วัสดุผสมเส้นใยธรรมชาติ-พอลิเมอร์ในรูปของไม้เทียม จากพอลิ(ไวนิลคลอไรด์) (PVC) และเส้นใยยูคาลิปตัส

NATURAL FIBER-POLYMER COMPOSITES AS ARTIFICIAL WOOD FROM POLY (VINYL CHLORIDE) AND EUCALYPTUS FIBERS

สมพร เอี่ยมรื่นรักกุล
SOMPHOP EIAMRUNRUKKUL

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์
ภาควิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะวิทยาศาสตร์
พ.ศ. 2544
ISBN 974-648-360-9

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ไม้เทียมพอลิเมอร์คอมโพสิตเส้นใยธรรมชาติจาก พอลิไวนิลคลอไรด์ (พีวีซี) และเส้นใยยูคาลิปตัส

NATURAL FIBER-POLYMER COMPOSITES AS ARTIFICIAL WOOD FROM POLY (VINYL CHLORIDE) AND EUCALYPTUS FIBERS

สมภพ เลิศลักขณากุล

SOMPHOP LERDLUCKANAKUL

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....80835
วัน,เดือน,ปี.....23 พ.ค. 2551

.b.....
.i.....

วิทยานิพนธ์เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2544

ISBN 974-648-360-9

NATURAL FIBER-POLYMER COMPOSITES AS ARTIFICIAL WOOD FROM POLY (VINYL CHLORIDE) AND EUCALYPTUS FIBERS

SOMPHOP LERDLUCKANAKUL

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE IN POLYMER TECHNOLOGY
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2001

ISBN 974-648-360-9

COPYRIGHT 2001

SCHOOL OF GRADUTE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ ไม้เทียมพอลิเมอร์คอมโพสิตเส้นใยธรรมชาติจากพอลิไวนิลคลอไรด์ (พีวีซี) และเส้นใยยูคาลิปตัส

NATURAL FIBER POLYMER COMPOSITES AS ARTIFICIAL WOOD FROM POLY (VINYL CHLORIDE) (PVC) AND EUCALYPTUS FIBERS

ชื่อนักศึกษา นายสมภพ เลิศลักขณากุล

รหัสประจำตัว 42065108

ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา เทคโนโลยีพอลิเมอร์

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.อิทธิพล แจ้งชัด

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม นายวรธรรม อุ่นจิตติชัย

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ดร.ชลลดา	ฤตวิรุฬห์	
ผศ.ดร.ทวีชัย	อมรศักดิ์ชัย	
ดร.สุภารัตน์	จำปา	
ผศ.ดร.อิทธิพล	แจ้งชัด	
นายวรธรรม	อุ่นจิตติชัย	

วัน / เดือน/ ปี ที่สอบ 29 มิถุนายน 2544 เวลา 9.30-12.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคารจุฬาภรณวลัยลักษณ์ ชั้น 6 ห้อง 602

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว

(รศ.ดร.บุญวัฒน์ อัตชู)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....9.....**เดือน**.....กันยายน.....**พ.ศ.**.....2544.....

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ไม้เทียมพอลิเมอร์คอมโพสิตเส้นใยธรรมชาติจากพอลิไวนิลคลอไรด์ (พีวีซี) และเส้นใยยูคาลิปตัส
นักศึกษา	นายสมภพ เลิศลักขณากุล
รหัสประจำตัว	42065018
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	เทคโนโลยีพอลิเมอร์
พ.ศ.	2544
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.อิทธิพล แจ้งชัด
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม	นายวรธรรม อุ่นจิตติชัย

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาพอลิเมอร์คอมโพสิตเส้นใยธรรมชาติเพื่อใช้เป็นไม้เทียม สามารถเตรียมได้จากพอลิไวนิลคลอไรด์ (Poly (vinyl chloride); PVC) กับเส้นใยยูคาลิปตัส (Eucalyptus fibers) โดยผสมในเครื่องผสมความเร็วสูง (High speed mixer) แล้วนำไปขึ้นรูปโดยใช้เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว (Single-screw extruder) และเครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding machine) จากนั้นนำไปศึกษาสมบัติต่างๆ เช่น สมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสัณฐานวิทยา ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาสภาวะที่ใช้ในการผลิตพีวีซีคอมโพสิต ผลของปริมาณเส้นใย ขนาดของเส้นใย ปริมาณของพลาสติไซเซอร์ไดออกทิลเทราพทาเลต (Dioctyl teraphatalate; DOP) ปริมาณของสารเพิ่มเนื้อแคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate; $CaCO_3$) ตลอดจนชนิดของเส้นใยที่ใช้ในการทดลองคือ เส้นใยยูคาลิปตัสที่เตรียมจากขบวนการความร้อนเชิงกล (Thermomechanical pulp; TMP) และขบวนการเคมี (Chemical pulp; CP) จากการทดลองพบว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมในการผสมพีวีซี ในเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยวคือ 170 องศาเซลเซียส ความเร็วของสกรูที่ใช้ 80 รอบต่อนาที และอุณหภูมิที่เหมาะสมในการขึ้นรูปพีวีซีคอมโพสิตในเครื่องอัดขึ้นรูปคือ 190 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที เมื่อทำการศึกษาปริมาณเส้นใยไม้ในพีวีซีคอมโพสิต พบว่า เมื่อปริมาณเส้นใยไม้เพิ่มขึ้น สมบัติเชิงกลของพีวีซีคอมโพสิตดีขึ้น แต่สมบัติเชิงกลจะลดลงเมื่อปริมาณไม้ที่เติมมีมากเกินไป และเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำเพิ่มมากขึ้น ปริมาณไม้ที่เหมาะสมที่สุดคือ 30 phr จากการศึกษาผลของขนาดของเส้นใย พบว่า พีวีซีคอมโพสิตที่ใช้เส้นใยยาว จะให้สมบัติเชิงกลที่ดีกว่าพีวีซีคอมโพสิตที่ใช้เส้นใยสั้น โดยสมบัติทางความร้อนและเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำมีค่าไม่เปลี่ยนแปลง ขนาดของเส้นใยไม้ที่ให้สมบัติเชิงกลที่ดีที่สุดคือ เส้นใยไม้ขนาด 35-50 mesh (300-500 ไมครอน) เมื่อทำการเพิ่มปริมาณ DOP ที่เติมลงไปในพีวีซีคอมโพสิต พบว่า วัสดุนิ่มขึ้นและมีความแข็งแรงลดลง พีวีซีคอมโพสิต ทนทานต่อความร้อนได้น้อยลง เมื่อปริมาณ DOP เพิ่มมากขึ้น แต่เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ เพิ่มมากขึ้น ปริมาณ DOP ที่

เหมาะสมในการผลิตพีวีซีคอมโพสิตคือ 10 phr สมบัติทางความร้อนของพีวีซีคอมโพสิตสามารถเพิ่มมากขึ้น เมื่อปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเพิ่มขึ้น แต่ทำให้สมบัติเชิงกลมีค่าลดลง ในการศึกษาชนิดของเส้นใยที่ใช้ในการผลิตพีวีซีคอมโพสิต พบว่า พีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจาก เส้นใย TMP จะมีสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนที่ดีกว่าพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย CP การศึกษาสัณฐานของพอลิเมอร์คอมโพสิต โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) พบว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP มีการกระจายตัวดีกว่าเส้นใย CP

Thesis Title	Natural Fiber-Polymer Composites as Artificial Wood from Poly (vinyl chloride) and Eucalyptus Fibers
Student	Mr. Somphop Lerdluckanakul
Student ID.	42065108
Degree	Master of Science
Programme	Polymer Technology
Year	2001
Thesis advisor	Asst.Prof.Dr. Ittipol Jangchud
Thesis co-advisor	Mr. Woratham Oonjittichai

ABSTRACT

In this research work, natural fiber-polymer composites used as artificial wood were prepared from poly (vinyl chloride) (PVC) and Eucalyptus fibers. The PVC formulas were mixed by a high speed mixer, compounded by a single-screw extruder, and then shaped by a compression molding machine. The composites were then characterized for physical, mechanical, thermal and morphological properties. Parameters affected composite properties were studied including conditions of PVC processing, amount of DOP (dioctyl teraphatalate) plasticizer, calcium carbonate ($CaCO_3$) filler, effect of amount, size and type of the fibers (thermomechanical pulp; TMP and chemical pulp; CP). It was found that an appropriate temperature to compound the PVC in the single-screw extruder was 170 $^{\circ}C$, at screw speed of 80 rpm and appropriate temperature for compression molding was 190 $^{\circ}C$ for 5 minutes. It was found that mechanical properties of the composites were improved by adding the fibers. However, the mechanical properties were declined after % fiber loading exceeded the optimum point (30 phr). As expected, the % water absorption (% WA) of the composites were also increased as the fiber loading was increased. The longer the fiber length used, the better the composite mechanical properties. Thermal properties and % WA of the composites were changed insignificantly. It was found that the optimum fiber size was in the range of 300-500 micron (35-50 mesh). As the DOP plasticizer loading was increased, the natural fiber composites were found to be softened and the mechanical properties were decreased. An optimum DOP loading in the composites was 10 phr. As $CaCO_3$ filler was added, high temperature resistance of the composites was improved; however, other mechanical properties were declined. It was found that the composites made from TMP fibers had

better mechanical and thermal properties than those made from CP fibers. Morphology of the fractured composites was observed by SEM. It was revealed that the composites of TMP fibers had better fiber dispersion than those of CP fibers.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างดี ด้วยคำแนะนำที่ดีเกี่ยวกับพีวีซี และคอมโพสิต ตลอดจนสิ่งต่างๆจาก ผศ.ดร. อิทธิพล แจ้งชัด ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ คุณวรธรรม อุ่นจิตติชัย นักวิชาการกรมป่าไม้ ผู้เอื้อเฟื้อเส้นใยไม้ที่ใช้ในการทดลอง ตลอดจนคำแนะนำต่างๆ ที่ทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ ดร.ชลลดา ฤตวิรุฬห์ ดร.สุภารัตน์ จำปา และ ผศ.ดร.ทวีชัย อมรศักดิ์ชัย อาจารย์และคณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาตรวจทาน และแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ คุณกฤษณะ เกษประดิษฐ์ และคุณสุดใจ สอนสะอาด เจ้าหน้าที่อาคารฝึกงานทางอุตสาหกรรมเคมี และพอลิเมอร์ ที่คอยอำนวยความสะดวกตลอดการดำเนินงานวิจัย

ขอขอบคุณ บริษัทวีนิไทย จำกัด (มหาชน) ที่เอื้อเฟื้อพีวีซี (264 GC) เพื่อใช้ในงานวิจัย

ขอขอบคุณ บริษัทเฮงเค็ลไทย จำกัด ที่เอื้อเฟื้อสารเคมี Process aids (Loxil G32) เพื่อใช้ในงานวิจัย

ขอขอบคุณ บริษัทเอ็นเอส อิเล็กโทรนิกส์ ที่ให้ความเอื้อเฟื้อในการใช้เครื่อง SEM

ขอขอบคุณ พ่อ แม่ พี่น้อง และเพื่อนๆ นักศึกษาทุกท่าน ที่เป็นกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้

นอกจากนี้ยังขอขอบคุณบุคคลท่านอื่นๆ ที่ใช้ความกรุณา ช่วยเหลือ ซึ่งผู้จัดทำมิได้กล่าวถึงอีกมากมาย ทางผู้เขียนขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้ด้วย

สมภพ เลิศลักขณากุล

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... III

กิตติกรรมประกาศ..... V

สารบัญ..... VI

สารบัญตาราง..... X

สารบัญภาพ..... XI

บทที่ 1 บทนำ..... 1

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย..... 1

1.1.1 ข้อดีของพีวีซี..... 3

1.1.2 ข้อดีของเส้นใยยูคาลิปตัส..... 3

1.2 วัตถุประสงค์..... 4

1.3 ขอบเขตงานวิจัย..... 4

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ..... 4

บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ..... 5

2.1 วัสดุคอมโพสิต..... 5

2.1.1 เมตริกซ์..... 7

2.1.2 ส่วนเสริมแรง..... 7

2.1.3 ข้อดีและข้อเสียของคอมโพสิต..... 8

2.1.4 คอมโพสิตจากไม้และผลิตภัณฑ์..... 8

2.1.5 เทอร์โมพลาสติก พอลิเมอร์คอมโพสิตจากไม้..... 10

2.2 พอลิไวนิลคลอไรด์..... 11

2.2.1 พีวีซีคอมพาวด์..... 12

2.2.2 สารเติมแต่ง..... 13

2.2.2.1 สเตบิไลเซอร์..... 13

2.2.2.2 พลาสติไซเซอร์..... 13

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.2.2.3 สารหล่อลื่น..... 15
2.2.2.4 สารเพิ่มเนื้อ..... 17
2.2.2.5 โปรเซสชิงเอด..... 17
2.2.2.6 สารปรับปรุงการรับแรงกระแทก..... 17
2.2.2.7 สารช่วยการพองตัว..... 18
2.2.2.8 สารให้สี..... 18
2.2.2.9 สารช่วยผสม..... 18
2.3 เส้นใยธรรมชาติ..... 19
2.3.1 เซลลูโลส..... 19
2.3.1.1 สมบัติทางกายภาพของเซลลูโลส..... 20
2.3.2 เฮมิเซลลูโลส..... 20
2.3.3 ลิกนิน..... 21
2.4 ยูคาลิปตัส..... 22
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 24

บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย..... 30
3.1 สารเคมีและวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย..... 30
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย..... 30
3.3 วิธีการทดลอง..... 32
3.3.1 การเตรียมเยื่อไม้..... 32
3.3.1.1 เยื่อไม้ที่เตรียมได้จากขบวนการความร้อนเชิงกล..... 32
3.3.1.2 เยื่อไม้ที่เตรียมได้จากขบวนการทางเคมี..... 32
3.3.2 ขั้นตอนการผสมพีวีซี..... 35
3.4 การทดสอบ..... 37
3.4.1 สมบัติเชิงกล..... 38
3.4.1.1 ความแข็งแรงดึง มอดุลัส และเปอร์เซ็นต์การดึง ยืด ณ จุดขาด... 38
3.4.1.2 ความแข็งแรงกระแทก 39
3.4.1.3 ความแข็งกด 39

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.4.1.4 ความแข็งแรงโค้งงอและมอดุลัสโค้งงอ 40

3.4.2 สมบัติทางกายภาพ..... 41

3.4.2.1 ความหนาแน่น 41

3.4.2.2 การดูดซับน้ำ 41

3.4.3 สมบัติทางความร้อน..... 41

3.4.3.1 Thermogravimetric Analysis (TGA) 41

3.4.3.2 Dynamic Mechanical Thermal Analysis (DMTA)..... 42

3.4.4 สัณฐานวิทยา..... 42

3.4.4.1 กล้องจุลทรรศ์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) 42

3.4.4.2 ขั้นตอนการสกัดเส้นใยไม้ออกจากพีวีซีคอมโพสิต..... 42

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง..... 43

4.1 องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยยูคาลิปตัส 43

4.2 การหาสภาวะที่เหมาะสมในขบวนการผลิต..... 45

4.1.1 การศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมของเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว.... 45

4.1.2 การหาอุณหภูมิที่เหมาะสมของเครื่องขึ้นรูปโดยวิธีกดอัด..... 45

4.3 การศึกษาผลของปริมาณเส้นใยไม้ที่เติมในพีวีซีคอมโพสิต..... 46

4.4 การศึกษาขนาดความยาวของเส้นใยไม้ที่เติมในพีวีซีคอมโพสิต..... 56

4.5 การศึกษาผลของปริมาณพลาสติไซเซอร์ (DOP) ที่เติมในพีวีซีคอมโพสิต..... 67

4.6 การศึกษาผลของปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต ที่เติมในพีวีซีคอมโพสิต..... 77

4.7 การศึกษาผลของวิธีเตรียมเส้นใยไม้ที่ผสมในพีวีซีคอมโพสิต..... 87

4.8 เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของพีวีซีคอมโพสิต..... 91

4.9 ผลจากเครื่องทดสอบทางความร้อน TGA (Thermogravimetric Analyzer)..... 95

4.10 ผลจากเครื่องทดสอบทางความร้อน DMTA (Dynamic Mechanical Thermal Analyzer)..... 99

4.11 การศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM).. 102

4.11.1 สัณฐานวิทยาของเส้นใย TMP เส้นใย CP และ เส้นใย TMP หลังทำการสกัด..... 102

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.11.2 สัณฐานวิทยาของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณเส้นใยไม้..... 103

4.11.3 สัณฐานวิทยาของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงขนาดความยาวเส้นใยไม้..... 106

4.11.4 สัณฐานวิทยาของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP เมื่อเติมแคลเซียมคาร์บอเนต 30 phr..... 108

4.11.5 เปรียบเทียบสัณฐานวิทยาของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP และ CP..... 109

บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง..... 110

5.1 สรุปผลการทดลอง..... 110

5.2 ข้อเสนอแนะ..... 112

เอกสารอ้างอิง..... 113

ภาคผนวก..... 116

ภาคผนวก ก. แสดงกราฟที่ได้จากเครื่อง DMTA ของพีวีซีคอมโพสิต..... 116

ประวัติผู้เขียน..... 127

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	สมบัติบางประการของวัสดุต่างๆ เทียบกับวัสดุคอมโพสิต.....	5
2.2	สมบัติทางกายภาพต่างๆ ของพอลิเมอร์เมื่อเติมสารเสถียรภาพพลาสติก.....	15
2.3	องค์ประกอบทางเคมีของไม้ยูคาลิปตัส คามาดูเลนซีส.....	23
3.1	สูตรการผสมพีวีซีคอมพาวด์.....	36
3.2	มาตรฐานต่างๆ ในการทดสอบพอลิเมอร์คอมโพสิต.....	37
4.1	องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยไม้ TMP และ CP.....	44
4.2	สมบัติต่างๆ ของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อทำการเพิ่มปริมาณไม้ลงไป.....	46
4.3	สมบัติต่างๆ ของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงขนาดความยาวเส้นใยไม้.....	56
4.4	สมบัติต่างๆ ของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณ DOP.....	67
4.5	สมบัติต่างๆ ของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงแคลเซียมคาร์บอเนต.....	77
4.6	การเปรียบเทียบสมบัติต่างๆ ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใยไม้ TMP และ CP..	87
4.7	ค่า T_g และค่า Tan δ จากเครื่อง DMTA เมื่อทำการเพิ่มปริมาณเส้นใยไม้ TMPในพีวีซีคอมโพสิตโดยใส่ DOP 10 phr.....	99
4.8	ค่า T_g และค่า Tan δ จากเครื่อง DMTA เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นใยไม้ TMP ปริมาณ 30 phr และใส่ DOP 10 phr.....	100
4.9	ค่า T_g และค่า Tan δ จากเครื่อง DMTA ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP ไม่แยกขนาด 30 phr เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณ DOP.....	100
4.10	ค่า T_g และค่า Tan δ จากเครื่อง DMTA ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP ไม่แยกขนาด 30 phr และ DOP 10 phr เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต.....	101
4.11	ค่า T_g และค่า Tan δ จากเครื่อง DMTA ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP หรือ CP ในปริมาณ 30 phr และ DOP 10 phr.....	101

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1.1	ความแตกต่างระหว่างไม้กับไม้คอมโพสิต	1
1.2	การประกอบของวัสดุไม้คอมโพสิต	2
2.1	แผนภาพการแบ่งประเภทของคอมโพสิต โดยแบ่งตามลักษณะของส่วนเสริมแรง	6
2.2	ตัวอย่างคอมโพสิตที่มีส่วนเสริมแรงต่างกัน	7
2.3	ลักษณะพื้นฐานของไม้ตั้งแต่ขนาดใหญ่ถึงเล็กตามลำดับ	9
2.4	ตัวอย่างของผลิตภัณฑ์ของคอมโพสิตจากไม้	9
2.5	ปฏิกิริยาการเตรียมพอลิไวนิลคลอไรด์	11
2.6	สูตรโครงสร้างของพลาสติไซเซอร์ชนิดต่างๆ	14
2.7	กลไกระหว่างสารหล่อลื่นกับพีวีซี	16
2.8	สูตรโครงสร้างของเซลลูโลส	19
2.9	สูตรโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส	20
2.10	ตัวอย่างโครงสร้างทางเคมีของลิกนิน	21
2.11	การจัดเรียงตัวของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินในไม้	21
2.12	ลักษณะของต้นยูคาลิปตัส	22
3.1	รูปถ่ายลักษณะของเส้นใยไม้ขนาดต่างกัน และชนิดการเตรียมต่างกัน	34
3.2	ลักษณะตัวอย่างของชิ้นงานที่นำมาทดสอบหาค่าความแข็งแรงดึง ค่ามอดุลัส และค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด	38
3.3	ลักษณะตัวอย่างของชิ้นงานที่นำมาทดสอบหาค่าความแข็งแรงกระแทก	39
3.4	แรงที่เกิดขึ้นในการทดสอบการโค้งงอ	40
4.1	ค่าความแข็งแรงดึงของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อทำการเพิ่มปริมาณเส้นใยไม้ (TMP) ในปริมาณ 10 20 30 40 และ 50 phr	47
4.2	ค่ามอดุลัสของพีวีซีคอมโพสิต เมื่อทำการเพิ่มปริมาณเส้นใยไม้ (TMP) ในปริมาณ 10 20 30 40 และ 50 phr	48
4.3	ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด ของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อทำการเพิ่มปริมาณเส้นใยไม้ (TMP) ในปริมาณ 10 20 30 40 และ 50 phr	49
4.4	ค่าความแข็งแรงกระแทกของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อทำการเพิ่มปริมาณเส้นใยไม้ (TMP) ในปริมาณ 10 20 30 40 และ 50 phr	50

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.5 ค่าความแข็งกดของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อทำการเพิ่มปริมาณเส้นใยไม้ (TMP) ในปริมาณ 10 20 30 40 และ 50 phr..... 51

4.6 ค่าความหนาแน่นของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อทำการเพิ่มปริมาณเส้นใยไม้ (TMP) ในปริมาณ 10 20 30 40 และ 50 phr..... 52

4.7 ค่า HDT ของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อทำการเพิ่มปริมาณเส้นใยไม้ (TMP) ในปริมาณ 10 20 30 40 และ 50 phr..... 53

4.8 ค่าความแข็งแรงโค้งงอของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อทำการเพิ่มปริมาณเส้นใยไม้ (TMP) ในปริมาณ 10 20 30 40 และ 50 phr..... 54

4.9 ค่ามอดุลัสโค้งงอของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อทำการเพิ่มปริมาณเส้นใยไม้ (TMP) ในปริมาณ 10 20 30 40 และ 50 phr..... 55

4.10 การเปลี่ยนแปลงของแรงต่างๆ รอบเส้นใยสั้นฝังอยู่ในเมตริกซ์เมื่อได้รับแรงจากภายนอก และแรงต่างๆ ที่เกิดในเส้นใย..... 57

4.11 ค่าความแข็งแรงดึงของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP ในปริมาณ 30 phr เมื่อทำการเปลี่ยนขนาดความยาวเส้นใยไม้..... 58

4.12 ค่ามอดุลัสของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP ในปริมาณ 30 phr เมื่อทำการเปลี่ยนขนาดความยาวเส้นใยไม้..... 59

4.13 ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP ในปริมาณ 30 phr เมื่อทำการเปลี่ยนขนาดความยาวเส้นใยไม้..... 60

4.14 ค่าความแข็งแรงกระแทกของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP ในปริมาณ 30 phr เมื่อทำการเปลี่ยนขนาดความยาวเส้นใยไม้..... 61

4.15 ค่าความแข็งกดของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP ในปริมาณ 30 phr เมื่อทำการเปลี่ยนขนาดความยาวเส้นใยไม้..... 62

4.16 ค่าความหนาแน่นของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP ในปริมาณ 30 phr เมื่อทำการเปลี่ยนขนาดความยาวเส้นใยไม้..... 63

4.17 ค่า HDT ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP ในปริมาณ 30 phr เมื่อทำการเปลี่ยนขนาดความยาวเส้นใยไม้..... 64

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.18 ค่าความแข็งแรงโค้งงอของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP ในปริมาณ 30 phr เมื่อทำการเปลี่ยนขนาดความยาวเส้นใยไม้..... 65

4.19 ค่ามอดุลัสโค้งงอของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP ในปริมาณ 30 phr เมื่อทำการเปลี่ยนขนาดความยาวเส้นใยไม้..... 66

4.20 ค่าความแข็งแรงดึงของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP โดยไม่มีการแยกขนาด 30 phr เมื่อทำการเพิ่มปริมาณ DOP ลงไปในปริมาณ 0 3 7 10 และ 20 phr..... 68

4.21 ค่ามอดุลัสของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP โดยไม่มีการแยกขนาด 30 phr เมื่อทำการเพิ่มปริมาณ DOP ลงไปในปริมาณ 0 3 7 10 และ 20 phr..... 69

4.22 ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP 30 phr โดยไม่มีการแยกขนาด เมื่อทำการเพิ่มปริมาณ DOP ลงไปในปริมาณ 0 3 7 10 และ 20 phr..... 70

4.23 ค่าความแข็งแรงกระแทกของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP 30 phr โดยไม่มีการแยกขนาด เมื่อทำการเพิ่มปริมาณ DOP ลงไปในปริมาณ 0 3 7 10 และ 20 phr..... 71

4.24 ค่าความแข็งกดของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP 30 phr โดยไม่มีการแยกขนาด เมื่อทำการเพิ่มปริมาณ DOP ลงไปในปริมาณ 0 3 7 10 และ 20 phr..... 72

4.25 ค่าความหนาแน่นของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP 30 phr โดยไม่มีการแยกขนาด เมื่อทำการเพิ่มปริมาณ DOP ลงไปในปริมาณ 0 3 7 10 และ 20 phr..... 73

4.26 ค่า HDT ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP 30 phr โดยไม่มีการแยกขนาด เมื่อทำการเพิ่มปริมาณ DOP ลงไปในปริมาณ 0 3 7 10 และ 20 phr..... 74

4.27 ค่าความแข็งแรงโค้งงอของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP 30 phr โดยไม่มีการแยกขนาด เมื่อทำการเพิ่มปริมาณ DOP ลงไปในปริมาณ 0 3 7 10 และ 20 phr..... 75

4.28 ค่ามอดุลัสโค้งงอของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP 30 phr โดยไม่มีการแยกขนาด เมื่อทำการเพิ่มปริมาณ DOP ลงไปในปริมาณ 0 3 7 10 และ 20 phr..... 76

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.29 ค่าความแข็งแรงดึงของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP ในปริมาณ 30 phr โดยไม่มีการแยกขนาด เมื่อทำการเพิ่มปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตลงไปในปริมาณ 0 10 20 30 และ 40 phr..... 78

