw extruder) และแบบสกรูคู่ (Twin screw extruder) จากการศึกษาพบว่า ที่ปริมาณของวัสดุเติมต่างกัน ค่า Tensile strength และ Tensile modulus ของผลิตภัณฑ์ประกอบต่างไม้พลาสติกที่เตรียมด้วยกระบวนการ Twin screw extruder มีค่ามากกว่าการเตรียมด้วยกระบวนการ Single screw extruder เนื่องจากกระบวนการ Twin screw extruder เพิ่มการกระจายตัวให้กับวัสดุเติม แต่กระบวนการทั้งสองไม่มีผลต่อสมบัติการทนแรงกระแทก เมื่อดูการกระจายตัวของเกลบและผงไม้พบว่า การใช้กระบวนการ Twin screw extruder มีการกระจายตัวดีกว่า กระบวนการ Single screw extruder ค่าการทนต่อแรงดึงของผลิตภัณฑ์ประกอบต่างไม้พลาสติกและเกลบอยู่ในช่วง 20-35 MPa ค่าการทนต่อแรงกระแทกของผลิตภัณฑ์ประกอบต่างไม้พลาสติกมีค่าในช่วง 13-20 MPa และค่าการทนต่อแรงกระแทกของผลิตภัณฑ์ประกอบต่างไม้พลาสติกของเกลบมีค่าในช่วง 10-20 MPa

ในปี 2007 H. S. Yang และคณะ [41] ทำการเตรียมผลิตภัณฑ์ประกอบต่างไม้พลาสติกที่เตรียมจาก LDPE และ HDPE โดยใช้ผงเกลบและผงไม้ขนาด 80-100 mesh เป็นวัสดุเติมและศึกษาผลของสารประสานที่ใช้ได้แก่ Maleic anhydride โดยอธิบายผลในด้านสมบัติเชิงกล ได้แก่ สมบัติแรงดึง (Tensile properties) และสมบัติการทนแรงกระแทก (Impact properties) และศึกษาสัดส่วนวิทยาของผลิตภัณฑ์ประกอบต่างไม้พลาสติก จากการศึกษาพบว่า ค่า Tensile strength ของผลิตภัณฑ์ประกอบต่างไม้พลาสติกลดลงเมื่อปริมาณผงเกลบและผงไม้เพิ่มขึ้น โดยผลิตภัณฑ์ประกอบต่างไม้พลาสติกที่เตรียมจาก LDPE/ผงไม้ และ LDPE/เกลบ มีค่า 10-20 MPa เนื่องจากการยึดติดระหว่างพลาสติกและตัว

เติมไม่ได้ รวมไปถึงการรวมตัวกันของผงเคลือบและผงไม้ เมื่อทำการเพิ่มการยึดติดระหว่างพลาสติกและตัวเติม ด้วยการใช้สารประสาน พบว่า ค่า Tensile strength และ Tensile modulus มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติกที่ไม่ใส่สารประสาน คือมีค่าอยู่ในช่วง 12-20 MPa และค่า Tensile strength และ Tensile modulus ของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติกที่ใช้ผงไม้เป็นตัวเติมมีค่าสูงกว่าผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติกที่ใช้เคลือบเป็นตัวเติม เนื่องจากผงไม้มีค่า Strength และ Modulus มากกว่าเคลือบ ด้านสมบัติการทนแรงกระแทก พบว่า Impact strength ที่ใช้สารประสานมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามปริมาณความเข้มข้นของสารประสานที่ใช้ จากสัญฐานวิทยา พบว่า การใช้สารประสานไม่พบการแตกหรือหักของผงเคลือบและผงไม้และรอยอนุภาคหลุดจากพลาสติก

L. Chotirat และคณะ [42] ทำการเตรียมผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติกที่เตรียมจากอะไคโลไนไตรล์-บิวตะไดอีน-สไตรีน (Acrylonitrile-butadiene-styreneABS) โดยใช้ซีลี้อยเป็นวัสดุเติมที่ปริมาณ 0-50 phr และใช้สารประสาน 2 ชนิด ได้แก่ 3-Methacryloxypropyl trimethoxysilane(KBM503) และ N-(2(aminoethyl)3-aminopropyl trimethoxysilane (KBM603) โดยใช้กระบวนการอัดรีด ศึกษาสมบัติเชิงกลและการยึดติดกันของเมตริกซ์และซีลี้อย จากการศึกษาเมื่อดูผลของปริมาณของซีลี้อยที่เติม พบว่าค่ามอดูลัสการยึดดึงและการดัดโค้งมีค่าเพิ่มขึ้น เพราะการเติมซีลี้อยลงไปเป็นการเพิ่มความแข็งให้กับวัสดุ ในทางตรงกันข้ามค่าแรงดึง แรงดัดโค้งและ ค่าการทนต่อแรงกระแทกมีค่าลดลงด้วยเหตุผล 3 ข้อคือ

1. การเติมซีลี้อยที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงผิวหน้าทำให้การยึดติดกันระหว่างเมตริกซ์และซีลี้อยไม่ดี
2. การยึดติดกันอาจเกิดจากการที่อนุภาคของซีลี้อยรวมตัวกัน และ
3. การเติมซีลี้อยลงไปทำให้มีช่องว่างในตัวเมตริกซ์

เมื่อใช้สารประสานปรับปรุงพื้นผิวของซีลี้อย พบว่า ค่าแรงดึงเพิ่มขึ้นจนถึงความเข้มข้นหนึ่งเมื่อสารประสานมีความเข้มข้นมากขึ้นทำให้ค่าแรงดึงลดลง โดยความเข้มข้นของสารประสานที่เหมาะสม อยู่ในช่วง 0.5-1.0%

S. Panthapulakkal และคณะ [43] ทำการศึกษาผลของวัสดุเหลือทิ้งจากเกษตรกรรม เช่น ฟางข้าว ช้างข้าวโพด เพื่อนำมาทำเป็นวัสดุเติมในผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก โดยใช้ High density polyethylene หรือ PE เป็นเมตริกซ์ ปริมาณของวัสดุเหลือทิ้งที่ใช้เท่ากับ 65% โดยน้ำหนักและนำมาวิเคราะห์สมบัติเชิงกลโดยเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติกที่ใช้ผงไม้เป็นวัสดุเติม จากการศึกษาพบว่า การใช้ฟางข้าวผสมกับ PE โดยใช้ Compatibilizers มีค่า แรงดึง (Tensile strength) แรงดัดโค้ง (Flexural strength) และค่าทนต่อแรงกระแทก (Impact strength) มากกว่าช้างข้าวโพด ทำนายได้ว่าเมื่อใช้ Compatibilizers กับผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติกที่ใช้ฟางข้าวมีการยึดติดกันระหว่างพันธะดีกว่า การใช้ Compatibilizers ทำให้สมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติกมีค่าที่ดีขึ้นเมื่อเทียบกับผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติกที่ไม่ได้ใส่ Compatibilizers สมบัติการดูดซึมน้ำ พบว่า ค่า

การดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของวัสดุเติมที่ใส่เพิ่มขึ้น และเรียงลำดับการใช้วัสดุเติมที่ให้ผลดีต่อสมบัติเชิงกลจากมากไปหาน้อยดังต่อไปนี้ ฟางข้าว>ผงไม้>ขี้ข้าวโพด ตามลำดับ

ในปัจจุบันการผลิตผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติกในหลายๆประเทศมีการผลิตผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติกเป็นโพรไฟล์ (Profile) ออกมาจำหน่ายในท้องตลาด โดยมีการทดสอบสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก ต่อไปจะขอยกตัวอย่างสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติกที่ขายตามท้องตลาดดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 สมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ ของบริษัท วี.พี.วี. จำกัด

ข้อมูลทางเทคนิค	
1. ความเค้นฉีกเนื่องจากการดึงตะปู (ASTM D 6117-97)	
- การดึงตะปู	$2.5 \times 10^6 \text{ N/m}^2$
- การดึงตะปูเกลียว	$15 \times 10^6 \text{ N/m}^2$
2. การทนต่อแรงกด (ASTM D 6108-97)	$9 \times 10^6 \text{ N/m}^2$
3. การทนต่อแรงดัดงอ (ASTM D 790-99)	$44 \times 10^6 \text{ N/m}^2$
4. ความหนาแน่นของวัสดุผสม (ASTM D 6111-97)	1.166 N/m^2
5. การทนต่อปลวก (% ความเสียหาย)	0
6. สมบัติทางความร้อน	
อุณหภูมิการสลายตัวเริ่มต้น	$243 \text{ }^\circ\text{C}$
7. เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ (ASTM D 570-95)	≤ 1.7

บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุุดิบและการเตรียมวัสดุุดิบ

การดำเนินงานวิจัยเตรียมการผลิตผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติกมีวัสดุุดิบที่ใช้ในการวิจัยดังต่อไปนี้

3.1.1 PVC Compound

งานวิจัยนี้ใช้ PVC ชนิดอัดรีด K 66 มีลักษณะเป็นผงสีขาว ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 157 ไมโครเมตร มีความหนาแน่น 0.57 กรัม/มิลลิลิตร ผลิตโดยบริษัท ไทยพลาสติกและเคมีภัณฑ์ จำกัด(มหาชน) ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 PVC Compound

3.1.2 ผงไม้ (Wood flour)

งานวิจัยนี้ใช้ผงไม้จากโรงงาน 2 ชนิด คือ ไม้เนื้ออ่อน ได้แก่ ไม้สัก (Teak) ความหนาแน่น (Bulk density) เท่ากับ 0.26 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และไม้เนื้อแข็ง คือ ไม้เต็ง (Selangan batu or Balau) ความหนาแน่น (Bulk density) เท่ากับ 0.31 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ขนาดของผงไม้ที่นำมาใช้มีขนาดใหญ่ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ดังนั้นจึงต้องนำผงไม้มาบดเพื่อให้ได้ขนาดที่ใช้ในการวิจัยคือ 45, 75, 106, 180 และ 250 ไมโครเมตร



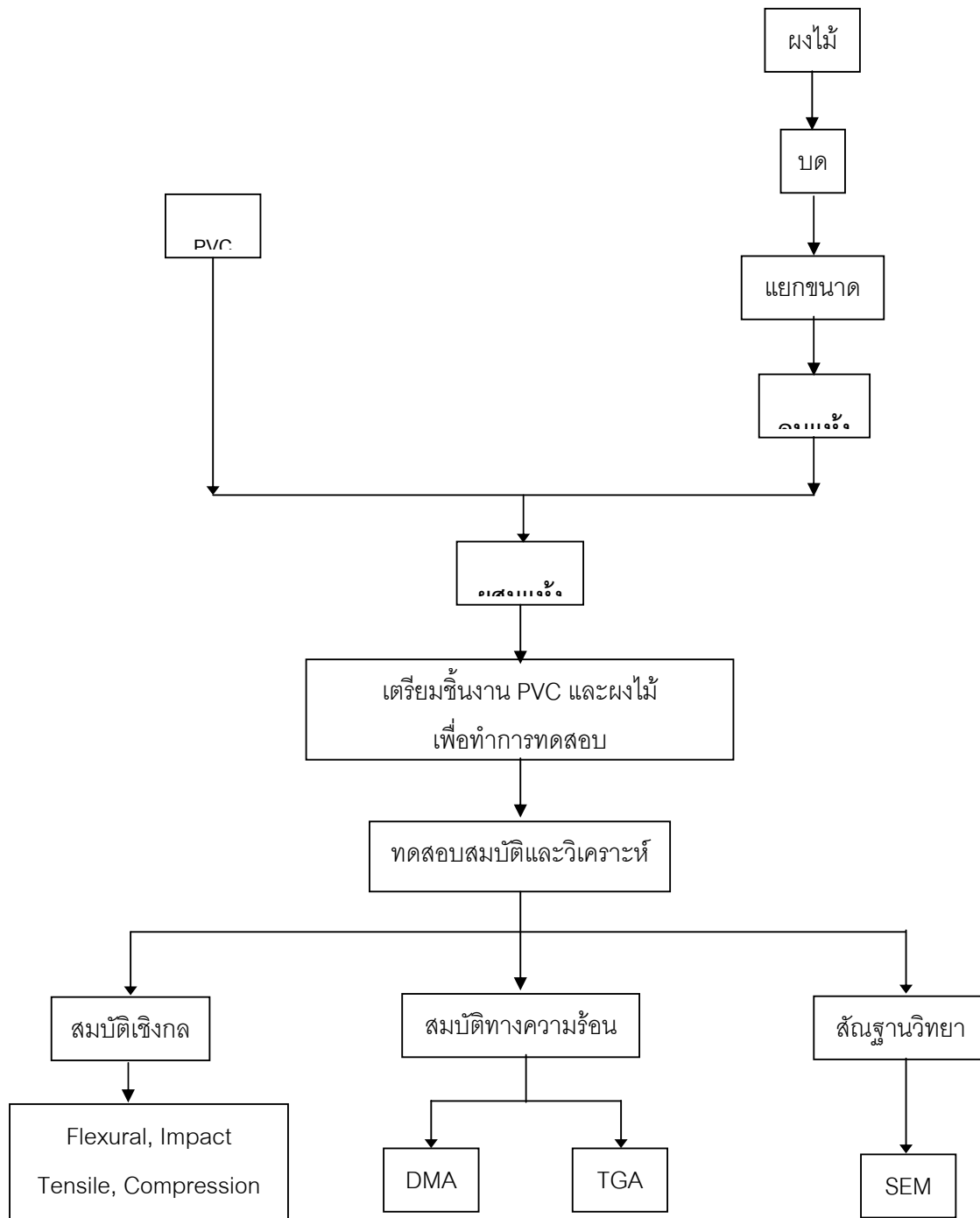
(ก) ผงไม้สัก



(ข) ผงไม้เต็ง
รูปที่ 3.2 ผงไม้

3.2 การดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงานวิจัยสามารถสรุปเป็นแผนผังการทำงานได้ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แผนผังการดำเนินงานวิจัย

แผนผังการดำเนินงานวิจัยสามารถแบ่งเป็นขั้นตอนการทดลองได้ดังนี้

3.2.1. การบดและการคัดแยกขนาดของผงไม้

นำผงไม้แต่ละชนิดมาบดละเอียดโดยใช้เครื่อง Vibration ball mill (Chuo Kakouki Co.,Ltd.) ดังแสดงในรูปที่ 3.4 (ก) การบดใช้เวลา 24 ชั่วโมง และคัดแยกขนาดของผงไม้ที่บดแล้วโดยใช้เครื่อง Sieve analyzer (Retsch) ดังแสดงในรูปที่ 3.4 (ข) ตะแกรงร่อนที่ใช้มีขนาด Mesh 325, 200, 150, 80 และ 60 ซึ่งจะได้ผงไม้ขนาดอนุภาค 45, 75, 106, 180 และ 250 ไมโครเมตร ตามลำดับ



(ก) Vibrational ball mill



(ข) Sieve analyzer

รูปที่ 3.4 แสดงเครื่องมือที่ใช้ในการบดและคัดแยกขนาดของผงไม้

3.2.2. การผสม PVC และผงไม้

นำผงไม้ไปอบไล่ความชื้นก่อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง แล้วจึงผสม PVC กับผงไม้ที่ได้คัดแยกขนาดต่างๆ แล้ว โดยใช้ปริมาณผงไม้ 20, 40, 60 และ 80 phr การผสม PVC และผงไม้ใช้เครื่อง Dry blending ดังแสดงในรูปที่ 3.5 เพื่อคลุกเคล้าให้ PVC กับผงไม้ผสมกัน



รูปที่ 3.5 Dry blending

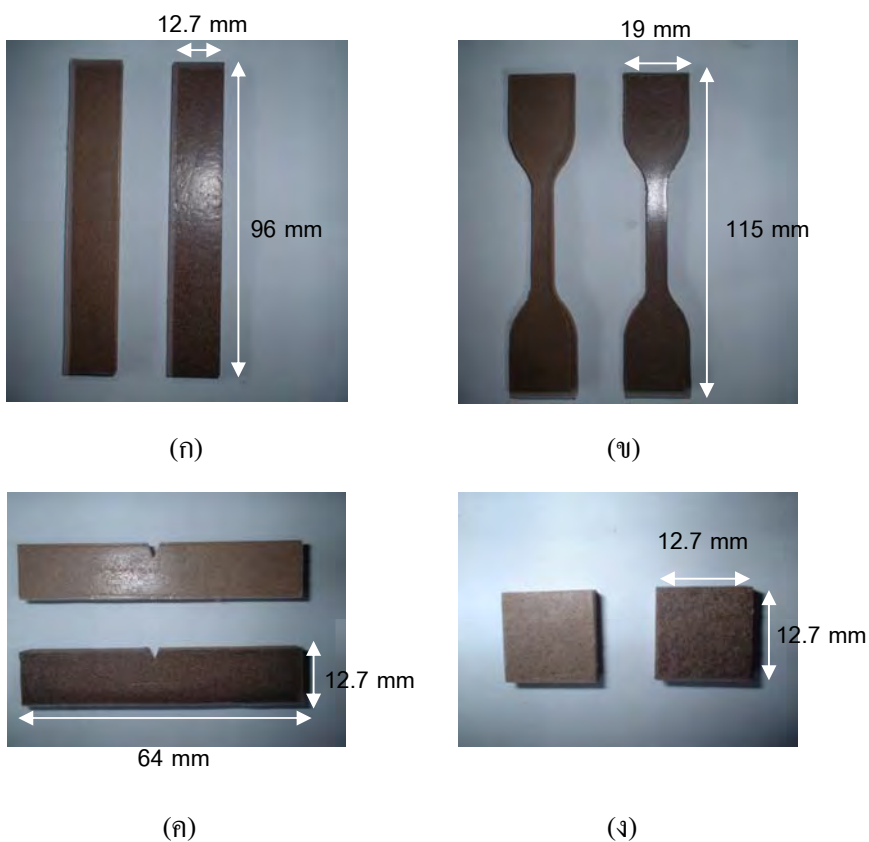
3.2.3. การเตรียมไม้พลาสติก PVC/ผงไม้เพื่อการทดสอบ

ในการเตรียมไม้พลาสติก PVC/ผงไม้เพื่อทำการทดสอบสมบัติเชิงกล ทำได้โดยนำ PVC ที่ผสมเข้ากับผงไม้สักและผงไม้เต็งที่ขนาด 45, 75, 106, 180 และ 250 ไมโครเมตรและปริมาณ ผงไม้ 20, 40, 60 และ 80 phr มาทำการอัดขึ้นรูปชิ้นงาน โดยใช้เครื่อง Hydraulic press (LAB TECH Engineering Company Ltd.) ดังแสดงในรูปที่ 3.6 อุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูป คือ 190 °C ซึ่งชิ้นงานทดสอบที่เตรียมขึ้นจะมีขนาดตามมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบสมบัติเชิงกลแต่ละชนิดได้แก่

- การทดสอบการทนต่อการโค้งงอ (Flexural property) ตามมาตรฐาน ASTM D 790 ขนาดของชิ้นงานคือ 12.7 × 96 × 3 มม.
- การทดสอบการทนต่อแรงกระแทก (Impact property) ตามมาตรฐาน ASTM D256 ขนาดของชิ้นงานคือ 12 × 64 × 6 มม.
- การทดสอบการทนต่อแรงอัด (Compression property) ตามมาตรฐาน ASTM D695 ขนาดของชิ้นงานคือ 12.7 × 12.7 × 3 มม.
- การทดสอบการทนต่อแรงดึง (Tensile property) ตามมาตรฐาน ASTM D638-IV ลักษณะชิ้นงานทดสอบทั้ง 4 ชนิด ที่ขึ้นรูปโดยการอัด ดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.6 Hydraulic press

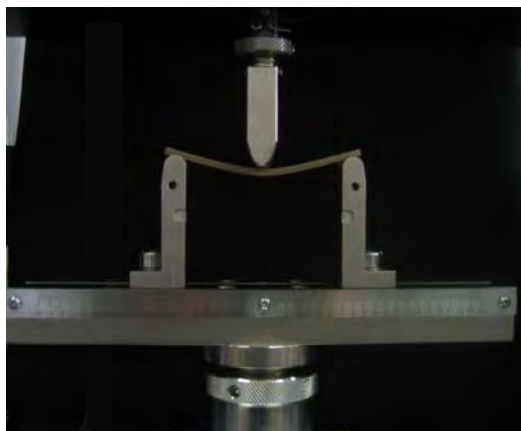


รูปที่ 3.7 ชิ้นงานทดสอบที่อัดขึ้นรูปแล้ว (ก) การทดสอบแรงดัดโค้ง (ข) การทดสอบแรงดึง (ค) การทดสอบแรงกระแทก (ง) การทดสอบแรงกด

3.3 การทดสอบสมบัติเชิงกล

3.3.1 การทดสอบการดัดโค้ง (Flexural property)

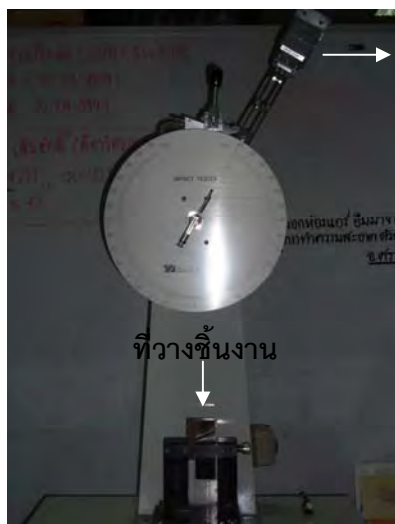
นำชิ้นงานผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ มาทดสอบการทนต่อการดัดโค้งแบบ 3-point bending แสดงดังในรูปที่ 3.8 โดยใช้เครื่อง Universal Testing Machine (INSTRON Model 5567) ขนาด Load cell 1 kN ด้วยความเร็วในการทดสอบ 1.2 มิลลิเมตรต่อนาที ทดสอบจนเครื่องหยุดที่ load 90 % โดยชิ้นงานจะโค้งแต่ไม่หัก ทดสอบจำนวน 5 ตัวอย่าง ตามมาตรฐาน ASTM D 790



รูปที่ 3.8 แสดงการทดสอบการดัดโค้งแบบ 3-point bending

3.3.2 การทดสอบการทนต่อแรงกระแทก (Impact property)

เป็นการทดสอบที่บ่งบอกว่าผลึกภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติกนั้นเหนียวหรือเปราะ ก่อนการทดสอบ จะนำผลึกภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ บาก (Notched) ขึ้นงานด้วย เครื่อง Notching machine เป็นมุม 45 องศา ลึก 0.25 มิลลิเมตร จากนั้นนำมาทดสอบด้วยการให้แรง กระแทกกับชิ้นงานที่มีรอยบาก โดยใช้เครื่อง Impact tester (Yasuda 258PC) ขนาดลูกตุ้ม 60 N ทดสอบ 10 ตัวอย่าง ตามมาตรฐาน ASTM D 256 ทดสอบจนกระทั่งชิ้นงานแตกหัก รูปที่ 3.9 (ก) แสดงเครื่อง Impact tester ที่ใช้ทดสอบและ รูปที่ 3.9 (ข) แสดงลักษณะการวางชิ้นงาน