4.30 ค่ามอดุลัสของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP ในปริมาณ 30 phr โดยไม่มีการแยกขนาด เมื่อทำการเพิ่มปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต ลงไปในปริมาณ 0 10 20 30 และ 40 phr..... 79

4.31 ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP ในปริมาณ 30 phr โดยไม่มีการแยกขนาด เมื่อทำการเพิ่มปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตลงไปในปริมาณ 0 10 20 30 และ 40 phr..... 80

4.32 ค่าความแข็งแรงกระแทกของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP ในปริมาณ 30 phr โดยไม่มีการแยกขนาด เมื่อทำการเพิ่มปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตลงไปในปริมาณ 0 10 20 30 และ 40 phr..... 81

4.33 ค่าความแข็งกดของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP ในปริมาณ 30 phr โดยไม่มีการแยกขนาด เมื่อทำการเพิ่มปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต ลงไปในปริมาณ 0 10 20 30 และ 40 phr..... 82

4.34 ค่าความหนาแน่นของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP ในปริมาณ 30 phr โดยไม่มีการแยกขนาด เมื่อทำการเพิ่มปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตลงไปในปริมาณ 0 10 20 30 และ 40 phr..... 83

4.35 ค่า HDT ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP ในปริมาณ 30 phr โดยไม่มีการแยกขนาด เมื่อทำการเพิ่มปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตลงไปในปริมาณ 0 10 20 30 และ 40 phr..... 84

4.36 ค่าความแข็งแรงโค้งงอของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP ในปริมาณ 30 phr โดยไม่มีการแยกขนาด เมื่อทำการเพิ่มปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตลงไปในปริมาณ 0 10 20 30 และ 40 phr..... 85

4.37 ค่ามอดุลัสโค้งงอของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP ในปริมาณ 30 phr โดยไม่มีการแยกขนาด เมื่อทำการเพิ่มปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตลงไปในปริมาณ 0 10 20 30 และ 40 phr..... 86

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.38 ค่าความแข็งแรงดึง มอดุลัส และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP และ เส้นใย CP ในปริมาณ 30 phr..... 88

4.39 ค่า HDT ค่าความแข็งกด ความแข็งแรงโค้งงอ และค่ามอดุลัสโค้งงอของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP และ เส้นใย CP ในปริมาณ 30 phr..... 89

4.40 ค่าความแข็งแรงกระแทก และค่าความหนาแน่น ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP และ เส้นใย CP ในปริมาณ 30 phr..... 90

4.41 เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP เมื่อทำการเปลี่ยนแปลง ปริมาณไม้เป็น 10 20 30 40 และ 50 phr..... 91

4.42 เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP ในปริมาณ 30 phr เมื่อทำการเปลี่ยนขนาดเส้นใยไม้..... 92

4.43 เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMPในปริมาณ 30 phr เมื่อทำการเพิ่มปริมาณ DOP ลงไปในปริมาณ 0 3 7 10 และ 20 phr..... 93

4.44 เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP ในปริมาณ 30 phr เมื่อทำการเพิ่มปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตลงไปในปริมาณ 0 10 20 30 และ 40 phr..... 93

4.45 เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อทำการเปลี่ยนชนิดของเส้นใยที่นำมาใช้ (เส้นใย TMP และ เส้นใย CP) ในปริมาณ 30 phr..... 94

4.46 กราฟ TGA ของเส้นใยไม้ TMP และเส้นใยไม้ CP..... 96

4.47 กราฟ TGA ของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อทำการเติมปริมาณไม้ TMP 10 20 30 40 และ 50 phr..... 96

4.48 กราฟ TGA ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP ในปริมาณ 30 phr เมื่อทำการเติมปริมาณ DOP 0 3 และ 20 phr..... 97

4.49 กราฟ TGA ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP ในปริมาณ 30 phr เมื่อทำการเติมปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต 10 20 30 และ 40 phr..... 97

4.50 กราฟ TGA ของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อทำการเปลี่ยนชนิดของเส้นใยไม้เป็น TMP และ CP ในปริมาณ 30 phr..... 98

4.51 สัณฐานวิทยาของเส้นใย TMP CP และ TMP หลังการสกัด..... 102

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.52	สัณฐานวิทยาของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณ เส้นใยไม้	104
4.53	สัณฐานวิทยาของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP ในปริมาณ 30 phr เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นใยไม้	106
4.54	สัณฐานวิทยาของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP ในปริมาณ 30 phr เมื่อทำการเติมแคลเซียมคาร์บอเนต ลงไป 30 phr	108
4.55	สัณฐานของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP และ CP	109

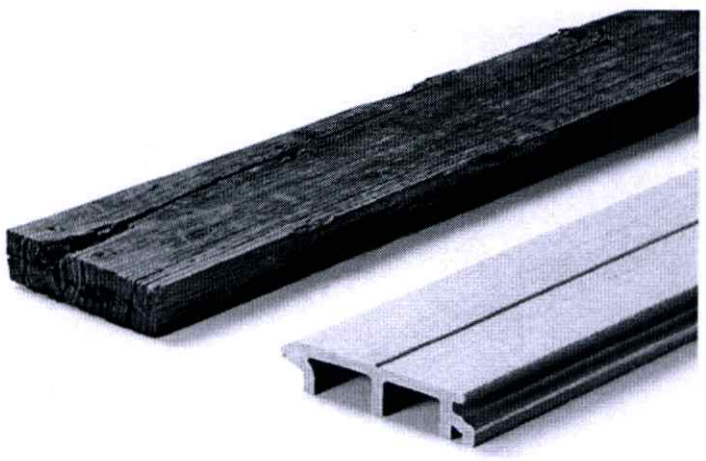
บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ในปัจจุบัน ไม้เป็นวัสดุที่มีความสำคัญมาก นิยมใช้เป็นวัสดุในการก่อสร้าง เฟอร์นิเจอร์ เครื่องมือและเครื่องใช้ต่างๆ เช่น บานประตู หน้าต่าง โต๊ะ เก้าอี้ โครงสร้างของบ้าน ทั้งนี้เนื่องจากไม้มีความสวยงาม มีความแข็งแรง และเป็นวัสดุที่หาได้ง่าย เกิดขึ้นได้เองตามธรรมชาติ มีใช้ได้ไม่หมดไม่สิ้น แต่ไม้ก็มีข้อเสียอีกหลายประการ เช่น มีน้ำหนักมาก ผุง่าย ไม่ทนต่อสภาวะแวดล้อม ดูดความชื้นได้ดี ถูกทำลายได้ง่ายโดยแมลงต่างๆ เช่น ปลวก มอด ฯลฯ ทำให้ไม้มีอายุการใช้งานจำกัด บางชนิดมีราคาแพง อีกทั้งปัจจุบันพื้นที่ป่าในประเทศมีจำนวนลดลงอย่างมาก จึงส่งผลให้ปริมาณไม้ที่ตัดได้ในประเทศมีปริมาณลดลงเช่นเดียวกัน

จากปัญหาต่างๆ จึงได้มีแนวทางในการหาวัสดุชนิดใหม่ ที่สามารถนำมาใช้แทนวัสดุไม้ได้ ซึ่งวัสดุนั้นคือ พลาสติก พลาสติกมีข้อดีกว่าไม้หลายอย่าง เช่น มีน้ำหนักเบา มีความแข็งแรงเหนียว ความทนทานต่อสภาพดินฟ้าอากาศได้เป็นอย่างดี ไม่ดูดความชื้น แมลงต่างๆ ไม่สามารถทำลายได้ อายุการใช้งานยาวนาน ขึ้นรูปได้ง่ายตามความต้องการตามลักษณะงานที่ใช้ และมีต้นทุนการผลิตต่ำ

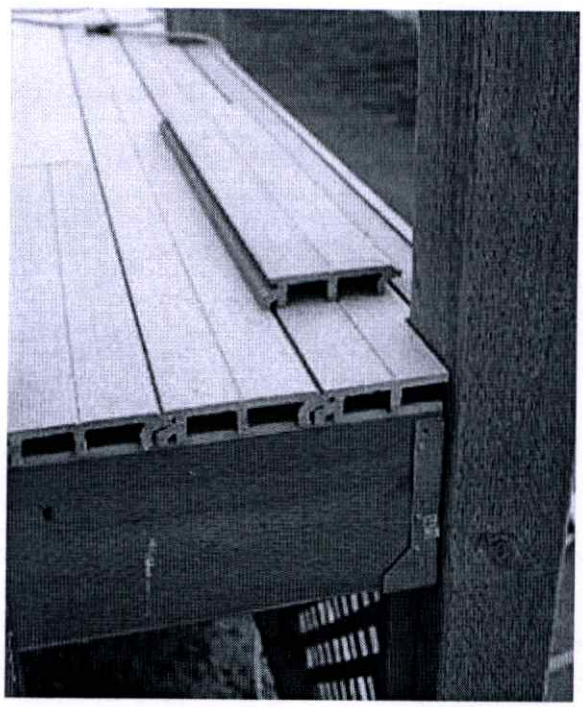
ในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวกับไม้ เช่น อุตสาหกรรมเฟอร์นิเจอร์ อุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมการเกษตรบางประเภท มักมีเศษไม้หรือผงไม้ที่เหลือใช้เป็นจำนวนมาก จึงได้มีแนว



รูปที่ 1.1 ความแตกต่างระหว่างไม้กับไม้คอมโพสิต

คิดที่นำเศษไม้หรือผงไม้เหล่านี้มาผสมกับพลาสติกเพื่อทำเป็นพอลิเมอร์คอมโพสิต (Polymer composites) เนื่องจากพอลิเมอร์คอมโพสิตให้สมบัติที่ดีกว่าไม้หรือพลาสติกคือ มีน้ำหนักเบา มีความแข็งแรงและค่ามอดุลัสสูง ขึ้นรูปได้ง่าย ทนทาน มีอายุการใช้งานยาวนาน สามารถนำไปใช้แทนไม้หรือโลหะได้หลายงาน เพราะฉะนั้นพอลิเมอร์คอมโพสิตจึงมีความสำคัญมากในปัจจุบัน

จากรูปที่ 1.1 แสดงความแตกต่างระหว่างไม้กับไม้คอมโพสิต โดยจะเห็นได้ว่าไม้คอมโพสิตสามารถขึ้นรูปให้ภายในมีลักษณะกลวงและมีข้อต่อทางด้านข้างของชิ้นงาน เพราะฉะนั้นการใช้งานไม้คอมโพสิต จึงสามารถใช้งานได้สะดวกสบายกว่า และรูปที่ 1.2 แสดงการประกอบของวัสดุไม้คอมโพสิต โดยจะเห็นได้ว่าไม้คอมโพสิตสามารถขึ้นรูปได้ตามลักษณะที่ต้องการ เพราะฉะนั้นจึงง่ายต่อการประกอบเป็นโครงสร้างต่างๆ



รูปที่ 1.2 การประกอบของวัสดุไม้คอมโพสิต

งานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาการผลิตพอลิเมอร์คอมโพสิต เพื่อใช้งานเป็นแผ่นไม้เทียมโดยพอลิเมอร์ที่ใช้ในการทดลองคือ พอลิไวนิลคลอไรด์ หรือพีวีซี (Poly (vinyl chloride); PVC) และเส้นใยไม้ที่ใช้คือ เส้นใยไม้ยูคาลิปตัส โดยข้อดีของพีวีซี และเส้นใยยูคาลิปตัสมีดังนี้

1.1.1 ข้อดีของพีวีซี [1]

1. ทนทานต่อสภาพแวดล้อมได้ดี
2. ไม่เกิดการบวมน้ำ และดูดความชื้นได้น้อย
3. สามารถผสมเข้ากันได้ดีกับเส้นใยไม้
4. สามารถขึ้นรูปได้ตามความต้องการ
5. ไม่ติดไฟ
6. สามารถทำให้อ่อนหรือแข็งได้ ขึ้นกับปริมาณพลาสติไซเซอร์ที่ใส่ลงไป
7. มีความคงรูปสูง
8. ราคาถูก

1.1.2 ข้อดีของเส้นใยยูคาลิปตัส

1. เป็นที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมกระดาษ จึงทำให้มีเศษไม้เหลือเป็นจำนวนมาก จึงไม่มีข้อจำกัดในการหาวัตถุดิบ
2. เนื่องจากไม้ยูคาลิปตัสเป็นไม้เนื้อแข็ง เส้นใยมีความแข็ง เพราะฉะนั้นเมื่อนำไปผสมกับพีวีซี สามารถเพิ่มสมบัติบางประการของพีวีซีได้
3. เส้นใยยูคาลิปตัสมีความหนาแน่นต่ำ มีอัตราส่วนน้ำหนักต่อปริมาตรต่ำ จึงสามารถใส่เส้นใยไม้ในพีวีซีได้ในปริมาณที่มาก

ทั้งพีวีซีและเส้นใยยูคาลิปตัส ต่างเป็นวัสดุที่มีโครงสร้างเป็นแบบมีขั้ว เพราะฉะนั้นของผสมทั้งสอง จึงคาดว่าสามารถผสมเข้ากันได้ ในการศึกษา ได้ทำการศึกษาสูตรที่ใช้ในการผสมและปริมาณของเส้นใยไม้ที่เหมาะสม เพื่อผลิตแผ่นไม้เทียมชนิดแข็งให้เหมาะสมกับการนำไปใช้งานตามความต้องการ เช่นเฟอร์นิเจอร์ไม้ และอุปกรณ์ก่อสร้างไม้ปาร์เกต์ เป็นต้น

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการผลิตพอลิเมอร์คอมโพสิตจากพีวีซีและเส้นใยไม้ยูคาลิปตัส ที่มีสมบัติที่ดี
2. เพื่อศึกษาสมบัติต่างๆ ของแผ่นไม้เทียมที่ได้ เช่น สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน สัณฐานวิทยา ฯลฯ
3. เพื่อศึกษาปัจจัยต่างๆ เช่น อัตราส่วนที่เหมาะสม ผลของสารตัวเติม ฯลฯ ที่มีผลต่อสมบัติต่างๆ ของไม้เทียมที่ผลิตได้

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. ศึกษาสูตรที่เหมาะสมในการผลิตพีวีซีสูตรแข็งเพื่อนำไปใช้งาน
2. ศึกษาปริมาณเส้นใยไม้ที่เหมาะสมที่เติมลงไปในพีวีซี (0-50 phr)
3. ศึกษาผลของความยาวเส้นใยไม้
4. ศึกษาผลของปริมาณของพลาสติไซเซอร์ คือไดออกทิลพทาเลต (DOP)
5. ศึกษาผลของสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$)
6. ศึกษาผลของชนิดของเส้นใยไม้ที่ใช้เพื่อเปรียบเทียบไม้เทียมจากเส้นใยไม้ที่มีวิธีเตรียมต่างกัน คือ เส้นใยยูคาลิปตัสที่เตรียมจากขบวนการความร้อนเชิงกล (Thermomechanical pulp; TMP) และ เส้นใยยูคาลิปตัสที่เตรียมจากขบวนการทางเคมี (Chemical pulp; CP)

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถผลิตไม้เทียม เพื่อทดแทนไม้จากธรรมชาติที่มีสมบัติที่ดีได้
2. ทราบถึงสูตรและขบวนการผลิตที่เหมาะสมในการผลิตไม้เทียมจากพีวีซีและเศษเส้นใยไม้ ให้มีสมบัติตามที่ต้องการ
3. เพื่อเป็นการลดขยะเศษไม้จากอุตสาหกรรมต่างๆ
4. ใช้ความรู้ที่ได้ในการพัฒนาวัสดุคอมโพสิตชนิดอื่นๆ เพื่อใช้ทดแทนไม้ต่อไป

บทที่ 2
ทฤษฎีและหลักการ

2.1 วัสดุคอมโพสิต (Composites) [2]

วัสดุคอมโพสิตหรือวัสดุประกอบ หมายถึง วัสดุที่ประกอบด้วยส่วนประกอบอย่างน้อย 2 ชนิด ที่มีสมบัติต่างกัน โดยจะแยกกันอยู่คนละวัฏภาค และทำให้วัสดุที่ได้มีสมบัติดีขึ้น โดยทั่วไปจะนิยมทำเพื่อปรับปรุงความแข็งแรง มอดุลัส ความเสถียรในรูปร่าง และลดความหนาแน่น

วัสดุคอมโพสิตจะประกอบด้วย 2 ส่วน สำคัญคือ ส่วนเมตริกซ์ (Matrix phase) และส่วนเสริมแรง (Reinforcement phase) ซึ่งอาจจะมีลักษณะเป็นแผ่น อนุภาคเล็กๆ หรือเป็นเส้นใยก็ได้ มักมีการใช้ลักษณะรูปร่างและการจัดเรียงตัวที่แตกต่างของส่วนเสริมแรง

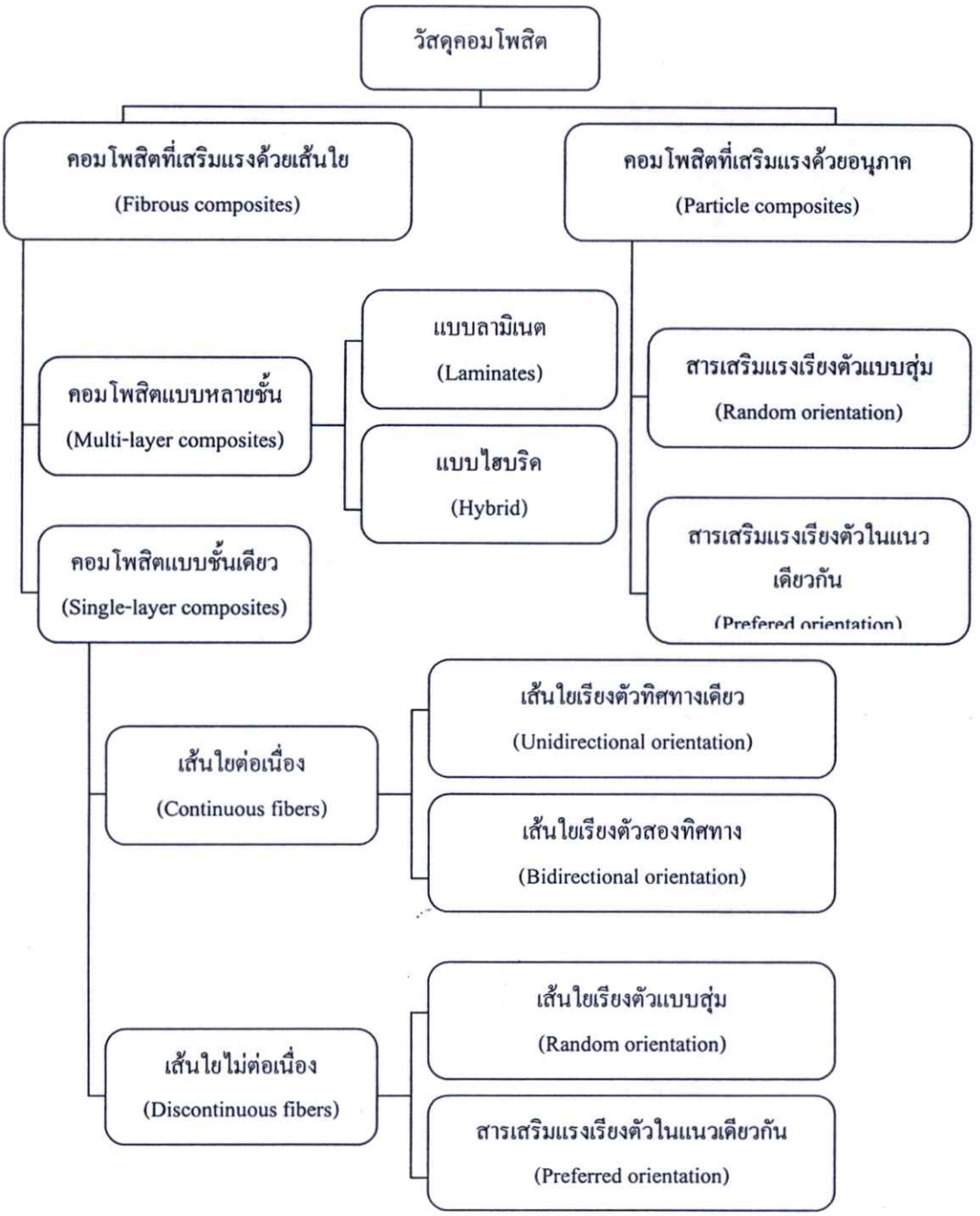
สมบัติของวัสดุคอมโพสิตขึ้นอยู่กับ

1. การยึดติดระหว่างเมตริกซ์และสารเสริมแรง
2. สมบัติของเมตริกซ์และสารเสริมแรง
3. ขนาดและรูปร่างของสารเสริมแรง
4. ปริมาณสารเสริมแรง
5. ขบวนการผลิต
6. การจัดเรียงตัวและการกระจายตัวของสารเสริมแรง
7. ตำหนิ (Flaws) หรือช่องว่าง (Voids) ภายในวัสดุคอมโพสิต

ตารางที่ 2.1 สมบัติบางประการของวัสดุต่างๆ เทียบกับวัสดุคอมโพสิต

วัสดุ	ความหนาแน่น (g/cm^3)	มอดุลัส (GPa)	ความแข็งแรงดึง (MPa)
ไนลอน 6,6	1.14	2.0	70
เส้นใยคาร์บอน / อิพอกซี	1.55	137.8	1550
เส้นใยแก้ว / อิพอกซี	1.85	39.3	965
เคฟลาร์ / อิพอกซี	1.38	75.8	1378

โดยตารางที่ 2.1 แสดงค่าความหนาแน่น (Density) มอดุลัส (Tensile modulus) และค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ของวัสดุชนิดต่างๆ โดยจะเห็นได้ว่า วัสดุพอลิเมอร์คอมโพสิตจะให้ค่าการยืดและมอดุลัสที่สูง และรูปที่ 2.1 แสดงการแบ่งประเภทของคอมโพสิตโดยแบ่งตามลักษณะของส่วนเสริมแรง



รูปที่ 2.1 แผนภาพการแบ่งประเภทของคอมโพสิต โดยแบ่งตามลักษณะของส่วนเสริมแรง [3]

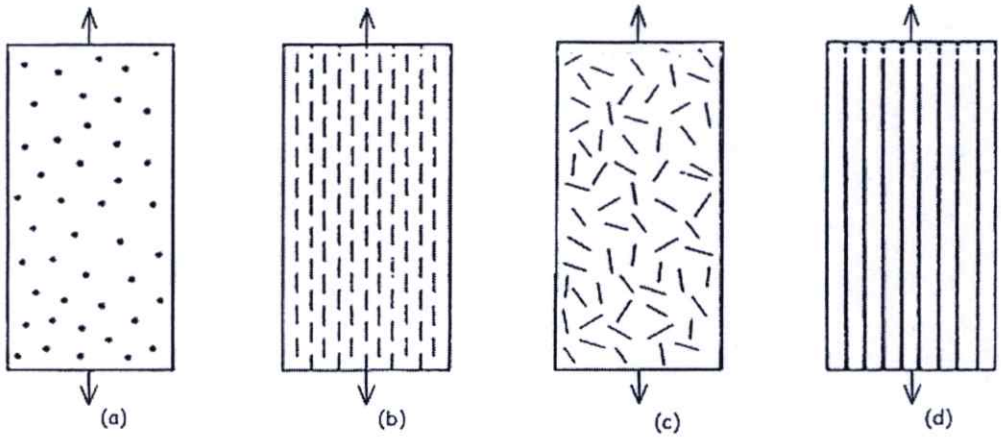
2.1.1 เมตริกซ์ (Matrix)

เมตริกซ์เป็นส่วนที่ห่อหุ้มและยึดส่วนเสริมแรงเข้าไว้ด้วยกัน ซึ่งโดยทั่วไปเมตริกซ์มักมีความเหนียวสูง และค่าความแข็งแรงและมอดุลัสต่ำกว่าสารเสริมแรง โดยทั่วไปเมตริกซ์ทำหน้าที่

1. รักษาความเสถียรในรูปร่าง และขนาดของวัสดุคอมโพสิต
2. รักษาการกระจายตัวของเส้นใย และแยกไม่ให้ส่วนของเส้นใยรวมกัน
3. ทำให้วัสดุคอมโพสิตสามารถทนต่อเสถียรภาพภายใต้อุณหภูมิหรือแรงที่ระดับหนึ่ง
4. สามารถกระจายหรือถ่ายแรงที่ได้รับจากภายนอกไปยังเส้นใยได้
5. ช่วยให้ทนทานต่อสภาพแวดล้อมและมีความเสถียรในตัวกลางต่างๆ

2.1.2 ส่วนเสริมแรง (Reinforcement Phase)

ส่วนเสริมแรงมีลักษณะรูปร่างได้หลายแบบ อาจมีลักษณะเป็นแผ่น เส้นใย หรืออนุภาคเล็กๆ ก็ได้ ตัวเสริมแรงที่นิยมใช้ส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นเส้นใย (Fibers) อาจเป็นเส้นใยต่อเนื่องหรือเส้นใยสั้นดังรูปที่ 2.2 ตัวอย่างเส้นใยที่ใช้เสริมแรงในพอลิเมอร์คอมโพสิต เช่น เส้นใยแก้ว (Glass fibers) เคฟลาร์ (Kevlar fibers) เส้นใยธรรมชาติต่างๆ



รูปที่ 2.2 ตัวอย่างคอมโพสิตที่มีส่วนเสริมแรงต่างกัน

(a) ส่วนเสริมแรงเป็นอนุภาคจัดเรียงตัวแบบสุ่ม
(b) ส่วนเสริมแรงเป็นเส้นใยสั้น จัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกัน
(c) ส่วนเสริมแรงเป็นเส้นใยสั้น จัดเรียงตัวแบบสุ่ม
(d) ส่วนเสริมแรงเป็นเส้นใยยาว จัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกัน

2.1.3 ข้อดีและข้อเสียของคอมโพสิต

ข้อดีของวัสดุคอมโพสิตมีดังนี้

- มีสมบัติต่อความหนาแน่นสูง (Properties to density (or weight)) สูง เช่น ความแข็งแรงจำเพาะ (Specific strength) มอดุลัสจำเพาะ (Specific modulus) ฯลฯ เนื่องจากวัสดุคอมโพสิตมีความหนาแน่นต่ำ น้ำหนักเบา
- ช่วยลดน้ำหนักของวัสดุ
- มีสมบัติหลากหลาย
- สามารถสร้างวัสดุคอมโพสิตให้เหมาะสมกับการใช้งาน
- มีอายุการใช้งานยืนยาว มีความต้านทานต่อการสึกกร่อนดี
- มีสมบัติรับแรงและแดมปิ้ง (Damping) ดี
- ความทนทานต่อการล้า (Fatigue resistance) ดี
- มีเสถียรภาพของรูปร่าง (Dimensional stability) สูง เนื่องจากมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน (Coefficients of thermal expansion; CTE) ต่ำ เมื่อเทียบกับวัสดุอื่น เช่น โลหะ