(ก) Impact tester

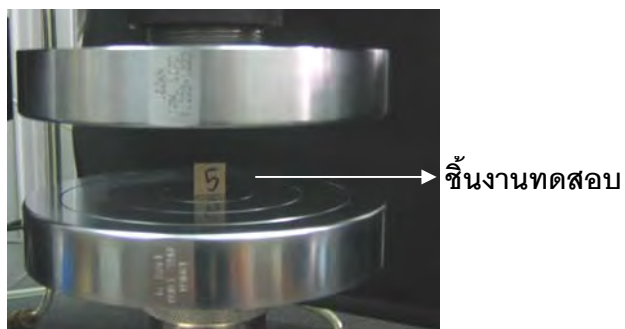


(ข) แสดงลักษณะการวางชิ้นงาน

รูปที่ 3.9

3.3.3 การทดสอบแรงกด (Compression property)

เป็นการทดสอบที่บอกถึงความแข็งแรงและความสามารถในการทนต่อการกดของชิ้นงาน โดยใช้เครื่อง Universal Testing Machine (INSTRON Model 5567) ขนาด Load cell 30 kN ตามวิธีทดสอบที่กำหนดใน ASTM D 695 ความเร็วในการทดสอบ 0.6 มิลลิเมตรต่อนาที ทดสอบ 5 ตัวอย่าง การทดสอบการทนต่อการกด แสดงดังในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 แสดงการทดสอบการกดอัด

3.3.4 การทดสอบการทนต่อแรงดึง (Tensile property)

เป็นการทดสอบที่บอกถึงความแข็งแรงและความสามารถในการทนต่อแรงดึงของชิ้นงาน ทดสอบการทนต่อแรงดึงด้วยเครื่อง Universal Testing Machine (INSTRON Model 5567) ขนาด Load cell 30 kN ความเร็ว 1.2 มิลลิเมตรต่อนาที ทดสอบ 10 ตัวอย่าง ตามมาตรฐาน ASTM D 638-IV ทดสอบจนกระทั่งชิ้นงานขาด ดังแสดงในรูปที่ 3.11



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.11 การทดสอบแรงดึง

3.4 สมบัติทางความร้อน

3.4.1 Dynamic Mechanical Analysis

เป็นการหาค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น (Elastic modulus) โมดูลัสความหนืด (Viscous modulus) และสัมประสิทธิ์ของการ Damping ($\tan \delta$) DMA ยังสามารถหาค่าการแปรเปลี่ยนสภาพของพลาสติก คือ อุณหภูมิการแปรสภาพแก้ว (Glass transition temperature) ได้ โดยขนาดของชิ้นงานคือ $76 \times 13 \times 3$ mm เครื่องมือทดสอบคือ dynamic mechanical analyzer (NETZSCH model DMA242) ดังแสดงในรูปที่ 3.12 การทดสอบ DMA มีมาตรฐาน ASTM D 4065-94 ซึ่งเป็นการกำหนดความถี่ของการสั่นคงที่ 1Hz ขณะเพิ่มอุณหภูมิแก่พอลิเมอร์ที่ทดสอบ



รูปที่ 3.12 เครื่อง dynamic mechanical analyzer

3.4.2 Thermogravimetric Analysis (TGA)

เป็นการทดสอบสมบัติทางความร้อนเพื่อหาอุณหภูมิการสลายตัวของวัสดุ เตรียมตัวอย่าง โดยนำ PVC/ผงไม้ ที่ได้จากการผสมแห้งมาใส่ใน crucible แล้วนำไปใส่ในเครื่อง Thermogravimetric Analysis (NETZSCH STA 409 C/CD) โดยน้ำหนักของ PVC/ผงไม้ ที่นำมาใช้ไม่ควรเกิน 10 มิลลิกรัม ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง ถึง 900°C ตัวอย่างที่ทดสอบได้แก่ PVC/ผงไม้ 45 ไมครอน 20 และ 80 phr , PVC/ผงไม้ 250 ไมครอน 20 และ 80 phr และ PVC compound ที่ไม่ได้ทำการเติมผงไม้ รูป เครื่อง TGA ดังแสดงในรูปที่ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 เครื่อง Thermogravimetric Analyzer

3.4.3 อุณหภูมิการโค้งงอ (Heat deflection temperature : HDT)

เป็นการศึกษาพฤติกรรมทางความร้อนของวัสดุประกอบแต่งทำให้รู้ถึงการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกล และสมบัติเชิงกายภาพของวัสดุเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง สามารถใช้ที่อุณหภูมิต่างๆ ได้อย่างเหมาะสม การทดลองทำตามมาตรฐาน ASTM D 648 ที่ Stress 0.45 MPa โดยเตรียมชิ้นงานตัวอย่างให้มีขนาดความยาว 127 มม. กว้าง 12.7 มม. หนา 3 มม. ชิ้นงานถูกวางอยู่บน Support Span ใน Oil Bath โดยมีอุปกรณ์วัดอุณหภูมิที่ชิ้นงาน 2 จุด การทดสอบอุณหภูมิการโค้งงอใช้วิธีใส่แรงกระทำ 3 จุด (Three-point Bending) พร้อมให้ความร้อนกับชิ้นงานทดสอบ เมื่อจุดกึ่งกลางของชิ้นงานเกิดการโค้งงอถึง 2.54 มม. อุณหภูมิ ณ จุดนี้เราเรียกว่า อุณหภูมิในการโค้งงอ (HDT) ตัวอย่างที่ทดสอบได้แก่ PVC/ผงไม้ 45 ไมครอน 20 และ 80 phr , PVC/ผงไม้ 250 ไมครอน 20 และ 80 phr และ PVC compound ที่ไม่ได้ทำการเติมผงไม้

3.5 การตรวจสอบการกระจายตัวของอนุภาคในชิ้นงาน

การวิเคราะห์ดูการกระจายตัวของผงไม้ใน PVC matrix ในระดับจุลภาคกระทำโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบกราดลำแสง (Scanning Electron Microscope, SEM) (JEOL) ดังแสดงในรูปที่ 3.14 การเตรียมไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ เพื่อส่องดูใน SEM กระทำโดยจุ่มชิ้นงานไม้พลาสติกในไนโตรเจนเหลวแล้วหักไม้พลาสติกให้แตก เคลือบผิวที่แตกด้วยทองโดยใช้เครื่อง JEOL model JSM 5200 LV และเคลือบฉาบผิวไม้พลาสติกด้วยทองเป็นเวลา 10 นาที ความหนาของทองที่เคลือบคือ

10-20 nm จากนั้นจึงวางไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ที่เคลือบทองแล้วในห้องวางตัวอย่างของเครื่อง SEM ที่ตั้งระดับอัตราเร่งของอิเล็กตรอน (Electron concentration) ที่ 15 kV



รูปที่ 3.14 เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)

3.6 การทดสอบการดูดซึมน้ำ (Water absorption) ของไม้พลาสติก

การทดสอบการดูดซึมน้ำ กระทำตามวิธีการและขั้นตอนที่กำหนดในมาตรฐาน ASTM D 570 ขนาดของชิ้นงานคือ $12.7 \times 96 \times 3$ มม. จำนวน 3 ชิ้น นำไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ทุกสูตรไปแช่ในน้ำ กลิ่น ณ อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 60 วัน ซึ่งน้ำหนักไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ก่อนแช่และหลังแช่ทุกวัน โดยใช้เครื่องชั่งสารแบบดิจิตอล 4 ตำแหน่ง (METTLER TOLEDO รุ่น AG204) สังเกตการเปลี่ยนแปลง หลังการทดสอบ

3.7 การขึ้นรูปไม้พลาสติก PVC/ผงไม้โดยเครื่องจักรระดับอุตสาหกรรม

การขึ้นรูปไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ เป็นการผลิตในระดับ Scale-up ด้วยเครื่องจักรอุตสาหกรรม ที่บริษัท นวพลาสติกอุตสาหกรรม จำกัด จ.ระยอง โดยนำ PVC ที่ผสมผงไม้ที่ขนาดต่างๆและปริมาณต่างๆ มาขึ้นรูปด้วยเครื่อง Twin Screw Extruder ดังแสดงในรูปที่ 3.15 โดยทำการขึ้นรูปไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ที่มีรูปร่างเป็นโปรไฟล์ (Profile) บัวติดผนัง



รูปที่ 3.15 เครื่องTwin screw extruder

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในบทนี้จะแสดงผลการทดลองของการทดสอบสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ โดยศึกษาถึงอิทธิพลของปริมาณและขนาดอนุภาคที่มีผลต่อสมบัติต่างๆ ของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ ซึ่งแสดงรายละเอียดดังต่อไปนี้

งานวิจัยนี้ทำการเตรียมผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ โดยผงไม้ที่ใช้เป็นตัวเติมคือ ไม้สัก (ไม้เนื้ออ่อน) และไม้เต็ง (ไม้เนื้อแข็ง) ผู้วิจัยได้ทำการหาองค์ประกอบของผงไม้ ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงองค์ประกอบของผงไม้ที่ได้จากการทดลองและเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากทฤษฎี

หน่วย : ร้อยละโดยน้ำหนัก

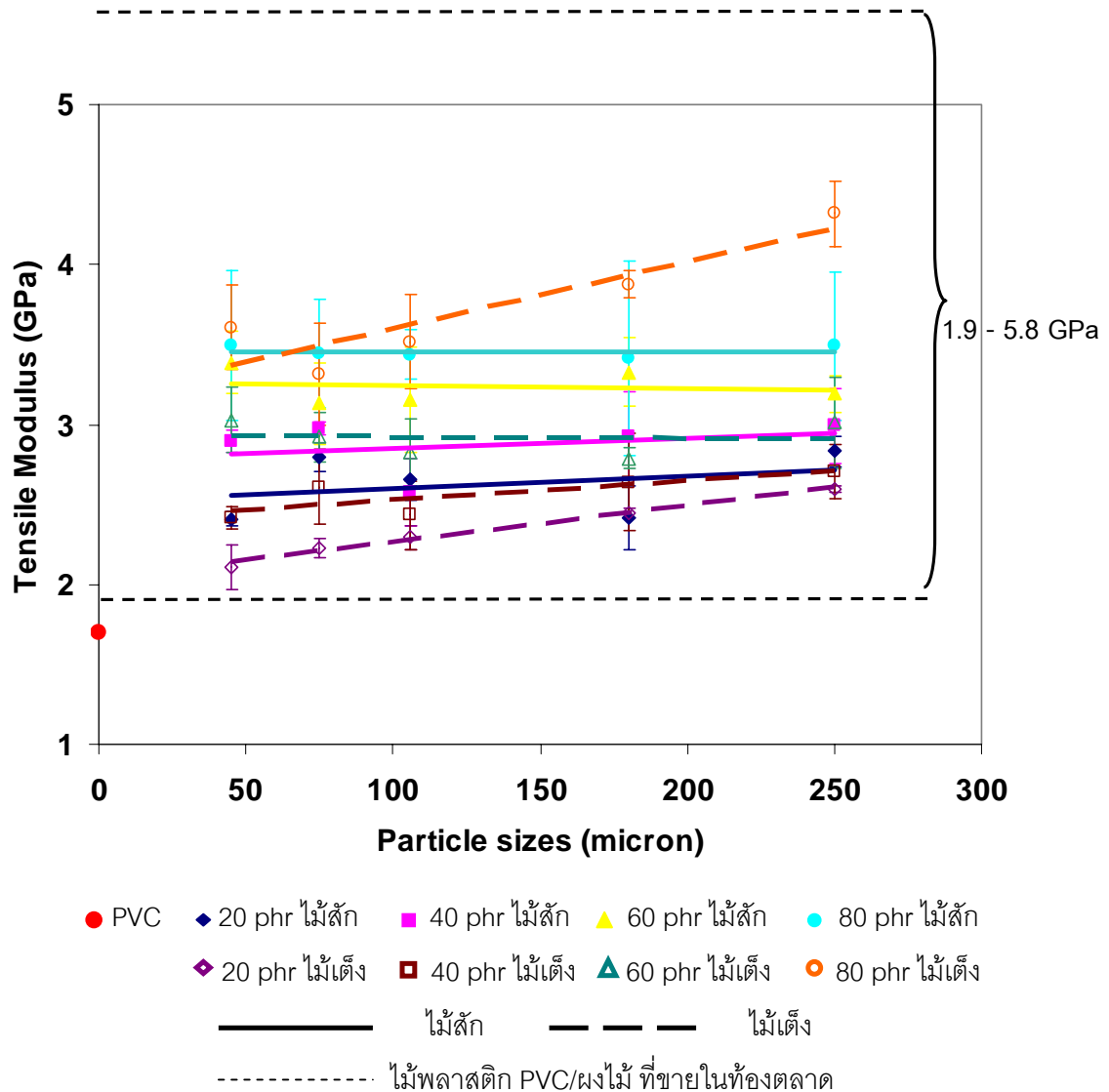
องค์ประกอบ	ผงไม้			
	ไม้สัก		ไม้เต็ง	
	ข้อมูลอ้างอิง	ทดลอง	ข้อมูลอ้างอิง	ทดลอง
เซลลูโลส	40-45	41.6	45-50	47.1
เฮมิเซลลูโลส	15-20	20.1	15-30	15.0
ลิกนิน	24-32	30.2	22-30	31.5
สารสกัดได้	0-5	8.1	0-10	6.3

* ข้อมูลอ้างอิง : A.K. Bledzki et al. Composites: Part A 36(2005)

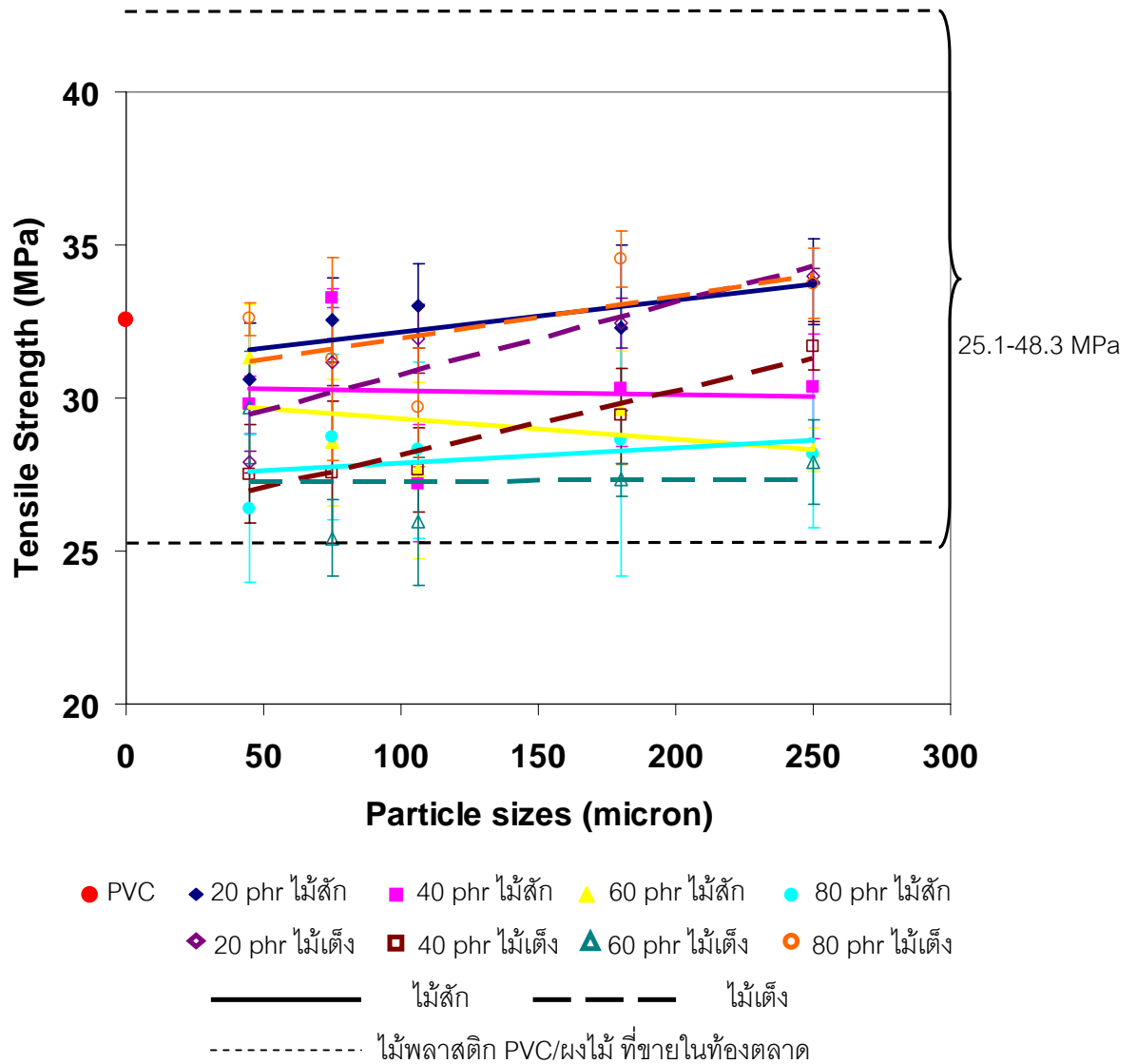
จากตารางที่ 4.1 องค์ประกอบหลักของผงไม้ทั้งสองชนิด คือ เซลลูโลส ซึ่งมีปริมาณร้อยละ 40-50 โดยน้ำหนักขององค์ประกอบทั้งหมดในไม้ โดยองค์ประกอบที่บ่งบอกถึงความแข็งแรงของไม้คือ ลิกนิน จากการทดลองพบว่า ปริมาณลิกนินในองค์ประกอบของผงไม้ทั้งสองชนิดมีค่าใกล้เคียงกัน โดยผงไม้สักมีปริมาณลิกนินร้อยละ 30.2 โดยน้ำหนัก และผงไม้เต็งมีปริมาณลิกนินร้อยละ 31.5 โดยน้ำหนัก ไม้ที่มีลิกนินมากจะมีความแข็งแรงสูง จากผลการวิเคราะห์สรุปได้ว่าไม้เต็งมีความแข็งแรงมากกว่าไม้สักเล็กน้อย

4.1 สมบัติการทนต่อแรงดึง (Tensile Property)

การศึกษาการทนต่อแรงดึงเพื่อเปรียบเทียบ ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) และค่าความแข็งแรงสูงสุดภายใต้แรงดึง (Ultimate Tensile Strength) ของ PVC บริสุทธิ์ และ ผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ ที่มีขนาดอนุภาคผงไม้ 45, 75, 106, 180 และ 250 ไมครอน ปริมาณผงไม้คือ 20, 40, 60 และ 80 phr ดังแสดงในรูปที่ 4.1 และ รูปที่ 4.2 ตามลำดับ



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงมอดูลัสภายใต้แรงดึงของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ ที่ขนาดและปริมาณของผงไม้ต่างๆ



รูปที่ 4.2 กราฟแสดง Ultimate Tensile stress ของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติกPVC/ผงไม้ ที่ขนาดและปริมาณของผงไม้ต่างๆ

จากรูปที่ 4.1 การทดสอบแรงดึงของ PVC บริสุทธิ์และผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ พบว่า มอดูลัสภายใต้แรงดึง (Tensile Modulus) ของ PVC บริสุทธิ์ คือ 1.7 GPa เมื่อใส่ผงไม้ลงไป ทำให้มอดูลัสภายใต้แรงดึงของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ มีค่าเพิ่มสูงกว่า PVC บริสุทธิ์ เนื่องจากผงไม้เป็นวัสดุที่มีความแข็งและมีค่ามอดูลัสสูง โดยธรรมชาติไม้เต็งมีค่ามอดูลัสภายใต้แรงดึงอยู่ในช่วง 20-23 GPa [44] และไม้สักมีค่ามอดูลัสภายใต้แรงดึงอยู่ในช่วง 8-17

GPa [45] เมื่อผสมรวมกับ PVC เป็นผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติกจึงเป็นผลทำให้ไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ มีมอดูลัสภายใต้แรงดึงสูงขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณของผงไม้ที่ใช้ในผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก พบว่าเมื่อปริมาณผงไม้เพิ่มขึ้นเป็นปริมาณ 20, 40, 60 และ 80 phr ค่ามอดูลัสภายใต้แรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้น โดยค่ามอดูลัสภายใต้แรงดึงของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้เต็ง มีค่า 34, 49, 69 และ 117 % ตามลำดับ ในขณะที่ค่ามอดูลัสภายใต้แรงดึงของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้สัก มีค่า 52, 64, 87, 100% ตามลำดับ และเมื่อคิดเทียบกับปริมาณเพิ่มขึ้นจาก 20 เป็น 40, 60 และ 80 phr มอดูลัสภายใต้แรงดึงของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้เต็ง มีค่าเพิ่มขึ้น 11, 12 และ 34% ตามลำดับ ในขณะที่ค่ามอดูลัสภายใต้แรงดึงของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้สัก มีค่า เพิ่มขึ้น 8, 12 และ 6.9% ตามลำดับ การใส่ผงไม้ทำให้มอดูลัสภายใต้แรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณของผงไม้ เนื่องจากการใส่ผงไม้ในปริมาณที่มากขึ้นทำให้วัสดุมีเนื้อที่เป็นผงไม้มากขึ้น จากเหตุผลที่กล่าวไปแล้วว่าผงไม้มีความแข็งและมีค่ามอดูลัสสูง จึงเป็นผลให้มอดูลัสภายใต้แรงดึงเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของผงไม้มากขึ้น และขณะที่ผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้ประกอบแต่ง PVC/ผงไม้ ถูกดึงในช่วง Hookean's region (ช่วงที่ใช้ในการคำนวณค่า Modulus of Elasticity) โมเลกุลของ PVC ตอบสนองต่อแรงดึงโดยเริ่มมีการคลายขดและขยับยืดออก อนุภาคผงไม้กลายเป็นเฟสที่จำกัดการเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุลของ PVC ทำให้ต้องใช้แรงดึงสูงขึ้นต่อหน่วยการยืดของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติกโดยรวม ซึ่งสะท้อนออกมาให้เห็นในรูปแบบค่า Modulus of Elasticity หรือ Young's modulus หรือมอดูลัสภายใต้แรงดึงสูงขึ้นเมื่อมีการใส่ผงไม้ [46]

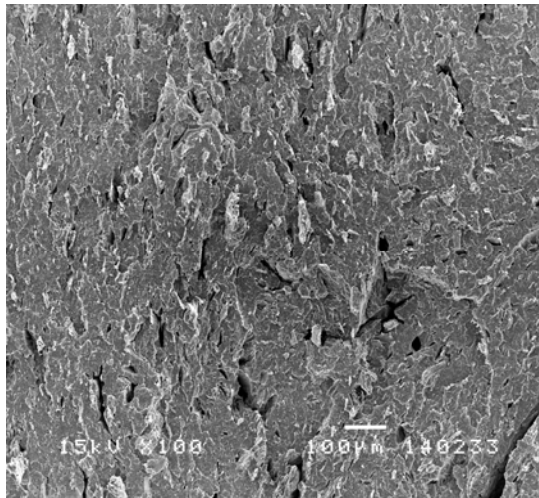
เมื่อเปรียบเทียบขนาดของอนุภาคที่มีผลต่อมอดูลัสภายใต้แรงดึงพบว่า โดยภาพรวมอนุภาคของผงไม้สักไม่มีผลต่อค่ามอดูลัสภายใต้แรงดึงมากนัก แต่อนุภาคของผงไม้เต็งที่อนุภาคขนาดใหญ่ขึ้นมีแนวโน้มของมอดูลัสภายใต้แรงดึงที่มากขึ้น โดยเฉพาะที่ปริมาณผงไม้เต็ง 80 phr อาจจะเป็นเนื่องมาจากสมบัติของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติกที่แสดงสมบัติในด้านความเป็นไม้มากขึ้น ทำให้มอดูลัสภายใต้แรงดึงมีค่าสูงขึ้น