แต่อย่างไรก็ดี ข้อเสียของวัสดุคอมโพสิตมีดังนี้

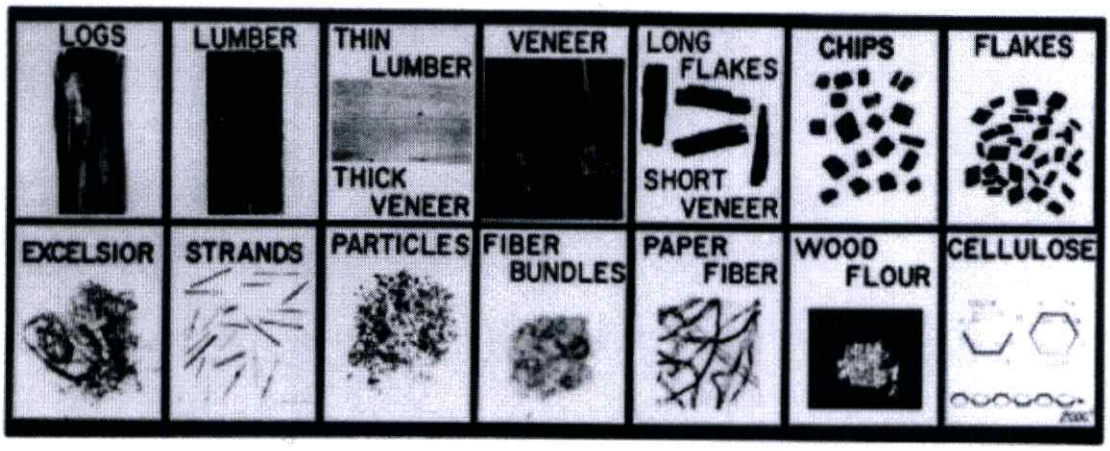
- มีต้นทุนการผลิตสูง
- มีสมบัติแต่ละทิศทางไม่เหมือนกัน เนื่องจากมีการจัดเรียงตัวของเส้นใย (Fiber orientation) เป็นสาเหตุให้คอมโพสิตไม่แข็งแรงในแนวตั้งฉากกับการเรียงตัว (Transverse direction)
- ยากในการต่อ หรือเชื่อมกับวัสดุอื่น
- ยากในการตรวจสอบวิเคราะห์สมบัติของคอมโพสิต
- ยากในการทำลายและนำกลับมาใช้ใหม่หรือรีไซเคิล (Recycle)

2.1.4 คอมโพสิตจากไม้และผลิตภัณฑ์

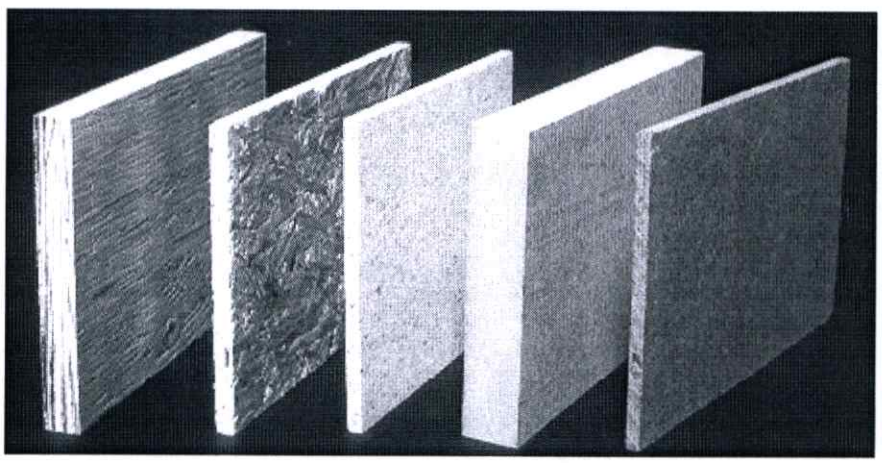
(Wood-based Composites and Panel Products)

เนื่องจากไม้มีสมบัติที่หลากหลาย จากต้นสายพันธุ์เดียวกัน และจากส่วนต่างๆ ของต้นเดียวกัน เมื่อการขึ้นรูปหลากหลายไปตามสมบัติที่ต้องการ บางครั้งผลที่ได้ก็ข้ามขีดความสามารถของธรรมชาติ สมบัติที่เปลี่ยนแปลงศึกษาในลักษณะของ เส้นใย อนุภาค สะเก็ดไม้ หรือแผ่นไม้ สมบัติของแต่ละวัสดุสามารถเปลี่ยนไปได้ โดยการรวมตัว การจัดตัวใหม่ หรือการแบ่งชั้นขององค์ประกอบเหล่านี้

คอมโพสิตไม้ทางการค้าแบ่งออกได้เป็น 5 ประเภทใหญ่ ๆ ขึ้นกับลักษณะทางกายภาพของไม้ที่ใช้ โดยแบ่งเป็น Plywood, Oriented standboard, Particleboard, Hardboard และ Cellulosic fiberboard ประสิทธิภาพของผลิตภัณฑ์ขึ้นกับลักษณะไม้และความหนาแน่นของคอมโพสิต อีกนัยหนึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงชนิดและปริมาณเรซินที่ใช้และสารเติมแต่ง เพื่อเพิ่มสมบัติการทนน้ำและไฟ หรือเพื่อทนทานต่อสภาวะแวดล้อมที่ใช้งาน โดยรูปที่ 2.3 แสดงลักษณะพื้นฐานของไม้ตั้งแต่ขนาดใหญ่ถึงเล็ก และรูปที่ 2.4 แสดงตัวอย่างของแผ่นพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ได้จากการผสมระหว่างพอลิเมอร์กับเส้นใยไม้



รูปที่ 2.3 ลักษณะพื้นฐานของไม้ตั้งแต่ขนาดใหญ่ถึงเล็กตามลำดับ [4]



รูปที่ 2.4 ตัวอย่างของผลิตภัณฑ์ของคอมโพสิตจากไม้ [4]

2.1.5 พอลิเมอร์คอมโพสิตจากไม้และเทอร์โมพลาสติก (Wood Fiber-Thermoplastic Composites)

เทอร์โมพลาสติกที่ใช้ร่วมกับเส้นใยจะต้องหลอมหรืออ่อนตัวที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิสลายตัวของเส้นใยลิกนินเซลลูโลส (Lignocellulosic) โดยทั่วไปประมาณ 200 – 220 °C เทอร์โมพลาสติกที่ใช้ก็ได้แก่ พอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีน พอลิไวนิลคลอไรด์ และ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและสูง

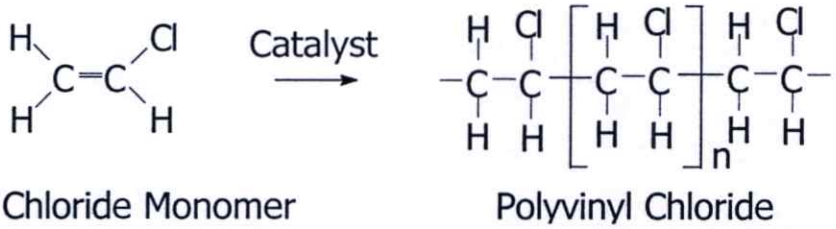
ผงไม้ (Wood flour) สามารถใช้เป็นสารตัวเติมได้ในเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตแต่ละเกรดขึ้นกับพันธุ์ไม้และขนาดอนุภาค ถึงแม้เส้นใยไม้จะทำการขึ้นรูปได้ยากกว่าผงไม้ แต่ก็ให้คอมโพสิตที่มีสมบัติดีกว่ามาก และยังแสดงลักษณะเป็นสารเสริมแรงมากกว่าสารตัวเติม

วัสดุอื่นๆ สามารถเติมลงไปในขบวนการผลิตเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของคอมโพสิต สารเติมแต่งเหล่านี้จะไปเสริมพันธะระหว่างเทอร์โมพลาสติกและองค์ประกอบไม้ เช่น สารคู่ควบ (Coupling agents) เพิ่มประสิทธิภาพของผลิตภัณฑ์ เช่น สารปรับปรุงการรับแรงกระแทก (Impact modifiers) สารเพิ่มเสถียรภาพรังสียูวี (UV stabilizers) และสารหน่วงการติดไฟ (Flame retardants) และช่วยในการขึ้นรูป เช่น สารหล่อลื่น (Lubricants)

สิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงในการขึ้นรูปไม้กับเทอร์โมพลาสติกคือความชื้น ความชื้นทำให้ชิ้นงานมีคุณภาพพื้นผิวต่ำ มีฟองอากาศ และได้ชิ้นงานที่ไม่มีคุณภาพ วัตถุดิบที่ใช้จึงควรผ่าน การทำให้แห้งก่อนหรือใช้เครื่องมือที่มีช่องระบายความชื้น นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงอุณหภูมิการเสียสภาพของเส้นใยไม้ โดยอุณหภูมิหลอมเหลวควรต่ำกว่า 200 °C การใช้อุณหภูมิขึ้นรูปที่สูงจะทำให้เกิดการหลุดออกขององค์ประกอบที่ระเหยได้ การเปลี่ยนสี มีกลิ่น และเกิดการแตกหักของไม้ที่เป็นองค์ประกอบ

2.2 พอลิไวนิลคลอไรด์ [1,5,6]

พอลิไวนิลคลอไรด์สามารถผลิตได้จากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของไวนิลคลอไรด์มอนอเมอร์ในน้ำ (Water dispersion) โดยผ่านกลไกการเกิดปฏิกิริยาแบบอนุมูลอิสระ (Free radical) ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ปฏิกิริยาการเตรียมพอลิไวนิลคลอไรด์

การผลิตพอลิไวนิลคลอไรด์สามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท [7,8] ดังนี้

1. ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบแขวนลอย (Suspension Polymerization, S-PVC)

เป็นขบวนการที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย ตัวกลางที่เป็นของเหลวจะมีการใช้สารช่วยแขวนลอย (Suspension agent) โดยในระบบมอนอเมอร์จะแขวนลอยอยู่ในตัวกลางที่เป็นของเหลว พีวีซีผง (PVC resin) ที่ได้จะมีลักษณะใส พื้นผิวมีรูพรุน สามารถดูดซับสารหล่อลื่น (Lubricants) และสารพลาสติไซเซอร์ (Plasticizers) ได้ง่ายกว่า M-PVC

2. ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบบัลค์ (Bulk Polymerization, M-PVC)

ขบวนการนี้ไม่ใช้น้ำ สารช่วยผสม (Compatibilitys) อิมัลซิไฟเออร์ (Emulsifiers) หรือสารแขวนลอย (Suspension agent) ในการเกิดปฏิกิริยา พีวีซีที่ได้มีลักษณะใส บริสุทธิ์ มีความกลมมนมากกว่า S-PVC มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ผิวแข็ง มีความหนาแน่นที่ดี แต่ความสามารถในการดูดซับสารเติมแต่งไม่ดี

3. ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบอิมัลชัน (Emulsion Polymerization, E-PVC)

ขบวนการนี้เป็นขบวนการเก่าแก่ มีตัวกลางเป็นของเหลวคือน้ำ พีวีซีจะถูกปั่นกวนเป็นหยดเล็กๆ แขวนลอยอยู่ในชั้นน้ำที่มีสารลดแรงตึงผิว (Emulsifiers) อยู่เป็นจำนวนมาก ทำให้ได้พีวีซีที่มีอนุภาคขนาดเล็ก นอกจากนี้พีวีซีที่ได้จะมีลักษณะขุ่น ทึบ

สมบัติทั่วๆ ไปของพีวีซีแบบ S-PVC และ E-PVC จะมีความแตกต่างกันน้อยมาก อย่างไรก็ตาม ยังมีความแตกต่างกันอยู่ในเรื่องขนาดและรูปร่างของอนุภาค

S-PVC จะมีรูปร่างคล้ายลูกบอล และเนื่องจากพื้นผิวสามารถดูดซับพลาสติไซเซอร์ได้ ทำให้ได้พอลิไวนิลคลอไรด์ที่มีลักษณะเหนียว มีความอ่อนนุ่มและความยืดหยุ่นเหมือนยาง ในการผสมพอลิไวนิลคลอไรด์ชนิดนี้ ต้องผสมกันภายใต้อุณหภูมิและความดันสูง เช่น เครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) หรือ เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอน (Screw extruder)

E-PVC จะมีขนาดอนุภาคเป็นทรงกลมใส ขนาดประมาณ 1/200 เท่าเทียบกับขนาดอนุภาค S-PVC เมื่อนำมาผสมจะมีสัดส่วนของ Plasticizer/Stabilizer ที่พอเหมาะ พีวีซีที่ได้จะมีลักษณะคล้ายแป้งเปียก (Paste) หรือ พลาสติโซล (Plastisols) ซึ่งสามารถนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการได้

2.2.1 พีวีซีคอมพาวด์ (PVC Compound) [9]

พีวีซีคอมพาวด์เป็นการผสมพีวีซีกับสารเติมแต่ง (Additives) ให้เข้ากันก่อนนำพีวีซีไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ทั้งนี้เป็นเพราะว่า พีวีซีมีสมบัติการทนต่อความร้อน (Thermal resistance) ได้น้อย มีความหนืดสูง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องผสมพีวีซีกับสารเติมแต่งต่างๆ เพื่อปรับปรุงพีวีซีให้มีสมบัติความทนทานต่อความร้อน และสมบัติอื่นๆ ให้ดีขึ้นเพื่อสามารถนำไปขึ้นรูปตามที่ต้องการ

สารเติมแต่ง (Additives) ที่ผสมในพีวีซีมีดังนี้

- สเตบิไลเซอร์หรือสารเพิ่มเสถียรภาพ (Stabilizers)
- พลาสติไซเซอร์ (Plasticizers)
- สารหล่อลื่น (Lubricants)
- สารตัวเติม (Fillers)
- โปรเซสซิงเอดหรือสารช่วยกระบวนการผลิต (Processing aids)
- สารปรับปรุงการรับแรงกระแทก (Impact modifiers)
- สารช่วยการพองตัว หรือสารให้ฟอง (Blowing agents)
- สารให้สี (Colorants)
- สารช่วยผสม (Compatibilizers)

2.2.2 สารเติมแต่ง (Additives)

2.2.2.1 สเตบิไลเซอร์หรือสารเพิ่มเสถียรภาพ (Stabilizers)

พีวีซีสามารถเกิดการเสียสภาพได้เมื่อได้รับความร้อนและแสงแดดโดยผ่านกลไกการขจัดออกของก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์ ซึ่งก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์นี้จะออกมาจากโครงสร้างที่ไม่อิ่มตัว และทำให้พื้นผิวของพีวีซีเปลี่ยนเป็นสีเข้มขึ้นจากสีใสเป็น เหลือง แดง และดำในที่สุด การสลายตัว (Degradation) ของพีวีซีไม่สามารถป้องกันได้ แต่สามารถทำให้ลดลงได้โดยการเติมสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน (Heat stabilizer) ลงไป

สารสเตบิไลเซอร์ ส่วนมากเป็นเกลือของโลหะ หรือสารประกอบที่ทำปฏิกิริยากับก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์ ซึ่งจะทำหน้าที่คล้ายตัวเร่งการสลายตัวของพีวีซี โดยสเตบิไลเซอร์ที่นิยมใช้ในการทำสารประกอบพีวีซีมีดังนี้

- เกลือของตะกั่ว (Lead salt)
- แบเรียม / แคดเมียมสเตบิไลเซอร์ (Barium/Cadmium stabilizers)
- แบเรียม / แคดเมียม / ซิงค์สเตบิไลเซอร์ (Barium/Cadmium/Zinc stabilizers)
- แบเรียม / ซิงค์สเตบิไลเซอร์ (Barium/Zinc stabilizers)
- ทินสเตบิไลเซอร์ (Tin stabilizers)
- แคลเซียม / ซิงค์สเตบิไลเซอร์ (Calcium/Zinc stabilizers)

สารเสริมเสถียรภาพที่ดีควรมีสมบัติดังต่อไปนี้

- ไม่เป็นพิษ
- ราคาไม่แพง
- ควรมีเสถียรภาพต่อการเสื่อมสภาพชนิดต่างๆ เช่น แสง ความชื้น
- ไม่ระเหยง่าย ไม่มีกลิ่น ไม่ทำให้เกิดตำหนิแก่ผลิตภัณฑ์
- ผสมกันได้ดีกับพอลิเมอร์และต้องไม่เกิดการเคลื่อนย้ายออกมาที่ผิวของวัสดุ (Blooming)
- ไม่ส่งผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ และการนำไปประยุกต์ใช้

2.2.2.2 พลาสติไซเซอร์ (Plasticizers)

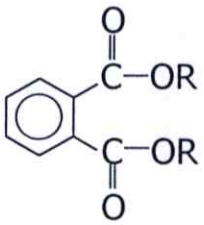
พลาสติไซเซอร์จัดเป็นสารที่มีความสำคัญมากอีกชนิดหนึ่ง เพราะจะทำให้พีวีซีมีความยืดหยุ่นมากขึ้น ทำให้สามารถผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีความอ่อนนุ่มได้ตลอดจนผลิตภัณฑ์ที่มีความแข็งได้ ซึ่งขึ้นกับปริมาณพลาสติไซเซอร์ที่เติมลงไป โดยพลาสติไซเซอร์ที่มีปริมาณการใช้มากที่สุดได้แก่

ไดออคทิลพทาเลต หรือดีโอพี (Dioctyl phthalate, DOP) รูปที่ 2.6 แสดงสูตรโครงสร้างของพลาสติไซเซอร์ชนิดต่างๆ

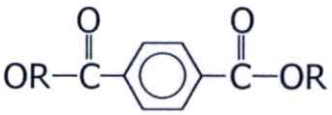
ตัวอย่างของพลาสติไซเซอร์ที่ใช้มีดังนี้

- พทาเลตเอสเทอร์ (Phthalate esters)
- ไตรเมลลิเทตเอสเทอร์ (Trimellitate esters)
- ฟอสเฟตเอสเทอร์ (Phosphate esters)
- อดิเปต และเซบาเคตเอสเทอร์ (Adipate & Sebacate esters)

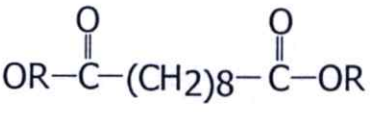
Phthalate



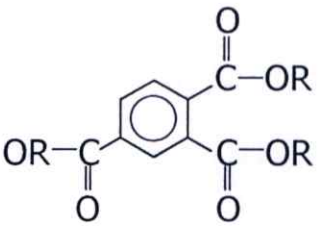
Terephthalate



Sebacate



Trimellitate



รูปที่ 2.6 สูตรโครงสร้างของพลาสติไซเซอร์ชนิดต่างๆ

สมบัติทางกายภาพต่างๆ ของพอลิเมอร์เมื่อเติมสารเสริมเสถียรภาพพลาสติกพีวีซี แสดงไว้ดังตารางที่ 2.2

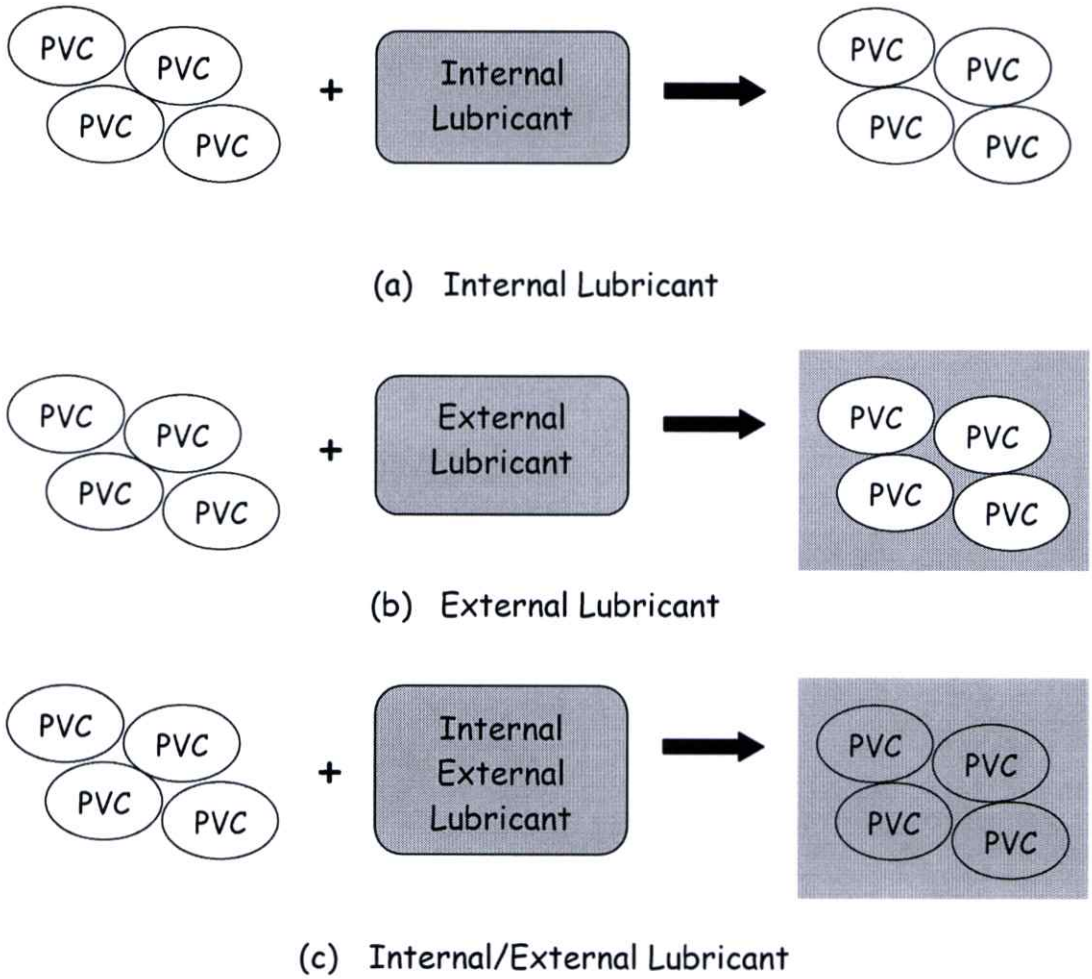
ตารางที่ 2.2 สมบัติทางกายภาพต่างๆ ของพอลิเมอร์เมื่อเติมสารเพิ่มเสถียรภาพพลาสติก [5]

สมบัติทางกายภาพ	การเปลี่ยนแปลง
ความหนาแน่น	ลดลง
ความแข็ง	ลดลง
ความแข็งแรงดึง	ลดลง
เปอร์เซ็นต์การดึงยืด	เพิ่มขึ้น
มอดุลัส	ลดลง
อุณหภูมิการหดตัว	ลดลง
ความยืดหยุ่นที่อุณหภูมิต่ำ	เพิ่มขึ้น
การระเหย	เพิ่มขึ้น
ความต้านทานต่อการขัดถู	ลดลง
ความต้านทานต่อการฉีกขาด	ลดลง
การเปลี่ยนแปลงขนาดจากการกดอัด	เพิ่มขึ้น
การทนทานต่อแรงกระแทก	เพิ่มขึ้น
ความบิดเบี้ยวเนื่องจากความร้อน	บิดเบี้ยวง่ายขึ้น
ความต้านทานต่อน้ำ	ส่วนมากจะลดลง-ขึ้นอยู่กับชนิด
ความต้านทานต่อน้ำมัน	ส่วนมากจะลดลง-ขึ้นอยู่กับชนิด
ความต้านทานต่อสารเคมี	ส่วนมากจะลดลง-ขึ้นอยู่กับชนิด
ความต้านทานต่อการติดไฟ	ขึ้นอยู่กับชนิด
ความต้านทานต่อการบล็อค	ลดลง
อุณหภูมิการเชื่อมด้วยความร้อน	ลดลง

2.2.2.3 สารหล่อลื่น (Lubricants)

สารหล่อลื่นจัดเป็นส่วนประกอบที่สำคัญ สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดคือ สารหล่อลื่นภายใน (Internal lubricant) และสารหล่อลื่นภายนอก (External lubricant) ขึ้นกับหน้าที่การทำงานในพีวีซีหลอมเหลว

สารหล่อลื่นภายในจะทำหน้าที่ลดความหนืดของพีวีซีหลอมเหลว ทำให้ขึ้นรูปได้ง่าย ส่วนสารหล่อลื่นภายนอกจะเคลื่อนที่ออกจากพีวีซีหลอมเหลว โดยไปลดแรงดึงดูดของพีวีซีหลอมเหลวกับผิวโลหะของเครื่องจักร ซึ่งสามารถช่วยปรับปรุงความสามารถในการผลิตให้ดีขึ้น



รูปที่ 2.7 กลไกระหว่างสารหล่อลื่นกับพีวีซี; (a) Internal Lubricant, (b) External Lubricant และ (c) Internal/External Lubricant

ในการขึ้นรูปพีวีซี ควรใช้สารหล่อลื่นทั้งภายในและภายนอกในปริมาณที่เหมาะสม ถ้าสารหล่อลื่นที่ใส่มีปริมาณน้อยเกินไปจะทำให้มีความหนืดสูง และอาจเกิดการสลายตัวได้ แต่ถ้าใส่มากเกินไปอาจทำให้การหลอมเหลวยากหรือไม่เกิดการหลอมเหลวเลย กลไกระหว่างสารหล่อลื่นกับพีวีซีเป็นไปดังรูปที่ 2.7

ตัวอย่างสารหล่อลื่นที่นิยมใช้ผสมกับพีวีซีมีดังนี้

- กรดสเตียริก และโลหะสเตียเรต (Stearic acid and metal stearates)
- เกลือของกรดไขมัน
- น้ำมันและขี้ผึ้งพาราฟิน (oils and Paraffin wax)
- พอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลต่ำ (Low molecular weight polyethylene)

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

- ออกซิไดซ์ พอลิเอทีลีนแวกซ์ (Oxidized polyethylene waxes)
- น้ำมันแร่ (Mineral oils)
- ขี้ผึ้งธรรมชาติและสังเคราะห์ (Natural & Synthetic waxes)

2.2.2.4 สารตัวเติม (Fillers)

สารเพิ่มเนื้อหรือสารตัวเติม มักนิยมเติมลงไปในพอลิเมอร์เพื่อเป็นการลดต้นทุน สารตัวเติมแบ่งเป็น 2 ประเภท ได้แก่ สารตัวเติมชนิดช่วยเสริมแรง (Reinforcing fillers) และสารตัวเติมชนิดไม่เสริมแรง (Non-reinforcing fillers)

การเติมสารเพิ่มเนื้อในพีวีซีแข็งยังลดความแข็งแรงกระแทก (Impact Strength) แต่ในพีวีซีอ่อนสามารถเติมสารนี้ได้มากเมื่อใช้พลาสติไซเซอร์ช่วย และไม่ทำให้ค่าความแข็งแรงกระแทกลดลงมากเกินไป

สารตัวเติมมีราคาถูก จึงทำให้ผลิตภัณฑ์ของพีวีซีมีราคาลดลง สารเพิ่มเนื้อที่นิยมใช้ ได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) สารตัวเติมขนาดเล็กจะมีการกระจายตัวที่ดี แต่มีราคาแพงกว่าสารตัวเติมขนาดใหญ่ แคลเซียมคาร์บอเนตจะมีทั้งในรูปของธรรมชาติ หรือเคลือบด้วยสารหล่อลื่น สารตัวเติมชนิดอื่นได้แก่ Talc, Wollastonite, Clays และอื่นๆ นอกจากนี้ยังมีการใช้ Asbestos กับงานกระเบื้อง ยางปูพื้น โดยใช้เป็นสารตัวเติมแบบเสริมแรง แต่ปัจจุบันได้มีการลดปริมาณการใช้ Asbestos เพราะมีผลต่อระบบทางเดินหายใจ

2.2.2.5 โปรเซสซิงเอด (Processing Aids)

โปรเซสซิงเอดหรือสารช่วยขบวนการผลิต เป็นสารที่ทำหน้าที่เพิ่มการไหลของพีวีซีหลอมเหลว สารประกอบพีวีซีผสมเข้ากันได้ดีขึ้น เพิ่มความมันเงา และลดความไม่สมบูรณ์ของพื้นผิว (Surface imperfections) โปรเซสซิงเอดที่ใช้ในพีวีซีแข็ง จะใช้ อะครีลิกเรซิน (Acrylic resin) หรือ ไฮโดรคาร์บอนเรซิน (Hydrocarbon resin) ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำๆ

2.2.2.6 สารปรับปรุงการรับแรงกระแทก (Impact Modifiers)

ในการปรับปรุงสมบัติบางประการของพอลิเมอร์ เช่น ความแข็งแรงกระแทก การทนต่อความร้อน ตลอดจนขบวนการขึ้นรูป มักใช้พอลิเมอร์ผสม (Polymer blends) เป็นสารตัวเติม พอลิเมอร์ผสม ที่มีการใช้งานเป็นอย่างมากคือ การใช้ยางผสมกับพลาสติกชนิดอื่นๆ เพราะจะทำให้พอลิเมอร์ชนิดนั้นมีความเหนียว และค่าความแข็งแรงกระแทกมากขึ้น
ส่วนสารรับแรงกระแทกที่ใช้กันมากในพีวีซีได้แก่ อะครีลิก (Acrylic) อะครีโลไนไตรล์ (Acrylonitrile) และ เมทราครีเลต (Metracrylate) โดยจะปรับปรุงสมบัติความแข็งแรงกระแทก

80835

(Impcat strength) ของพอลิเมอร์และเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break) เพิ่มขึ้น แต่ขณะเดียวกันสมบัติความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ของพอลิเมอร์ลดลง

2.2.2.7 สารช่วยการพองตัว (Blowing Agents)

สารช่วยการพองตัวหรือสารให้ฟอง ใส่เพื่อให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความกลวงอยู่ภายในได้เป็นผลิตภัณฑ์โฟมพอลิเมอร์ เพราะฉะนั้นผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเบา รับแรงได้ดี มักใช้ทำฝาบ้าน วัสดุฉนวนความร้อน หนังเทียม ฯลฯ สารช่วยการพองตัวที่นิยมใช้ได้แก่ Azodicarbonamide (AZ)

2.2.2.8 สารให้สี (Colorants)

สารให้สี (Colorants) มีทั้งประเภทผงสี (Pigments) และสีย้อม (Dyes) สารให้สีมีผลกระทบต่อการผลิตพีวีซีคอมพาวด์โดยเฉพาะงานอัดรีด (Extrusion) ผงสีสามารถทำให้พีวีซีคอมพาวด์เปลี่ยนแปลง ส่งผลต่อความสม่ำเสมอของพีวีซีคอมพาวด์ การตรวจสอบทำได้โดยใช้เครื่องบราเบนเดอร์พลาสติคอร์เดอร์ ซึ่งจะแสดงลักษณะการหลอมเหลวของพลาสติกได้อย่างชัดเจน ซึ่งมีประโยชน์อย่างมากในการปรับแต่งพีวีซีคอมพาวด์ให้มีเนื้อที่สม่ำเสมอ

2.2.2.9 สารช่วยผสม (Compatibilizers)

สารช่วยผสมใช้ผสมลงในพอลิเมอร์เพื่อช่วยในการละลายตัว และลดแรงตึงผิว (Surface tension) ระหว่างวัฏภาคที่แยกกันอยู่ของพอลิเมอร์หลักทั้งสองชนิด ทำให้ขนาดของอนุภาคที่กระจายลดลง และเป็นการเพิ่มแรงยึดติดระหว่างวัฏภาค (Interfacial adhesion) ของแต่ละวัฏภาคด้วย ทำให้พอลิเมอร์ผสมสามารถรับแรงกระจายได้มากขึ้น นอกจากนี้สารช่วยผสมยังช่วยเพิ่มโครงสร้างที่เป็นเส้นตรงในพอลิเมอร์ผสม ทำให้พอลิเมอร์ผสมสามารถเข้ากันได้ดียิ่งขึ้น สารช่วยผสมที่ใช้กันอยู่เป็นพอลิเมอร์ร่วม (Copolymer) ที่มีองค์ประกอบของพอลิเมอร์สองชนิด ทำให้สามารถละลายได้ทั้งสองวัฏภาคและทำตัวเป็นสะพานเชื่อมทั้งสองวัฏภาค พอลิเมอร์ผสมที่ใช้สารช่วยผสมจะมีสมบัติดีกว่าพอลิเมอร์ที่ไม่ได้ใช้สารช่วยผสม

2.3 เส้นใยธรรมชาติ (Natural Fibers) [10]

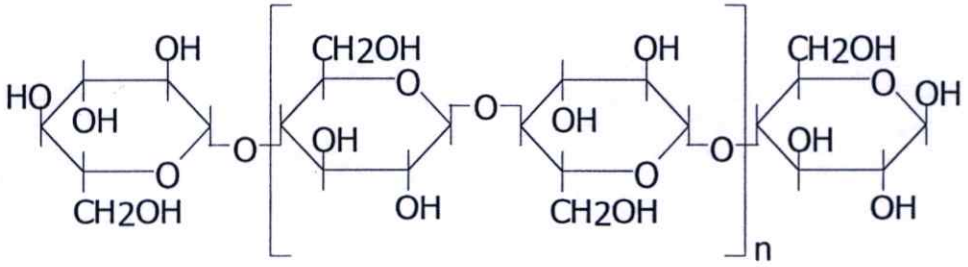
เส้นใยธรรมชาติเป็นอินทรีย์วัสดุที่สำคัญ หาได้ง่ายจากธรรมชาติ มีปริมาณมาก สามารถเกิดขึ้นได้ใหม่เรื่อยๆ และมีราคาถูกกว่าเส้นใยสังเคราะห์ ด้วยเหตุนี้ เส้นใยธรรมชาติจึงนิยมใช้เป็นสารเติมแต่งในพลาสติก โดยอาจเป็นทั้งสารตัวเติมและสารเสริมแรง เพื่อเป็นการลดต้นทุน เพิ่มปริมาณการผลิต และเสริมแรงแก่ผลิตภัณฑ์ ซึ่งขึ้นอยู่ชนิดและขนาดของเส้นใยที่นำมาใช้

โครงสร้างโดยทั่วไปของเส้นใยธรรมชาติประกอบไปด้วยเซลลูโลส (Cellulose) เป็นส่วนใหญ่ องค์ประกอบที่เหลือเป็นเฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) ลิกนิน (Lignin) และสารประกอบอื่นๆ

2.3.1 เซลลูโลส (Cellulose) [11]

เซลลูโลสเป็นสารประกอบพอลิแซคคาไรด์ (Polysaccarides) เชิงเส้นตรงที่ประกอบด้วยหน่วยซ้ำๆ กัน มีสูตรโมเลกุลทั่วไปคือ $(C_6H_{12}O_5)_n$ เป็นโครงสร้างในเนื้อเยื่อพืช โดยพบรวมกับลิกนิน เพนโตแซน กัม แทนนิน ไขมัน สารที่ทำให้เกิดสี เป็นต้น เซลลูโลสจะมีหน่วยโมเลกุลยาวและแข็ง โดยเซลลูโลสจะมีสูตรโครงสร้างทางเคมีดังรูปที่ 2.8

เซลลูโลสมีหมู่ไฮดรอกซิลถึง 3 หมู่ สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนได้ แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของเซลลูโลสจึงมีมาก และโครงสร้างของเซลลูโลสยังจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ จึงทำให้เซลลูโลสมีความเป็นผลึกสูงมาก อุณหภูมิการหลอมตัวจึงสูงมาก มักจะเกิดการสลายตัวก่อนถึงอุณหภูมิหลอมตัว และมีความสามารถในการละลายต่ำ เซลลูโลสธรรมชาติจะมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยต่างกัน การกระจายน้ำหนักโมเลกุลของเซลลูโลสมีความสำคัญต่อสมบัติทางกายภาพ ส่วนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำจะส่งผลให้คุณสมบัติทางกายภาพไม่ดี ในทางอุตสาหกรรมจะหาน้ำหนักโมเลกุลโดยประมาณได้โดยการวัดความหนืด



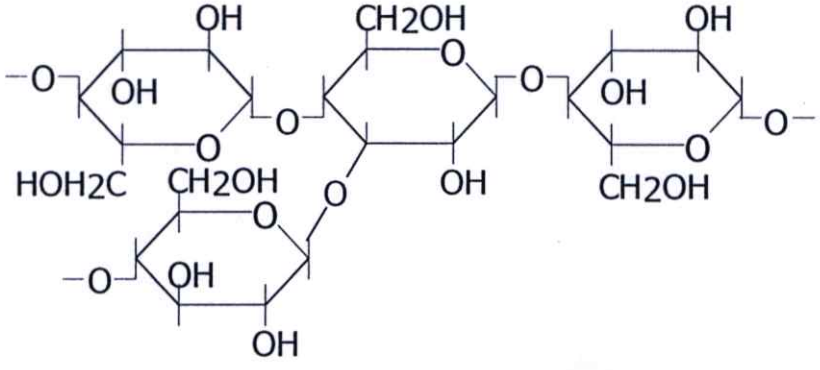
รูปที่ 2.8 สูตรโครงสร้างของเซลลูโลส

2.3.1.1 สมบัติทางกายภาพของเซลลูโลส

ความหนาแน่นของเซลลูโลสประมาณ 1.5 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ความหนาแน่น ของเส้นใยเดี่ยวมีค่าไม่แน่นอน ซึ่งแปรตามแหล่งที่มาและการปรับปรุงทางเคมี เซลลูโลสเป็นของแข็ง ไม่มีสี มีการดูดและคายไอน้ำและของเหลวอื่นๆ ที่อยู่ในบรรยากาศรอบๆ จนกระทั่งถึงสมดุล ปริมาณความชื้นของเซลลูโลสมีผลต่อสมบัติบางอย่าง เช่น ความแข็งแรงดึง (Tensile strength) เซลลูโลสไม่ละลายในน้ำและตัวทำละลายอินทรีย์ แต่จะละลายในกรดแร่เข้มข้น เช่น 72% ของกรดซัลฟิวริก 40% ของกรดไฮโดรคลอริก และ 78% ของกรดฟอสฟอริก เซลลูโลสจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสอย่างรวดเร็ว ในสารละลายกรดแร่ที่อุณหภูมิห้อง และปฏิกิริยาจะหยุดที่อุณหภูมิต่ำๆ และสารละลายเกลือเข้มข้นบางชนิด เช่น 72% ของซิงค์ออกไซด์ จะทำให้เซลลูโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำๆ ละลายได้

2.3.2 เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose)

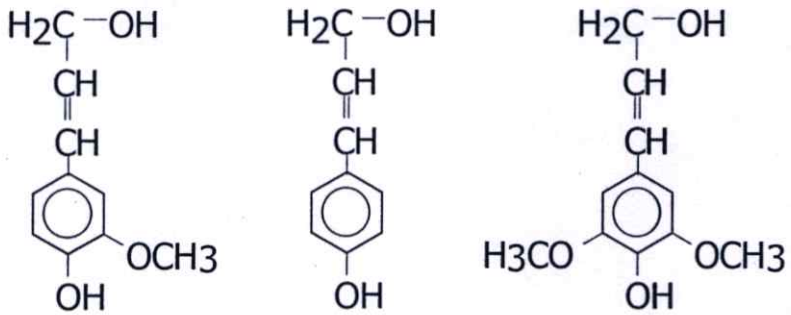
เฮมิเซลลูโลสเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ชนิดหนึ่ง ซึ่งคล้ายเซลลูโลส แต่ประกอบด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวหลายชนิด เช่น กลูโคส กาแลกโตส แมนโนส ไซโลส อะราบิโนส รวมทั้งกรดกลูคูโรนิกและกาแลกทูโรนิก เฮมิเซลลูโลสพบในเนื้อเยื่อของพืชโดยรวมอยู่กับสารอื่นๆ เช่น ลิกนิน เซลลูโลส เป็นโครงสร้างของผนังเซลล์ พบมากในแกลบ ซังข้าวโพด เฮกโซแซน สูตรทางเคมีคือ $(C_6H_{12}O_5)_{2n}$ โครงสร้างทางเคมีแสดงไว้ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 สูตรโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส

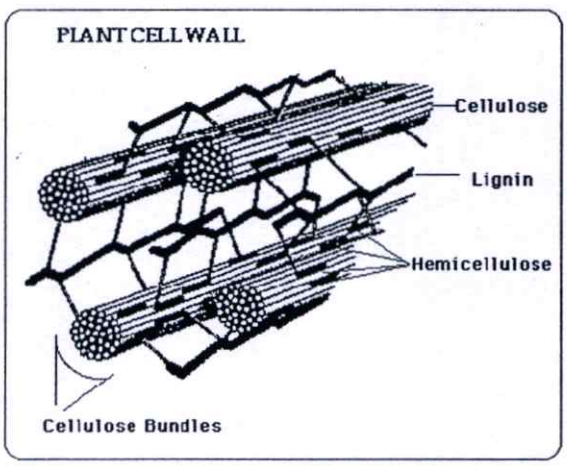
2.3.3 ลิกนิน (Lignin)

ลิกนินเป็นสารประกอบเชิงซ้อน มีน้ำหนักโมเลกุลสูง มักพบอยู่ร่วมกับเซลลูโลส ลิกนินเป็นสารที่ประกอบด้วยคาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) และออกซิเจน (O) รวมกันเป็นหน่วยย่อยหลายชนิดซึ่งเป็นสารอะโรมาติก ลิกนินไม่ละลายน้ำ ไม่มีสมบัติทางการยืดหยุ่น เพราะฉะนั้นจึงทำให้พืชที่มีลิกนินมากมีความแข็งแรงทนทาน เมื่อพืชตาย ลิกนินจะถูกย่อยด้วยเอนไซม์ลิกเนส (Lignase) หรือ ลิกนินเนส (Ligninase) ซึ่งเป็นจุลินทรีย์ที่สำคัญในรา ตัวอย่างโครงสร้างของ ลิกนินแสดงดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ตัวอย่างโครงสร้างทางเคมีของลิกนิน

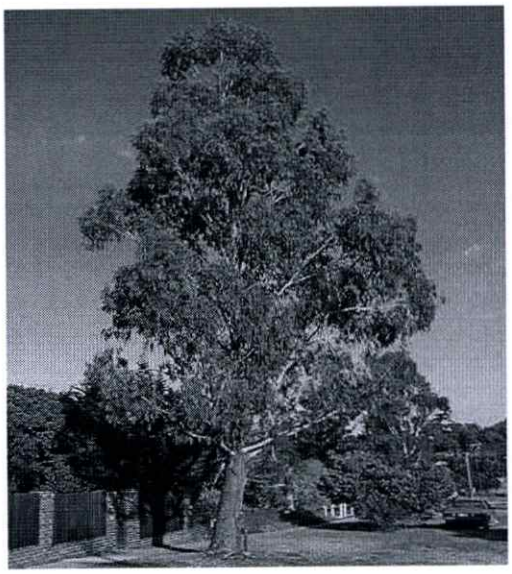
ไม้แต่ละชนิดจะมีอัตราส่วนระหว่างเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ไม่เท่ากัน ขึ้นกับชนิดและอายุของไม้ โดยไม้ที่มีลิกนินมาก จะมีความแข็งสูง และในไม้ชนิดเดียวกัน ไม้ที่มีอายุมากจะมีปริมาณลิกนินมากเช่นเดียวกัน โดยการจัดเรียงตัวของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินในไม้ จะเป็นไปดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 การจัดเรียงตัวของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ในไม้

2.4 ยูคาลิปตัส (Eucalyptus) [12]

ไม้ยูคาลิปตัสเป็นไม้ที่สำคัญมากในปัจจุบัน โดยต้นยูคาลิปตัสจะมีลักษณะสูง โตง่าย ปลูกได้ในทุกๆ สภาพดิน มีความทนทาน เมื่อปลูกแล้วสามารถตัดได้ 2-3 ครั้งโดยไม่ต้องปลูกใหม่ ด้วยเหตุดังกล่าว ไม้ยูคาลิปตัสจึงได้เป็นที่นิยมปลูก และใช้งาน โดยลักษณะของต้นยูคาลิปตัสจะเป็นดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ลักษณะของต้นยูคาลิปตัส

ต้นยูคาลิปตัส คามาลดูเลนซีส (*Eucalyptus camaldulensis*) เป็นต้นยูคาลิปตัสที่ปลูกได้ดีในประเทศไทย โดยลักษณะของไม้จะแบ่งเป็น 3 ส่วน ส่วนนอกสุดเป็นส่วนเปลือก จะมีสีซีดหรือสีครีม และจะมีเขตของเนื้อไม้ที่มีสีต่างออกไปมาก คือส่วนที่เรียกว่าแก่น (Heartwood) เป็นส่วนที่มีสีน้ำตาลเข้ม และด้านนอกแก่น จะมีสีขาวกว่าเรียกว่ากระพี้ (Sapwood) ส่วนนี้จะมีความหนาขึ้นตามอายุของต้นไม้ ส่วนของกระพี้สามารถถูกทำลายได้ง่ายโดยแมลงหรือเห็ด รา ต่างๆ ได้มากกว่าแก่น ถึงแม้ส่วนประกอบของเซลล์และโครงสร้างของทั้งกระพี้และแก่นเหมือนกัน แต่การสะสมของสารเคมีโดยกระพี้จะถูกซึมเข้าไปได้โดยง่ายกว่าแก่น และกระพี้จะมีสภาวะที่จะถูกซึมซาบโดยสารเคมีที่ใช้ในการต้มเยื่อย่อยได้เป็นอย่างดี จึงเป็นประโยชน์ในอุตสาหกรรมทำกระดาษได้ดี

องค์ประกอบทางเคมีของไม้ยูคาลิปตัสแสดงไว้ดังตารางที่ 2.3 จากตารางที่ 2.3 แสดงว่าเมื่อนำไม้ยูคาลิปตัส คามาลดูเลนซีส ที่มีอายุ 3 10 และ 15 ปี มาเปรียบเทียบกัน จะพบว่าไม้ยูคาลิปตัสที่มีอายุ 3 ปี จะมีประมาณลิกนินและปริมาณน้ำตาลอยู่ในเนื้อไม้มากกว่าไม้ที่มีอายุ 10 และ 15 ปี เมื่อพิจารณาปริมาณเซลลูโลส พบว่ามี 53.43 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น ซึ่งมีปริมาณน้อยกว่าไม้ที่มีอายุ 10 และ 15 ปีจากเหตุผลนี้จึงพอสรุปได้ว่า ไม้ยูคาลิปตัส คามาลดูเลนซีส ที่มีอายุน้อยสามารถนำไปใช้

ประโยชน์ทางด้านอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมทำกระดาษ อุตสาหกรรมไม้ปาร์เกต์ อุตสาหกรรมไม้อัดซีเมนต์ อุตสาหกรรมไม้ฟืน ได้ดี

ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบทางเคมีของ ไม้ยูคาลิปตัส คามาลดูเลนซีส [10]

องค์ประกอบ	ไม้อายุ 3 ปี	ไม้อายุ 10 ปี	ไม้อายุ 15 ปี
ลิกนิน	29.90	27.75	26.60
เซลลูโลส	53.43	58.36	58.18
เฮมิเซลลูโลส	78.50	73.66	73.73
เพนโตซาน	19.45	17.01	17.15
ขี้เถ้า	0.44	0.33	0.43

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในช่วงเวลาที่ผ่านมา ได้มีนักวิทยาศาสตร์หลายท่าน ให้ความสนใจในการศึกษาค้นคว้างานวิจัยเกี่ยวกับพอลิเมอร์คอมโพสิตชนิดต่างๆ โดยตัวอย่างงานวิจัยมีดังนี้

Kokta และคณะ [13] ได้ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิพรอพิลีนที่ใส่ไม้ (ต้นสน) ซึ่งมีการปรับสภาพผิวในวิธีต่างๆ เพื่อปรับปรุงการยึดติดระหว่างพอลิเมอร์ กับไม้ต้นสน โดยใช้ Polymethylene Polyphenylisocyanate (PMPPIC), Silane coupling agent (Silane A-172 Silane A-174 และ Silane-A1100) และ Epolene wax เป็นสารปรับสภาพผิวก่อนใส่ในพอลิเมอร์ โดยวิธีการผสมในเครื่องผสมแบบ 2 ลูกกลิ้ง (Two-roll mill) และเครื่องขึ้นรูปพลาสติกแบบกดอัด (Compression molding) พบว่า การใช้ Epolene wax เป็นสารช่วยกระจายเพียงอย่างเดียว สามารถเพิ่มค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ค่ามอดุลัส (Tensile modulus) และค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break) ของพอลิเมอร์ ได้เป็นอย่างดี ซึ่งเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยจะเพิ่มค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดุลัส แต่ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์จะลดลง ในขณะที่ใช้ PMPPIC กับ Epolene wax เป็นสารปรับสภาพผิวนั้น ทำให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์มีค่าสูงสุด นอกจากนี้ยังพบว่า ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นใยที่ให้ค่าสมบัติเชิงกลสูงสุดคือ 20 mesh

Joseph และคณะ [14] ได้ทำการศึกษาสมบัติแรงดึง (Tensile properties) ของคอมโพสิตที่เกิดจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) กับเส้นใยป่านศรนารายณ์ (Sisal fiber) พบว่าปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงดึง ได้แก่ กระบวนการผสมเส้นใยกับพอลิเมอร์ โดยที่การผสมพอลิเมอร์กับเส้นใยแบบหลอมเหลว (Melt mixing) ซึ่งเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยลงไป จะมีผลทำให้ค่าความแข็งแรงดึงของคอมโพสิตเพิ่มขึ้น แต่ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดลดลง และเมื่อนำคอมโพสิตมาฉีดขึ้นรูปใหม่จะได้ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดเพิ่มขึ้นตามจำนวนครั้งที่ฉีดทั้งนี้เนื่องมาจากผลของความร้อนในระหว่างกระบวนการขึ้นรูปจะทำให้เกิดการสลายตัวที่พื้นผิวของเส้นใย จึงสามารถยึดติดกับพอลิเอทิลีนได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้พบว่า มีการจัดเรียงตัวของเส้นคอมโพสิตที่จัดเรียงตัวตามแนวแรงจะให้ค่าความแข็งแรงดึงดีกว่าคอมโพสิตที่มีการจัดเรียงตัวของเส้นใยในแนวทิศทางตั้งฉากกับแนวแรง และเส้นใยที่มีความยาว 3 มิลลิเมตร จะให้ค่าความแข็งแรงดึงที่สูงสุด

Jayamol และคณะ [15] ได้ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลและสมบัติวิสโคอิลาสติก (Viscoelastic) ของพอลิเมอร์คอมโพสิต ซึ่งใช้เส้นใยสับปะรดที่มีขนาดสั้นๆ เป็นสารเสริมแรงในพอลิเอทิลีนที่เตรียมจาก 2 วิธีคือ

1. การผสมแบบสารละลาย (Solution mixing) สามารถเตรียมโดยนำเส้นใยสับปะรดใส่ลงในสารละลายพอลิเอทิลีน
2. การผสมแบบหลอมเหลว (Melt mixing) สามารถเตรียมได้โดยนำเส้นใยสับปะรดใส่ลงในพอลิเอทิลีนที่กำลังหลอมอยู่ในเครื่อง Brabender

จากนั้นนำคอมโพสิตที่เตรียมได้จากแต่ละวิธีมาทำการทดสอบสมบัติเชิงกลและความเป็น Viscoelastic พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยสับปะรดในคอมโพสิต จะทำค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดุลัส มีค่าเพิ่มขึ้นปริมาณเส้นใยที่ใส่เข้าไป โดยคอมโพสิตที่ได้จากการเตรียมโดยวิธีการผสมแบบสารละลาย และเส้นใยที่มีความยาวประมาณ 10 มิลลิเมตร จะให้ค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดุลัส สูงกว่าเส้นใยที่มีขนาด 2 และ 6 มิลลิเมตร นอกจากนี้ยังพบว่าลักษณะการจัดเรียงตัวของเส้นใยในคอมโพสิตมีผลต่อค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดุลัส โดยคอมโพสิตที่มีการจัดเรียงตัวของเส้นใยตามแนวแรงจะให้ค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดุลัสดีกว่าคอมโพสิตที่มีการจัดเรียงตัวของเส้นใยในแนวทิศทางตั้งฉากกับแนวแรง

Xian และคณะ [16] ได้ทำการศึกษาเส้นใยไผ่ (Bamboo) กาบมะพร้าว (Coconut husk หรือ Coir) และหญ้า March (Phragmites) โดยใช้เสริมแรงกับพอลิเมอร์ เช่น Epoxy, Resorcinol Formaldehyde (RF), และ Urea Formaldehyde (UF) พบว่าความแข็งแรงในการเสริมแรงเรียงลำดับจากมากไปน้อยเป็นดังนี้ คือ ไผ่เส้นยาว (Long bamboo fiber) ไผ่เส้นสั้น (Short bamboo fiber) ไผ่ชิ้น (Chipped bamboo fiber) กาบมะพร้าว (Coir fiber) และหญ้า March ตามลำดับ

เฉลิมพล อิทธิวิวัฒน์ และสกุล บรรจงวุฒิ [17] ได้ทำการศึกษาเส้นใยเซลลูโลส ได้แก่ หญ้าสลาบหลวง (Typha angustifolia) เป็นสารเสริมแรงในพอลิพรอพิลีน โดยผสมเส้นใยแก้วและสาร Silane เพื่อเป็นสารเชื่อมโยง (Coupling agent) จากการทดลองพบว่า เส้นใยช่วยเพิ่มความแข็งแรงดึงและค่าความแข็งแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมโพสิต แต่มีแนวโน้มที่จะลดค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด นอกจากนี้ยังทำการศึกษาปรับปรุงสมบัติและการใช้งานอื่นๆ เช่น ใช้ในการทำแผ่น MDF (Medium Density Fiber Board) และใช้เทอร์โมเซต เช่น UF MF เป็นตัวประสาน