รูปที่ 4.2 แสดงค่า Tensile strength หรือการทนต่อแรงดึงสูงสุดของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ พบว่า เมื่อเทียบกับ PVC บริสุทธิ์ ค่า Tensile strength โดยส่วนมากมีค่าลดลง เมื่อปริมาณผงไม้เพิ่มขึ้นเป็น 20, 40, 60 และ 80 phr ค่า Tensile strength ของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ลดลง 0.06, 8, 12 และ 16% ตามลำดับ และค่า Tensile

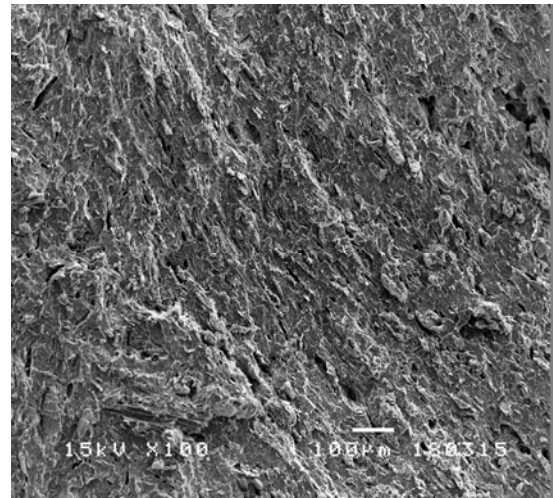
strength ของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้เต็ง ลดลง 3.5, 13, 19 และ 0.8% ตามลำดับ

เมื่อเปรียบเทียบผลของปริมาณผงไม้ พบว่าค่า Tensile strength ของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้สักลดลงตามปริมาณผงไม้ที่เพิ่มขึ้น โดยจาก 20 phr เพิ่มเป็น 40, 60 และ 80 phr ค่า Tensile strength ลดลง 7.5, 3.7 และ 3% ตามลำดับ ในขณะที่ค่า Tensile strength ของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้เต็ง ลดลงตามปริมาณผงไม้ที่เพิ่มขึ้น โดยจาก 20 phr เพิ่มเป็น 40, 60 ลดลง 9, 5.5% ในทางตรงกันข้ามค่า Tensile strength ของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้เต็ง ที่ปริมาณผงไม้ 80 phr มีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่า 20 phr รว 3% การลดลงของค่า Tensile strength ของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ เนื่องจากเหตุผล 3 ประการดังต่อไปนี้ (ก) ในผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติกมีผงไม้มากขึ้น เป็นผลให้ผงไม้เหล่านี้ยึดติดกับเมตริกซ์ PVC ไม่สม่ำเสมอทำให้เกิดช่องว่างระหว่างผิวของผงไม้และเมตริกซ์ PVC กลายเป็น defect ในผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติกและ/หรือระหว่างเมตริกซ์และผงไม้ไม่มีการเกิดพันธะกันขึ้นเมื่ออนุภาคของผงไม้ไม่ได้มีการปรับปรุงผิวหน้า (ข) เมื่อปริมาณผงไม้เพิ่มขึ้น อนุภาคของผงไม้อาจมีการกระจายตัวที่ไม่ดีนักหรือมีโอกาสเกิดการจับตัวกันเองของอนุภาคผงไม้เป็นกลุ่มก้อน (Agglomerate) (ค) เกิดช่องว่าง(Voids) ระหว่างเฟสของเมตริกซ์กับผงไม้ ทำให้ค่า Tensile strength ลดลง [42] ซึ่งสามารถสนับสนุนเหตุผลดังกล่าวได้ด้วยภาพถ่าย SEM ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ถึง รูปที่ 4.5 ซึ่งแสดงถึงการกระจายตัวของผงไม้ใน PVC เมตริกซ์ และการรวมตัวกันของอนุภาคผงไม้ รวมไปถึงการเกิดช่องว่างระหว่างเฟส ที่มีผลทำให้ค่า Tensile strength ลดลง

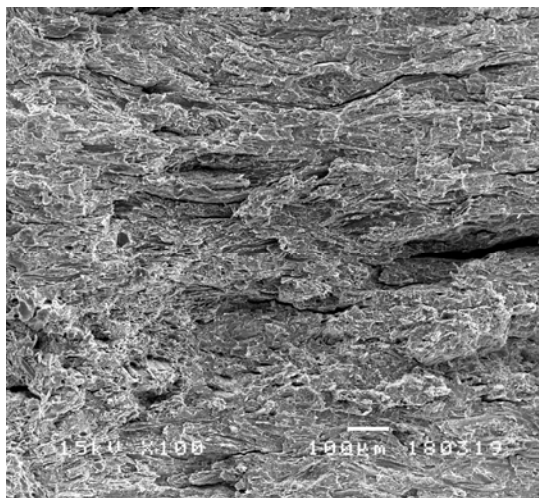
เมื่อเปรียบเทียบค่ามอดูลัสและค่า Tensile strength ของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ ที่ขายในท้องตลาดมีค่าอยู่ในช่วง 1.9-5.8 GPa และ 25.1-48.3 MPa [48-51] และเมื่อเปรียบเทียบกับไม้พลาสติกที่ผลิตขึ้นในงานวิจัยนี้ พบว่าไม้พลาสติกจาก PVC/ผงไม้ทั้งสองชนิด มีค่าอยู่ในช่วงเดียวกับไม้พลาสติกที่มีขายในท้องตลาด แสดงให้เห็นว่า ไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ ที่ผลิตได้สามารถนำไปใช้งานแทนไม้ธรรมชาติได้



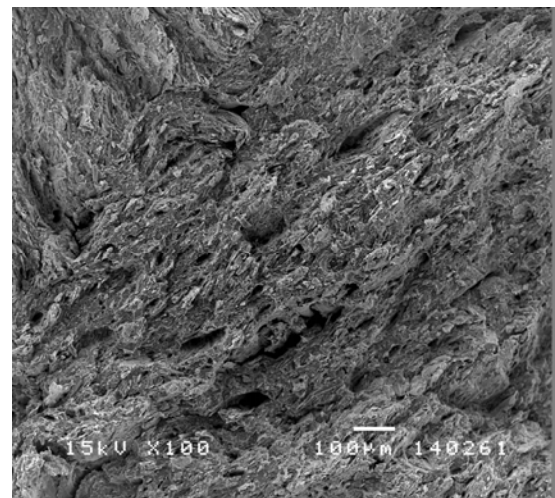
(ก) แสดงภาพการกระจายตัวของผงไม้สัก
ขนาด 45 ไมครอน 20 phr



(ข) แสดงภาพการกระจายตัวของผงไม้สัก
ขนาด 45 ไมครอน 40 phr

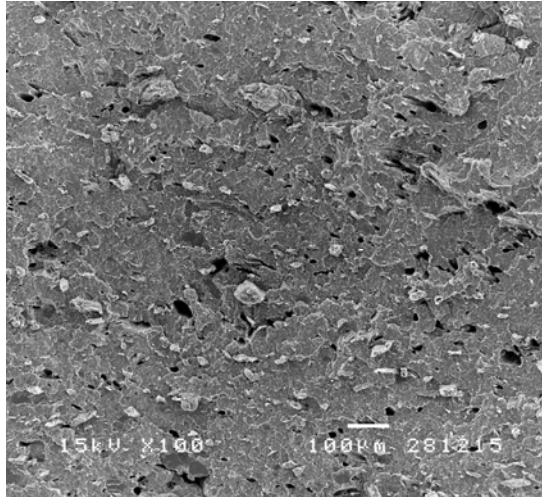


(ค) แสดงภาพการกระจายตัวของผงไม้สัก
ขนาด 45 ไมครอน 60 phr

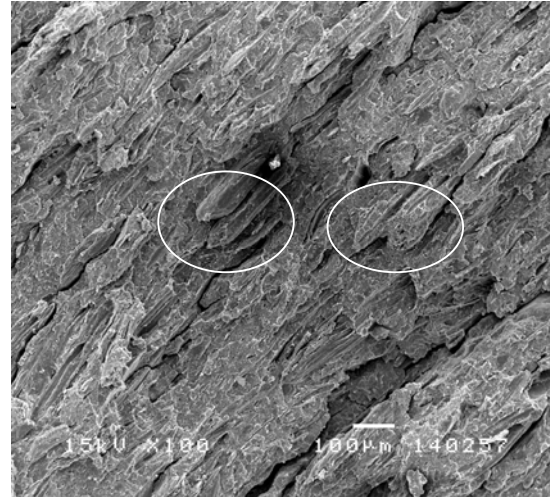


(ง) แสดงภาพการกระจายตัวของผงไม้สัก
ขนาด 45 ไมครอน 80 phr

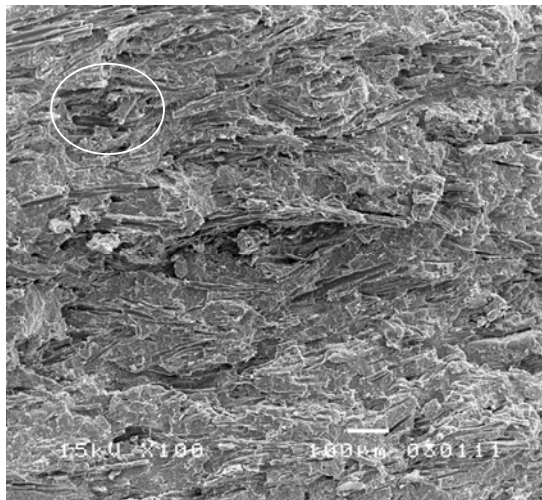
รูปที่ 4.3 แสดงภาพการกระจายตัวของผงไม้สัก ขนาดอนุภาค 45 ไมครอน ที่ปริมาณต่างๆ
กำลังขยาย 100



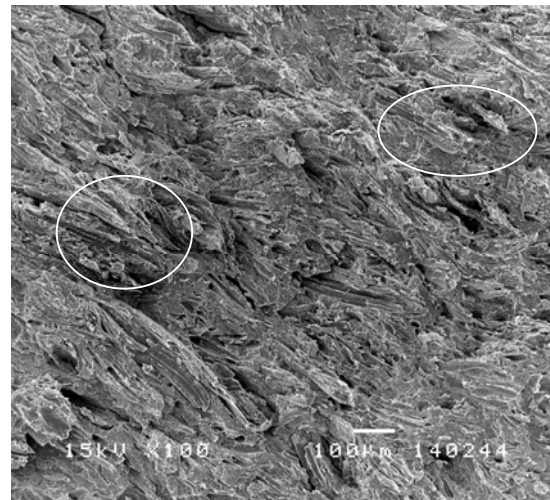
(จ) แสดงภาพการกระจายตัวของผงไม้เต็ง
ขนาด 45 ไมครอน 20 phr



(ข) แสดงภาพการกระจายตัวของผงไม้เต็ง
ขนาด 45 ไมครอน 40 phr

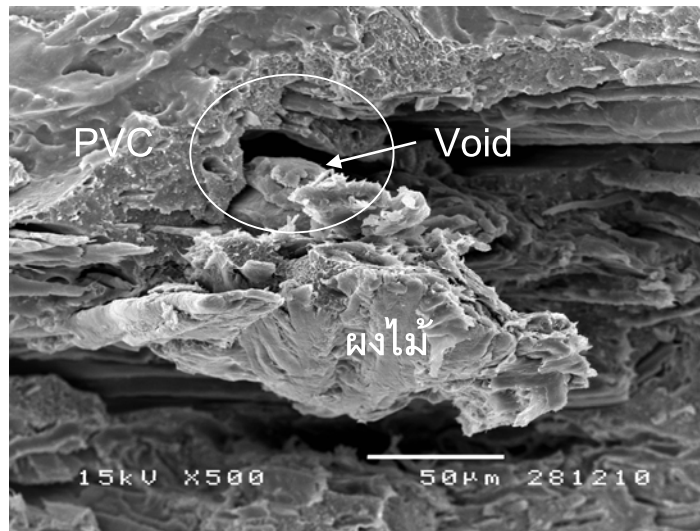


(ค) แสดงภาพการกระจายตัวของผงไม้เต็ง
ขนาด 45 ไมครอน 60 phr

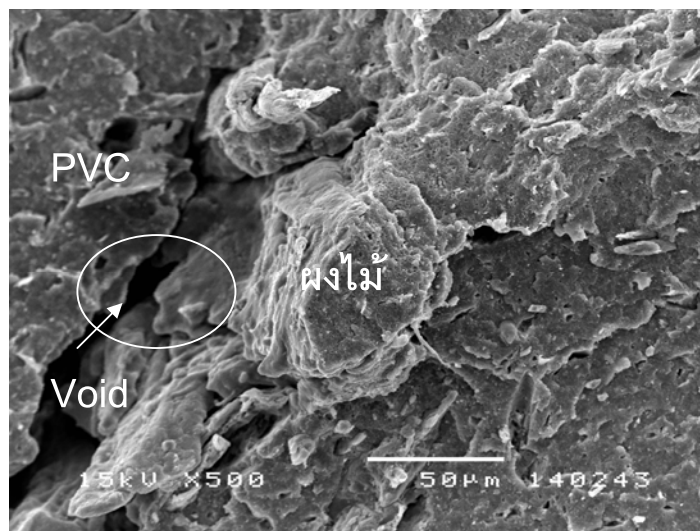


(ง) แสดงภาพการกระจายตัวของผงไม้เต็ง
ขนาด 45 ไมครอน 80 phr

รูปที่ 4.4 แสดงภาพการกระจายตัวของผงไม้เต็ง ขนาดอนุภาค 45 ไมครอน ที่ปริมาณต่างๆ
กำลังขยาย 100



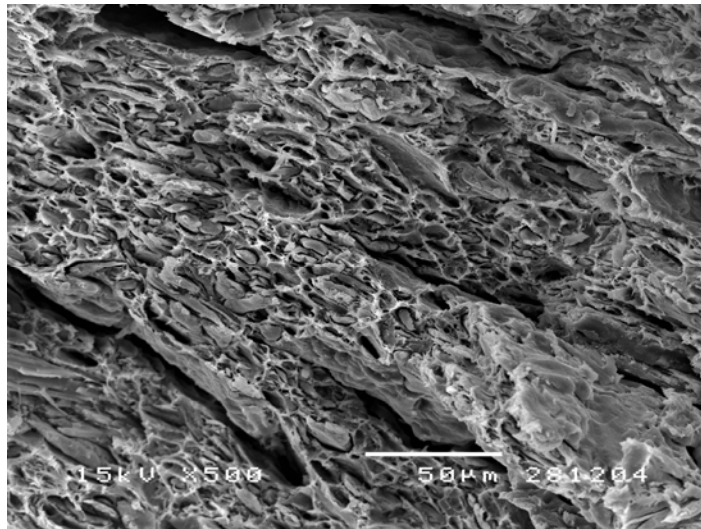
(ฉ) แสดงภาพการยึดติดระหว่างเฟสของผงไม้สักและเมทริกซ์ PVC ขนาด 250 ไมครอน 20 phr



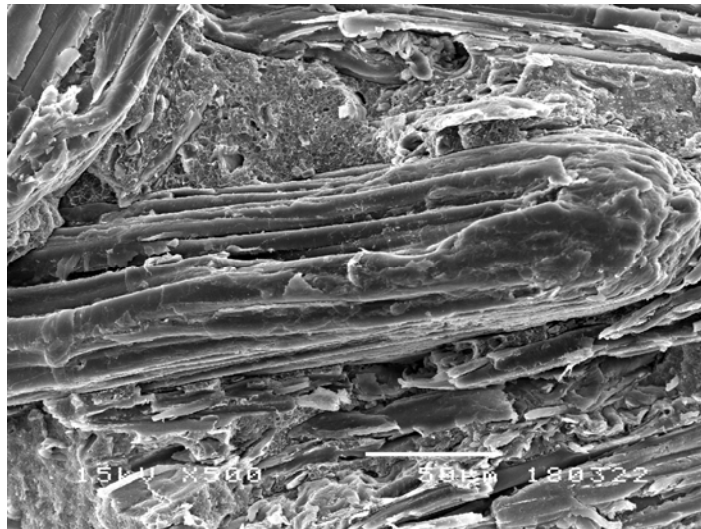
(ญ) แสดงภาพการยึดติดระหว่างเฟสของผงไม้เต็งและเมทริกซ์ PVC ขนาด 250 ไมครอน 20 phr

รูปที่ 4.5 แสดงภาพการยึดติดระหว่างเฟสของผงไม้และเมทริกซ์ PVC
ขนาดอนุภาค 250 ไมครอน กำลังขยาย 500

ในด้านอิทธิพลของขนาดอนุภาคผงไม้ พบว่าขนาดอนุภาคใหญ่ขึ้นส่งผลให้ค่า Tensile strength มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากอนุภาคผงไม้ขนาดเล็กมีโอกาสเกิดการจับตัวกันเองของอนุภาคผงไม้เป็นกลุ่มก้อนหรือเกิดการกระจายตัวของผงไม้ในเมตริกซ์ที่ไม่ค่อยดีมากกว่าผงไม้ที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ จึงส่งผลต่อค่า Tensile strength ดังแสดงในรูปที่ 4.6 และ 4.7 เปรียบเทียบระหว่างขนาดอนุภาค 45 (ดังแสดงในรูปที่ 4.6) และ 250 ไมครอน (ดังแสดงในรูปที่ 4.7) พบว่าที่ขนาดอนุภาค 45 ไมครอน ผงไม้มีการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อน ในขณะที่ ขนาดใหญ่กว่าไม่เห็นการรวมตัวกันของอนุภาคเท่าใดนัก



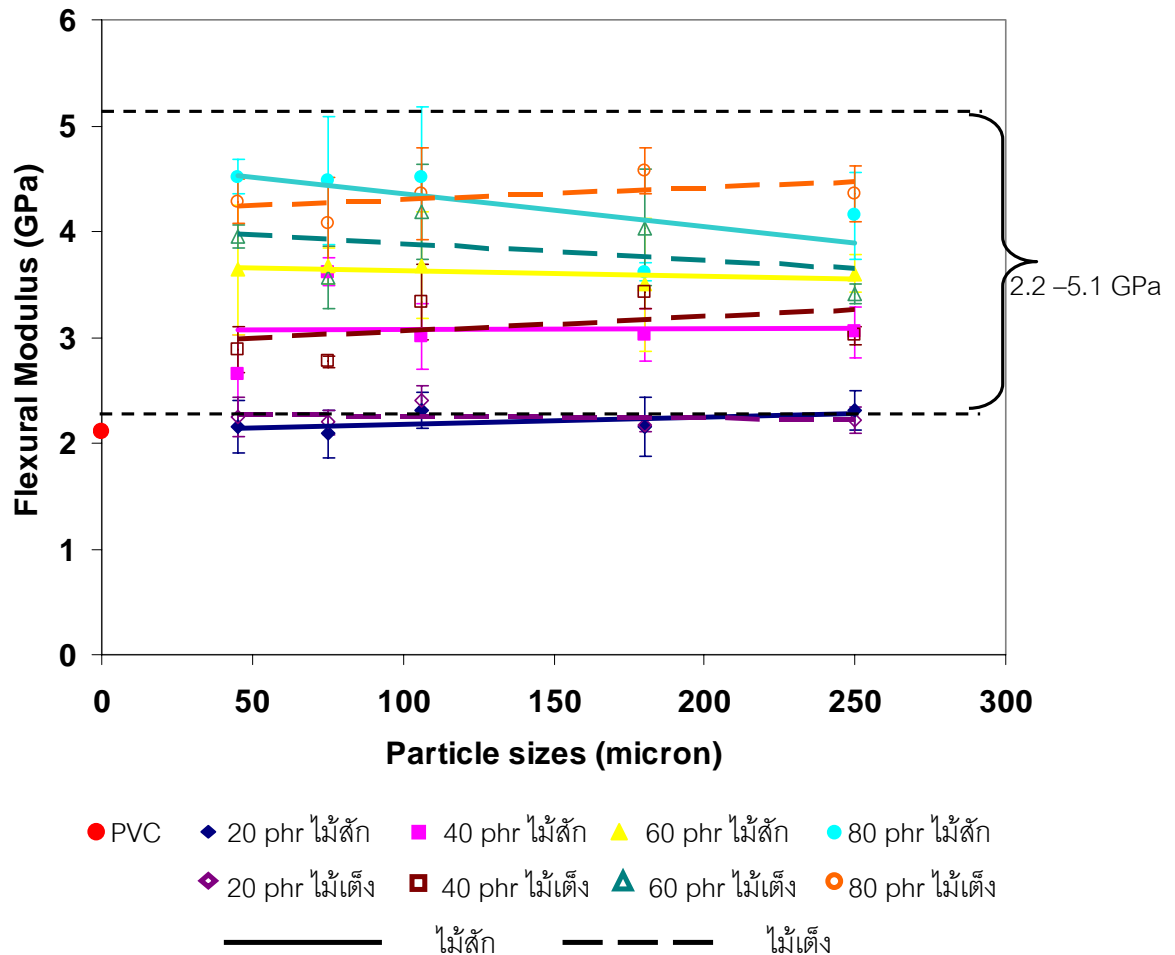
รูปที่ 4.6 แสดงภาพการกระจายตัวของผงไม้ ขนาดอนุภาค 45 ไมครอน



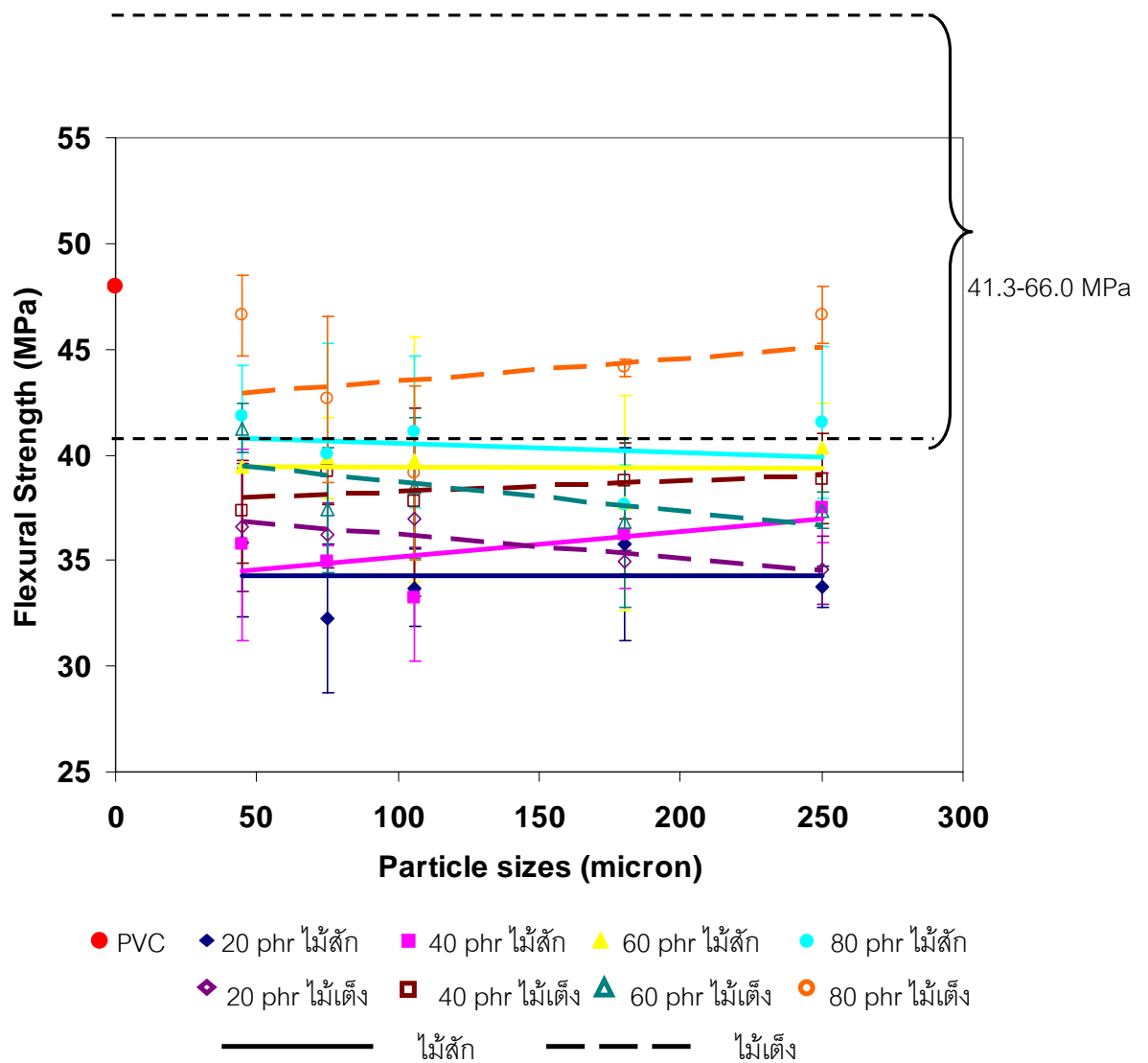
รูปที่ 4.7 แสดงภาพการกระจายตัวของผงไม้ ขนาดอนุภาค 250 ไมครอน

4.2 สมบัติการทนต่อแรงดัด (Flexural Property)

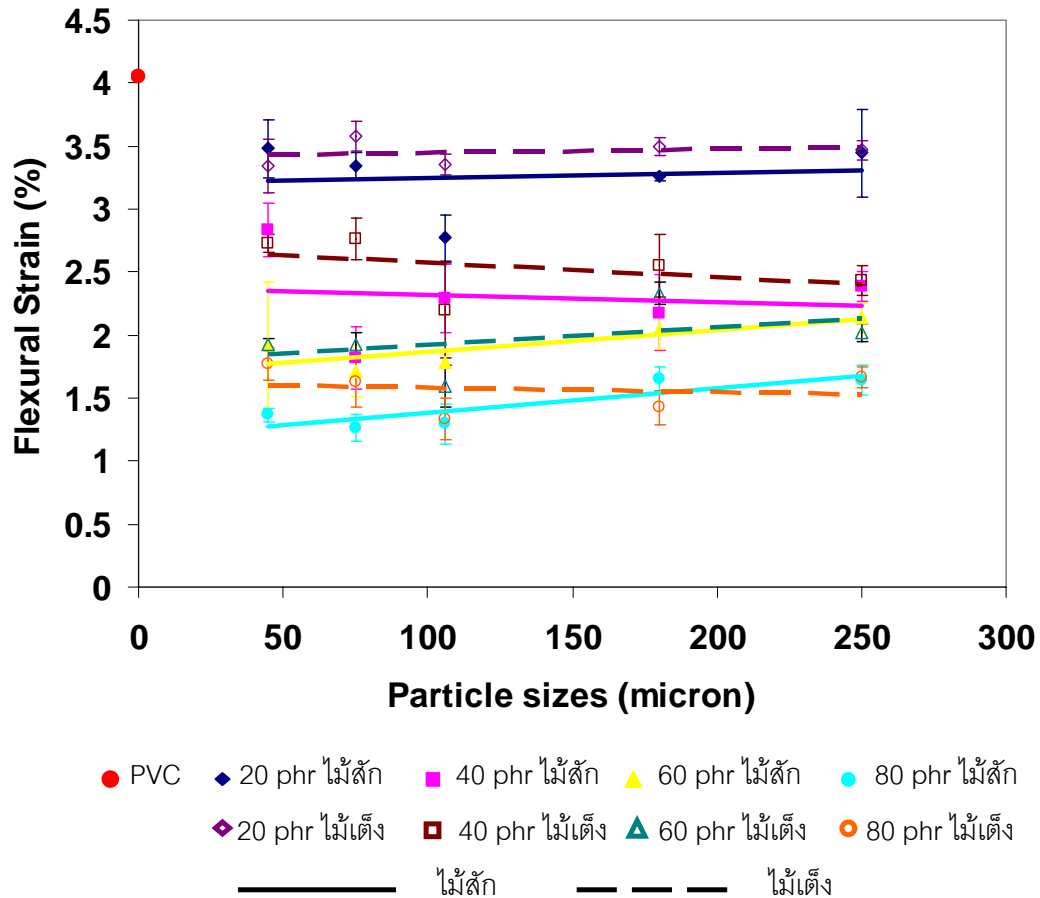
งานวิจัยนี้ทำการศึกษากการทนต่อแรงดัด เพื่อเปรียบเทียบค่ามอดูลัสภายใต้แรงดัด (Flexural Modulus), ค่าความแข็งแรงสูงสุดภายใต้แรงดัด (Ultimate Flexural Strength) และ ค่าการยืดตัวสูงสุดเนื่องจากแรงดัด (Ultimate Flexural Strain) ของ PVC บริสุทธิ์ และผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ ที่มีขนาดอนุภาคผงไม้ 45, 75, 106, 180 และ 250 ไมครอน ปริมาณผงไม้คือ 20, 40, 60 และ 80 phr ผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 4.8 ถึง 4.9



รูปที่ 4.8 กราฟแสดง Flexural Modulus ของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ ที่ขนาดและปริมาณของผงไม้ต่างๆ



รูปที่ 4.9 กราฟแสดง Ultimate Flexural stress ของผลิตภัณฑ์ประกอบต่างไม้พลาสติกPVC/ผงไม้
 ที่ขนาดและปริมาณของผงไม้ต่างๆ



รูปที่ 4.10 กราฟแสดง Ultimate Flexural strain ของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติกPVC/ผงไม้ ที่ขนาดและปริมาณของผงไม้ต่างๆ

จากรูปที่ 4.9 มอดูลัสภายใต้แรงดัดของ PVCบริสุทธิ์ คือ 2.11 GPa เมื่อเติมผงไม้ใน PVC ผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ ทุกสูตร มีค่ามอดูลัสภายใต้แรงดัดโค้งสูงกว่าของ PVC บริสุทธิ์ การที่มอดูลัสเพิ่มสูงขึ้น เพราะเราใส่ผงไม้ซึ่งเป็นวัสดุที่มีมอดูลัสสูงเข้าไปในระบบ เมื่อเติมผงไม้เพิ่มจาก 20, 40, 60 และ 80 phr ค่ามอดูลัสภายใต้แรงดัดของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้สัก มีค่าเพิ่มขึ้น 4, 45, 69, 100% ตามลำดับ และค่ามอดูลัสภายใต้แรงดัดของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้แต่ง เพิ่มขึ้นราว 8, 46, 80 และ 103 % ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการเติมผงไม้ ทำให้มอดูลัสภายใต้แรงดัดเพิ่มขึ้นจากระดับของ PVC บริสุทธิ์

การเปรียบเทียบอิทธิพลของปริมาณผงไม้ที่เพิ่มขึ้นจาก 20 phr เป็น 40, 60 และ 80 phr พบว่ามอดูลัสภายใต้แรงดัดของไม้พลาสติกเหล่านี้เพิ่มขึ้น โดยที่ค่ามอดูลัสภายใต้แรงดัดของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้สัก มีค่าเพิ่มขึ้น 40, 15 และ 19 % ตามลำดับ และค่า

มอดูลัสภายใต้แรงดัดของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้เต็ง เพิ่มขึ้นราว 40, 23 และ 13 % ตามลำดับ ดังนั้นการใส่ผงไม้ ทำให้มอดูลัสภายใต้แรงดัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณของผงไม้ เนื่องจากการใส่ผงไม้ในปริมาณที่มากขึ้นทำให้วัสดุมีเนื้อที่เป็นผงไม้มากขึ้นอีกทั้งยังมีความแข็งเพิ่มขึ้น จึงเป็นผลให้มอดูลัสภายใต้แรงดัดเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของผงไม้มากขึ้น

ส่วนอิทธิพลของขนาดอนุภาค จะเห็นว่ามอดูลัสภายใต้แรงดัดของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ ไม่มีความแตกต่างกันเท่าใดนัก

รูปที่ 4.9 แสดง Flexural strength ของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ เมื่อเปรียบเทียบกับ PVCบริสุทธิ์ ระดับ Flexural strength ของ PVCบริสุทธิ์ มีค่า 48 MPa ในขณะที่ผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก มีค่าต่ำกว่า PVC บริสุทธิ์ กล่าวคือผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้สัก ที่มีผงไม้ปริมาณ 20 phr มีระดับ Flexural strength ต่ำกว่าระดับของ PVC บริสุทธิ์ราว 42% เมื่อปริมาณผงไม้เพิ่มเป็น 40, 60 และ 80 phr ค่า Flexural strength ของไม้พลาสติกลดลงราว 37, 24 และ 20 % ตามลำดับ ผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้เต็ง มีระดับ Flexural strength ต่ำกว่าระดับของ PVCบริสุทธิ์ราว 36% เมื่อปริมาณผงไม้เพิ่มเป็น 40, 60 และ 80 phr ค่า Flexural strength ของไม้พลาสติกลดลงราว 27, 27 และ 11 % ตามลำดับ

การเปรียบเทียบผลของปริมาณผงไม้เมื่อเติมลงใน PVC เมตริกซ์ พบว่า เมื่อปริมาณผงไม้เพิ่มขึ้น จาก 20 เป็น 40, 60 และ 80 phr ค่า Flexural strength ของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้สัก มีค่าเพิ่มขึ้น 41.6, 15.47 และ 19 % ตามลำดับ และผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้เต็ง มีค่าเพิ่มขึ้น 7.38, 7.38 และ 23.29 % ตามลำดับ เนื่องจากผงไม้เป็นวัสดุภาคที่แข็ง และดัดโค้งได้ยากกว่า PVC จึงทำให้ต้องใช้แรงในการทำให้ชิ้นงานเกิดการแตกหักมากขึ้น อีกเหตุผลหนึ่ง C.F. Kuan และคณะรายงานว่า การเพิ่มขึ้นของ strength เป็นเพราะว่าผงไม้มีหมู่ไฮดรอกซิลที่บริเวณผิวหน้ามาก ทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนกับเมตริกซ์ที่มีขั้วได้ ดังนั้นการยึดติดกันของผงไม้และเมตริกซ์จะดีขึ้นด้วยพันธะไฮโดรเจน [38] จึงเป็นเหตุให้ค่า Flexural Strength เพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณผงไม้มากขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบผลของขนาดของอนุภาคผงไม้ พบว่าขนาดอนุภาคไม่มีผลต่อค่า Flexural Strength เท่าใดนัก

เมื่อเปรียบเทียบไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ ในงานวิจัยนี้ กับไม้พลาสติกที่ขายตามท้องตลาด พบว่า ไม้พลาสติกที่ขายตามท้องตลาด (ผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้) มีค่า มอดูลัส และ Flexural strength อยู่ในช่วง 2.2 – 5.1 GPa และ 41.3 – 66.0 MPa [48-51] ตามลำดับ ไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ในงานวิจัยนี้มีค่ามอดูลัสอยู่ในช่วงเดียวกันกับไม้พลาสติกที่ขายตามท้องตลาด แต่ค่า Flexural strength ของไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ในงานวิจัยนี้มีค่าต่ำกว่าไม้พลาสติกที่มีขายในท้องตลาด แสดงให้เห็นว่าถ้าจะนำไม้พลาสติก PVC/ผงไม้เต็ง และไม้พลาสติก PVC/ผงไม้สักที่ผลิตได้ไปใช้งาน ควรเลือกใช้ในอัตราส่วนที่มีผงไม้ในปริมาณที่มากกว่า 60 phr

จากรูปที่ 4.10 แสดงการยึดตัวภายใต้แรงดัดของ PVCบริสุทธิ์ และผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ PVCบริสุทธิ์สามารถยึดตัวได้ 4% ในขณะที่ผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ มีระดับการยึดตัวภายใต้แรงดัด ต่ำกว่าของ PVCบริสุทธิ์ เนื่องจากผงไม้ขัดขวางการยึดตัวของเมตริกซ์ PVC เป็นเหตุให้การโค้งลดลง เมื่อเติมผงไม้เป็นปริมาณ 20, 40, 60 และ 80 phr ระดับการดัดโค้งของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้สัก มีค่าลดลง 25, 76, 112 และ 177 % ตามลำดับ ในทางเดียวกันระดับการดัดโค้งของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้เต็ง มีค่าลดลง 17, 60.5, 108 และ 163 % ตามลำดับ

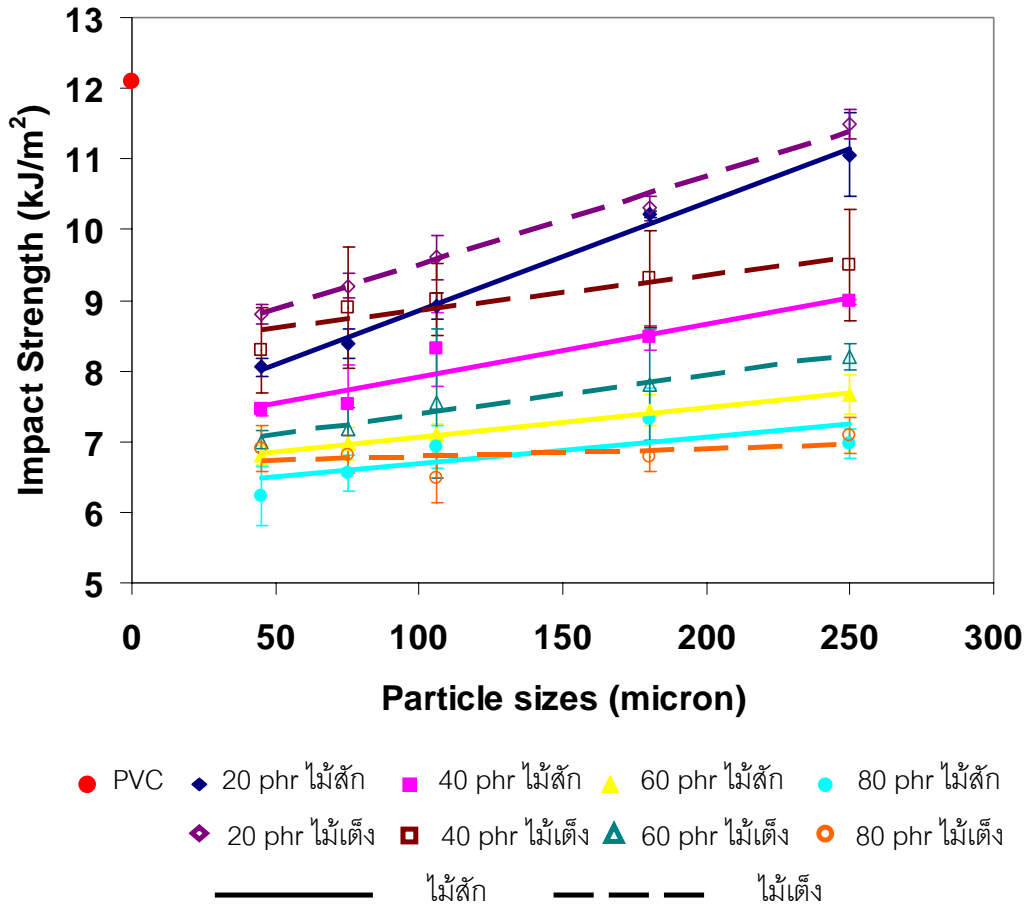
เปรียบเทียบปริมาณผงไม้ที่เพิ่มขึ้นจาก 20 เป็น 40, 60 และ 80 phr การยึดตัวของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้สัก ลดลง 40.5, 86.4 และ 122% ตามลำดับ ขณะที่ ผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้เต็ง มีค่าลดลง 36, 74.2, และ 122 % ตามลำดับ ปริมาณผงไม้ที่มากขึ้น ทำให้การดัดโค้งของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ทำได้ยากขึ้น ผงไม้ที่เสียดไปขัดขวางการโค้งตัวของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก ทำให้ผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก ดัดโค้งได้น้อยลงเมื่อปริมาณผงไม้มากขึ้น

เปรียบเทียบอิทธิพลของขนาดอนุภาคผงไม้จาก 45 ถึง 250 ไมครอน จากรูปที่ 4.10 จะเห็นได้ว่าขนาดของอนุภาคผงไม้มีผลต่อการดัดโค้งของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติกเพียงเล็กน้อย โดยการดัดโค้งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อขนาดอนุภาคของผงไม้ใหญ่ขึ้น

4.3 สมบัติการทนต่อแรงกระแทก (Impact Property)

งานวิจัยนี้ศึกษาการทนต่อแรงกระแทกที่มีการบากชิ้นงานผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ ทั้งผงไม้เนื้ออ่อน และผงไม้เนื้อแข็ง เพื่อเปรียบเทียบการทนต่อแรงกระแทกและพลังงานที่

ใช้ในการกระแทกผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ ที่มีขนาดอนุภาค 45, 75, 106, 180, และ 250 ไมครอน ที่ปริมาณผงไม้ 20, 40, 60 และ 80 phr จนแตกหัก ดังแสดงในรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงค่าการทนแรงกระแทกของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ ที่ขนาดและปริมาณผงไม้ต่างๆ

รูปที่ 4.11 แสดงผลการทดสอบแรงกระแทก โดยที่ค่าการทนแรงกระแทกของ PVC บริสุทธิ์มีค่า impact strength อยู่ที่ระดับ 12.1 kJ/m^2 แต่เมื่อเติมผงไม้ลงไป พบว่าไม้พลาสติก PVC ผงไม้ทุกสูตรทนต่อแรงกระแทกน้อยกว่า PVC บริสุทธิ์มาก

โดยการเติมผงไม้สัก 20 phr มีผลให้การทนต่อแรงกระแทกลดลงราว 35 % เมื่อปริมาณผงไม้สักเพิ่มขึ้นอีกเป็น 40, 60 และ 80 phr พบว่าการทนต่อแรงกระแทกลดลงไปอีกราว 45, 70 และ 73 % ตามลำดับ ในขณะที่ เมื่อเติมผงไม้เต็ง มีผลให้การทนต่อแรงกระแทกลดลงราว 26, 34, 60 และ 73 % เมื่อปริมาณผงไม้เต็งเพิ่มขึ้นเป็น 20, 40, 60 และ 80 phr ตามลำดับ การลดลงของค่าการทนต่อแรงกระแทกของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ เนื่องจากผงไม้เป็นวัสดุที่มีความ

แข็งมากกว่าเมื่อเทียบกับ PVC ที่มีความเหนียว การใส่ผงไม้ในผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ส่งผลให้ไม้พลาสติกมีความเปราะเพิ่มขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณที่มีต่อค่า impact strength พบว่าค่า impact strength ของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ ทั้งสองชนิดมีค่า ลดลง

โดยที่ปริมาณผงไม้สัก 40 phr ค่า Impact strength ลดลงจาก 20 phr 22 % และเมื่อปริมาณผงไม้สักสูงขึ้นเป็น 60 phr ค่า impact strength ลดลงจาก 20 และ 40 phr ราว 51 และ 17% ตามลำดับ เมื่อปริมาณผงไม้สักสูงขึ้นถึง 80 phr พบว่า ค่า Impact strength ลดลงจาก 20, 40 และ 60 phr 58, 29 และ 10% ตามลำดับ

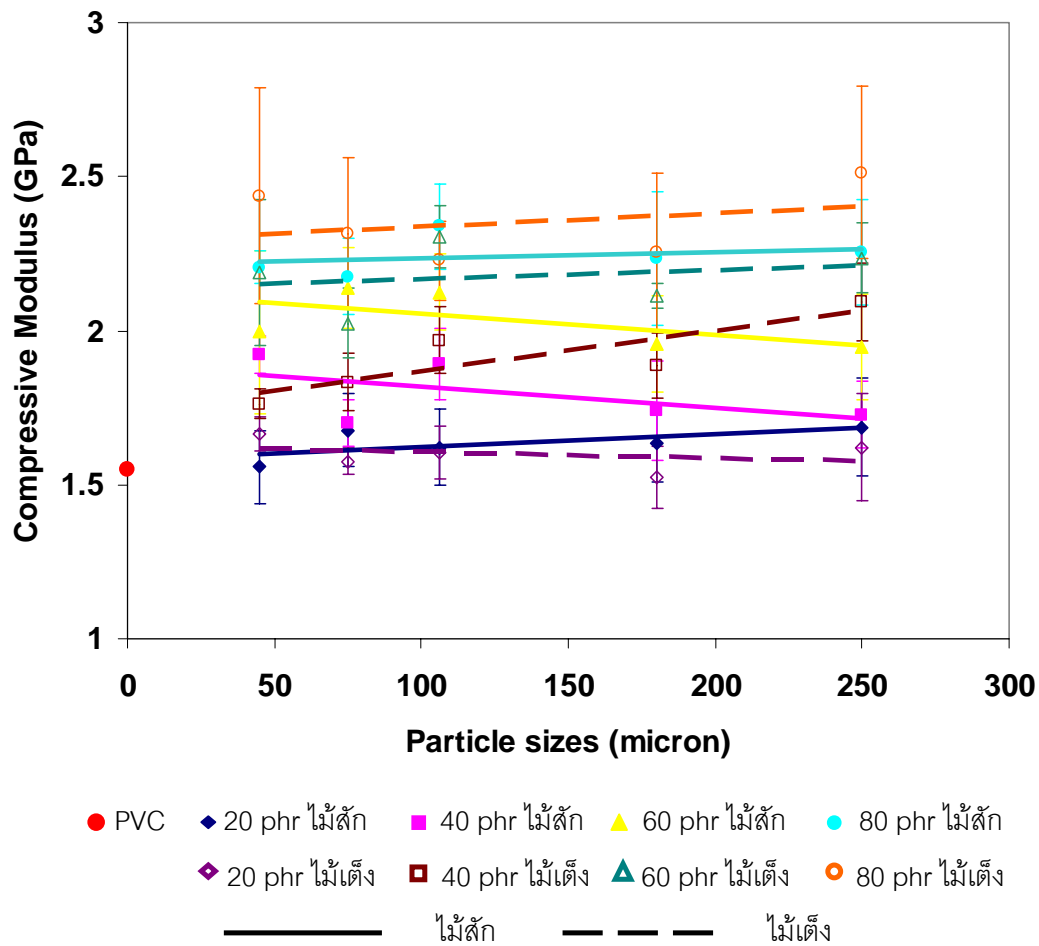
และเมื่อปริมาณผงไม้เต็ง 40 phr ค่า Impact strength ลดลงจาก 20 phr 21 % และเมื่อปริมาณผงไม้เต็งเพิ่มขึ้นเป็น 60 phr ค่า impact strength ลดลงจาก 20 และ 40 phr ราว 40 และ 15% ตามลำดับ เมื่อปริมาณผงไม้เต็งสูงขึ้นถึง 80 phr พบว่า ค่า Impact strength ลดลงจาก 20, 40 และ 60 phr 62, 33 และ 15% ตามลำดับ จะเห็นว่ายิ่งผสมผงไม้มากขึ้น การทนต่อแรงกระแทกของไม้พลาสติกก็ยิ่งลดลงอย่างเห็นได้ชัด

นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบขนาดอนุภาคของผงไม้จาก 45,75,106,180 และ 250 ไมครอน จะเห็นว่าขนาดของอนุภาคผงไม้มีอิทธิพลต่อการทนแรงกระแทกของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก อย่างชัดเจนที่ทุกระดับปริมาณของผงไม้ที่เติมลงไป โดย Impact strength มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดของอนุภาคผงไม้ใหญ่ขึ้น

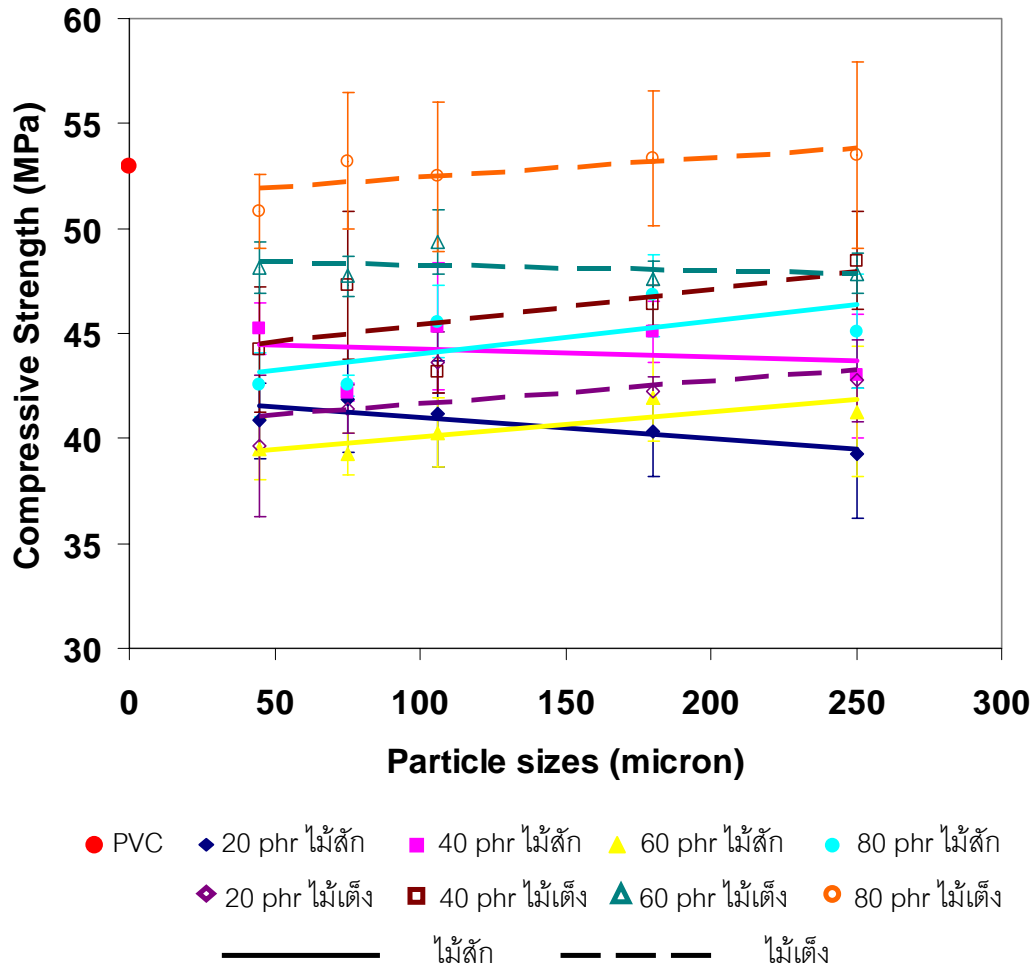
เมื่อเปรียบเทียบไม้พลาสติกจาก PVC/ผงไม้ กับไม้พลาสติกที่ขายอยู่ทั่วไปตามท้องตลาด พบว่า ไม้พลาสติกที่ขายอยู่ทั่วไปตามท้องตลาด (ผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้) มีค่า Impact strength โดยเฉลี่ยอยู่ที่ 3.67 kJ/m^2 [51] และเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกจาก PVC/ผงไม้ พบว่าวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกจาก PVC/ผงไม้ ที่มีปริมาณผงไม้ 20, 40, 60 และ phr มีค่าสูงกว่าไม้พลาสติกในท้องตลาด แสดงให้เห็นว่าไม้พลาสติก PVC/ไม้ ที่ผลิตได้สามารถนำไปใช้งานแทนไม้ธรรมชาติได้

4.4 สมบัติการทนต่อแรงกด (Compressive Property)

สมบัติการทนต่อแรงกดทำให้สามารถเปรียบเทียบค่า Modulus of Elasticity และ ค่า Ultimate compressive stress ของ PVC บริสุทธิ์ และผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ ที่มีขนาดอนุภาคผงไม้ 45, 75, 106, 180 และ 250 ไมครอน ปริมาณผงไม้คือ 20, 40, 60 และ 80 phr ดังแสดงในรูปที่ 4.12 และ รูปที่ 4.13 ตามลำดับ



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงมอดูลัสของแรงกดของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ ที่ขนาดและปริมาณของผงไม้ต่างๆ



รูปที่ 4.13 กราฟแสดง Ultimate Compression stress ของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ ที่ขนาดและปริมาณของผงไม้ต่างๆ

จากรูปที่ 4.12 แสดงมอดูลัสภายใต้แรงกดของ PVCบริสุทธิ์ มีค่า 1.5 GPa ซึ่งน้อยกว่ามอดูลัสภายใต้แรงกดของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติกทุกสูตร โดยที่ค่ามอดูลัสภายใต้แรงกดของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้สัก เพิ่มขึ้น 10, 20, 23 และ 50 % เมื่อปริมาณผงไม้เพิ่มจาก 20, 40, 60 และ 80 phr ตามลำดับ และผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้เต็ง มีค่ามอดูลัสภายใต้แรงกดเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณผงไม้เพิ่มจาก 20, 40, 60 และ 80 phr รวบรวม 8, 26.67, 66.67 และ 53.33 % ตามลำดับ การเติมผงไม้ที่มีมอดูลัสสูง ทำให้มอดูลัสภายใต้แรงกดเพิ่มขึ้น

การเปรียบเทียบผลของปริมาณผงไม้ที่มีต่อค่ามอดูลัสภายใต้แรงกด พบว่า มอดูลัสภายใต้แรงกดมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของผงไม้ เมื่อผงไม้สักเพิ่มปริมาณจาก 20 phr เป็น 40, 60 และ 80 phr ค่ามอดูลัสภายใต้แรงกดของผลิตภัณฑ์ประกอบไม้พลาสติก เพิ่มขึ้น 32.7, 18.34 และ 33.33% ตามลำดับ และเมื่อผงไม้เต็งเพิ่มปริมาณจาก 20 phr เป็น 40, 60 และ 80 phr ค่ามอดูลัสภายใต้แรงกดของผลิตภัณฑ์ประกอบไม้พลาสติก เพิ่มขึ้น 10.14, 31.68 และ 26% ตามลำดับ เนื่องจาก ผงไม้ที่เติมเข้าไปในระบบ ทำหน้าที่รับแรงกดที่ส่งต่อจากเมตริกซ์ PVC เมื่อปริมาณผงไม้มากขึ้นก็จะสามารถรับแรงกดได้สูงขึ้น

ในการเปรียบเทียบขนาดของอนุภาคของผงไม้ พบว่า ผลของขนาดอนุภาคที่มีต่อมอดูลัสภายใต้แรงกด มีความเป็นไปได้ทั้ง 2 กรณี คือ เมื่อขนาดใหญ่ขึ้นค่ามอดูลัสสูงขึ้นในบางสูตรการทดลอง ในขณะที่บางสูตรเมื่อขนาดอนุภาคใหญ่ขึ้นค่ามอดูลัสลดลง

รูปที่ 4.13 แสดงค่า Compressive strength ของ PVCบริสุทธิ์ที่มีค่าอยู่ในระดับ 53 MPa จากการทดลองพบว่า Compressive strength ของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ มีค่าต่ำกว่า Compressive strength ของ PVCบริสุทธิ์

เมื่อเปรียบเทียบผลของปริมาณผงไม้ พบว่าค่า Compressive strength เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณผงไม้เพิ่มขึ้น โดยเมื่อเพิ่มผงไม้จาก 20 phr เป็น 40, 60 และ 80 phr มีผลให้ค่า Compressive strength ของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้สัก เพิ่มขึ้น 9.25, 0 และ 8% และผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้เต็ง มีค่ามอดูลัสภายใต้แรงกดเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณผงไม้เพิ่มจาก 20 เป็น 40, 60 และ 80 phr รวบรวม 10, 15.9 และ 25.6 % ตามลำดับ เนื่องมาจากผงไม้ที่ได้ทำหน้าที่ร่วมรับแรงกด ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติกมี Compressive strength สูงขึ้นเมื่อปริมาณผงไม้มากขึ้น

ในการเปรียบเทียบขนาดของอนุภาคของผงไม้ที่มีต่อค่า Compressive strength พบว่า ผลของขนาดอนุภาคที่มีต่อ Compressive strength มีความเป็นไปได้ทั้ง 2 กรณี คือ เมื่อขนาดใหญ่ขึ้นค่ามอดูลัสสูงขึ้นในบางสูตรการทดลอง ในขณะที่บางสูตรเมื่อขนาดอนุภาคใหญ่ขึ้นค่ามอดูลัสลดลง เช่นเดียวกับมอดูลัสภายใต้แรงกด

4.5 สมบัติทางความร้อนของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้

4.5.1 Dynamic Mechanical Analysis (DMA)

การทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DMA ของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ ขนาด 45 และ 250 ไมครอน ที่ปริมาณ 20 และ 80 phr เพื่อหาอุณหภูมิการแปรสภาพแก้ว (Glass transition temperature ; Tg) ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าอุณหภูมิการแปรสภาพแก้วของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ เปรียบเทียบกับ PVC บริสุทธิ์

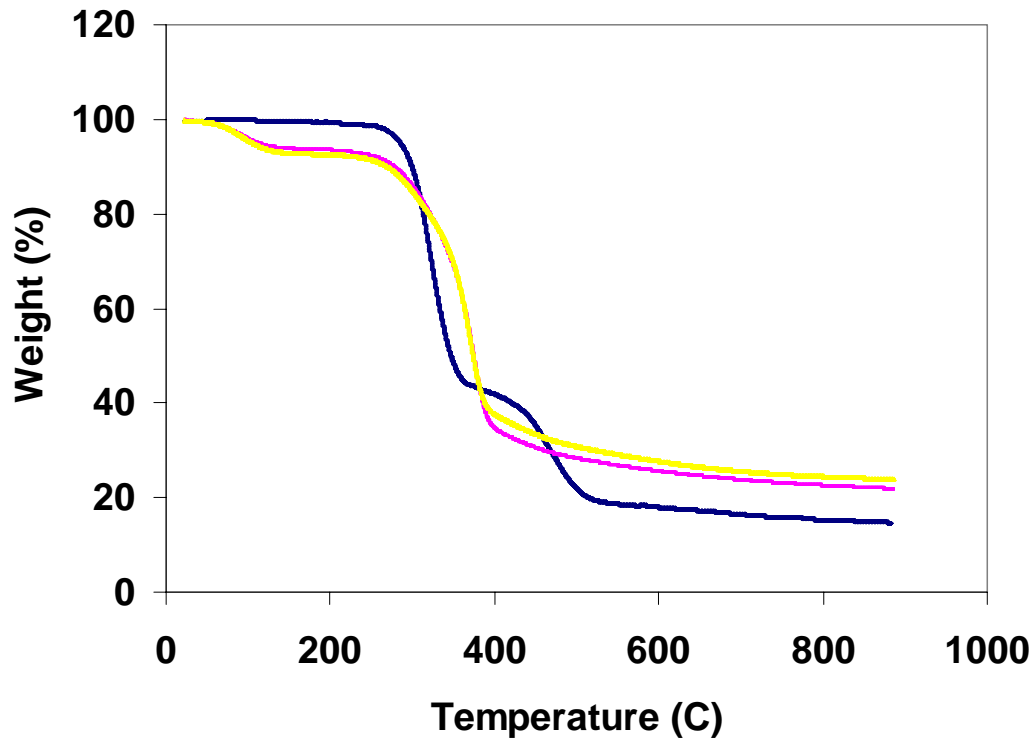
ขนาดอนุภาค	Glass transition temperature (°C)				
	PVC	ไม้พลาสติก PVC/ผงไม้สัก		ไม้พลาสติก PVC/ผงไม้เต็ง	
		20 phr	80 phr	20 phr	80 phr
45	91	88	91	94	91
250		89	89	88	89

จากการทดลองพบว่า เมื่อเติมผงไม้ลงใน PVC เมทริกซ์ มีผลทำให้ค่าอุณหภูมิการแปรสภาพแก้วของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติกมีค่าลดลงเป็นส่วนใหญ่ แต่การลดลงของอุณหภูมิการแปรสภาพแก้วมีค่าไม่มากนัก ในขณะที่ไม้พลาสติก PVC/ผงไม้เต็ง ขนาดอนุภาค 45 ไมครอน ปริมาณ 20 phr มีค่าอุณหภูมิการแปรสภาพแก้วเพิ่มขึ้นจาก 91°C เป็น 94 °C การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิการแปรสภาพแก้วเป็นผลมาจากการที่ใส่ผงไม้เข้าไปในเมทริกซ์ PVC ทำให้ต้องให้ความร้อนในการเปลี่ยนสภาพมากขึ้น เนื่องจากผงไม้ไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุลของ PVC จากการทดลองสรุปได้ว่าขนาดอนุภาคและปริมาณของผงไม้ไม่มีผลที่เป็นนัยสำคัญต่อค่าอุณหภูมิการแปรสภาพแก้วของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ ในการรายงานผลของ M. Bengtsson และคณะ [37] รายงานว่าการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DMA นอกจากเป็นการหาอุณหภูมิการแปรสภาพแก้วของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติกแล้วยังสามารถให้ข้อมูลเกี่ยวกับการยึดติดกันระหว่างเมทริกซ์กับผงไม้ด้วย โดยพิจารณาจากกราฟที่พล็อตระหว่างค่า tan delta กับ อุณหภูมิ ซึ่งถ้าเกิดแรงภายในระหว่างเมทริกซ์และตัวเติม กราฟที่ได้ควรมีพื้นที่ใต้กราฟเพิ่มขึ้นและตำแหน่งของพีคที่เกิดขึ้นจะเปลี่ยนแปลงไป ในกรณีที่เกิดการยึดติดที่ดีระหว่างเมทริกซ์และผงไม้ พีคที่เกิดขึ้นควรจะอยู่ในตำแหน่งที่อุณหภูมิการแปรสภาพแก้วสูงขึ้น ซึ่งการที่อุณหภูมิการแปรสภาพแก้วมีค่าสูงขึ้นเกิดขึ้นจากการที่ผงไม้ขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์ที่เป็นตัวเมทริกซ์

4.5.2 Thermogravimetric Analysis (TGA)

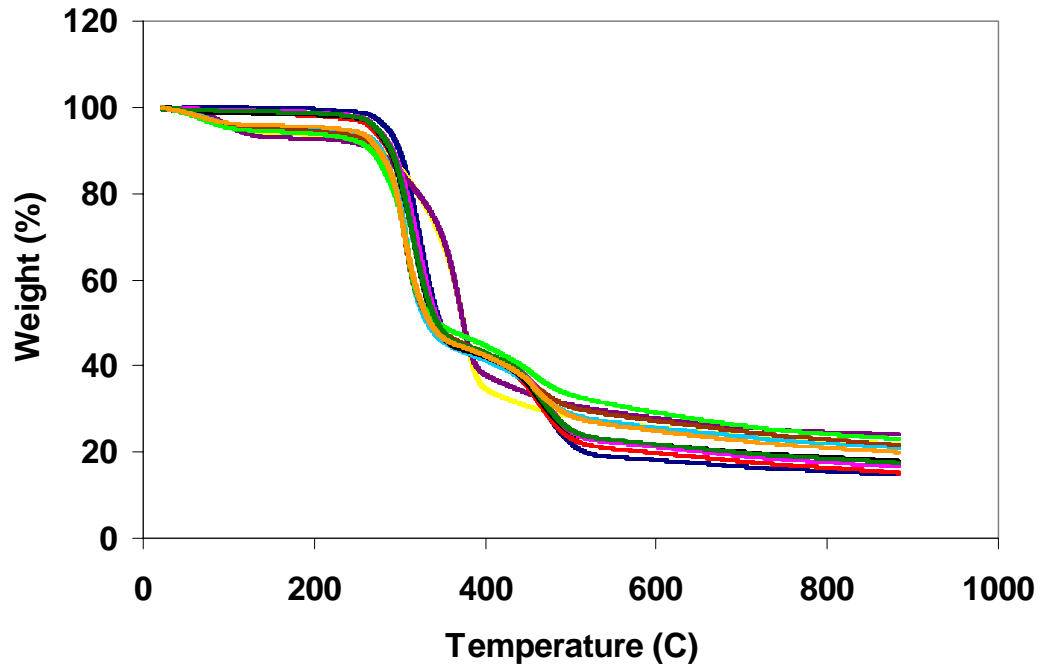
การทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA ของ PVCบริสุทธิ์ ผงไม้สัก ผงไม้เต็ง ดังแสดงในรูปที่ 4.14 และผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ ขนาด 45 และ 250 ไมครอน ที่ปริมาณ 20 และ 80 phr ดังแสดงในรูปที่ 4.15 จากการทดลองพบว่า การสลายตัวของ PVCบริสุทธิ์ ดังแสดงในเส้นสีน้ำเงิน เกิดการสลายตัวที่ 2 ช่วงอุณหภูมิคือช่วงอุณหภูมิแรกที่ 270-360 °C เป็นการสลายตัวให้ก๊าซไฮโดรคลอไรด์ออกมา และช่วงอุณหภูมิที่สองเกิดขึ้นในช่วง 360-520 °C ซึ่งเป็นการสลายตัวของสารเติมแต่ง (Additives) ต่างๆ ใน PVC การสลายตัวของผงไม้สักและผงไม้เต็ง แสดงในเส้นสีเหลืองและสีม่วง ตามลำดับ ช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า 100°C ผงไม้เริ่มมีการสลายตัวประมาณ 1.5-6% โดยเกิดปฏิกิริยาการดึงน้ำออก (Dehydration) หลังจากนั้นจะเกิดการสลายตัวในช่วงอุณหภูมิ 250-380°C ซึ่งเป็นช่วงที่สารอินทรีย์ (Organic compound) ที่เป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งได้แก่ เซลลูโลส ลิกนินและสารอื่นๆ เกิดการสลายตัว โดยน้ำหนักของผงไม้สักเหลือประมาณ 22 % ในขณะที่น้ำหนักของผงไม้เต็งเหลือประมาณ 26 % เมื่อเปรียบเทียบการสลายตัวของ PVCบริสุทธิ์กับไม้พลาสติกPVC/ผงไม้ ดังแสดงในเส้นสีแดง ฟ้ำดำและน้ำตาล เป็นการสลายตัวของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้สัก และเส้นสีชมพู เขียวอ่อน เขียวเข้ม และสีส้ม เป็นการสลายตัวของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้เต็ง จากการทดลองพบว่า ผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ เกิดการสลายตัว 2 ช่วงอุณหภูมิและเป็นการสลายตัวในช่วงอุณหภูมิเช่นเดียวกันกับ PVC บริสุทธิ์ แต่อุณหภูมิการสลายตัวในช่วงแรกจะต่ำกว่า PVCบริสุทธิ์ ดังแสดงในเส้นสีต่างๆ ซึ่งลดต่ำกว่าเส้นสีน้ำเงินที่หมายถึง PVCบริสุทธิ์ เป็นที่สังเกตได้ว่า ผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ ที่ปริมาณผงไม้ที่ 80 phr เกิดการสลายตัวในช่วงอุณหภูมิก่อน 100°C เหมือนผงไม้ทั้งสองชนิด อาจจะเป็นเนื่องมาจากมีปริมาณผงไม้จำนวนมาก ทำให้เกิดการสลายตัวในช่วงอุณหภูมิก่อน 100°C เมื่อปริมาณผงไม้เพิ่มขึ้นจาก 20 phr ดังแสดงในเส้นสีแดงและดำ (ไม้สัก) และเส้นชมพูและเขียวเข้ม (ไม้เต็ง) เป็น 80 phr ดังแสดงในเส้นสีฟ้าและน้ำตาล (ไม้สัก) และเส้นสีส้มกับสีเขียวอ่อน (ไม้เต็ง) อุณหภูมิในการสลายตัวของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติกลดลงเล็กน้อยจาก ช่วงแรก 260-380 °C เป็น 240-340 °C และช่วงที่สองลดลงจาก 360-520 °C เป็น 340-500 °C ช่วงการสลายตัว ทั้ง 2 ช่วงอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติกนี้เป็นการสลายตัวให้ก๊าซไฮโดรคลอริกในช่วงแรกและในช่วงที่ 2 เป็นการสลายตัวของสารเติมแต่ง (Additives) ต่างๆ เช่นเดียวกันกับ PVC บริสุทธิ์ การเติมผงไม้ลงไป ทำให้อุณหภูมิการสลายตัวของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ลดลง ปริมาณของแข็งที่เหลือจากการสลายตัวเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ PVC บริสุทธิ์ โดยเมื่อปริมาณผงไม้มากขึ้นจาก 20 เป็น 80 phr ปริมาณของแข็งที่เหลือมากขึ้นราว 6 % เมื่อเปรียบเทียบขนาดอนุภาคพบว่าขนาดอนุภาคไม่ส่งผลต่ออุณหภูมิการสลายตัวของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้

พลาสติก เนื่องจากค่าการสลายตัวใกล้เคียงกัน ในขณะที่ขนาดอนุภาคผงไม้ที่ใหญ่ขึ้นส่งผลต่อปริมาณของแข็งที่เหลือโดยผงไม้ขนาดใหญ่มีปริมาณของแข็งเหลือมากกว่าราว 2%



— PVC บริสุทธิ์ — ไม้สีก — ไม้เต็ง

รูปที่ 4.14 TGA curve ของ PVC ผงไม้สีกและผงไม้เต็ง จากอุณหภูมิห้อง ถึง 800 °C ที่อัตรา 10 °C/min ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน



- PVC บริสุทธิ์
- ไม้สัก
- ไม้เต็ง
- ไม้พลาสติกPVC/ผงไม้สัก 45 micron 20 phr
- ไม้พลาสติกPVC/ผงไม้สัก 250micron 20 phr
- ไม้พลาสติกPVC/ ผงไม้สัก 45 micron 80 phr
- ไม้พลาสติกPVC/ผงไม้สัก 250micron 80 phr
- ไม้พลาสติกPVC/ผงไม้เต็ง 45 micron 20 phr
- ไม้พลาสติกPVC/ผงไม้เต็ง 250micron 20 phr
- ไม้พลาสติกPVC/ ผงไม้เต็ง 45 micron 80 phr
- ไม้พลาสติกPVC/ผงไม้เต็ง 250micron 80 phr

รูปที่ 4.15 TGA curve ของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ จากอุณหภูมิห้อง ถึง 800 °C ที่อัตรา 10 °C/min ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน

4.5.3 อุณหภูมิการโค้งงอ (Heat deflection temperature : HDT)

การหาอุณหภูมิการโค้งงอของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติกของ PVCบริสุทธิ์ ผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้สัก และ ผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้เต็ง โดยทำการทดลองตามมาตรฐาน ASTM D 648 ผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติกที่ทดสอบได้แก่ PVC/ผงไม้ 45 ไมครอน ที่ปริมาณ 20 และ 80 phr และ PVC/ผงไม้ 250 ไมครอน 20 และ 80 phr แสดงดังตารางที่ 4.3 จากการทดลองพบว่า ค่าอุณหภูมิการโค้งงอของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติกของ PVC บริสุทธิ์ มีค่าเท่ากับ 78 องศาเซลเซียส ในขณะที่ค่าอุณหภูมิการโค้งงอของ ผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้สัก และผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้เต็ง ที่ผงไม้ขนาด 45 ไมครอน ปริมาณ 20 phr มีค่าอุณหภูมิการโค้งงอเท่ากับ 79 องศาเซลเซียส และ ค่าอุณหภูมิการโค้งงอของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้สัก และผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้เต็ง ที่ผงไม้ขนาด 250 ไมครอน ปริมาณ 80 phr มีค่าอุณหภูมิการโค้งงอเท่ากับ 81 องศาเซลเซียส จากการทดลองสรุปได้ว่า อนุภาคของผงไม้ไม่มีผลมากนักต่อค่าอุณหภูมิการโค้งงอ ในขณะที่เมื่อปริมาณผงไม้มากขึ้น อุณหภูมิการโค้งงอของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องมาจากการทดสอบหาค่าอุณหภูมิการโค้งงอ มีการให้แรงแกว่งขึ้นภายในห้องให้ความร้อนซึ่งสามารถควบคุมอุณหภูมิได้ แล้วดูการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของ ผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก การที่เติมผงไม้ลงไปมากขึ้นทำให้ผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ เกิดการเสียรูปจากความร้อนและไหลดที่ได้รับยากขึ้น เนื่องจากมีอนุภาคของผงไม้ขัดขวางการเปลี่ยนรูปของ PVC ทำให้อุณหภูมิการโค้งงอมีค่ามากขึ้น การที่อุณหภูมิการโค้งงอของ ผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ มีค่ามากขึ้น เป็นเรื่องที่ดีเพราะสามารถนำผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ ไปใช้งานที่อุณหภูมิสูงขึ้นได้

ตารางที่ 4.3 อุณหภูมิการโค้งงอของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้

ขนาดอนุภาค (μm)	Heat deflection temperature ($^{\circ}\text{C}$)			
	ไม้พลาสติก PVC/ผงไม้สัก		ไม้พลาสติก PVC/ผงไม้เต็ง	
	20 phr	80 phr	20 phr	80 phr
45	79	81	79	81
250	79	81	79	81

4.6 สมบัติการดูดซึมน้ำ

การศึกษาสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก โดยศึกษาจากสมบัติการดูดซึมน้ำของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ เปรียบเทียบกับ PVC บริสุทธิ์ ด้วยการนำชิ้นงานผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ ที่เตรียมได้ แขน้ำกลั่น ณ อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 60 วัน การหาค่าการดูดซึมน้ำของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ คำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

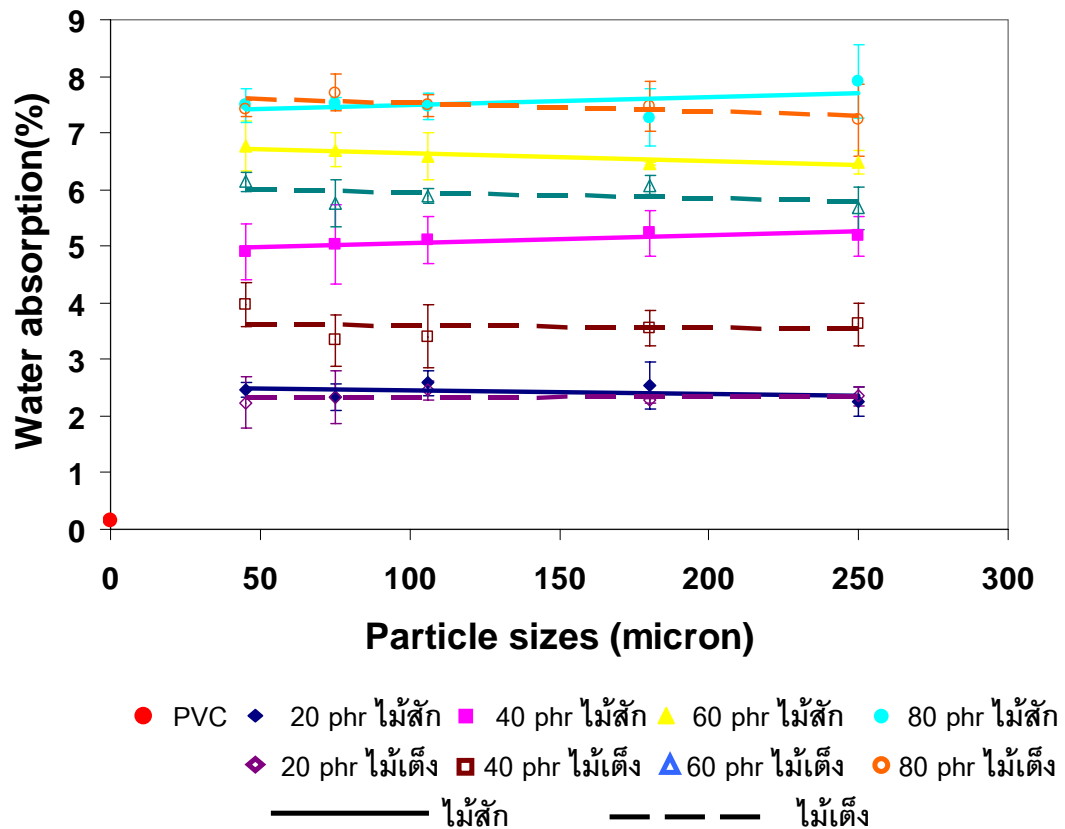
$$\text{การดูดซึมน้ำ (\%)} = \frac{(\text{น้ำหนักชิ้นงานหลังแช่น้ำ} - \text{น้ำหนักชิ้นงานก่อนแช่น้ำ}) \times 100}{\text{น้ำหนักชิ้นงานก่อนแช่น้ำ}}$$

ผลการหาค่าการดูดซึมน้ำดังแสดงในรูปที่ 4.16 จากผลการทดลองพบว่า PVC บริสุทธิ์ ดูดซึมน้ำเพียง 0.16% ขณะที่การดูดซึมน้ำของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ มีค่ามากกว่า PVC บริสุทธิ์ กล่าวคือเมื่อเติมผงไม้ลงในผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก การดูดซึมน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติกผลิตขึ้นจากการนำพลาสติกและไม้มาผสมกัน ทำให้มี 2 เฟสที่ผสมกันอยู่ คือ PVC และผงไม้ ซึ่ง PVC เป็นพอลิเมอร์ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) การที่ผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ มีการดูดซึมน้ำมากขึ้น เป็นผลมาจากผงไม้เพราะผงไม้มีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบหลักซึ่งโครงสร้างของเซลลูโลสมีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) อยู่ในโครงสร้าง ทำให้สามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนกับน้ำได้ เมื่อเติมผงไม้ลงไป PVC จึงเป็นผลให้ค่าการดูดซึมน้ำมากขึ้น และในงานวิจัยของ A.K. Bledzki และคณะ [36] เสนอว่าอีกเหตุผลหนึ่งของการที่ผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก มีการดูดซึมน้ำเพิ่มเนื่องมาจากการที่ PVC กับผงไม้มีการยึดติดกันที่ไม่ดีนัก ทำให้เกิดระยะห่างระหว่างผงไม้กับ PVC ทำให้น้ำเกิดการดูดซึมเข้าไปในผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติกได้

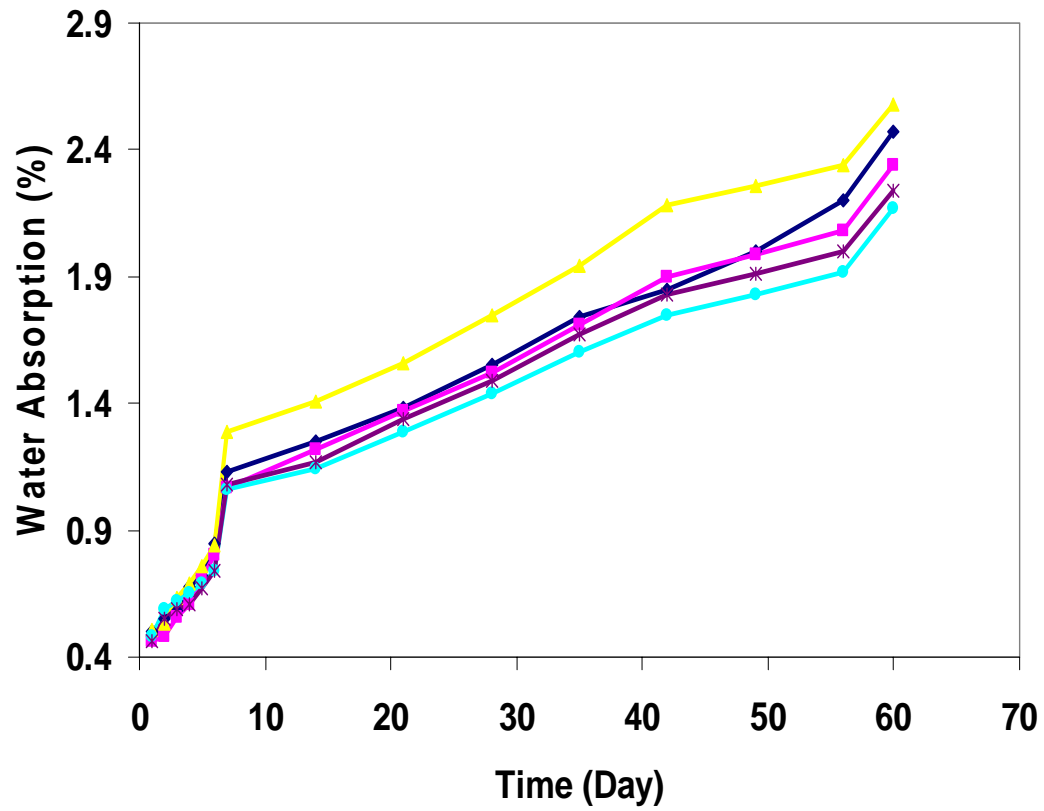
เปรียบเทียบผลของปริมาณผงไม้ ที่มีต่อสมบัติการดูดซึมน้ำโดยเพิ่มจาก 0 เป็น 20, 40, 60 และ 80 phr พบว่า ผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้สัก มีค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มเป็น 2, 5, 6.5 และ 7.5 เท่า ตามลำดับ ในขณะที่ผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้เต็ง มีค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มเป็น 2, 3.5, 6 และ 7.5 เท่า ตามลำดับ เนื่องจากผงไม้ที่มากขึ้นทำให้ผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติกสามารถดูดซึมน้ำได้มากขึ้น และด้วยสมบัติของไม้สักและไม้เต็งตามธรรมชาติแล้ว ไม้ทั้งสองชนิดสามารถดูดซึมน้ำได้ถึง 10-20 เปอร์เซ็นต์ในการแช่น้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง [47] เมื่อเปรียบเทียบชนิดของผงไม้ที่มีผลต่อสมบัติการดูดซึมน้ำ จากการทดลองพบว่า ค่าการดูดซึมน้ำของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติกที่เติมไม้สักและไม้เต็ง ไม่มีความแตกต่างกันของค่าการดูดซึมน้ำ

ในระดับที่มีนัยสำคัญ ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ A.K. Bledzki และคณะ [36] ที่รายงานว่าความแตกต่างของค่าการดูดซึมน้ำของไม้สองชนิดได้แก่ ไม้เนื้ออ่อนและไม้เนื้อแข็ง ไม่มีความแตกต่างกันมากนัก ในส่วนของขนาดอนุภาคผงไม้ไม่มีผลต่อปริมาณการดูดซึมน้ำของไม้พลาสติกเช่นเดียวกับชนิดของไม้

รูปที่ 4.17 และ 4.18 แสดงพฤติกรรมของการดูดซึมน้ำของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้สัก และ PVC/ผงไม้เต็ง ตามลำดับ ที่ปริมาณ 20 phr ขนาด 45, 75, 106, 180 และ 250 μm จากกราฟพฤติกรรมของการดูดซึมน้ำพบว่า การดูดซึมน้ำของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้สัก และ PVC/ผงไม้เต็ง จะมีอัตราการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นในช่วงแรก ประมาณ 1-7 วัน หลังจากนั้นอัตราการดูดซึมน้ำจะลดลงเล็กน้อยแต่ยังมีการดูดซึมน้ำอยู่ เนื่องจากผงไม้เป็นวัสดุที่ชอบน้ำ ค่าการดูดซึมน้ำจึงยังเพิ่มขึ้น

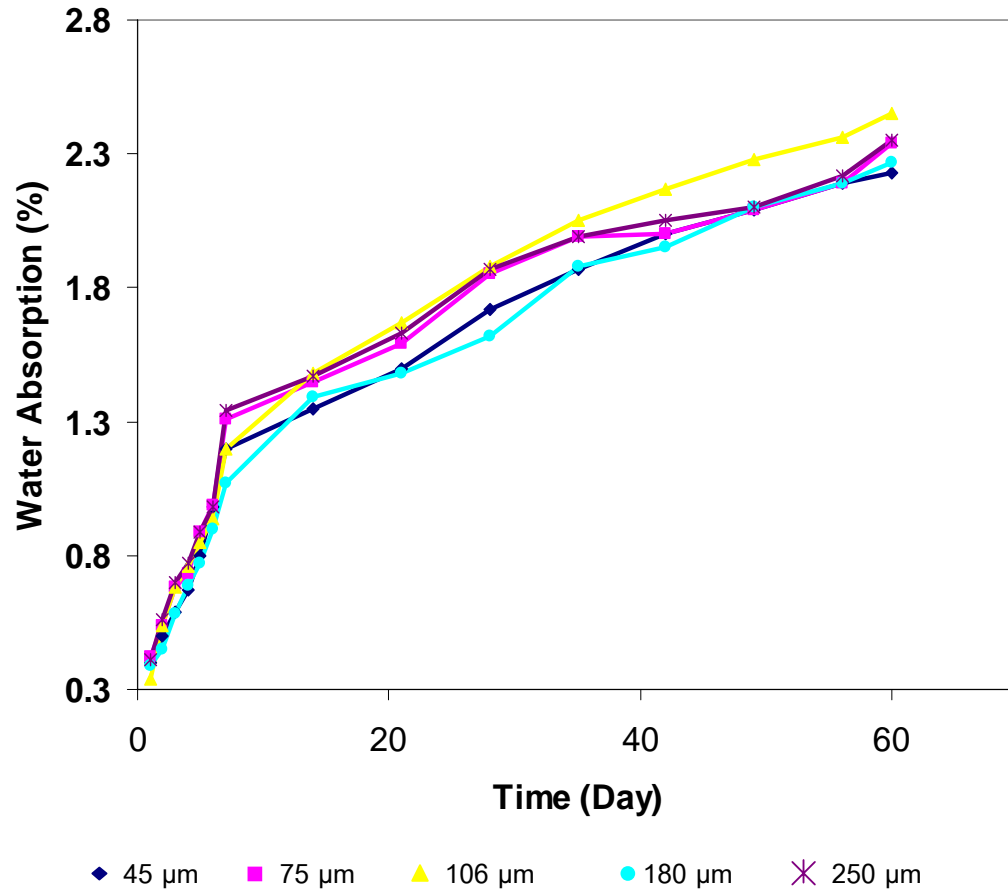


รูปที่ 4.16 กราฟการดูดซึมน้ำของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ที่ขนาดและปริมาณของผงไม้ต่างๆ



◆ 45 μm ■ 75 μm ▲ 106 μm ● 180 μm ✱ 250 μm

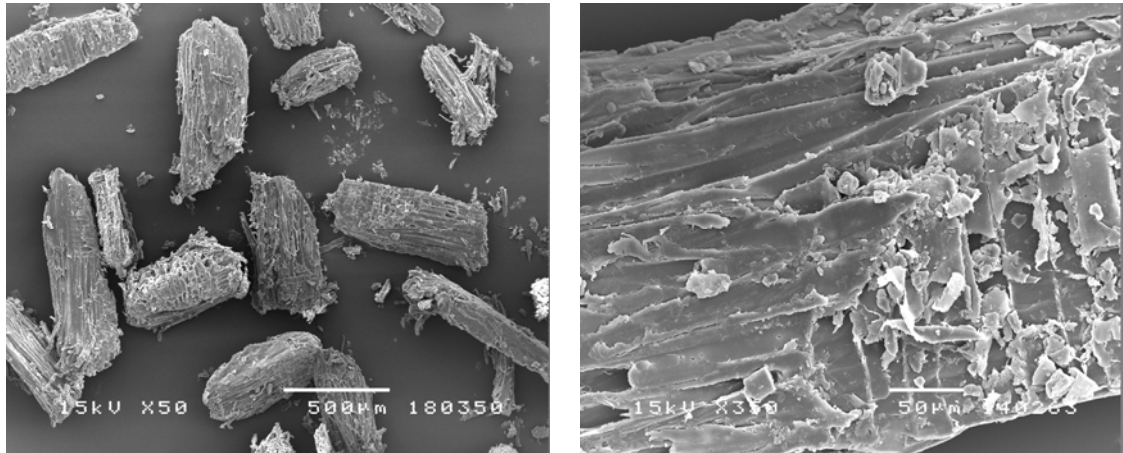
รูปที่ 4.17 พฤติกรรมการดูดซึมน้ำของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ไม้สัก ที่ปริมาณ 20 phr ที่ขนาดต่างๆ



รูปที่ 4.18 พฤติกรรมการดูดซึมน้ำของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ไม้เต็ง ที่ปริมาณ 20 phr ที่ขนาดต่างๆ

4.7 การตรวจสอบการกระจายตัวของอนุภาคผงไม้ในผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้

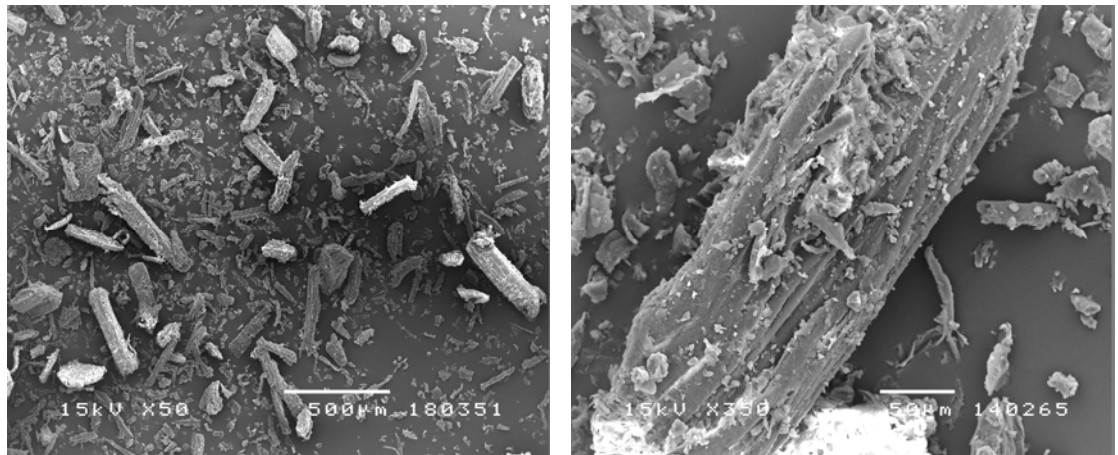
การวิเคราะห์ดูการกระจายตัวของผงไม้ใน PVC matrix ในระดับจุลภาคกระทำโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบกราดลำแสง (Scanning Electron Microscope, SEM) (JEOL) ดังแสดงในรูปที่ 4.19-4.24



(ก)

(ข)

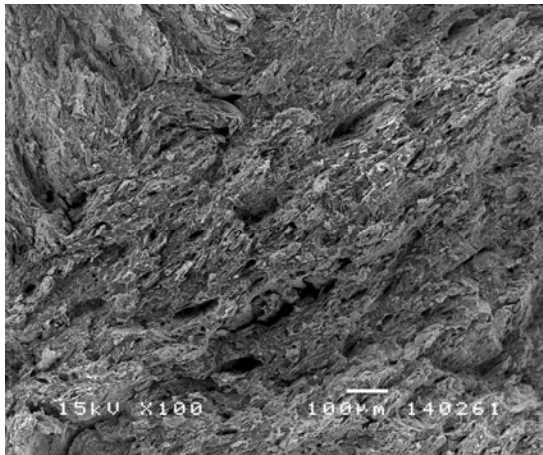
รูป 4.19 แสดงภาพถ่ายของไม้สัก (ก) กำลังขยาย 50 (ข) กำลังขยาย 350



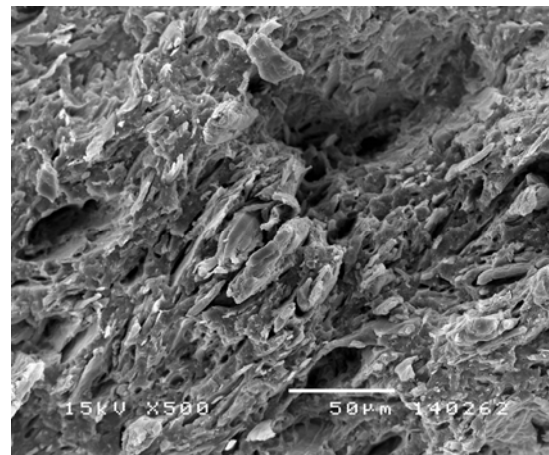
(ค)

(ง)