พิชัย มนัสพัฒนา และศิริพงศ์ โรจน์วีระ [18] ทำการศึกษาขุยมะพร้าวและฟางข้าวซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ใช้ปรับปรุงสมบัติทางกายภาพของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) และพอลิพรอพิลีน (PP) พบว่าขุยมะพร้าวทำให้ HDPE และ PP มีค่ามอดุลัสสูงขึ้น ค่าความแข็งแรงดึงไม่เปลี่ยนแปลง และค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด เพิ่มขึ้น ฟางข้าวทำให้ค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดุลัสสูงขึ้น อย่างไรก็ดี ถ้าใช้สารตัวเติมมากกว่า 10 phr จะมีปัญหาในการขึ้นรูป

Rodeney และคณะ [19] ได้ทำการศึกษาสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ได้จากขวดพลาสติกพอลิพรอพิลีนชนิดหลายชั้น (Multi-layer) และเส้นใยไม้ (Wood fiber) โดยทำการศึกษาเปรียบเทียบผลกับพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ทำจากเม็ดพลาสติกพอลิพรอพิลีนใหม่ และทำการผสมใน Twin-screw extruder ใช้ปริมาณของเส้นใยไม้ 0 30 40 และ 50% โดยน้ำหนัก เมื่อนำผลการทดลองที่ได้มาเปรียบเทียบ พบว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตที่เตรียมจากเม็ดพลาสติกพอลิพรอพิลีนนำกลับมาใช้ใหม่ จะให้สมบัติเชิงกลที่ดีกว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตที่เตรียมจากเม็ดพลาสติกพอลิพรอพิลีนใหม่ แต่ถ้าเติมเส้นใยไม้มากกว่า 30% โดยน้ำหนัก จะทำให้ค่าความแข็งแรงดึงและค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดลดลง เนื่องจากสารเติมแต่งที่มีอยู่ในขวดพอลิพรอพิลีนชนิดหลายชั้นจะไปช่วยเพิ่มการยึดติดระหว่างส่วนที่เป็นเมตริกซ์กับเส้นใยไม้มากขึ้น

ณะภัทรพงศ์ สุวรรณชัย และณัฐพร เด่นนินนาท [20] ได้ทำการศึกษาการใช้ประโยชน์จากเส้นใยสลาบหลวง เป็นสารตัวเติมในพอลิพรอพิลีน โดยทำการศึกษาสารตัวเติม และสารเชื่อมโยงต่างชนิดกันคือ Silane A-174 และ MAH ในปริมาณ 0 4 และ 6% โดยน้ำหนัก จากผลการทดลองพบว่า สมบัติทางความร้อนและสมบัติเชิงกลโดยรวมของพอลิพรอพิลีนคอมโพสิต ทั้งที่มีการใช้และไม่ใช้สารเชื่อมโยง จะให้ประสิทธิภาพลดลง เมื่อเทียบกับพอลิพรอพิลีนที่ไม่มีเส้นใยสลาบหลวงเป็นตัวเติม ส่วนผลของแสงอัลตราไวโอเลตต่อการสลายตัวของพอลิเมอร์คอมโพสิตพบว่าปริมาณสารตัวเติมรวมทั้งชนิดและปริมาณของสารเชื่อมโยงในพอลิพรอพิลีนคอมโพสิตไม่มีผลช่วยป้องกันการสลายตัวของพอลิเมอร์โดยแสงอัลตราไวโอเลต

Nagaty และคณะ [21] ได้ทำการศึกษาพอลิเมอร์คอมโพสิตจาก Lignocellulose โดยทำการต่อกิ่ง Methyl Methacrylate (MMA) บนเส้นใยชานอ้อยและใช้ Sodium bisulphite-soda lime เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา พบว่าสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิตขึ้นอยู่กับปริมาณและขนาดของเส้นใยชานอ้อย

Woodhams และคณะ [22] ได้ทำการศึกษาพอลิโอลิฟินที่เสริมแรงด้วยเส้นใยที่มีอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่าศูนย์กลาง (Aspect ratio) ประมาณ 100 โดยใช้กรดสเตียริก (Stearic acid) และอีโพลีน (Epolene) เป็นสารช่วยให้เส้นใยกระจายตัวใน HDPE และ PP แล้วขึ้นรูปด้วยเครื่องฉีดขึ้นรูป (Injection molding) พบว่าเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพด้วยความแข็งแรงต่อน้ำหนักแล้วคอมโพสิตจากเยื่อไม้จะมีความแข็งแรงเท่ากับ หรือมากกว่าวัสดุชนิดอื่นๆ ที่ใช้ในการก่อสร้าง เช่น เหล็กกล้า อะลูมิเนียม และคอมโพสิตจากใยแก้ว ในขณะที่ราคาถูกกว่า

Yam และคณะ [23] ได้ทำการศึกษาการเตรียมคอมโพสิตของ HDPE จากขวดนมกับเส้นใยไม้สน โดยศึกษาเส้นใยที่ไม่ได้ปรับปรุง นำมาปรับปรุงด้วยความร้อนและอะเซทิเลต (Acetylate)

ทำการผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ พบว่าสามารถผสมกันได้ถึงร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก แต่ถ้าเพิ่มปริมาณเส้นใย ค่าความแข็งแรงดึงจะลดลง และเส้นใยที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงด้วยความร้อนและอะเซทิเลต จะให้ค่าดีกว่าเส้นใยที่ปรับปรุงด้วยความร้อน สำหรับค่ามอดุลัส ค่าความแข็งแรงกระแทก และค่าการยึดติด จะไม่ขึ้นกับการปรับปรุงเส้นใย ค่ามอดุลัสจะเพิ่มตามปริมาณเส้นใย และส่งผลให้ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดลดลง ส่วนรูปแบบและอุณหภูมิการผสมจะมีผลต่อสมบัติเชิงกลที่ได้ พบว่าถ้าใช้อุณหภูมิมากกว่า 200 องศาเซลเซียส จะทำให้ลิกนินเริ่มเสื่อมสภาพ และถ้าใช้เวลานาน คอมโพสิตที่ได้จะมีสีคล้ำ เนื่องจากการเสื่อมสภาพโดยความร้อน

Raj และคณะ [24] ได้ศึกษาการใช้เส้นใยไม้เป็นตัวเติมในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลาง (Medium density polyethylene; MDPE) โดยใช้เส้นใย 3 ชนิดคือ เยื่อเชิงกล (Mechanical pulp) ผงไม้ (Wood flour) และเยื่อเซลลูโลส (Cellulose pulp) และได้มีการปรับปรุงเส้นใยก่อนด้วยสารพวกไซเลน (Silane) และพอลิไอโซยาเนต (Polyisocyanate) เพื่อเป็นการปรับปรุงการยึดติดระหว่างเส้นใยกับพอลิเมอร์ พบว่าค่าความแข็งแรงดึงจะเพิ่มขึ้นในกรณีที่มีการปรับปรุงเส้นใยก่อน แต่จะไม่มีผลต่อค่ามอดุลัสยืดหยุ่น ค่ามอดุลัสจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้น ส่วนค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดและค่าพลังงานการแตกหักจะลดลง สำหรับวิธีผสม ถ้าผสมโดยเครื่องอัดรีด จะมีค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดุลัสสูงกว่าผสมด้วยเครื่องผสมแบบลูกกลิ้ง พบว่า MDPE ที่เติมด้วยเยื่อเชิงกลจะมีสมบัติที่ดีกว่าการเติมเยื่อเซลลูโลสและผงไม้

George และคณะ [25] ได้ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลของ LDPE ที่เสริมแรงด้วยเส้นใยสับปะรด โดยสามารถเติมเส้นใยได้สูงสุดถึงร้อยละ 30 มีการเปรียบเทียบการเติม 2 วิธีคือ การผสมโดยทำเป็นสารละลาย (Solution mixing) และการผสมขณะหลอม (Melt mixing) พบว่าการเตรียมทั้ง 2 วิธีนี้ ค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดุลัสจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณเส้นใย แต่การเตรียมแบบสารละลายจะให้ค่าที่สูงกว่า ส่วนค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใย สำหรับความยาวของเส้นใยจะมีผลต่อสมบัติของคอมโพสิตได้ โดยเส้นใยที่ยาวจะช่วยให้ค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดุลัสเพิ่มขึ้น นอกจากนี้การจัดเรียงตัวของเส้นใยจะมีผลต่อค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดุลัสด้วย ถ้าเส้นใยจัดตัวในทิศทางเดียวกันตามแนวแรง คอมโพสิตที่ได้จะมีค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดุลัสสูงกว่าที่จัดตัวตั้งฉากกับแนวแรง

Kokta และคณะ [26] ได้ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิพรอพิลีนที่ใส่ผงไม้ ซึ่งเคลือบผิวด้วยอีโพลีน เพื่อช่วยในการกระจายตัว โดยใช้ไซเลน และพอลิเมทิลีน พอลิฟีนิลไอโซไซยาเนต (Polymethylene polyphenylisocyanate; PMPPIC) เป็นสารช่วยยึดติด ทำการผสมโดยใช้เครื่องผสมแบบลูกกลิ้งและขึ้นรูปด้วยวิธีกดอัด พบว่ากรณีที่ใช้ PMPPIC ร่วมกับอีโพลีน ค่าความแข็งแรงดึงจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณเส้นใย แต่การปรับปรุงเส้นใยจะไม่มีผลต่อมอดุลัส ค่ามอดุลัสจะขึ้นกับอัตรา

ส่วนความยาวต่อเส้นผ่าศูนย์กลาง ถ้าเส้นใยยาวจะมีค่ามอดุลัสสูง และการเพิ่มปริมาณเส้นใยก็ทำให้ค่ามอดุลัสเพิ่มขึ้นด้วยแต่ค่าเปอร์เซ็นต์ดึงยืด ณ จุดขาดและค่าความแข็งแรงกระแทกจะลดลง

รัชดา ขวัญตน [27] ได้ทำการศึกษาการเตรียมคอมโพสิตของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงจากขวดน้ำและเส้นใยอ้อย โดยใช้เปรียบเทียบสารช่วยการยึดติด 2 ชนิดได้แก่ PE-g-AA และ PE-g-MAH จากการทดลองพบว่าการเติมชานอ้อยลงไปในคอมโพสิตจะทำให้คอมโพสิตมีค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดุลัสเพิ่มขึ้น แต่ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดและค่าความแข็งแรงกระแทกลดลง และคอมโพสิตที่ใช้สารช่วยการยึดติดระหว่าง แก่ PE-g-AA และ PE-g-MAH จะให้ผลที่ไม่แตกต่างกัน

ปิยะวัน ตังควรรณวานิช [28] ได้ทำการศึกษาพอลิเมอร์คอมโพสิตจากเส้นใยธรรมชาติ (ไผ่สีสุก) กับเอบีเอสที่มีการปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยไผ่ โดยทำการผสมเส้นใยไผ่ 0-40 phr กับเอบีเอส โดยใช้เครื่องผสมหลอมเหลวระบบปิดแบบเกลียวหนอนคู่ (Twin-screw extruder) และขึ้นรูปด้วยเครื่องฉีดขึ้นรูป (Injection molding) พบว่า พอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการต่อกิ่งกับพอลิเมทิลไครเลต (PMMA) มีสมบัติเชิงกลดีกว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตแบบไม่ต่อกิ่ง และเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยลงไป พบว่า พอลิเมอร์คอมโพสิตจะมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น

นางสาววัชรี อธิปัญญาสฤษดิ์ นายวัฒนเกียรติ เลื่องลือเจริญกิจ และนางสาววิศณีย์ ตั้งยืนยง [29] ได้ทำการศึกษาการปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยธรรมชาติ เพื่อใช้ในพอลิเมอร์คอมโพสิต โดยใช้ปฏิกิริยาการต่อกิ่งด้วยวิธีการฉายรังสีแกมมาลงในสารละลายมอนอเมอร์เมทิลเมทาอะไครเลต (MMA) โดยทำคอมโพสิตกับอะคริโลไนไทรส์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (เอบีเอส) และขึ้นรูปโดยการฉีด พบว่าคอมโพสิตที่มีการปรับปรุงสมบัติต่างๆ ดีกว่าคอมโพสิตที่ไม่ได้รับการปรับปรุง โดยเฉพาะคอมโพสิตที่ฉายรังสี 15 kGy พบว่าที่ความเข้มข้น 20% มอนอเมอร์มีการต่อกิ่งมากที่สุด คอมโพสิตที่ผสมเส้นใยชานอ้อย 3% โดยน้ำหนักมีสมบัติเชิงกลดีที่สุด เมื่อทำการสกัดโฮโมพอลิเมอร์ (PMMA) ออกจากเส้นใยก่อนผสมเป็นคอมโพสิต พบว่ามีสมบัติด้อยลง คาดว่าโฮโมพอลิเมอร์ที่เกิดจากการฉายรังสีมีบทบาทช่วยเสริมเส้นใยที่ได้รับการต่อกิ่ง ทำให้มีสมบัติดีขึ้น

นางสาวนันทพร พันธุ์ภักดี และนางสาวเรวดี สกุลอาริยะ [30] ได้ทำการศึกษาเส้นใยอ้อยเป็นสารตัวเติมในพอลิพรอพิลีน โดยเส้นใยอ้อยจะถูกปรับสภาพผิวเพื่อปรับปรุงสมบัติการกระจายตัว และการยึดติดในพอลิเมอร์โดยใช้ อีโพลีนแวกซ์ (Epolene wax) การฉายรังสี และการใช้มัลติ-ฟังก์ชันนัลมอนอเมอร์ (Multifunctional monomer) แล้วนำมาผสมกับพอลิพรอพิลีนในเครื่อง Brabender จากนั้นนำมาขึ้นรูปด้วยเครื่องขึ้นรูปแบบฉีด พบว่าคอมโพสิตที่มีเส้นใยอ้อย 10% โดยน้ำหนักทั้งที่ปรับและไม่ปรับสภาพผิว มีแนวโน้มที่จะมีสมบัติเชิงกลในด้านต่างๆ ดีขึ้น

นางสาวปิยะวรรณ เจียวก๊ก และนายพงศ์ศักดิ์ แพน้อย [31] ได้ทำการศึกษาพอลิเมอร์คอมโพสิตจากพอลิพรอพิลีน และเส้นใยยูคาลิปตัสทั้งที่ได้จากขบวนการทางเคมี (Chemical pulp; CP) และทางความร้อนเชิงกล (Thermomechanical pulp; TMP) โดยศึกษาผลของสารช่วยผสมมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟ์พอลิพรอพิลีนและอัตราส่วนของเส้นใยที่เหมาะสม โดยพบว่าสมบัติเชิงกลของ คอมโพสิตดีขึ้นเมื่อปริมาณเส้นใยไม้มีมากขึ้น และปริมาณเส้นใยที่เหมาะสมได้แก่ 20 phr เมื่อเพิ่มปริมาณสารช่วยผสมพบว่า คอมโพสิตมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น และมีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำลดลง ปริมาณสารช่วยผสมที่เหมาะสมที่สุดคือ 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมื่อทำการเปรียบเทียบคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP และ CP พบว่า เส้นใย TMP มีการกระจายตัวที่ดีกว่าและมีสมบัติเชิงกลดีกว่า เมื่อพิจารณาองศาความเป็นผลึกพบว่า ปริมาณเส้นใยไม้ไม่มีผลต่อค่าองศาความเป็นผลึก แต่ปริมาณสารช่วยผสมมีผลทำให้ค่าองศาความเป็นผลึกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

จากผลงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าพอลิเมอร์คอมโพสิต จะให้สมบัติเชิงกลที่ดีกว่าวัสดุทั่วๆ ไป คือ ค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดุลัสจะสูงกว่าวัสดุอื่นๆ โดยเนื้อหาที่สำคัญของการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่กล่าวข้างต้น สามารถเขียนสรุปได้ดังนี้

1. การเพิ่มปริมาณเส้นใย จะส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึง และค่ามอดุลัสมีค่าสูงขึ้น
2. คอมโพสิตที่มีทิศทางการจัดเรียงตัวในแนวเดียวกัน จะมีสมบัติที่ดีกว่าคอมโพสิตที่มีทิศทางการจัดเรียงตัวแบบตั้งฉาก
3. การผสมพอลิเมอร์คอมโพสิตโดยใช้เครื่องอัดรีด จะให้สมบัติที่ดีกว่าการผสมแบบใช้เครื่องผสมแบบลูกกลิ้ง

บทที่ 3
การดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีและวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

1. พอลิไวนิลคลอไรด์ (Polyvinylchloride; PVC) บริษัทวีนิไทย จำกัด (มหาชน)
   ชนิด Suspension รุ่น 264 GC
   - Viscosity index 102 dm^3 / kg
   - K value 64
2. สารเสริมเสถียรภาพทางความร้อน (Heat Stabilizer) บริษัท TPC จำกัด
   Ca-Zn Stabilizer
3. ซีรีคลอร์ (Celeclor) พลาสติไซเซอร์ บริษัท ICI จำกัด
4. ไดออกทิลพทาเลต (Dioctyl phtalate; DOP) บริษัท เซาท์ ซิตี้ปิโตรเคม จำกัด
5. แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate) SURINT OMYA CHEMICALS (THAILAND).CO.,LTD
6. Processing aid (Loxiol G32) บริษัทเฮงเค็ลไทย จำกัด
7. น้ำมัน Epoxydized soybean oil VIKOFLEX 7170
   บริษัท ศรีเทพไทย จำกัด
8. ซิงค์สเตียเรต (Zinc stearate) SURINT OMYA CHEMICALS (THAILAND).CO.LTD
9. กรดสเตียริก (Stearic acid) บริษัท TPC จำกัด
10. เส้นใยไม้ยูคาลิปตัส กรมป่าไม้

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

1. เครื่องผสมความเร็วสูง (High speed mixer) : LAB TECH ENGINEERING COMPANY LTD.
2. เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว (Single-screw extruder) รุ่น Axon ab. Plasma : Sew Eurodrive
3. เครื่องอัดแบบขึ้นรูปพลาสติก (Compression molding machine) : Lab Tech Engineering Company LTD.
4. เครื่องบดพลาสติก (Grinder) : Bosco Engineering

5. เครื่องทดสอบสมบัติเชิงกล (Universal Testing Machine) : LLYOD INSTRUMENT LTD.
6. เครื่องทดสอบความแข็งแรงกระแทก (Izod impact tester) : Yasuda Seiki Seisakusho Ltd.
7. เครื่องทดสอบความแข็งกดแบบชอร์ดี (Hardness tester, shore D) : Yasuda Seiki Seisakusho Ltd.
8. Dynamic mechanical thermal analyzer (DMTA) : รุ่น DMTA-V บริษัท Rheometric Scientific LTD.
9. เครื่องทดสอบทางความร้อน TGA (Thermogravimetric analyzer) : TGA-51 บริษัท Shimadzu Co.,Ltd
10. เครื่องทดสอบความเบี่ยงเบนทางความร้อน HDT (Heat distortion temperature) : Yasuda Seiki Seisakukho LTD.
11. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning electron microscope; SEM) : รุ่น JSM-5800LV บริษัท JEOL
12. เครื่องร่อนแยกขนาด
13. ตะแกรงมาตรฐานขนาด 20 35 50 80 และ 120 mesh
14. ชุดทดสอบ Density-Gradient Technique
15. ตู้อบ
16. เดซิเคเตอร์
17. เกรียง
18. เครื่องชั่ง
19. ถุงมือกันความร้อน
20. เวอร์เนียร์
21. ไมโครมิเตอร์
22. เครื่องแก้วต่างๆ เช่น บีกเกอร์ ขวดวัดปริมาตร

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การเตรียมเยื่อไม้

ในงานวิจัยได้ทำการศึกษาเยื่อไม้ยูคาลิปตัส 2 ชนิดได้แก่ เยื่อไม้ยูคาลิปตัสที่เตรียมได้จากขบวนการความร้อนเชิงกล (Thermomechanical pulp; TMP) และ เยื่อไม้ยูคาลิปตัสที่เตรียมได้จากขบวนการทางเคมี (Chemical pulp; CP) ซึ่งสามารถเตรียมได้ดังนี้

3.3.1.1 เยื่อไม้ที่เตรียมได้จากขบวนการความร้อนเชิงกล (Thermomechanical pulp; TMP)

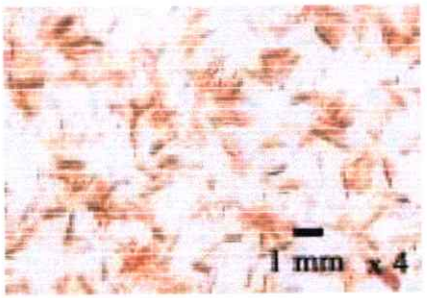
เป็นการแยกเยื่อโดยวิธีความร้อนเชิงกล (Thermomechanical pulping) ซึ่งเป็นวิธีที่ดัดแปลงมาจากวิธีการผลิตเยื่อทางกลโดยการบด (Refined mechanical pulping) เริ่มจากการนำชิ้นไม้หรือชิ้นวัตถุดิบ เข้านึ่งไอน้ำภายใต้ความดันไอ จนอุณหภูมิไอน้ำสูงกว่า 140 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นจุดที่ทำให้ลิกนินอ่อนตัว เรียกว่า จุดเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition point) หรือ จุดนิ่มตัว (Softening point) แล้วจึงทำการบดชิ้นไม้ให้แยกออกจากกันภายใต้อุณหภูมิและความดันสูงเป็นเส้นใยหรือกลุ่มของเส้นใย การบดใช้วิธีการเสียดสี (Attrition action) ของเครื่อง Defibrators หรือ Attrition mills ซึ่งประกอบด้วยจานบดที่มีผิวหยาบเป็นร่อง 2 จาน โดยจานหนึ่ง หรือ 2 จาน หมุนสวนทางเสียดสีกันให้ชิ้นไม้ที่อยู่ระหว่างจานทั้งสองแตกแยกออกเป็นกลุ่มเยื่อ ผลผลิตของเยื่อที่ได้ประมาณ 90 – 95 % ขึ้นอยู่กับ สภาวะในการแยกเยื่อ ได้แก่ อุณหภูมิหรือความดันไอน้ำ เวลาในการนึ่งชิ้นไม้และเวลาในการบดเยื่อ จะมีความผันแปรไปขึ้นอยู่กับชนิดไม้หรือวัตถุดิบ ความหนาแน่นของไม้หรือวัตถุดิบ ความชื้น และรูปทรงทางเรขาคณิตของชิ้นไม้

3.3.1.2 เยื่อไม้ที่เตรียมได้จากขบวนการทางเคมี (Chemical pulp; CP)

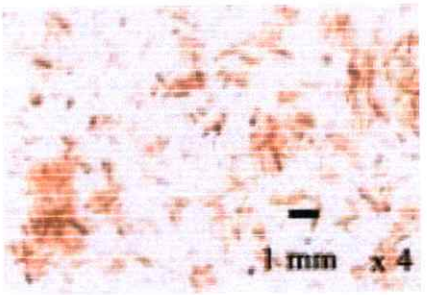
เป็นการแยกเยื่อโดยวิธีทางเคมี (Chemical pulping) ที่ทำการแยกเยื่อในถังปฏิกรณ์ (Reactor) ภายใต้อุณหภูมิและความดันสูงประมาณ 125 - 180 องศาเซลเซียส ซึ่งไม่มีขบวนการเชิงกลในการแยก แต่ใช้สารประกอบเคมีที่มีสภาวะเป็นด่าง เรียกว่า Alkaline process หรือ สารประกอบเคมีที่มีสภาวะเป็นกรด เรียกว่า Acidic (sulfite) process เข้าทำปฏิกิริยาละลายลิกนินที่อ่อนตัวแล้ว (Delignification) ออกจากชิ้นไม้หรือชิ้นวัตถุดิบ จนได้เป็นเส้นใย ขบวนการนี้จะให้ผลผลิตต่ำเพียง 40 - 60 % ระยะเวลาที่ใช้ในการแยกเยื่อก็จะมากกว่า 1 – 5 ชั่วโมง ต้นทุนสูง แต่เยื่อที่ได้จะมีความบริสุทธิ์มากกว่า เนื่องจาก ลิกนินและเฮมิเซลลูโลสจะถูกแยกออกเกือบทั้งหมด ลักษณะของเส้นใยจะยุบและอ่อนตัวจากเดิมที่มีความแข็งกระด้างและรูปร่างทรงกลม กลายเป็นลักษณะ

คล้ายโบริบบิ้น ที่มีพื้นที่ผิวมากขึ้นเพื่อการเกิดพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bonding) ซึ่งเป็นลักษณะที่ต้องการของขบวนการทำกระดาษ

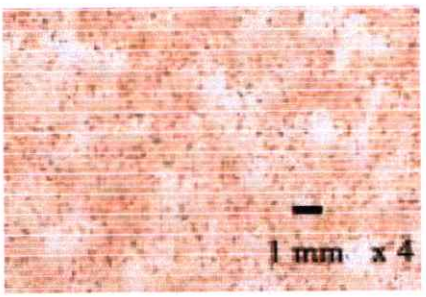
หลังจากเตรียมเส้นใยเสร็จแล้ว นำเส้นใยไม้ที่บดเสร็จแล้วไปล้างด้วยน้ำ หลังจากนั้นนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 วัน โดยก่อนการทดลอง ต้องทำการคัดแยกขนาดอนุภาคเส้นใยไม้ โดยใช้เครื่องร่อนแยกขนาด ร่อนให้ได้ผงไม้ที่มีขนาด 20-35 35-50 50-80 80-120 และมากกว่า 120 mesh แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสอีก 1 วัน เพื่อเป็นการทำให้ความชื้นในผงไม้หมดไป นำไปเก็บไว้ในเดซิเคเตอร์ โดยลักษณะของเส้นใยไม้ที่เตรียมได้มีลักษณะดังรูปที่ 3.1