รูป 4.20 แสดงภาพถ่ายของไม้เต็ง (ค) กำลังขยาย 50 (ง) กำลังขยาย 350



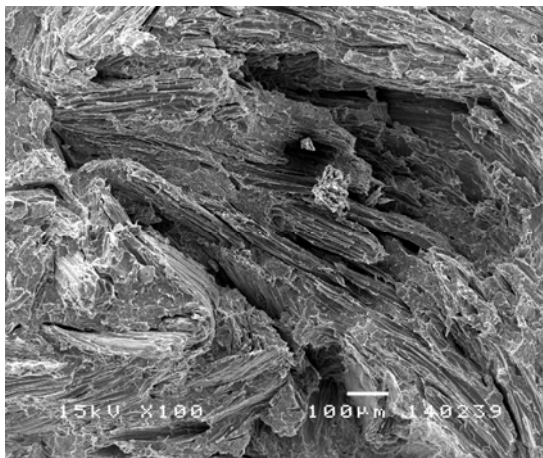
(จ)



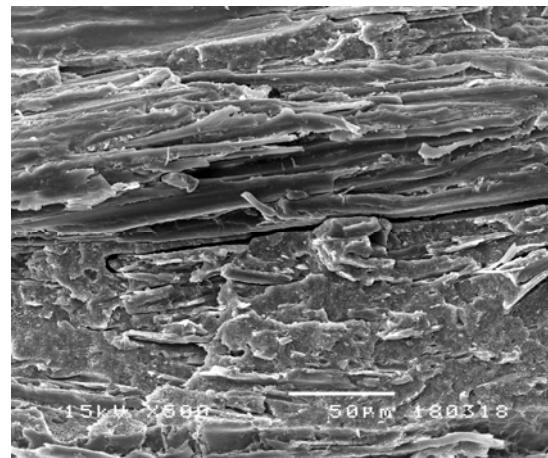
(ข)

รูป 4.21 แสดงภาพถ่ายของไม้สีก ขนาด 45 ไมครอน ปริมาณ 80 phr

(จ) กำลังขยาย 100 (ข) กำลังขยาย 500



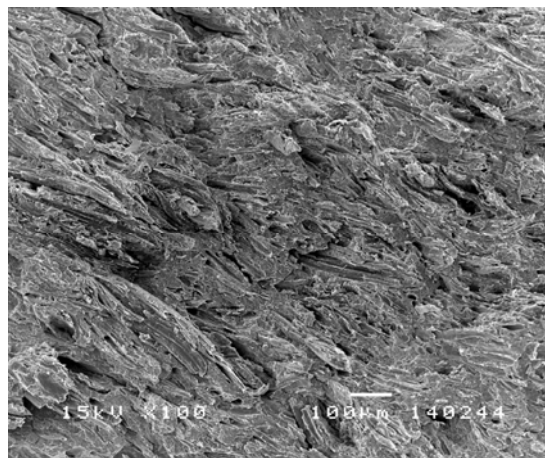
(ฉ)



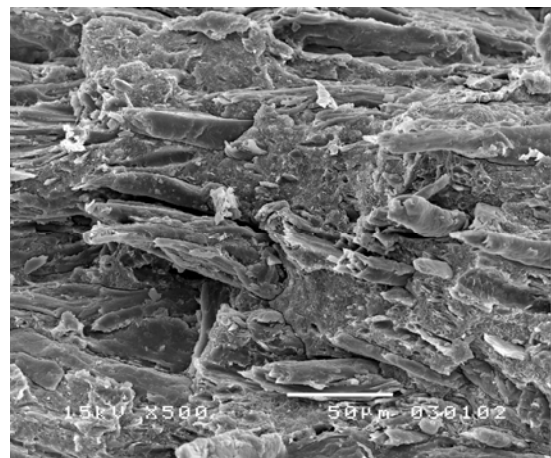
(ช)

รูป 4.22 แสดงภาพถ่ายของไม้สีก ขนาด 250 ไมครอน ปริมาณ 80 phr

(ฉ) กำลังขยาย 100 (ช) กำลังขยาย 500



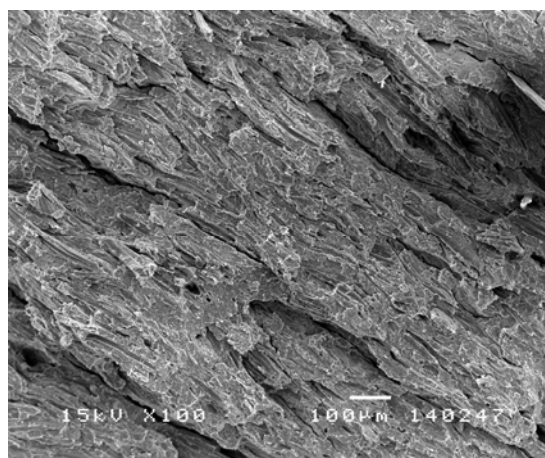
(ด)



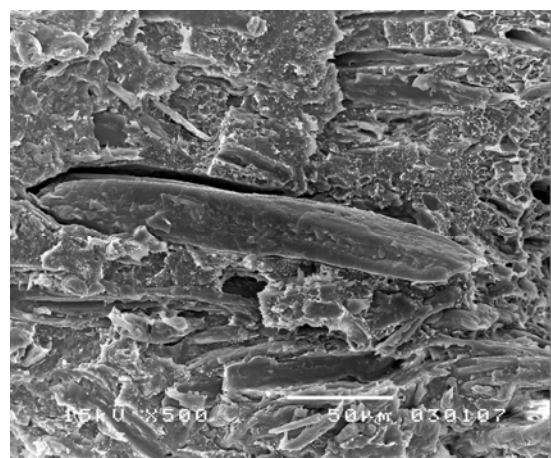
(ญ)

รูป 4.23 แสดงภาพถ่ายของไม้เต็ง ขนาด 45 ไมครอน ปริมาณ 80 phr

(ด) กำลังขยาย 100 (ญ) กำลังขยาย 500



(ฐ)



(ฑ)

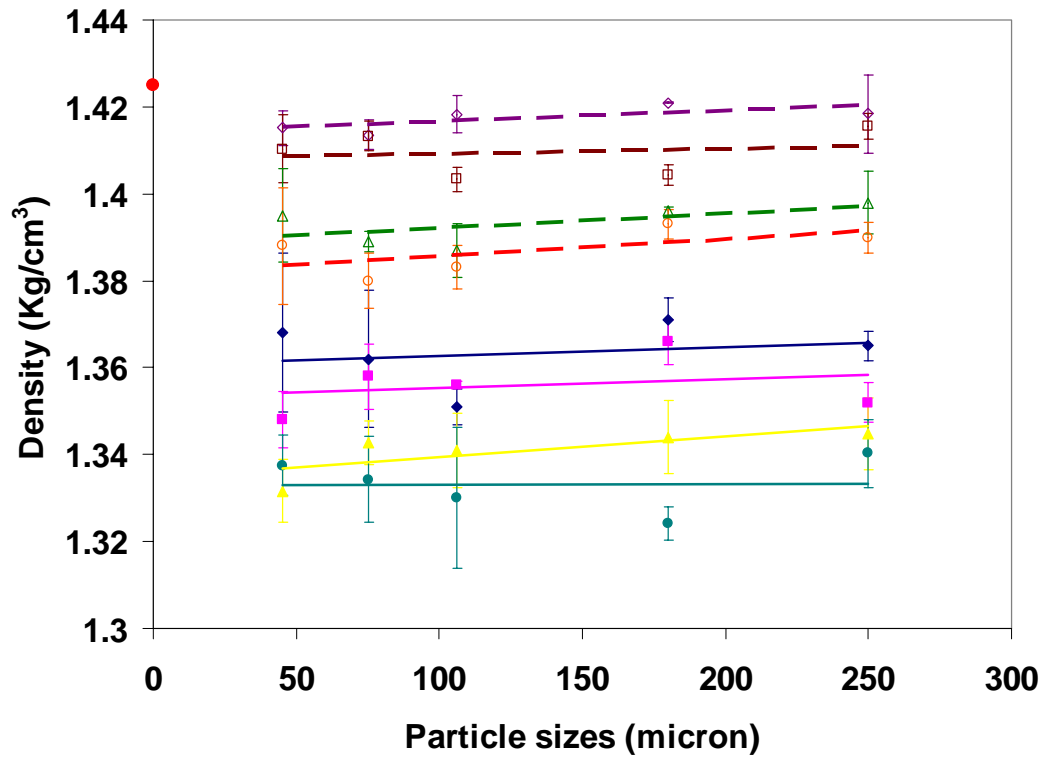
รูป 4.24 แสดงภาพถ่ายของไม้เต็ง ขนาด 250 ไมครอน ปริมาณ 80 phr

(ฐ) กำลังขยาย 100 (ฑ) กำลังขยาย 500

จากรูปถ่าย SEM เป็นการดูการกระจายตัวของอนุภาคผงไม้ในผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ โดยรูปที่ 4.19 และ 4.20 เป็นภาพถ่าย SEM ของผงไม้สักและผงไม้เต็ง รูปที่ 4.21 และ 4.22 เป็นภาพแสดงการกระจายตัวของอนุภาคผงไม้สักในผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก เมื่อปริมาณผงไม้สักเพิ่มขึ้นโอกาสที่จะเกิดการรวมตัวของอนุภาคผงไม้สักมีมากขึ้น และเป็นที่สังเกตว่ามีผงไม้บางส่วนหลุดออกไปจาก PVC เมตริกซ์ ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากการยึดติดกันที่ไม่ค่อยดีนักของ PVC เมตริกซ์ และผงไม้สัก รูปที่ 4.23 และ 4.24 เป็นภาพแสดงการกระจายตัวของอนุภาคผงไม้เต็งในผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก เมื่อปริมาณผงไม้เต็งเพิ่มขึ้นโอกาสที่จะเกิดการรวมตัวของอนุภาคแบบผงไม้สักมีมากขึ้นเช่นกัน ซึ่งจะส่งผลต่อค่าสมบัติเชิงกลดังที่ได้กล่าวไปแล้ว และเป็นที่น่าสนใจว่ามีผงไม้เต็งมีการยึดติดกับ PVC เมตริกซ์ ได้ดีกว่าผงไม้สัก ซึ่งเป็นผลให้สมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้เต็ง มีค่าที่ดีกว่าของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้สัก เนื่องจากการยึดติดกันระหว่างเฟสดีกว่า

4.8 ความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้

ความหนาแน่นของ PVC บริสุทธิ์ ไม้พลาสติก PVC/ผงไม้สักและไม้พลาสติก PVC/ผงไม้เต็ง แสดงดังรูปที่ 4.25 จากการทดลองพบว่า เมื่อเปรียบเทียบความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติกกับ PVCบริสุทธิ์ การเติมผงไม้เป็นผลให้ความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติกลดลง โดยPVCบริสุทธิ์มีความหนาแน่น 1.425 กรัม/ลบ.ซม. ผงไม้สักมีความหนาแน่นประมาณ 0.6 กรัม/ลบ.ซม. และผงไม้เต็งมีความหนาแน่น 0.9 กรัม/ลบ.ซม. ซึ่งมีค่าความหนาแน่นน้อยกว่า PVC บริสุทธิ์ เมื่อเติมผงไม้ทั้งสองชนิดลงไป PVC บริสุทธิ์ จึงส่งผลให้ความหนาแน่นลดลง และเมื่อเพิ่มปริมาณของผงไม้มากขึ้น ความหนาแน่นจะลดลงตามปริมาณผงไม้ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากผงไม้ทำหน้าที่เสมือนเป็นสารเพิ่มเนื้อของไม้พลาสติก ปริมาณผงไม้ที่มากขึ้นกลายเป็นเนื้อแทนเมตริกซ์ PVC เป็นผลให้ความหนาแน่นลดลง ขนาดของผงไม้ไม่ส่งผลต่อความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก ความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้สัก มีค่าต่ำกว่าผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้เต็ง เนื่องจากผงไม้สักมีค่าความหนาแน่นน้อยกว่าผงไม้เต็ง

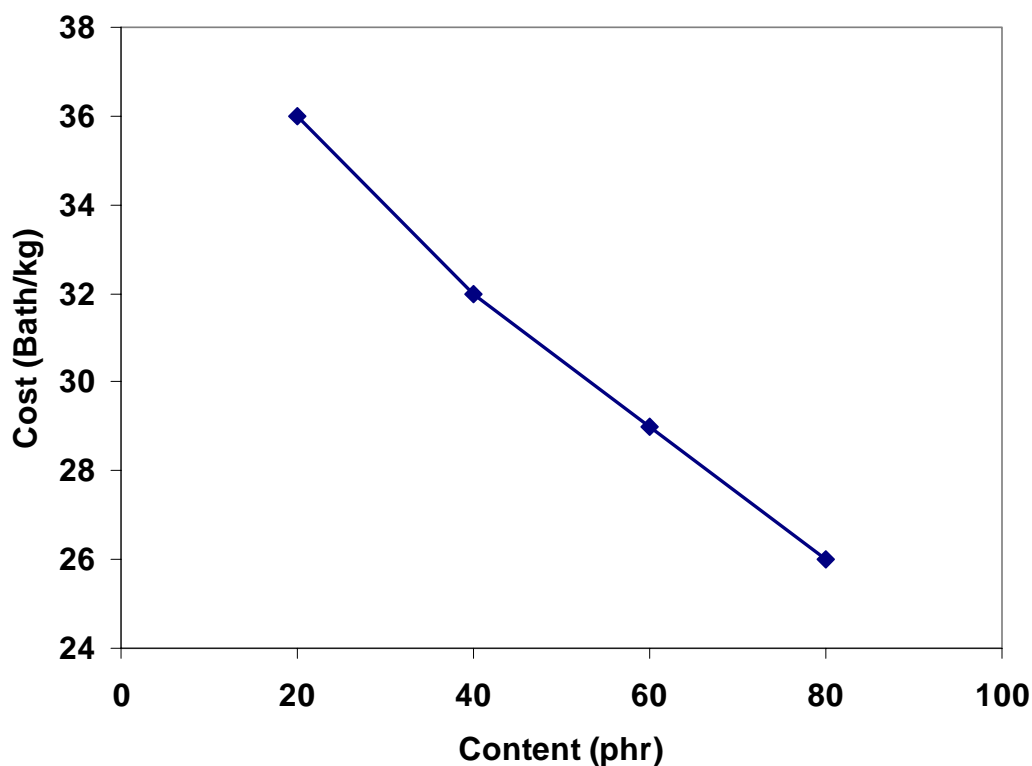


- PVC ◆ 20 phr ไม่ตึง ■ 40 phr ไม่ตึง ▲ 60 phr ไม่ตึง ● 80 phr ไม่ตึง
 ◆ 20 phr ไม่ตึง ■ 40 phr ไม่ตึง ▲ 60 phr ไม่ตึง ● 80 phr ไม่ตึง
 ————— ไม่ตึง - - - - - ไม่ตึง

รูปที่ 4.25 ความหนาแน่นของไม้พลาสติกที่ขนาดและปริมาณต่างๆ

4.9 การคำนวณราคา (Cost Analysis) ของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้

จากการผลิตผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ สามารถคำนวณต้นทุนการผลิตได้ดังแสดงในรูปที่ 4.26 จากการคำนวณราคาพบว่า เมื่อปริมาณผงไม้เพิ่มขึ้น ต้นทุนการผลิตมีค่าลดลง โดยที่ PVC เรซิน มีราคาอยู่ที่ 35.50 บาทต่อ 1 กิโลกรัม ในขณะที่ ผงไม้สักและผงไม้เต็งมีราคาประมาณ 3 บาท ต่อ 1 กิโลกรัม เมื่อเติมผงไม้ที่ปริมาณ 20 phr ต้นทุนการผลิตอยู่ที่ราคา 36 บาท เมื่อเติมผงไม้ลงไปทีปริมาณ 40, 60 และ 80 phr ต้นทุนการผลิตอยู่ที่ราคา 32, 29 และ 26 บาท ตามลำดับ โดยที่ราคาวัตถุดิบในการผลิตไม้พลาสติกที่ขายในท้องตลาดอยู่ที่ราคา 41 บาทต่อ 1 กิโลกรัม (บริษัท นวพลาสติกอุตสาหกรรม จำกัด)



รูปที่ 4.26 กราฟแสดงต้นทุนการผลิตผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ ที่ปริมาณต่างๆ

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาผลของอิทธิพลของปริมาณและขนาดอนุภาคผงไม้เมื่อใช้ผงไม้เป็นตัวเติมในการผลิตผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติกจาก PVC ผลการวิจัยสรุปได้ดังนี้

เมื่อปริมาณผงไม้มากขึ้น

- ค่ามอดูลัสภายใต้แรงดึง มอดูลัสภายใต้แรงดัด และมอดูลัสภายใต้แรงกด มีค่าสูงขึ้น
- ค่า Tensile strength และ Impact strength ลดลง ในทางตรงข้าม ค่า Flexural และ Compressive strength มีค่าเพิ่มขึ้น
- สมบัติการยืดตัว (strain) ของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก ลดลง

เมื่อขนาดอนุภาคเพิ่มขึ้น

- ค่า Tensile modulus และ strength มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในขณะที่ สมบัติการทนต่อแรงดัด และการทนต่อการกด ขนาดอนุภาคไม่มีผลมากนัก
- ค่า Impact strength มีค่าเพิ่มขึ้น

เมื่อปริมาณผงไม้มากขึ้น อุณหภูมิในการสลายตัวของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ ลดลง ปริมาณของแข็งที่เหลือสูงขึ้น ในขณะที่ขนาดอนุภาคผงไม้ ไม่ส่งผลต่ออุณหภูมิในการสลายตัวของไม้พลาสติกแต่มีผลทำให้ปริมาณของแข็งที่เหลือลดลงเล็กน้อย

เมื่อปริมาณผงไม้มากขึ้น การดูดซึมน้ำมากขึ้น แสดงให้เห็นว่าไม้พลาสติกนี้ไม่เหมาะที่จะใช้งานในบริเวณที่มีความชื้นสูง

5.2 ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะแนวทางปรับปรุงและศึกษาเพิ่มเติม มีดังต่อไปนี้

5.2.1 เพื่อเพิ่มการยึดติดของพันธะระหว่างเมตริกซ์และผงไม้ นำไปสู่สมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น ควรมีการปรับปรุงพื้นผิวของผงไม้ด้วย coupling agent เพื่อเพิ่มการยึดเกาะกันของเมตริกซ์ PVC และผงไม้ให้ดียิ่งขึ้น

5.2.2 ศึกษาผลกระทบจากสิ่งแวดล้อม เช่น แสงแดด อุณหภูมิและความชื้น

5.2.3 ศึกษาว่ามีวัสดุหรือสารเคมีใดบ้างที่ช่วยทำให้สมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งไม้พลาสติกมีค่าที่ดีขึ้น โดยวิเคราะห์จากวัสดุที่ผลิตขึ้นในปัจจุบัน เช่น ใยท่อนาโน (Nanotube) เพื่อเพิ่มสมบัติในด้านความแข็งแรง หรือ ทำการปรับปรุงผิวหน้าโดยใช้สารละลายไฮดรอกไซด์เพื่อเพิ่มการกระจายตัวของผงไม้ในเมตริกซ์

รายการอ้างอิง

- [1] สมควร วัฒนกิจไพบูลย์, จิตตกร ทรงต่อศรีสกุล. การผลิตวัสดุทดแทนแผ่นขึ้นไม้อัดจากเศษ วัสดุเหลือใช้. *Engineering Today* กรกฎาคม 2548.
- [2] ธนดล สัตตบงกช. **การพัฒนาไม้ประกอบพลาสติก** มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ แหล่งที่มา : <http://www.forest.go.th/Forprod/Tips/details/woodst.htm>. [1 ธันวาคม 2550]
- [3] Wolcott and Smith, 39th International Wood Composites Symposium, 2005.
- [4] ศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร สำนักงานปลัดกระทรวงพาณิชย์. **การส่งออกสินค้าตาม โครงสร้างสินค้าที่สำคัญของไทย**. แหล่งที่มา : http://www2.ops2.moc.go.th/export/recode_export [15 มกราคม 2551]
- [5] กรมป่าไม้. **การผลิตและการใช้ไม้**. แหล่งที่มา : <http://www.forest.go.th/stat/stat49/stat2549.htm> [15 มกราคม 2551]
- [6] เจริญ นาคะสวรรค. **เทคโนโลยีเบื้องต้นทางพลาสติก**. กรุงเทพมหานคร : ภาควิชาเทคโนโลยียาง และพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี, 2546.
- [7] บรรเลง ศรีนิล. **เทคโนโลยีพลาสติก**. กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น, 2548
- [8] เจริญ นาคะสวรรค. **เทคโนโลยีเบื้องต้นพลาสติก**. กรุงเทพฯ : วีเจพรีนติ้ง, 2545
- [9] Mel M. Schwartz. *Composite Materials: Processing, Fabrication and Application 2* (1997)
- [10] กิตติ อนุชาผัด, ดวงดาว อาจองค์, รัตนวรรณ อาจองค์, สมชาย พิณจตุตถการณ, พิทักษ์ วราฤทธิ์ชัย. **คอมโพสิต**. กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม สมาคมไทยคอมโพสิต กรกฎาคม 2548
- [11] ปรีชา พหลแพทย์. **โพลีเมอร์**. พิมพ์ครั้งที่ 12, สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยรามคำแหง, ปี 2547
- [12] ชัยวัฒน์ เจนวาณิชย์. **เคมีโพลีเมอร์พื้นฐาน**. พิมพ์ครั้งที่ 1, สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์, ปี 2547
- [13] พิเชิต เลี่ยมพิพัฒน์. **พลาสติก**. สำนักพิมพ์มิตรนราการพิมพ์, ปี 2526
- [14] L. I. Nass and C. A. Heiberger. *Encyclopedia of PVC*. 1(1985)
- [15] วินิต ช่อวิเชียร. **การออกแบบโครงสร้างไม้**. พิมพ์ครั้งที่ 2, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, หน้า 5-17
- [16] บางรักษ์ เศษฐสิงห์. **หลักเกณฑ์การแบ่งไม้เนื้ออ่อนไม้เนื้อแข็งตามมาตรฐานของกรมป่าไม้** แหล่งที่มา : <http://www.forest.go.th/Forprod/Tips/details/woodstandard.html> [15 มกราคม 2551]
- [17] University of Cambridge. **Structure of wood** แหล่งที่มา : http://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/wood/structure_wood_pt1.php [1 ธันวาคม 2550]

- [18] สุรินทร์ อุดมสุข. **การผลิตเยื่อกระดาษจากผักสามหาว**. คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2546
- [19] P. Stenius. **Forest Product Chemistry**. Printed by Gummerus Printing, Jyvaskyla, Finland (2000)
- [20] <http://61.19.145.15/student/web42106/504/504-2645/company.htm>
- [21] สมภพ เลิศลักษณ์กุล. **ไม้เทียมพอลิเมอร์คอมโพสิตเส้นใยธรรมชาติจากพอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) และเส้นใยยูคาลิปตัส** วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง, 2544
- [22] พงศ์ โสโน. **คุณสมบัติของไม้** แหล่งที่มา:
http://search.sanook.com/knowledge/enc_preview.php [1 ธันวาคม 2550]
- [23] จินตมัย สุวรรณประทีป. **การทดสอบสมบัติทางกลของพลาสติก**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: ส.ส.ท. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย- ญี่ปุ่น), 2547.
- [24] Harry R. Allcock and Frederick W. Lampe. **Contemporary Polymer Chemistry**. 2 nd ed. New Jersey: Prentice Hall (1990)
- [25] Terry L. Richardson. **Industrial Plastics: Theory and Application**. 2 nd ed. New York: Delmar publishers Inc.(1989)
- [26] Roger P. Brown. **Handbook of Plastics Test method**. Longman Scientific & Technical, Singapore (1988)
- [27] Ishida H. **Polymer composite processing**. Case Western Reserve University Press. Ohio (1997)
- [28] Richard C. Progelhof and James L. Throne. **Polymer Engineering Principles Properties, Processes, Tests for design**. New York: Hanser.
- [29] บุศรินทร์ วิเชียรปัญญา. **หาค่าประกอบต่างๆในวัสดุด้วยเทคนิค Thermogravimetric Analysis**. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, 2546
- [30] E. H. Barkraji, N. Salman, H. Al-kassiri. Gamma-radiation- induce wood plastic composites from Syrian tree species. **Radiation Physics and Chemistry** 61(2001) : 137-141.
- [31] M.N. Ichazo, C. Albano, J. Gonzalez, R. Perera, M.V. Candal. Polypropylene/wood flour composites: treatments and properties. **Composites Structure** 54(2001) : 207-214.
- [32] N.M. Stark, R.E. Rowlands. Effects of wood fiber characteristics on mechanical properties of wood/Polypropylene composites. **Wood and Fiber Science** 35(2) (2003) :167-174.