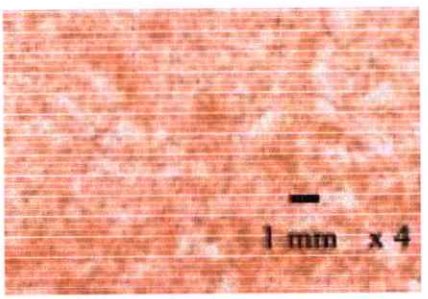
(a) เส้นใยไม้ TMP ขนาด 20-35 mesh



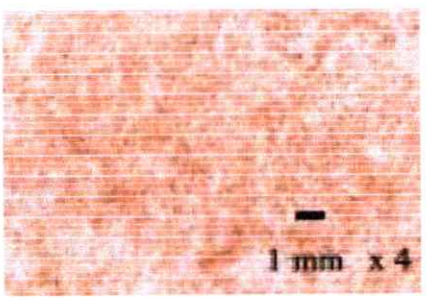
(b) เส้นใยไม้ TMP ขนาด 35-50 mesh



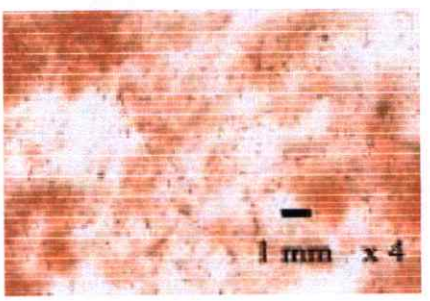
(c) เส้นใยไม้ TMP ขนาด 50-80 mesh



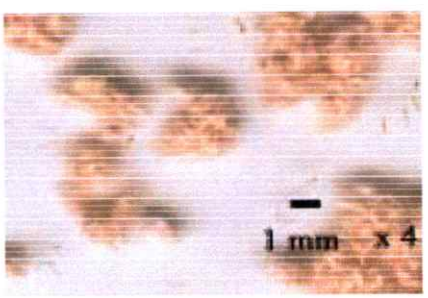
(d) เส้นใยไม้ TMP ขนาด 80-120 mesh



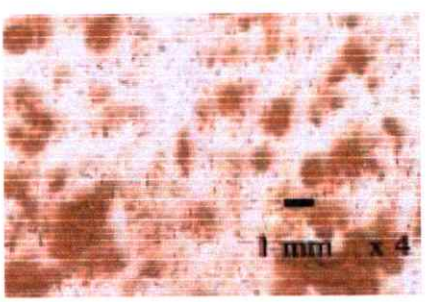
(e) เส้นใยไม้ TMP ขนาดมากกว่า 120 mesh



(f) เส้นใยไม้ TMP ไม่แยกขนาด



(g) เส้นใยไม้ CP ไม่แยกขนาด



(h) เส้นใยไม้ TMP ไม่แยกขนาดหลังผ่านกระบวนการผลิต

รูปที่ 3.1 รูปถ่ายลักษณะของเส้นใยไม้ขนาดต่างกัน และชนิดการเตรียมต่างกัน

3.3.2 ขั้นตอนการผสม PVC

1. ชั่งสูตรผสมต่างๆ ดังตารางที่ 3.1
2. ทำ PVC-compound โดยการผสม PVC DOP และ Cereclor ในเครื่องผสมความเร็วสูง (High speed mixer) กวนของผสมเป็นเวลา 5 นาที
3. เติม เส้นใยไม้ Ca-Zn stabilizer ซิงค์สเตียเรต กรดสเตียริก Loxiol G32 และแคลเซียมคาร์บอเนตลงไป จากนั้นทำการปั่นกวนต่อเป็นเวลา 10 นาที
4. เติมน้ำมัน Epoxydized soybean oil ปั่นกวนต่อ 5 นาทีหรือให้ส่วนผสมเข้ากันได้ดีโดยใช้ความเร็วในการผสม 4000 rpm และใช้อุณหภูมิในการผสม 60 องศาเซลเซียส
5. นำส่วนผสมที่ได้ไปผสมกันในเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว (Single screw extruder) โดยศึกษาอุณหภูมิในการผสมที่เหมาะสม
6. นำ PVC-compound ที่ได้ไปบด
7. นำ PVC-compound ที่บดไปทำการขึ้นรูปโดยใช้เครื่อง Compression molding โดยจะศึกษาอุณหภูมิและเวลาในการขึ้นรูปที่เหมาะสม
8. นำ PVC-compound ที่ได้ไปทดสอบสมบัติต่างๆ ได้แก่

8.1 ศึกษาสมบัติเชิงกล
- ทดสอบสมบัติแรงดึงด้วยเครื่อง Universal tensile tester และได้ค่าความแข็งแรงดึง ค่ามอดุลัส และค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด
- ความแข็งแรงกระแทก
- ความแข็งกด
- HDT

8.2 ศึกษาสมบัติทางกายภาพ
- ความหนาแน่น
- การดูดซับน้ำ

8.3 ศึกษาสมบัติทางความร้อน
- TGA
- DMTA

8.4 ศึกษาสัณฐานวิทยา
- SEM

ตารางที่ 3.1 สูตรการผสมพีวีซีคอมพาวด์

ส่วนประกอบ	หน่วย (phr)
พีวีซี	100
ซีรีคลอร์ (Cereclor)	3
Cd-Zn stabilizer	3
Stearic acid	3
ซิงค์สเตียเรต (Zinc stearate)	1.5
Loxiol G32-wax	1.5
Epoxydized soybean oil	5
** DOP	0-20
** เส้นใยไม้ยูคาลิปตัส	0-50
** แคลเซียมคาร์บอเนต	0-40

หมายเหตุ ** คือองค์ประกอบที่ทำการศึกษา

- ในการศึกษาปริมาณเส้นใยไม้ ได้ทำการเติมเส้นใยไม้ไม่แยกขนาด 10-50 phr และเติม DOP 10 phr โดยไม่มีการเติมแคลเซียมคาร์บอเนต
- ในการศึกษาความยาวเส้นใยไม้ ได้ทำการเติมเส้นใยไม้ที่มีความยาว 20-35 mesh 35-50 mesh 50-80 mesh 80-120 mesh และมากกว่า 120 mesh ปริมาณ 30 phr และเติมDOP 10 phr โดยไม่มีการเติมแคลเซียมคาร์บอเนต
- ในการศึกษาปริมาณ DOP ได้ทำการเติม DOP 0-20phr และเติมเส้นใยไม้ไม่แยกขนาด 30 phr โดยไม่มีการเติมแคลเซียมคาร์บอเนต
- ในการศึกษาปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต ได้ทำการเติมแคลเซียมคาร์บอเนต 10-40 phr เติมเส้นใยไม้ไม่แยกขนาด 30 phr และ DOP 10 phr
- ในการศึกษาผลของวิธีการเตรียมเส้นใย ได้ทำการเติมเส้นใยไม้ไม่แยกขนาด 30 phr DOP 10 phr โดยไม่มีการเติมแคลเซียมคาร์บอเนต

3.4 การทดสอบ [32]

การทดสอบสมบัติต่างๆ ของพอลิเมอร์คอมโพสิต ได้ทำการทดสอบมาตรฐานดังตาราง 3.2 ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3.2 มาตราฐานต่างๆ ในการทดสอบพอลิเมอร์คอมโพสิต

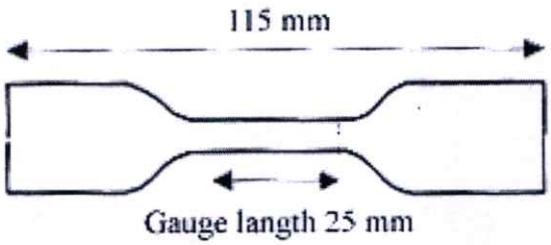
สมบัติ	มาตราฐานที่ใช้ทดสอบ	หน่วยรายงานผล
ความแข็งแรงดึง (Tensile strength)	ASTM D 638	MPa
มอดุลัสที่ 3 % การยืด (Modulus 3% strain)	ASTM D 638	MPa
เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break)	ASTM D 638	%
ความแข็งแรงกระแทก (Impact strength)	ASTM D 256	kJ / m^2
ความแข็งกด (Hardness)	ASTM D 785	Shore D
ความแข็งแรงโค้งงอ (Flexural strength)	ASTM D 790	MPa
มอดุลัสโค้งงอ (Flexural modulus)	ASTM D 790	MPa
Heat distortion temperature (HDT)	ASTM D 648	^{o}C
ความหนาแน่น (Density)	ASTM D 1505-85	g / cm^3
เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ (% water absorption)	ASTM D 570	%

3.4.1 สมบัติเชิงกล

3.4.1.1 ความแข็งแรงดึง (Tensile Strength) มอดุลัส (Tensile Modulus) และ เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (%Elongation at Break)

การทดสอบหาค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) เป็นไปดังมาตรฐาน ASTM D 638 [33] โดยในการทดสอบจะทดสอบโดยใช้เครื่องทดสอบสมบัติเชิงกล (Universal Testing Machine) แต่ละครั้งใช้ตัวอย่าง 10 ชิ้นโดยตัวอย่างเป็นรูปดัมเบลล์ดังรูปที่ 3.2 และสภาวะในการทดสอบเป็นดังนี้

- โหลดเซลล์ (Load cell)	30	กิโลนิวตัน (kN)
- ความเร็วในการดึง (Test speed)	100	มิลลิเมตร / นาที
- ความยาวของเกจ (Guage length)	25	มิลลิเมตร



รูปที่ 3.2 ลักษณะตัวอย่างของชิ้นงานที่นำมาทดสอบหาค่าความแข็งแรงดึง ค่ามอดุลัส และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด

ค่าความแข็งแรงดึง ค่ามอดุลัส และค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด สามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength); σ $= \dfrac{F}{A}$ (3.1)

ค่ามอดุลัส (Tensile modulus at 3% strain); E $= \dfrac{F/A}{3/100}$ (3.2)

% การดึงยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break); At $= \left(\dfrac{l - l_0}{l_0}\right) \times 100$ (3.3)

เมื่อ F คือแรงที่ใช้ในการยืดตัวอย่าง (หน่วยเป็นนิวตัน; N)

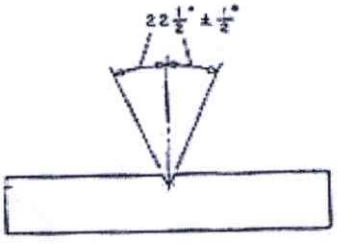
A คือพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง (หน่วยเป็นตารางมิลลิเมตร; mm^2)

l คือระยะห่างระหว่างจุดสองจุดหลังทำการดึงตัวอย่าง (มิลลิเมตร; mm)

l_0 คือช่วงที่ชิ้นงานแคบที่สุดและมีพื้นที่หน้าตัดขนานกัน; Guage length (มิลลิเมตร; mm)

3.4.1.2 ความแข็งแรงกระแทก (Impact Strength)

การทดสอบหาค่าความแข็งแรงกระแทก (Impact strength) เป็นไปดังมาตรฐาน ASTM D 256 [34] โดยในการทดสอบจะใช้มาตรฐานแบบไอซอด (Izod type) และแต่ละครั้งใช้ตัวอย่าง 10 ชิ้น โดยตัวอย่างเป็นดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ลักษณะตัวอย่างของชิ้นงานที่นำมาทดสอบหาค่าความแข็งแรงกระแทก

ค่าความแข็งแรงกระแทกสามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\text{ความแข็งแรงกระแทก (IS)} = \frac{W}{A} \qquad (3.4)$$

เมื่อ IS คือค่าความแข็งแรงกระแทก (หน่วยเป็นกิโลจูลต่อตารางเมตร; kJ / m^2)

W คือค่าพลังงานกระแทก (หน่วยเป็นกิโลจูล; kJ)

A คือพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง (ตารางเมตร; m^2)

3.4.1.3 ความแข็งกด (Hardness)

การทดสอบหาค่าความแข็งกด (Hardness) เป็นไปดังมาตรฐาน ASTM D 785 [35] โดยในการทดสอบจะใช้มาตรฐานแบบ Shore D ลักษณะของชิ้นงานที่นำมาทดสอบต้องมีความหนาไม่ต่ำกว่า ¼ นิ้ว มีความเรียบ กดเป็นเวลา 15 วินาทีจึงสามารถอ่านค่าได้

3.4.1.4 ความแข็งแรงโค้งงอ (Flexural Strength) และมอดุลัสโค้งงอ (Flexural Modulus)

การทดสอบหาค่าความแข็งแรงโค้งงอ (Flexural strength) และมอดุลัสโค้งงอ (Flexural modulus) เป็นไปดังมาตรฐาน ASTM D 790 [36] โดยลักษณะในการทดสอบเป็นดังรูปที่ 3.4 และสภาวะในการทดสอบเป็นดังนี้

- โหลดเซลล์ (Load cell)	1	กิโลนิวตัน (kN)
- ความเร็วในการกด (Compression speed)	10	มิลลิเมตร / นาที
- ระยะห่างของขารองรับชิ้นงาน (Span length)	40	มิลลิเมตร

สูตรที่ใช้ในการคำนวณค่าความแข็งแรงโค้งงอและมอดุลัสโค้งงอมีดังนี้

$$\text{ค่าความแข็งแรงโค้งงอ; } \sigma_f = \frac{3/2\,FL}{bh^2} \tag{3.5}$$

$$\text{มอดุลัสโค้งงอ; } E_b = \frac{L^3}{4bh^3} \times \frac{\Delta F}{\Delta d} \tag{3.6}$$

เมื่อ F คือแรงกด (หน่วยเป็นนิวตัน; N)

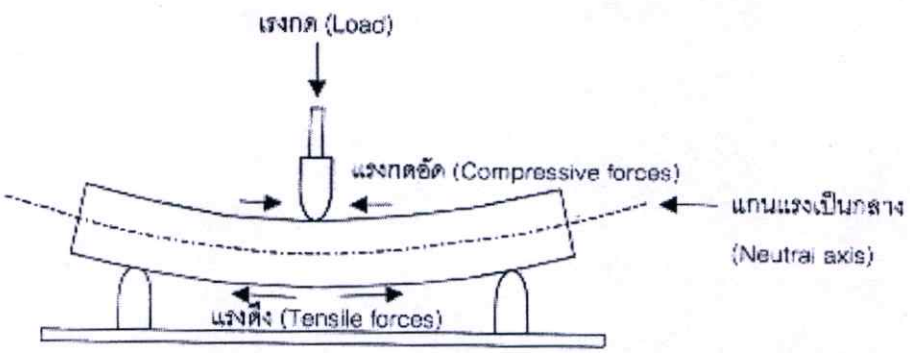
L คือ Span length (หน่วยเป็นมิลลิเมตร; mm)

b คือความกว้างของตัวอย่าง (หน่วยเป็นมิลลิเมตร; mm)

h คือความหนาของตัวอย่าง (หน่วยเป็นมิลลิเมตร; mm)

ΔF คือผลต่างของแรงดึง (หน่วยเป็นนิวตัน; N

Δd ระยะกดโค้งงอ (หน่วยเป็นมิลลิเมตร; mm)



รูปที่ 3.4 แรงที่เกิดขึ้นในการทดสอบการโค้งงอ

3.4.2 สมบัติทางกายภาพ

3.4.2.1 ความหนาแน่น (Density)

ความหนาแน่น (Density) สามารถทดสอบโดยใช้วิธี Gradient column ตามมาตรฐาน ASTM D 1505-85 [37] หลักการคือใช้สารละลายที่มีความหนาแน่นต่างกัน นำมาเทลงคอลัมน์โดยที่สารละลายที่มีความหนาแน่นมากจะอยู่ด้านล่าง สารละลายที่มีความหนาแน่นน้อยอยู่ด้านบน จากนั้นนำเม็ดพลาสติกมาตรฐานที่ทราบความหนาแน่นที่แน่นอน หย่อนลงไปในคอลัมน์ บันทึกความสูงของพลาสติกแต่ละชิ้น จากนั้นนำความหนานแน่นและความสูงไปสร้างกราฟมาตรฐาน ชิ้นงานที่นำมาทดสอบ ตัดเป็นชิ้นเล็กๆ นำไปหย่อนในคอลัมน์ นำความสูงที่ได้ไปเทียบกับกราฟมาตรฐาน จะได้ความหนาแน่นของชิ้นงาน

3.4.2.2 การดูดซับน้ำ (Water Absorption)

การทดสอบการดูดซับน้ำ (Water absorption) เป็นไปตาม ASTM D 570 [38] โดยการนำชิ้นงานไปอบที่อุณหภูมิ 105 ± 2 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำตัวอย่างที่ได้ไปไว้ในเดซิเคเตอร์เป็นเวลา 30-45 นาที ชั่งน้ำหนักและบันทึก จากนั้นนำไปแช่น้ำเป็นเวลา 43 วัน และชั่งน้ำหนักตัวอย่างทุกๆ 2 วัน โดยการดูดซับน้ำสามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\%\ \text{การดูดซับน้ำ} = \frac{\text{น้ำหนักตัวอย่างเปียก} - \text{น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น}} \times 100 \quad (3.7)$$

3.4.3 สมบัติทางความร้อน

3.4.3.1 Thermogravimetric Analysis (TGA)

Thermogravimetric analysis (TGA) เป็นการศึกษาการสลายตัวของพอลิเมอร์ หลักการของเครื่อง TGA คือให้ความร้อนแก่ชิ้นงานจนชิ้นงานเกิดการเสียสภาพ นำผลการทดลองมาวาดกราฟอุณหภูมิเทียบกับน้ำหนักที่หายไป โดยใช้สภาวะในการทดลองดังนี้

- อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ (Heating rate) = 10 องศาเซลเซียส / นาที
- อุณหภูมิที่ใช้ = 100-400 องศาเซลเซียส

3.4.3.2 Dynamic Mechanical Thermal Analysis (DMTA)

Dynamic mechanical thermal analysis (DMTA) เป็นเทคนิคในการหาค่ามอดุลัสสะสม (Storage modulus) และมอดุลัสสูญเสีย (Loss modulus) ของพอลิเมอร์คอมโพสิต โดยการให้แรงสั่นที่มีความถี่คงที่หรืออุณหภูมิที่เปลี่ยนไปเทียบกับเวลา ในการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DMTA สามารถหาค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature; T_g) ได้โดยสภาวะที่ใช้ในการทดลอง มีดังนี้

รูปแบบในการทดสอบ	= Single Cantilever Bending Geometry
ความถี่ (Frequency)	= 1 Hz
อุณหภูมิ	= 30-140 องศาเซลเซียส
อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ (Heating rate)	= 5 องศาเซลเซียส / นาที

3.4.4 สัณฐานวิทยา

3.4.4.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning Electron Microscope; SEM)

การศึกษาสัณฐานวิทยาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning electron microscope; SEM) เป็นการส่องดูพื้นผิวของวัสดุอย่างละเอียดเพื่อศึกษาการยึดติดระหว่างเส้นใยไม้กับพอลิเมอร์ การเตรียมตัวอย่างทำได้โดย นำตัวอย่างมาแช่ที่อุณหภูมิต่ำ โดยใช้ไนโตรเจนเหลว (Liquid nitrogen) และทำการหักทันทีที่อุณหภูมิต่ำ จากนั้นนำตัวอย่างมาเคลือบทองและนำเข้าเครื่อง SEM ต่อไป

3.4.4.2 ขั้นตอนการสกัดเส้นใยไม้ออกจากพีวีซีคอมโพสิต

นำพีวีซีคอมโพสิตที่ต้องการสกัดเพื่อเอาเส้นใยมาใส่ในเตตระไฮโดรฟูราน (Tetrahydrofuran) ทำการปั่นกวนที่อุณหภูมิห้องจนกว่าพีวีซีจะละลายหมด จากนั้นนำเส้นใยไม้ที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

บทที่ 4
ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

การศึกษาการผลิตแผ่นไม้เทียมจากพีวีซีและเส้นใยยูคาลิปตัส ได้แบ่งขั้นตอนการศึกษาไว้ดังนี้

4.1 องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยยูคาลิปตัส
4.2 การหาสภาวะที่เหมาะสมในขบวนการผลิต
4.3 การศึกษาผลของปริมาณเส้นใยไม้ที่เติมในพีวีซีคอมโพสิต
4.4 การศึกษาขนาดความยาวของเส้นใยไม้ที่เติมในพีวีซีคอมโพสิต
4.5 การศึกษาผลของปริมาณพลาสติไซเซอร์ (DOP) ที่เติมในพีวีซีคอมโพสิต
4.6 การศึกษาผลของปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต ที่เติมในพีวีซีคอมโพสิต
4.7 การศึกษาผลของวิธีเตรียมเส้นใยไม้ที่ผสมในพีวีซีคอมโพสิต
4.8 เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของพีวีซีคอมโพสิต
4.9 ผลจากเครื่องทดสอบทางความร้อน TGA (Thermogravimetric analyzer)
4.10 ผลจากเครื่องทดสอบทางความร้อน DMTA (Dynamic mechanical thermal analyzer)
4.11 การศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM)

4.1 องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยยูคาลิปตัส

การหาองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยยูคาลิปตัสเป็นไปตามมาตรฐาน ซึ่งองค์ประกอบของเส้นใยยูคาลิปตัสแสดงดังตารางที่ 4.1 โดยจากตารางพบว่า เส้นใย CP มีปริมาณของสารแทรกและลิกนินน้อยเมื่อเทียบกับเส้นใย TMP ทั้งนี้เป็นเพราะการเตรียมเส้นใย CP สารแทรกและลิกนินถูกสกัดออกไปแล้วบางส่วนระหว่างการผลิตเส้นใย เพราะฉะนั้นเส้นใยที่ผลิตได้ จะมีความบริสุทธิ์ของเซลลูโลสสูง เมื่อเทียบกับเส้นใย TMP

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยไม้ TMP และ CP

องค์ประกอบทางเคมี Chemical composition	เส้นใยไม้		มาตรฐาน Standard	หน่วย Unit
	TMP	CP		
1. สารแทรก ความสามารถในการละลายแอลกอฮอล์-เบนซิน (Alcohol-benzene solubility)	2.47	0.26	TAPPI-T204-cm-97	% โดยน้ำหนักอบแห้ง
ความสามารถในการละลายแอลกอฮอล์ (Alcohol solubility)	0.07	0.08	TAPPI-T264-cm-97	
ความสามารถในการละลายน้ำร้อน (Hot water solubility)	6.72	3.58	TAPPI-T207-cm-93	
2. ความสามารถในกาละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1% (1% NaOH solubility)	24.54	5.39	TAPPI-T212-cm-98	% โดยน้ำหนักอบแห้ง
3. โฮโลเซลลูโลส (Holocellulose)	62.69	94.99	Acid chlorite Method of Browing	% โดยน้ำหนักอบแห้ง
4. ลิกนิน (Lignin)	28.05	1.08	TAPPI-T222-cm-98	% โดยน้ำหนักอบแห้ง
5. เพนโตแซน (Pentosan)	13.32	13.46	TAPPI-T223-cm-84	% โดยน้ำหนักอบแห้ง
6. แอลฟาเซลลูโลส (α Cellulose)	60.49	86.32	TAPPI-T203-cm-88	% โดยน้ำหนักอบแห้ง

4.2 การหาสภาวะที่เหมาะสมในขวนการผลิต

การทดลองนี้เป็นการผลิตไม้เทียมจากพีวีซีและเส้นใยไม้ยูคาลิปตัส ในระหว่างการศึกษาขั้นตอนการขึ้นรูปของพีวีซีมีขบวนการขึ้นรูปพีวีซีโดยใช้ความร้อน จึงจำเป็นที่ต้องหาสภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปพีวีซี เพื่อลดปัญหาการเสียสภาพของพีวีซี และสามารถผลิตไม้เทียมได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ

ในการทดลอง แบ่งการหาสภาวะที่เหมาะสมไว้ 2 ช่วงดังนี้

1. การหาอุณหภูมิที่เหมาะสมของเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว (Single-screw extruder)
2. การหาอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมของเครื่องขึ้นรูปโดยวิธีกดอัด (Compression molding)

4.2.1 การหาอุณหภูมิที่เหมาะสมของเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว (Single-screw Extruder)

สกรูเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยวประกอบไปด้วยส่วนหลัก 3 ส่วนได้แก่ Feed zone Transition zone และ Metering zone โดยส่วนปลายของสกรูต่อเข้ากับหัวดาย (Die) จากการทดลองพบว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมของหัวดายคือ 170 องศาเซลเซียส โดยอุณหภูมินี้เป็นอุณหภูมิที่ต่ำสุดที่ใช้หลอมพีวีซีให้สามารถรวมตัวกับเส้นใยไม้ ถ้าใช้อุณหภูมิน้อยกว่า 170 องศาเซลเซียส การหลอมของพีวีซีเกิดขึ้นอย่างไม่สมบูรณ์ พีวีซีที่ออกมาจากเครื่องจะมีลักษณะเป็นผงจับตัวกันบ้างบางส่วนแต่ไม่เป็นสายยาวออกมา

เพราะฉะนั้น อุณหภูมิที่เหมาะสมบริเวณหัวดายคือ 170 องศาเซลเซียส จากนั้นจึงปรับอุณหภูมิของสกรูให้ลดลงมาตามลำดับโดยส่วน Metering zone ใช้ 165 องศาเซลเซียส Transition zone ใช้ 160 องศาเซลเซียส และ ส่วน Feed zone ใช้ 155 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

4.2.2 การหาอุณหภูมิที่เหมาะสมของเครื่องขึ้นรูปโดยวิธีกดอัด (Compression Molding)

หลังจากขึ้นรูปพีวีซีคอมโพสิตโดยใช้เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว นำพีวีซีคอมโพสิตที่ได้มาทำการบดโดยเครื่องบดพลาสติก นำไปขึ้นรูปเป็นแผ่น โดยเครื่องขึ้นรูปโดยวิธีกดอัด จากนั้นนำไปตัดเป็นชิ้นงานเพื่อนำไปทดสอบสมบัติต่างๆ ต่อไป โดยในการทดลองได้ทดลองการขึ้นรูปที่อุณหภูมิต่างๆ กันได้แก่ 170 180 190 และ 200 องศาเซลเซียส

ผลการทดลองพบว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมในการนำพีวีซีไปขึ้นรูปโดยวิธีกดอัดคือ 190 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส พีวีซีคอมโพสิตเกิดการเสียสภาพ ทำให้ไม่สามารถนำ

ชิ้นงานไปใช้งานได้ และที่อุณหภูมิ 170 และ 180 องศาเซลเซียส พีวีซียังหลอมได้ไม่สมบูรณ์ เพราะฉะนั้น แผ่นพีวีซีที่ได้ จะมีลักษณะของพีวีซียังจับตัวเป็นก้อน เส้นใยไม่สามารถเกิดการกระจายตัวที่ดี ส่งผลให้แผ่นพีวีซี มีสมบัติที่ไม่ดี หลังจากนั้นจึงได้ทดสอบการทำพีวีซีไปขึ้นรูปที่ 190 องศาเซลเซียส แต่ได้ทำการเปลี่ยนเวลาในการผสมให้เหมาะสม พบว่าเวลาที่เหมาะสมในการขึ้นรูปคือ 5 นาที ถ้าใช้เวลามาก 5 นาที ทำให้พีวีซีคอมโพสิตเกิดการเสียสภาพ และที่เวลาน้อย 5 นาที การหลอมละลายของพีวีซีไม่ดี เป็นผลเสียต่อสมบัติของชิ้นงานได้

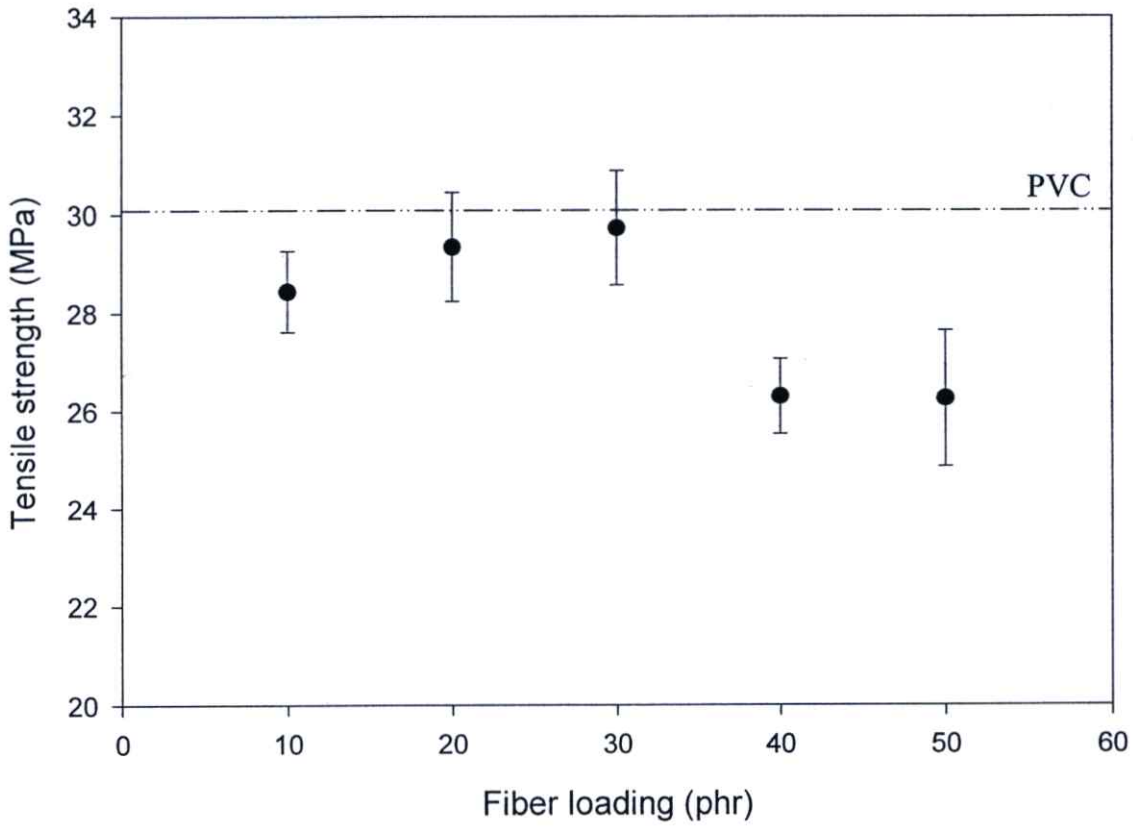
4.3 การศึกษาผลของปริมาณเส้นใยไม้ที่เติมในพีวีซีคอมโพสิต

ในการศึกษาผลของปริมาณเส้นใยไม้ที่เหมาะสมที่สามารถเติมเข้าไปในพีวีซีคอมโพสิต ได้ทำการเติม DOP ลงไปในคอมโพสิต 10 phr และทำการศึกษาการเติมปริมาณเส้นใยไม้ TMP โดยไม่ทำการแยกขนาดที่ 10 20 30 40 และ 50 phr (Part per hundred of polymer) ซึ่งผลการทดลองที่ได้เป็นไปตามตารางที่ 4.2

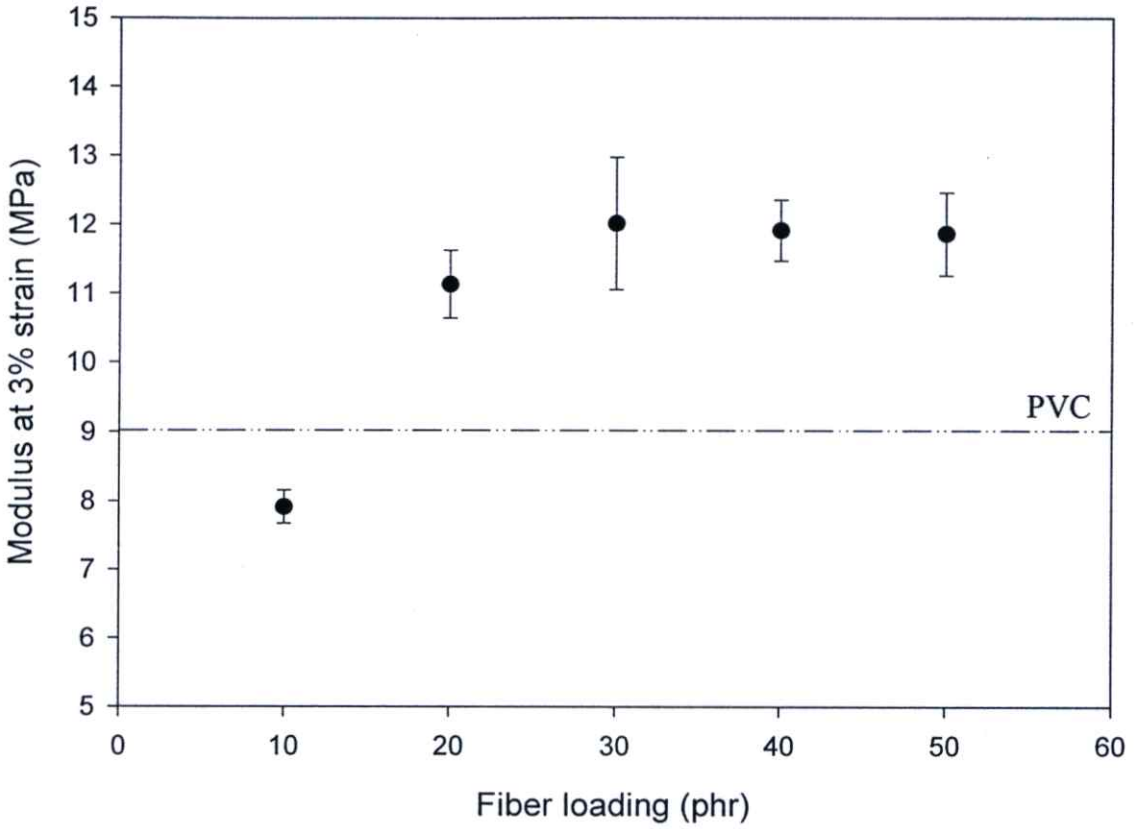
ตารางที่ 4.2 สมบัติต่างๆ ของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อทำการเพิ่มปริมาณไม้ลงไป

	PVC	PVC + เส้นใย 10 phr	PVC + เส้นใย 20 phr	PVC + เส้นใย 30phr	PVC + เส้นใย 40phr	PVC + เส้นใย 50phr
ความแข็งแรงดึง (MPa)	30.31	28.44	29.34	29.72	26.29	26.49
มอดุลัสที่ 3 % การยืด (MPa)	9.09	7.91	11.12	12.01	11.91	11.87
เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (%)	6.89	5.83	5.67	4.44	4.22	3.81
ความแข็งแรงกระแทก (kJ/m^2)	2.80	2.74	2.82	2.87	2.90	2.60
ความแข็งกด (Shore D)	65.0	65.0	65.5	66.5	66.5	66.5
ความหนาแน่น (g/cm^3)	1.30	1.30	1.30	1.29	1.30	1.29
HDT (องศาเซลเซียส)	45.0	45.6	46.6	47.3	47.5	48.8
ความแข็งแรงโค้งงอ (MPa)	43.77	37.92	44.39	46.42	45.63	43.14
มอดุลัสโค้งงอ (MPa)	122.23	98.26	109.54	164.68	158.15	151.60

ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) และค่ามอดุลัส (Tensile modulus) ของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อทำการเพิ่มปริมาณเส้นใยไม้ (TMP) ลงไปแสดงดังรูปที่ 4.1 และรูปที่ 4.2 โดยผลการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยไม้มากขึ้น (ปริมาณเส้นใยไม้ 10-30 phr) ทำให้ค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดุลัสมีค่าเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะว่าเส้นใยไม้ที่เติมลงไป ทำหน้าที่ช่วยเสริมแรงให้แก่พีวีซีคอมโพสิต ทำให้พีวีซีคอมโพสิตสามารถรับแรงดึงได้มากขึ้น ค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดุลัสจึงมีค่ามากขึ้น แต่ปริมาณเส้นใยไม้ที่มากเกินไป (ปริมาณเส้นใยไม้ 40-50 phr) การกระจายตัวของเส้นใยไม้กระจายตัวได้ไม่ดี เกิดการจับตัวกันเองเป็นกลุ่มก้อนของเส้นใยไม้ พีวีซีหลอมละลายจึงไม่สามารถแทรกตัวเข้าไประหว่างเส้นใยไม้ได้ อีกทั้งการที่มีปริมาณเส้นใยไม้มากเกินไปทำให้เกิดช่องว่างภายในชิ้นงาน จึงทำให้ค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดุลัสมีค่าลดลง จากกราฟที่ 4.1 และ 4.2 พบว่า ปริมาณเส้นใยไม้ที่เติมลงไปแล้วทำให้ค่าความแข็งแรงดึงและค่า มอดุลัสสูงสุดคือ 30 phr

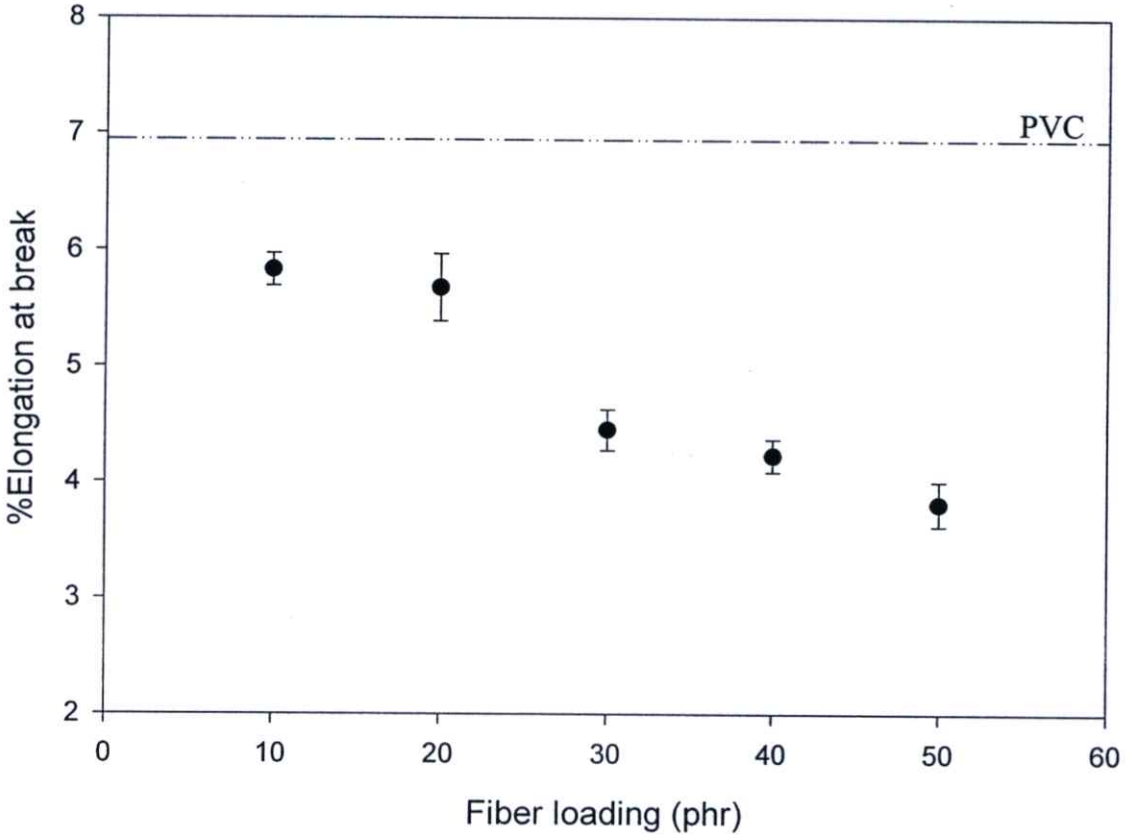


รูปที่ 4.1 ค่าความแข็งแรงดึงของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อทำการเพิ่มปริมาณเส้นใยไม้ (TMP) ในปริมาณ 10 20 30 40 และ 50 phr



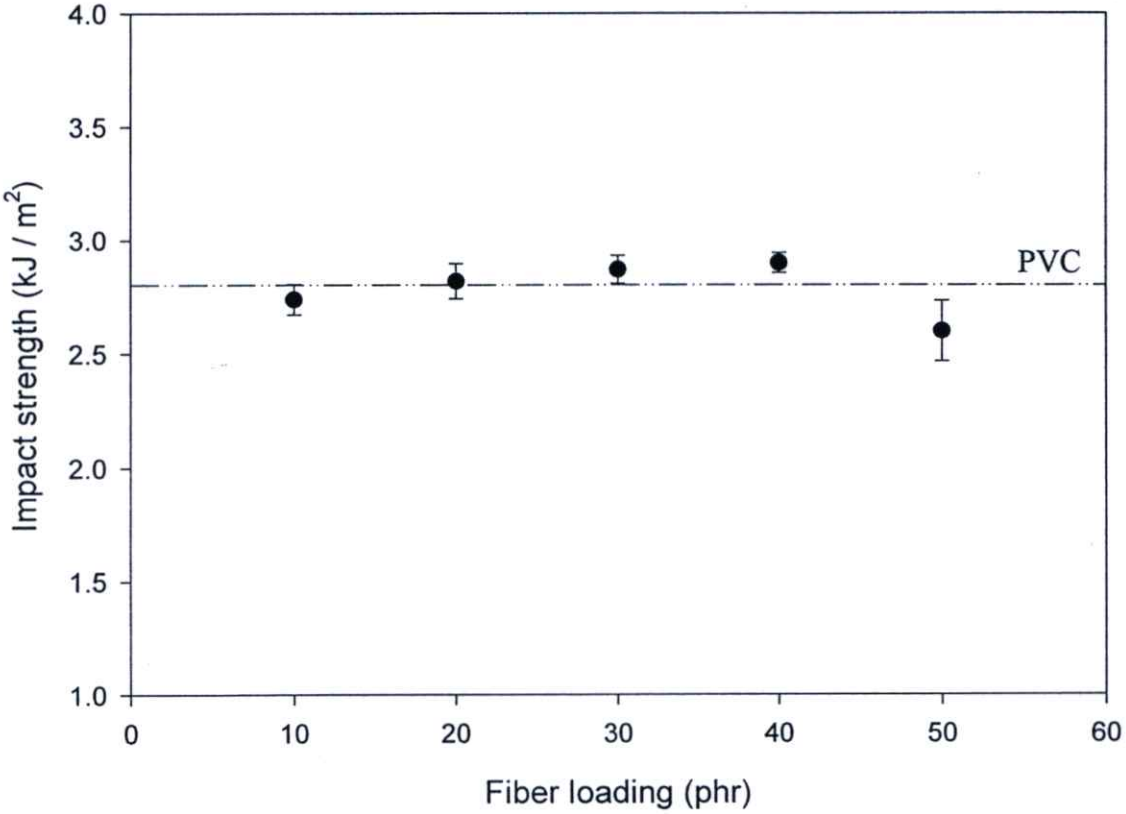
รูปที่ 4.2 ค่ามอดุลัสของพีวีซีคอมโพสิต เมื่อทำการเพิ่มปริมาณเส้นใยไม้ (TMP) ในปริมาณ 10 20 30 40 และ 50 phr

ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break) ของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อทำการเพิ่มปริมาณไม้ (TMP) ลงไปแสดงดังรูปที่ 4.3 โดยจากกราฟพบว่า เมื่อปริมาณเส้นใยไม้เพิ่มขึ้น ทำให้เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดลดลง ทั้งนี้เมื่อพิจารณาโครงสร้างของพีวีซี พบว่าพีวีซีมีสายโซ่หลักเป็นลักษณะเส้นตรง เมื่อให้แรงดึงสามารถยืดได้ดี พีวีซีเมื่อยังไม่ได้เติมเส้นใยไม้จึงมีค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดสูง แต่เมื่อมีการเติมเส้นใยไม้ลงไปในพีวีซี จะทำให้พีวีซีคอมโพสิตยืดได้น้อยลง ทั้งนี้เป็นเพราะว่า เส้นใยไม้เป็นวัสดุที่มีความแข็ง ไม่สามารถยืดหรือดึงได้ อีกทั้งเส้นใยไม้จะไปขัดขวางสายโซ่ของพีวีซี ทำให้พีวีซียืดได้น้อยลง เพราะฉะนั้น ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดของไม้เทียมที่ได้จึงลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยไม้เพิ่มมากขึ้น



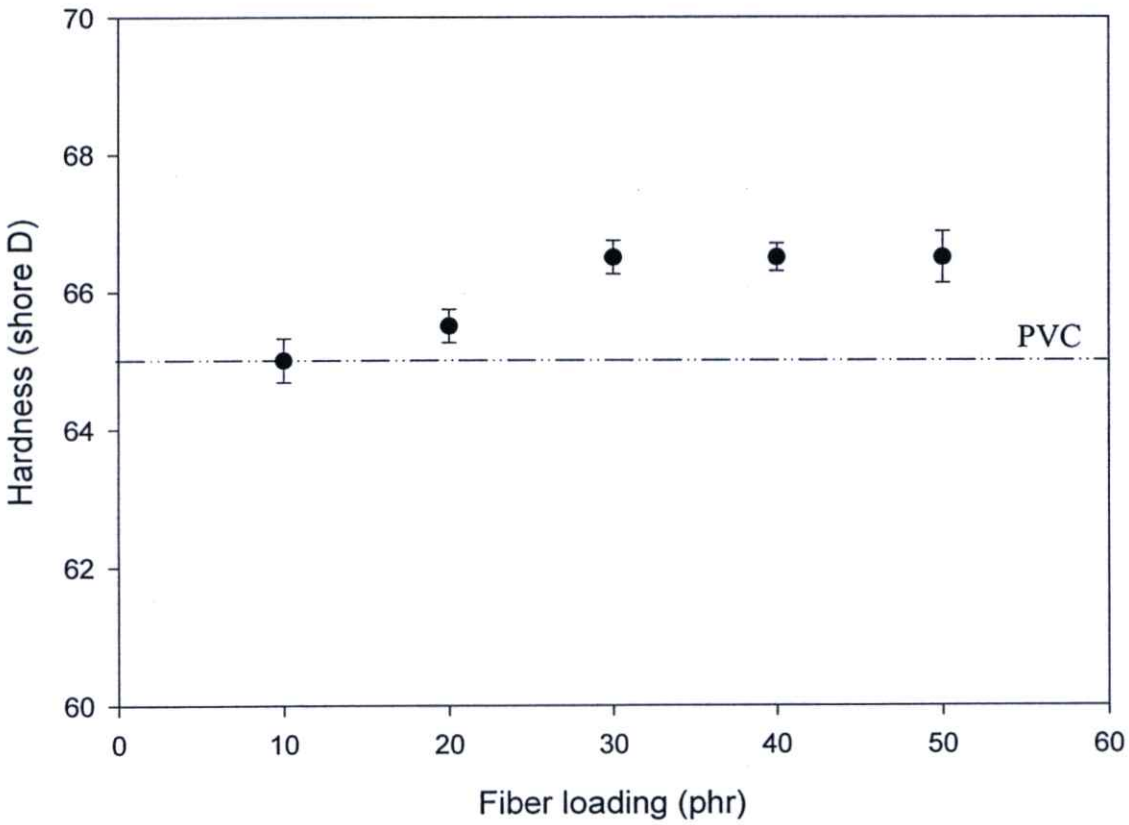
รูปที่ 4.3 ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด ของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อทำการเพิ่มปริมาณเส้นใยไม้ (TMP) ในปริมาณ 10 20 30 40 และ 50 phr

ค่าความแข็งแรงกระแทก (Impact strength) ของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อทำการเพิ่มปริมาณเส้นใยไม้ (TMP) ลงไปแสดงดังรูปที่ 4.4 โดยจากผลการทดลองพบว่า ค่าความแข็งแรงกระแทกเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยไม้ (10-40 phr) ทั้งนี้เนื่องจาก เส้นใยไม้สามารถช่วยรับแรงได้ดี เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยไม้ลงไป ไม้เทียมคอมโพสิตจึงสามารถทนแรงกระแทกได้ดีขึ้น แต่เมื่อเส้นใยไม้มีปริมาณมากเกินไป (ที่ 50 phr) พบว่าเส้นใยไม่สามารถกระจายตัวในพีวีซีได้ดี จึงเกิดช่องว่างระหว่างเส้นใย เมื่อพีวีซีคอมโพสิตได้รับแรงกระแทก พีวีซีคอมโพสิตจะรับแรงกระแทกได้น้อยลง ค่าความแข็งแรงกระแทกจึงมีค่าลดลง



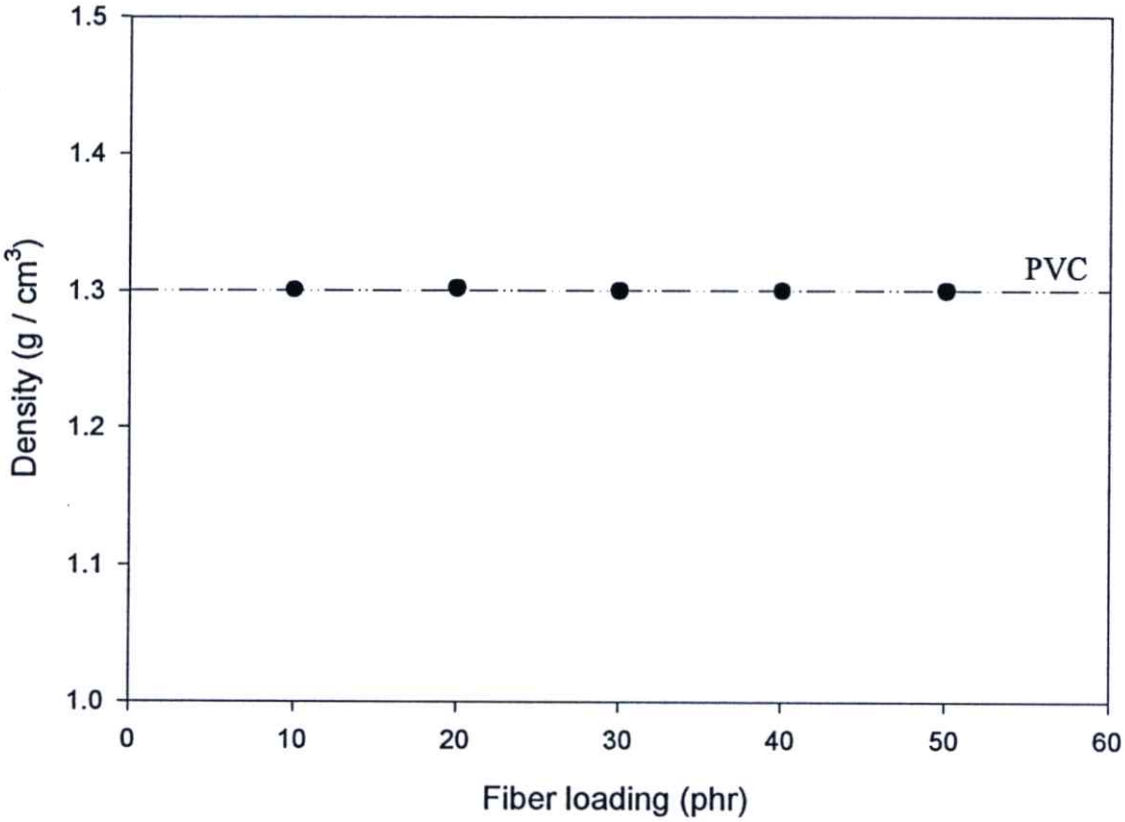
รูปที่ 4.4 ค่าความแข็งแรงกระแทกของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อทำการเพิ่มปริมาณเส้นใยไม้ (TMP) ในปริมาณ 10 20 30 40 และ 50 phr

รูปที่ 4.5 แสดงค่าความแข็งกด (Hardness) ของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อทำการเพิ่มปริมาณเส้นใยไม้ (TMP) ลงไป โดยผลการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณไม้ลงไปในพีวีซีคอมโพสิต ทำให้สมบัติความแข็งกดมีค่าเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากว่าเส้นใยไม้จัดเป็นวัสดุที่มีความแข็ง มีค่าความแข็งแรงกดสูง แต่พีวีซีเป็นพอลิเมอร์ที่มีความนิ่ม รับแรงกดได้น้อย ค่าความแข็งกดจึงไม่มากเมื่อเทียบกับเส้นใยไม้ เพราะฉะนั้นเมื่อเติมเส้นใยไม้ลงไปในพีวีซี เส้นใยไม้ที่เติมลงไปสามารถช่วยให้ความแข็งของวัสดุโดยรวมมีค่ามากขึ้น ส่งผลให้พีวีซีคอมโพสิตสามารถรับกดได้ดีขึ้น ค่าความแข็งกดจึงสูงขึ้น



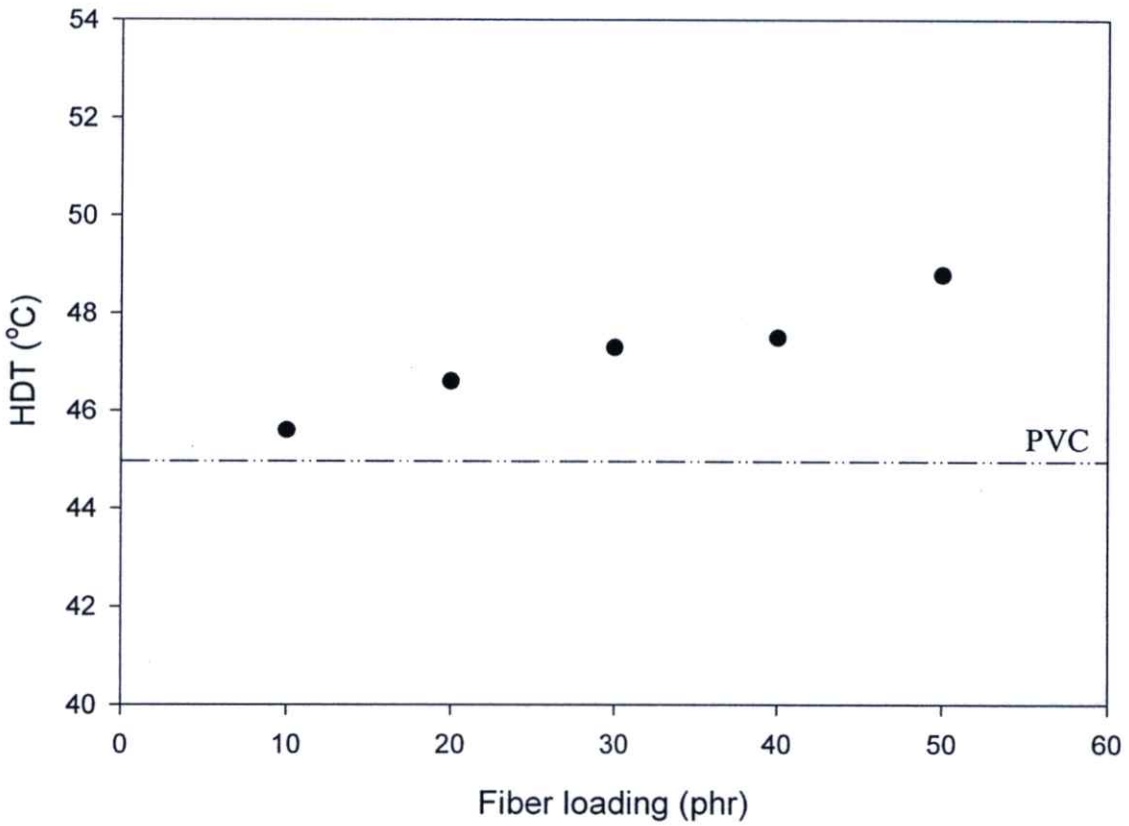
รูปที่ 4.5 ค่าความแข็งกดของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อทำการเพิ่มปริมาณเส้นใยไม้ (TMP) ในปริมาณ 10 20 30 40 และ 50 phr