- [33] S.E. Selke, I. Wichman. Wood fiber/polyolefin composites. **Composites: Part A**, 35 (2004) : 321-326.
- [34] C.F. Kuan, H.C. Kuan, C.C. M.Ma, C.M. Huang. Mechanical, thermal and morphological properties of water-crosslinked wood flour reinforced liner low-density polyethylene composites. **Composites: Part A** 37 (2006) :1696–1707.
- [35] S.T. Georgopoulos, P.A. Tarantili, E. Avgerinos, A.G. Andreopoulos, E.G. Koukios. Thermoplastic polymers reinforced with fibrous agricultural residues. **Polymer Degradation and Stability** 90 (2005) : 303-312.
- [36] A.K. Bledzki, M. Letman, A. Viksne, L. Rence. A comparison of compounding processes and wood type for wood fibre-PP composites. **Composites: Part A** 36 (2005) : 789-797.
- [37] M. Bengtsson, P. Gatenholm, K. Oksman. The effect of crosslinking on the properties of polyethylene/wood flour composites. **Composites Science and Technology** 65 (2005) : 1468-1479.
- [38] C.F. Kuan, H.C. Kuan, C.C. M. Ma, H.L. Wu, Y.M. Liao. Preparation and characterization of the novel water-crosslinked cellulose reinforced Poly(butylenes succinate) composites. **Composites Science and Technology** 66 (2006) : 2231–2241.
- [39] M. Bengtsson, K. Oksman. Silane crosslinked wood plastic composites: processing and properties. **Composites Science and Technology** 66 (2006): 2177–2186.
- [40] H.S. Yang, M. P. Wolcott, H.S. Kim, S. Kim, H. J. Kim. Properties of lignocellulosic material filled polypropylene bio-composites made with different manufacturing processes. **Polymer Testing** 25 (2006) :668-676.
- [41] H.S. Yang, M.P. Wolcott, H.S. Kim, S. Kim, H.J. Kim. Effect of different compatibilizing agents on the mechanical properties of the lignocellulosic material filled polyethylene bio-composites. **Composite Structure** 79 (2007) : 369-375.
- [42] L. Chotirat, K. Chaochanchaikul, N. Sombatsompop. On adhesion mechanisms and interfacial strength in acrylonitrile-butadiene-styrene/wood sawdust composites. **Internation Journal of Adhesion & Adhesives** 27 (2007) : 669–678.
- [43] S. Panthapulakkal, M. Sain. Agro-residue reinforced high-density polyethylene composites: Fiber characterization and analysis of composite properties. **Composites: Part A** 38 (2007) :1445–1454.
- [44] MTC Wood Wizard. Red Balua. แหล่งที่มา: <http://woodwizard.mtc.com>.

- [45] K.M. Bhat and P.B. Priya. Influence of Provenance Variation on Wood Properties of Teak From The Western Ghat Region In India . *IAWA Journal* 25 (3) 2004 : 273–282
- [46] ชีษณา ปิติธรรมภรณ์. **การพัฒนาวัสดุประกอบแต่งไม้พลาสติกที่เตรียมจากพอลิไวนิลคลอไรด์และแคลบ**.วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549
- [47] M. Saxena, V.S. Gowri, T.N. Gupta. Potentials of Utilization of Industrial Wastes for Developing Wood Substitute แหล่งที่มา : <http://www.cdos-india.com/Papers%20technical.htm> [15 กุมภาพันธ์ 2551]
- [48] Wolcott, M. P. Production Methods and Platforms for Wood Plastic Composites. Civil and Environmental Engineering, Wood Materials and Engineering Laboratory, Washington State University.
- [49] Georgia Gulf 3014 Rigid PVC, Extrusion แหล่งที่มา : <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatID=41707> [25 มีนาคม 2551]
- [50] Georgia Gulf 3020 Rigid PVC, Extrusion แหล่งที่มา : <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatID=41656> [25 มีนาคม 2551]
- [51] Cabonyx new innovation : Mechanical Properties แหล่งที่มา : <http://www.vpwood.com/home/pdf/cer.pdf> [25 มีนาคม 2551].

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ข้อมูลดิบผลการทดสอบสมบัติเชิงกล

ตารางที่ ก-1 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบการทนต่อแรงดึงของไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ ที่ผงไม้
อนุภาคขนาดต่างๆที่ปริมาณผงไม้ 20 phr

ไม้พลาสติก PVC/ผงไม้สัก

Particle sizes (μm)	Tensile Modulus (GPa)	Tensile strength (MPa)	Tensile strain (%)
45	2.41	30.64	1.81
75	2.78	32.56	1.57
106	2.66	33.01	1.99
180	2.42	32.29	1.82
250	2.83	33.79	1.73

ไม้พลาสติก PVC/ผงไม้เต็ง

Particle sizes (μm)	Tensile Modulus (GPa)	Tensile strength (MPa)	Tensile strain (%)
45	2.11	27.89	1.81
75	2.22	31.17	1.96
106	2.29	31.94	1.83
180	2.45	32.45	1.80
250	2.59	33.97	1.74

ตารางที่ ก-2 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบการทนต่อแรงดึงของไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ ที่ผงไม้
อนุภาคขนาดต่างๆที่ปริมาณผงไม้ 40 phr
ไม้พลาสติก PVC/ผงไม้สัก

Particle sizes (μm)	Tensile Modulus (GPa)	Tensile strength (MPa)	Tensile strain (%)
45	2.89	29.77	1.38
75	2.97	33.25	1.42
106	2.58	27.21	1.43
180	2.93	30.32	1.60
250	2.99	30.38	1.62

ไม้พลาสติก PVC/ผงไม้เต็ง

Particle sizes (μm)	Tensile Modulus (GPa)	Tensile strength (MPa)	Tensile strain (%)
45	2.42	27.52	1.64
75	2.61	27.57	1.48
106	2.43	27.63	1.46
180	2.64	29.42	1.79
250	2.71	31.70	1.93

ตารางที่ ก-3 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบการทนต่อแรงดึงของไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ ที่ผงไม้
อนุภาคขนาดต่างๆที่ปริมาณผงไม้ 60 phr
ไม้พลาสติก PVC/ผงไม้สัก

Particle sizes (μm)	Tensile Modulus (GPa)	Tensile strength (MPa)	Tensile strain (%)
45	3.39	31.34	1.16
75	3.13	28.56	1.13
106	3.16	27.63	1.16
180	3.33	29.67	1.19
250	3.19	28.33	1.22

ไม้พลาสติก PVC/ผงไม้เต็ง

Particle sizes (μm)	Tensile Modulus (GPa)	Tensile strength (MPa)	Tensile strain (%)
45	3.03	29.68	1.94
75	2.92	25.41	1.78
106	2.83	25.97	1.85
180	2.79	27.32	1.34
250	3.01	27.89	1.10

ตารางที่ ก-4 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบการทนต่อแรงดึงของไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ ที่ผงไม้
อนุภาคขนาดต่างๆที่ปริมาณผงไม้ 80 phr
ไม้พลาสติก PVC/ผงไม้สัก

Particle sizes (μm)	Tensile Modulus (GPa)	Tensile strength (MPa)	Tensile strain (%)
45	3.49	26.39	0.96
75	3.44	28.72	0.96
106	3.44	28.29	1.00
180	3.41	28.61	1.02
250	3.49	28.17	1.02

ไม้พลาสติก PVC/ผงไม้เต็ง

Particle sizes (μm)	Tensile Modulus (GPa)	Tensile strength (MPa)	Tensile strain (%)
45	3.61	32.58	1.12
75	3.32	31.27	1.16
106	3.52	29.68	1.01
180	3.88	34.52	1.09
250	4.32	33.74	0.97

ตารางที่ ก-5 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบการทนต่อแรงดึงของPVCบริสุทธิ์

	Tensile Modulus (GPa)	Tensile strength (MPa)	Tensile strain (%)	Stress at yield (MPa)	Strain at yield (%)
PVC	1.680	32.57	3.77	31.16	2.8

ตารางที่ ก-6 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบการทนต่อการดัดโค้งของไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ ที่ผงไม้ อนุภาคขนาดต่างๆ ที่ปริมาณผงไม้ 20 phr

ไม้พลาสติก PVC/ผงไม้สัก

Particle sizes (μm)	Flexural Modulus (GPa)	Flexural strength (MPa)	Flexural strain (%)
45	2.15	35.87	3.48
75	2.08	32.23	3.34
106	2.31	33.71	2.77
180	2.15	35.75	3.26
250	2.31	33.72	3.44

ไม้พลาสติก PVC/ผงไม้เต็ง

Particle sizes (μm)	Flexural Modulus (GPa)	Flexural strength (MPa)	Flexural strain (%)
45	2.24	35.52	3.37
75	2.19	36.21	3.58
106	2.39	36.99	3.35
180	2.18	34.92	3.49
250	2.22	34.55	3.47

ตารางที่ ก-7 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบการทนต่อการดัดโค้งของไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ ที่ผงไม้
อนุภาคขนาดต่างๆ ที่ปริมาณผงไม้ 40 phr

ไม้พลาสติก PVC/ผงไม้สัก

Particle sizes (μm)	Flexural Modulus (GPa)	Flexural strength (MPa)	Flexural strain (%)
45	2.65	35.76	2.83
75	3.62	34.97	1.82
106	3.01	33.19	2.29
180	3.03	36.22	2.17
250	3.05	37.47	2.38

ไม้พลาสติก PVC/ผงไม้เต็ง

Particle sizes (μm)	Flexural Modulus (GPa)	Flexural strength (MPa)	Flexural strain (%)
45	2.88	37.32	2.73
75	2.77	39.21	2.76
106	3.34	37.37	2.19
180	3.43	38.74	2.55
250	3.02	38.86	2.43

ตารางที่ ก-8 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบการทนต่อการดัดโค้งของไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ ที่ผงไม้
อนุภาคขนาดต่างๆ ที่ปริมาณผงไม้ 60 phr

ไม้พลาสติก PVC/ผงไม้สัก

Particle sizes (μm)	Flexural Modulus (GPa)	Flexural strength (MPa)	Flexural strain (%)
45	3.64	39.85	1.76
75	3.68	39.87	1.71
106	3.68	39.76	1.79
180	3.49	37.71	2.04
250	3.59	40.31	2.13

ไม้พลาสติก PVC/ผงไม้เต็ง

Particle sizes (μm)	Flexural Modulus (GPa)	Flexural strength (MPa)	Flexural strain (%)
45	3.95	41.24	1.93
75	3.57	37.41	1.93
106	4.19	38.44	1.59
180	4.03	36.81	2.33
250	3.41	37.37	2.02

ตารางที่ ก-9 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบการทนต่อการดัดโค้งของไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ ที่ผงไม้
อนุภาคขนาดต่างๆ ที่ปริมาณผงไม้ 80 phr

ไม้พลาสติก PVC/ผงไม้สัก

Particle sizes (μm)	Flexural Modulus (GPa)	Flexural strength (MPa)	Flexural strain (%)
45	4.52	41.81	1.36
75	4.48	40.02	1.27
106	4.52	41.09	1.21
180	3.61	37.68	1.66
250	4.15	41.52	1.64

ไม้พลาสติก PVC/ผงไม้เต็ง

Particle sizes (μm)	Flexural Modulus (GPa)	Flexural strength (MPa)	Flexural strain (%)
45	4.28	46.59	1.77
75	4.08	42.63	1.63
106	4.36	39.14	1.34
180	4.57	44.12	1.42
250	4.35	46.62	1.60

ตารางที่ ก-10 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบการทนต่อการดัดโค้งของ PVC บริสุทธิ์

	Flexural Modulus (GPa)	Flexural strength (MPa)	Flexural strain (%)	Stress at yield (MPa)	Strain at yield (%)
PVC	2.113	48.24	4.05	47.49	4.00

ตารางที่ ก-11 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบการทนต่อการกดของไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ ที่ผงไม้
อนุภาคนขนาดต่างๆที่ปริมาณผงไม้ 20 phr

ไม้พลาสติก PVC/ผงไม้สัก

Particle sizes (μm)	Compression Modulus (GPa)	Compression strength (MPa)	Compression strain (%)
45	1.557	40.83	6.36
75	1.67	41.85	6.82
106	1.62	41.16	6.71
180	1.64	40.36	7.69
250	1.68	39.26	6.78

ไม้พลาสติก PVC/ผงไม้เต็ง

Particle sizes (μm)	Compression Modulus (GPa)	Compression strength (MPa)	Compression strain (%)
45	1.67	39.64	5.88
75	1.58	41.40	6.21
106	1.60	43.64	6.69
180	1.52	42.27	6.73
250	1.62	42.74	7.35

ตารางที่ ก-12 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบการทนต่อการกดของไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ ที่ผงไม้
อนุภาคนขนาดต่างๆที่ปริมาณผงไม้ 40 phr

ไม้พลาสติก PVC/ผงไม้สัก

Particle sizes (μm)	Compression Modulus (GPa)	Compression strength (MPa)	Compression strain (%)
45	1.92	45.22	5.14
75	1.7	42.19	5.39
106	1.89	45.33	5.49
180	1.74	45.07	6.31
250	1.73	42.99	5.89

ไม้พลาสติก PVC/ผงไม้เต็ง

Particle sizes (μm)	Compression Modulus (GPa)	Compression strength (MPa)	Compression strain (%)
45	1.76	44.24	6.15
75	1.83	47.32	6.18
106	1.97	43.15	4.95
180	1.89	46.34	5.61
250	2.09	48.71	6.04

ตารางที่ ก-13 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบการทนต่อการกดของไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ ที่ผงไม้
อนุภาคนขนาดต่างๆที่ปริมาณผงไม้ 60 phr

ไม้พลาสติก PVC/ผงไม้สัก

Particle sizes (μm)	Compression Modulus (GPa)	Compression strength (MPa)	Compression strain (%)
45	1.99	39.49	3.01
75	2.14	39.28	2.87
106	2.13	40.28	3.09
180	1.96	41.94	4.12
250	1.95	41.28	4.44

ไม้พลาสติก PVC/ผงไม้เต็ง

Particle sizes (μm)	Compression Modulus (GPa)	Compression strength (MPa)	Compression strain (%)
45	2.19	48.15	5.67
75	2.02	47.73	5.5
106	2.3	49.36	6.32
180	2.11	47.61	5.85
250	2.24	47.84	6.02

ตารางที่ ก-14 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบการทนต่อการกดของไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ ที่ผงไม้
อนุภาคนขนาดต่างๆที่ปริมาณผงไม้ 80 phr

ไม้พลาสติก PVC/ผงไม้สัก

Particle sizes (μm)	Compression Modulus (GPa)	Compression strength (MPa)	Compression strain (%)
45	2.16	42.58	4.11
75	2.18	42.51	3.54
106	2.34	45.55	3.69
180	2.23	46.81	4.25
250	2.25	45.09	4.05

ไม้พลาสติก PVC/ผงไม้เต็ง

Particle sizes (μm)	Compression Modulus (GPa)	Compression strength (MPa)	Compression strain (%)
45	2.44	50.82	4.23
75	2.32	53.23	5.16
106	2.23	52.47	4.79
180	2.26	53.33	5.09
250	2.51	53.48	4.49

ตารางที่ ก-15 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบการทนต่อการกดของPVC บริสุทธิ์

	Compression Modulus (GPa)	Compression strength (MPa)	Compression strain (%)	Stress at yield (MPa)	Strain at yield (%)
PVC	1.547	52.92	10.97	50.4	8.66

ตารางที่ ก-16 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบการทนต่อการกระแทกของไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ ที่ผง ไม้อนุภาคขนาดต่างๆ ที่ปริมาณผงไม้ 20 phr

PVC/ไม้สัก		PVC/ไม้เต็ง	
Particle sizes (μm)	Impact strength (kJ/m^2)	Particle sizes (μm)	Impact strength (kJ/m^2)
45	8.05	45	8.8
75	8.39	75	9.2
106	8.92	106	9.61
180	10.22	180	10.3
250	11.06	250	11.49

ตารางที่ ก-17 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบการทนต่อการกระแทกของไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ ที่ผง ไม้อนุภาคขนาดต่างๆ ที่ปริมาณผงไม้ 40 phr

PVC/ไม้สัก		PVC/ไม้เต็ง	
Particle sizes (μm)	Impact strength (kJ/m^2)	Particle sizes (μm)	Impact strength (kJ/m^2)
45	6.8	45	7.00
75	6.97	75	7.18
106	7.12	106	7.54
180	7.44	180	7.8
250	7.67	250	8.2

ตารางที่ ก-18 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบการทนต่อการกระแทกของไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ ที่ผง ไม้อนุภาคขนาดต่างๆ ที่ปริมาณผงไม้ 60 phr

PVC/ไม้สัก		PVC/ไม้เต็ง	
Particle sizes (μm)	Impact strength (kJ/m^2)	Particle sizes (μm)	Impact strength (kJ/m^2)
45	7.46	45	8.29
75	7.52	75	8.89
106	8.31	106	9.01
180	8.47	180	9.30
250	8.98	250	9.49

ตารางที่ ก-19 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบการทนต่อการกระแทกของไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ ที่ผง ไม้อนุภาคขนาดต่างๆ ที่ปริมาณผงไม้ 80 phr

PVC/ไม้สัก		PVC/ไม้เต็ง	
Particle sizes (μm)	Impact strength (kJ/m^2)	Particle sizes (μm)	Impact strength (kJ/m^2)
45	6.23	45	6.91
75	6.56	75	6.81
106	6.93	106	6.49
180	7.31	180	6.78
250	6.97	250	7.09

ตารางที่ ก-20 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบการทนต่อการกระแทกของ PVC บริสุทธิ์

	Impact strength (kJ/m^2)
PVC	12.1

ภาคผนวก ข

ข้อมูลดิบผลการทดสอบการดูดซึมน้ำ

ตารางที่ ข-1 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบสมบัติการดูดซึมน้ำของไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ ที่ผงไม้
อนุภาคขนาดต่างๆ ที่ปริมาณผงไม้ 20 phr

PVC/ไม้สัก		PVC/ไม้เต็ง	
Particle sizes (μm)	Water Absorption (%)	Particle sizes (μm)	Water Absorption (%)
45	2.47	45	2.24
75	2.33	75	2.33
106	2.58	106	2.46
180	2.54	180	2.27
250	2.24	250	2.35

ตารางที่ ข-2 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบสมบัติการดูดซึมน้ำของไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ ที่ผงไม้
อนุภาคขนาดต่างๆ ที่ปริมาณผงไม้ 40 phr

PVC/ไม้สัก		PVC/ไม้เต็ง	
Particle sizes (μm)	Water Absorption (%)	Particle sizes (μm)	Water Absorption (%)
45	4.89	45	3.96
75	5.03	75	3.34
106	5.11	106	3.41
180	5.23	180	3.56
250	5.19	250	3.62

ตารางที่ ข-3 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบสมบัติการดูดซึมน้ำของไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ ที่ผงไม้
อนุภาคขนาดต่างๆ ที่ปริมาณผงไม้ 60 phr

PVC/ไม้สัก		PVC/ไม้เต็ง	
Particle sizes (μm)	Water Absorption (%)	Particle sizes (μm)	Water Absorption (%)
45	6.77	45	6.14
75	6.70	75	5.75
106	6.59	106	5.88
180	6.47	180	6.07
250	6.49	250	5.67

ตารางที่ ข-4 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบสมบัติการดูดซึมน้ำของไม้พลาสติก PVC/ผงไม้ ที่ผงไม้
อนุภาคขนาดต่างๆ ที่ปริมาณผงไม้ 80 phr

PVC/ไม้สัก		PVC/ไม้เต็ง	
Particle sizes (μm)	Water Absorption (%)	Particle sizes (μm)	Water Absorption (%)
45	7.49	45	7.43
75	7.51	75	7.71
106	7.46	106	7.49
180	7.27	180	7.46
250	7.66	250	7.23

ตารางที่ ข-5 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบสมบัติการดูดซึมน้ำของ PVC บริสุทธิ์

	Water Absorption (%)
PVC	0.16

ภาคผนวก ค

ข้อมูลดิบผลการทดสอบความหนาแน่นของไม้พลาสติก

ตารางที่ ค-1 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบความหนาแน่นของไม้พลาสติก PVC/ผงไม้สัก ที่ผงไม้
อนุภาคขนาดต่างๆ ที่ปริมาณผงไม้ 20 ถึง 80 phr

Particle sizes (μm)	Density (g/cm^3)			
	20 phr	40 phr	60 phr	80 phr
45	1.368	1.348	1.332	1.337
75	1.354	1.358	1.343	1.334
106	1.351	1.356	1.341	1.310
180	1.371	1.366	1.344	1.324
250	1.365	1.352	1.345	1.340

ตารางที่ ค-2 แสดงข้อมูลดิบจากการทดสอบความหนาแน่นของไม้พลาสติก PVC/ผงไม้เต็ง ที่ผงไม้
อนุภาคขนาดต่างๆ ที่ปริมาณผงไม้ 20 ถึง 80 phr

Particle sizes (μm)	Density (g/cm^3)			
	20 phr	40 phr	60 phr	80 phr
45	1.346	1.357	1.410	1.415
75	1.348	1.355	1.413	1.414
106	1.351	1.361	1.403	1.418
180	1.361	1.367	1.404	1.421
250	1.390	1.398	1.416	1.418

ความหนาแน่นของ PVC บริสุทธิ์ เท่ากับ 1.425 g/cm^3

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวกมลรัตน์ คณาวัง เกิดเมื่อวันที่ 26 เมษายน พ.ศ. 2525 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร เข้าศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาที่โรงเรียนศิลาจารย์พัฒนัง สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ในปีการศึกษา 2547 และเข้าศึกษาต่อในคณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การเสนอผลงานทางวิชาการ

1. Preparation and Charecterization of Wood Plastic Composites Prepared from Poly(vinyl chloride) and Wood Flour. K. Kanawang and S. Covavisaruch, Asian Polymer Association International Conference on Advances in Polymer Science and Technology (2008)
2. The Effect of Tropical Wood Flour Content and Its Particle Sizes on the Mechanical Properties of Wood Plastic Composites Prepared from Poly(vinyl chloride). K. Kanawang and S. Covavisaruch, Pure and Applied Chemistry International Conference (2008)