ค่าความหนาแน่น (Density) ของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อทำการเพิ่มปริมาณเส้นใยไม้ (TMP) ลงไป แสดงดังรูปที่ 4.6 โดยจากผลการทดลองพบว่า ปริมาณเส้นใยไม้ที่เติมลงไป ไม่มีผลทำให้ค่าความหนาแน่นของคอมโพสิตไม่แตกต่างไปจากเดิมมากนัก (เส้นใยไม้โดยทั่วไปมีความหนาแน่นเฉลี่ย 1.5 g/cm^3 [39] และพีวีซีมีความหนาแน่น 1.302 g/cm^3) เพราะฉะนั้นจากการทดลองจึงสามารถสรุปได้ว่าเส้นใยไม้ยูคาลิปตัสน่าจะมีค่าความหนาแน่นใกล้เคียงกับพีวีซี



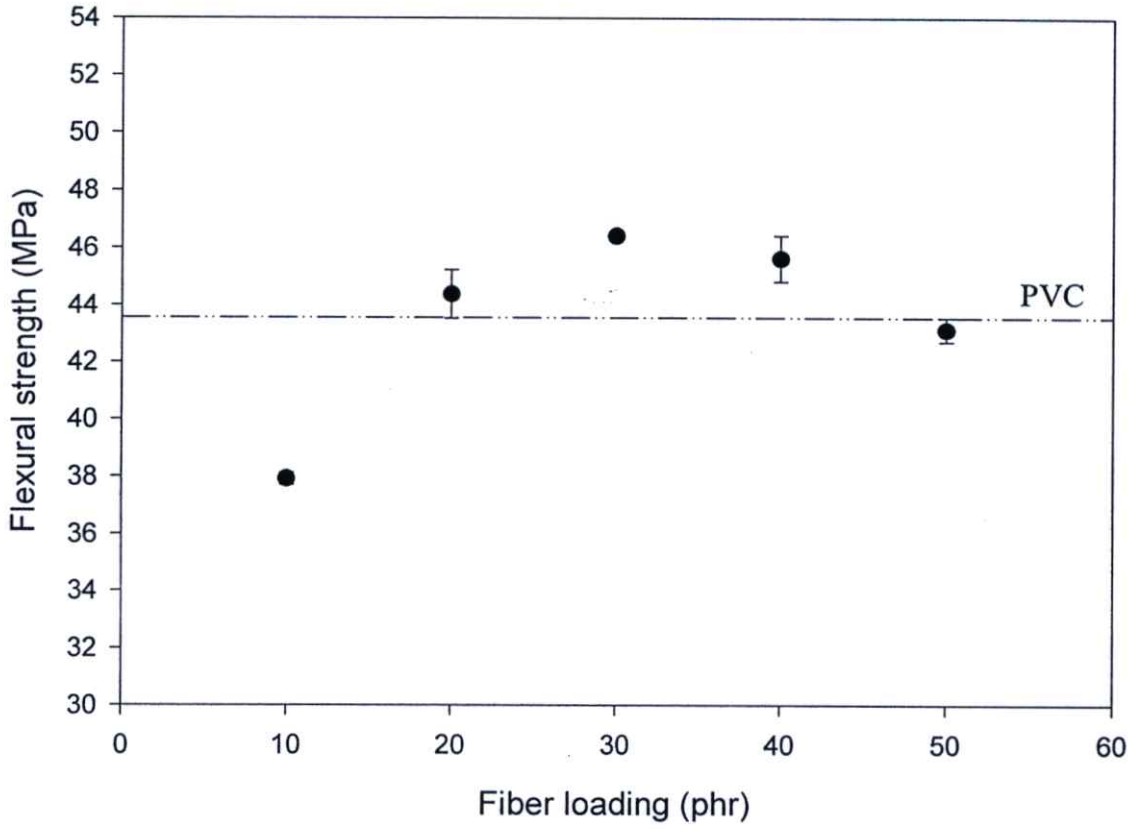
รูปที่ 4.6 ค่าความหนาแน่นของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อทำการเพิ่มปริมาณเส้นใยไม้ (TMP) ในปริมาณ 10 20 30 40 และ 50 phr

ค่า HDT ของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อทำการเพิ่มปริมาณเส้นใยไม้ (TMP) ลงไป โดยผลการทดลองจะเป็นไปดังรูปที่ 4.7 จากกราฟพบว่า ค่า HDT เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยไม้ที่ใส่ลงไปมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากว่า เส้นใยไม้สามารถรับความร้อนได้ดีเมื่อเปรียบเทียบกับพีวีซี เมื่อให้ความร้อนแก่พีวีซีคอมโพสิต เส้นใยไม้จะเป็นตัวช่วยรับความร้อนให้แก่พีวีซี เพราะฉะนั้น ปริมาณไม้ที่เพิ่มมากขึ้นจะทำให้พีวีซีคอมโพสิตสามารถทนต่อความร้อนได้ดีขึ้น อีกทั้งไม้ยังมีความแข็งมากกว่าพีวีซี จึงทำให้พีวีซีคอมโพสิตสามารถรับแรงได้มากขึ้นด้วย

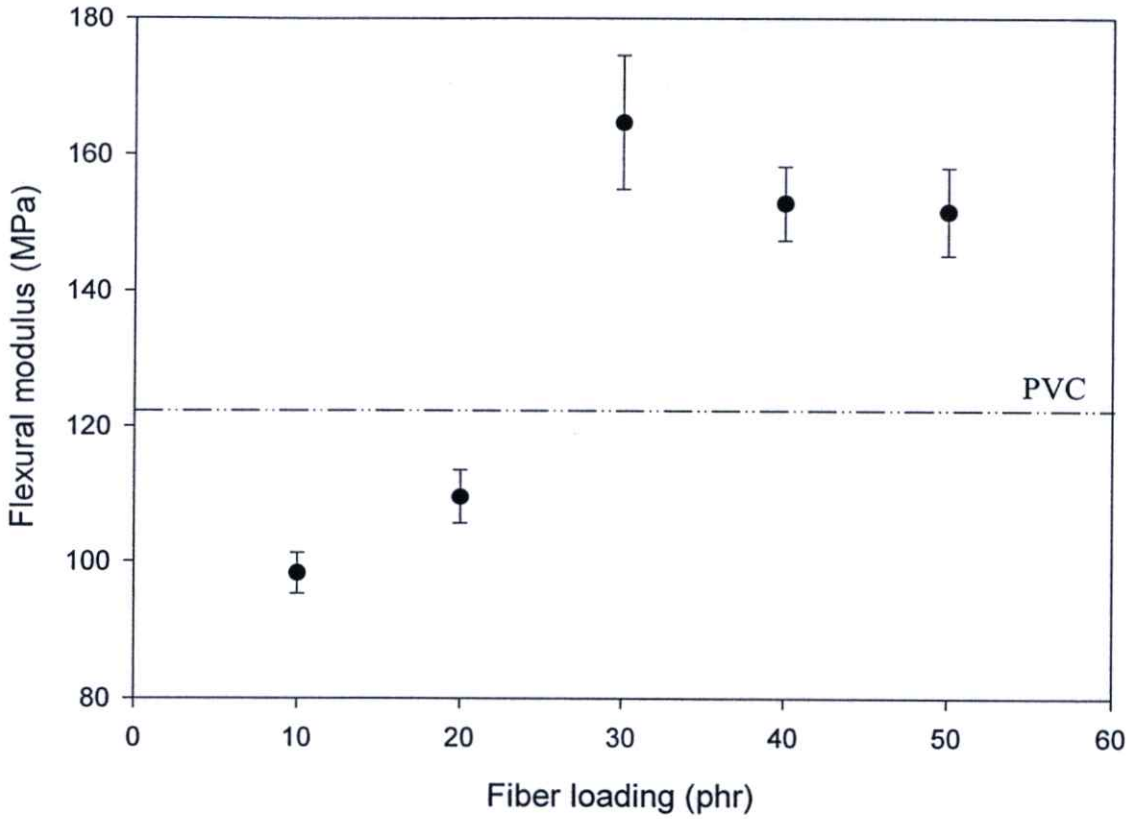


รูปที่ 4.7 ค่า HDT ของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อทำการเพิ่มปริมาณเส้นใยไม้ (TMP) ในปริมาณ 10 20 30 40 และ 50 phr

ค่าความแข็งแรงโค้งงอ (Flexural strength) และค่ามอดุลัสโค้งงอ (Flexural modulus) เป็นการทดสอบหาค่าความแข็งแรงยึดเกาะที่อินเตอร์เฟส (Evaluation of interfacial bonding) ระหว่างพีวีซีและเส้นใยไม้ยูคาลิปตัส โดยแสดงดังรูปที่ 4.8 และ 4.9 จากกราฟพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยไม้ลงไป (10-30 phr) ค่าความแข็งแรงโค้งงอและค่ามอดุลัสโค้งงอ มีค่าเพิ่มมากขึ้น แต่เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยไม้มากเกินไป (40-50 phr) การยึดเกาะที่อินเตอร์เฟสระหว่างพีวีซีและเส้นใยไม้มีค่าลดลง เนื่องมาจาก ปริมาณไม้ที่เติมในคอมโพสิตมีมากเกินไป ทำให้เส้นใยไม้ยึดติดกับพีวีซีไม่ดี ค่าความแข็งแรงโค้งงอและค่ามอดุลัสโค้งงอ จึงมีค่าลดลง ปริมาณเส้นใยที่เหมาะสมคือ 30 phr เหตุผลนี้ก็สอดคล้องกับผลการทดลองตอนต้นในรูปที่ 4.1 และ 4.2



รูปที่ 4.8 ค่าความแข็งแรงโค้งงอของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อทำการเพิ่มปริมาณเส้นใยไม้ (TMP) ในปริมาณ 10 20 30 40 และ 50 phr



รูปที่ 4.9 ค่ามอดุลัสโค้งงอของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อทำการเพิ่มปริมาณเส้นใยไม้ (TMP) ในปริมาณ 10 20 30 40 และ 50 phr

เมื่อทำการเปรียบเทียบสมบัติของพีวีซีคอมโพสิตกับพีวีซีพบว่า การเติมเส้นใยไม้ลงไปในพีวีซีคอมโพสิต จะส่งผลให้สมบัติบางอย่างมีค่าต่ำเมื่อเทียบกับพีวีซี เช่น ค่าความแข็งแรงดึง และสมบัติอื่นๆ ที่ปริมาณการเติมเส้นใยไม้ต่ำ (10-20 phr) ทั้งนี้สามารถอธิบายได้ว่า เมื่อให้แรงแก่พีวีซีคอมโพสิต จะเกิดความเค้นที่บริเวณรอยต่อระหว่างอินเตอร์เฟสของพีวีซีกับเส้นใยไม้ ส่งผลให้สมบัติเชิงกลบางอย่างลดลง แต่เมื่อพิจารณาการเติมเส้นใยที่ 30 phr พบว่า จะทำให้สมบัติต่างๆ มีค่าที่ดีขึ้น เพราะฉะนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า ปริมาณเส้นใยไม้ที่เหมาะสมในการทำงานวิจัยได้แก่ ปริมาณเส้นใยไม้ที่ 30 phr เพราะฉะนั้นจึงใช้ปริมาณเส้นใยไม้ในพีวีซีคอมโพสิต 30 phr ตลอดงานวิจัย

4.4 การศึกษาขนาดความยาวของเส้นใยไม้ที่เติมในพีวีซีคอมโพสิต

ในการศึกษาหาขนาดความยาวของเส้นใยไม้ที่เหมาะสม ได้ทำการศึกษาเส้นใยไม้ที่มีขนาดความยาวต่างๆ กันดังนี้

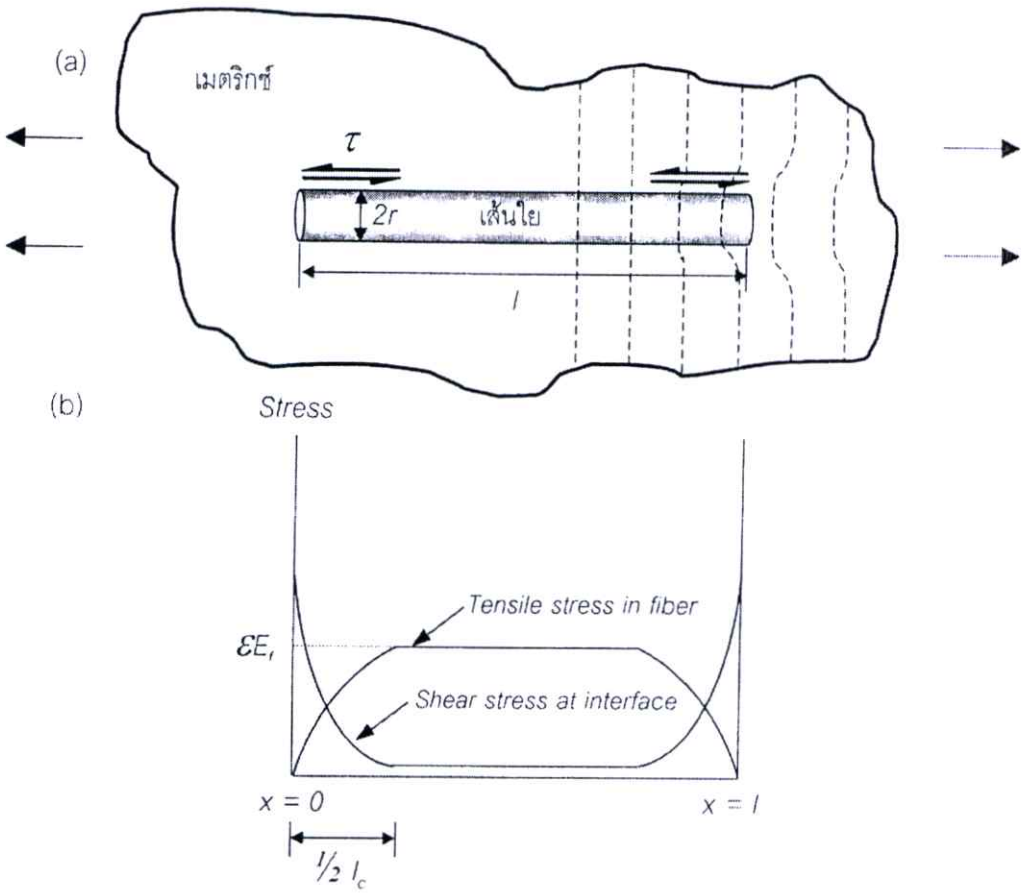
- เส้นใยไม้ที่ไม่ได้ทำการแยกขนาดความยาว
- เส้นใยไม้ขนาดความยาว 20-35 mesh (850-500 micron)
- เส้นใยไม้ขนาดความยาว 35-50 mesh (300-500 micron)
- เส้นใยไม้ขนาดความยาว 50-80 mesh (180-300 micron)
- เส้นใยไม้ขนาดความยาว 80-120 mesh (125-180 micron)
- เส้นใยไม้ขนาดความยาวมากกว่า 120 mesh (น้อยกว่า 125 micron)

และในการทดลองได้ใช้ปริมาณเส้นใยไม้ 30 phr และปริมาณ DOP 10 phr ตลอดการทดลอง โดยผลการทดลองที่ได้เป็นไปตามตารางที่ 4.3 ดังนี้

ตารางที่ 4.3 สมบัติต่างๆ ของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อทำการเปลี่ยนขนาดความยาวเส้นใยไม้

	ไม่แยกขนาด	20-35 mesh	35-50 mesh	50-80 mesh	80-120 mesh	มากกว่า 120 mesh
ความแข็งแรงดึง (MPa)	29.72	31.47	32.28	28.77	26.34	22.12
มอดุลัสที่ 3 % การยืด (MPa)	12.01	13.01	13.27	11.10	10.25	8.80
เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (%)	4.44	4.02	4.06	4.15	3.98	4.01
ความแข็งแรงกระแทก (kJ/m^2)	2.87	2.41	2.78	2.81	2.52	2.58
ความแข็งกด (Shore D)	66.5	66.5	67.0	66.0	66.0	65.5
ความหนาแน่น (g/cm^3)	1.29	1.28	1.29	1.29	1.29	1.28
HDT (องศาเซลเซียส)	47.3	50.1	49.3	48.6	48.9	48.3
ความแข็งแรงโค้งงอ (MPa)	46.42	47.95	47.12	43.29	45.09	32.64
มอดุลัสโค้งงอ (MPa)	164.68	159.61	149.51	126.19	112.06	103.10

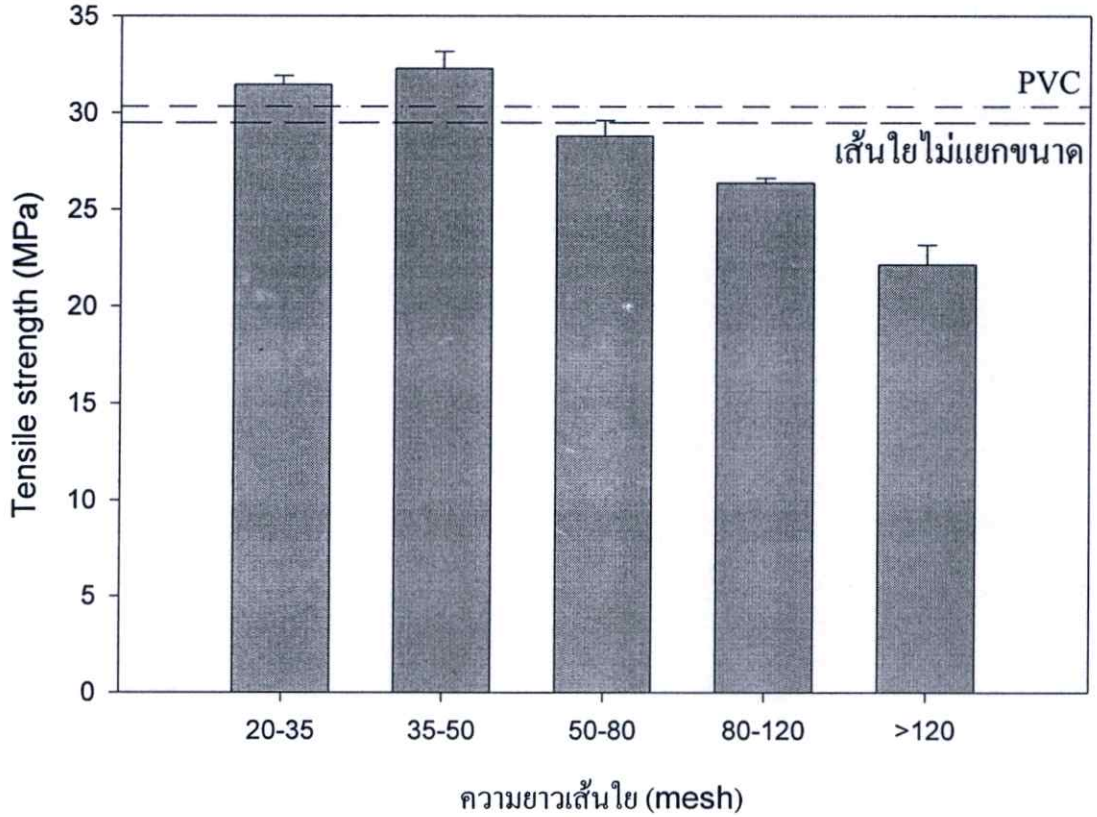
รูปที่ 4.11 และรูปที่ 4.12 แสดงค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) และค่ามอดุลัส (Tensile modulus) ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP 30 phr เมื่อทำการเปลี่ยนขนาดความยาวเส้นใยไม้ พบว่าขนาดความยาวของเส้นใยที่เปลี่ยนไป ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดุลัสมีค่าเปลี่ยนแปลงไป โดยเส้นใยที่มีความยาวมาก (20-35 mesh และ 35-50 mesh) ให้ค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดุลัสที่สูง แต่เมื่อขนาดของเส้นใยสั้นลง ค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดุลัสจะลดลง ทั้งนี้สามารถอธิบายได้จากค่าความยาววิกฤต (Critical length; l_c) [2,40] กล่าวคือการที่วัสดุสามารถรับแรงได้สูงสุด เส้นใยจะต้องมีความยาวมากกว่าค่าความยาววิกฤตดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 (a) การเปลี่ยนแปลงของแรงต่างๆ รอบเส้นใยสั้นฝังอยู่ในเมตริกซ์เมื่อได้รับแรงจากภายนอก
(b) แรงต่างๆ ที่เกิดในเส้นใย

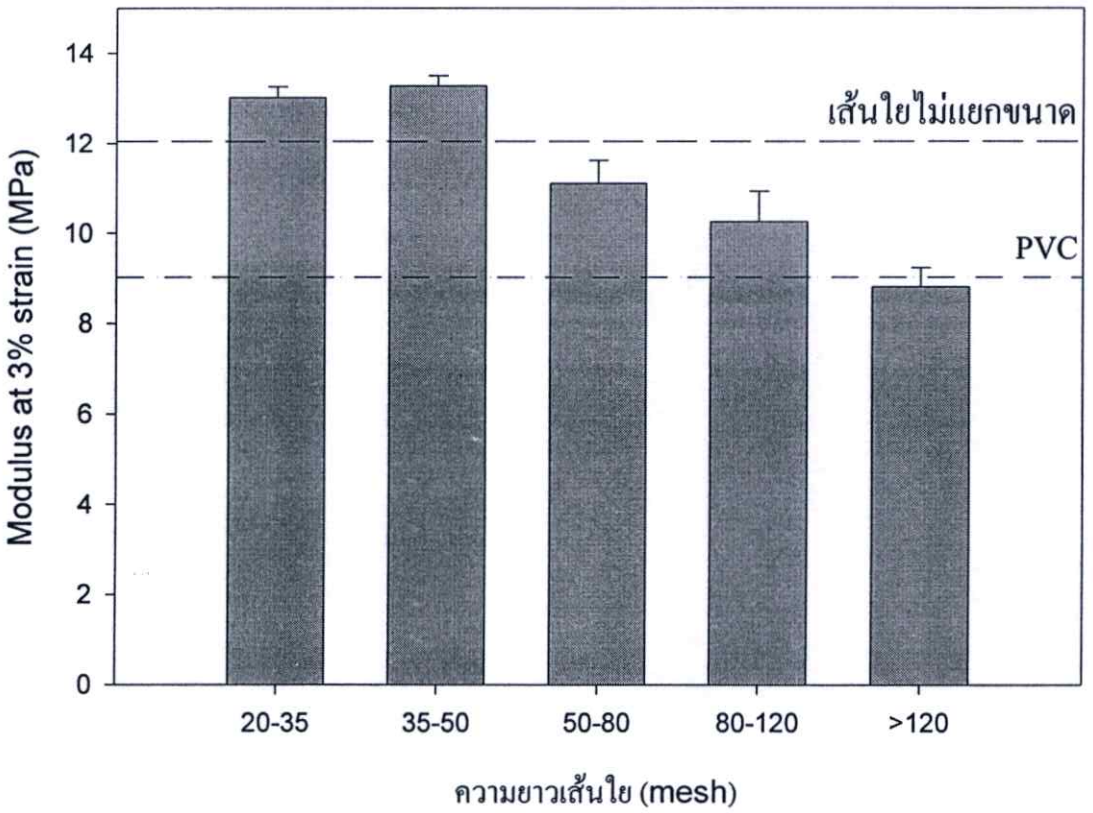
เมื่อพิจารณาดูรูปที่ 4.10 (a) พบว่า แรงที่คอมโพสิตได้รับจากภายนอกจะถูกถ่ายเทจากเมตริกซ์ข้ามรอยต่อระหว่างเฟส (Interface) ไปสู่ส่วนปลายของเส้นใย (Fiber ends) เพราะฉะนั้นจึงส่งผลให้ความเค้นเฉือนมีค่าสูงสุดที่บริเวณปลายเส้นใย และมีค่าลดลงจนเกือบศูนย์บริเวณกลางเส้นใยดังรูปที่ 4.10 (b) แสดงให้เห็นว่าบริเวณปลายของเส้นใยไม่สามารถช่วยรับแรง ส่วนที่ช่วยรับแรงจะอยู่บริเวณกลางเส้นใย เส้นใยยาวทำหน้าที่เป็นสารตัวเติมประเภทเสริมแรง (Reinforcing filler) ให้แก่พีวีซีคอมโพสิต เพราะเส้นใยยาวมีบริเวณกลางเส้นใยมาก จึงช่วยรับแรงได้มาก แต่เส้นใยสั้นมีบริเวณกลางเส้นใยน้อยลง จึงส่งผลทำให้เส้นใยรับแรงได้ไม่ดี เพราะฉะนั้นจึงกล่าวได้ว่าประสิทธิภาพการเสริมแรงจะลดลงเมื่อความยาวของเส้นใยน้อยลง

เส้นใยที่มีความยาวทำหน้าที่เป็นสารตัวเติมประเภทเสริมแรง (Reinforcing filler) ให้แก่พีวีซีคอมโพสิต เมื่อมีแรงมากระทำต่อพีวีซีคอมโพสิต เส้นใยที่ยาวสามารถช่วยรับแรง ทำให้พีวีซีคอมโพสิตนั้นสามารถรับแรงดึงได้มากขึ้น มีความแข็งแรงสูงขึ้น แต่เส้นใยที่มีขนาดสั้นทำหน้าที่เป็นเพียงสารตัวเติมไม่สามารถช่วยในการเสริมแรงได้ (Non-reinforcing filler)



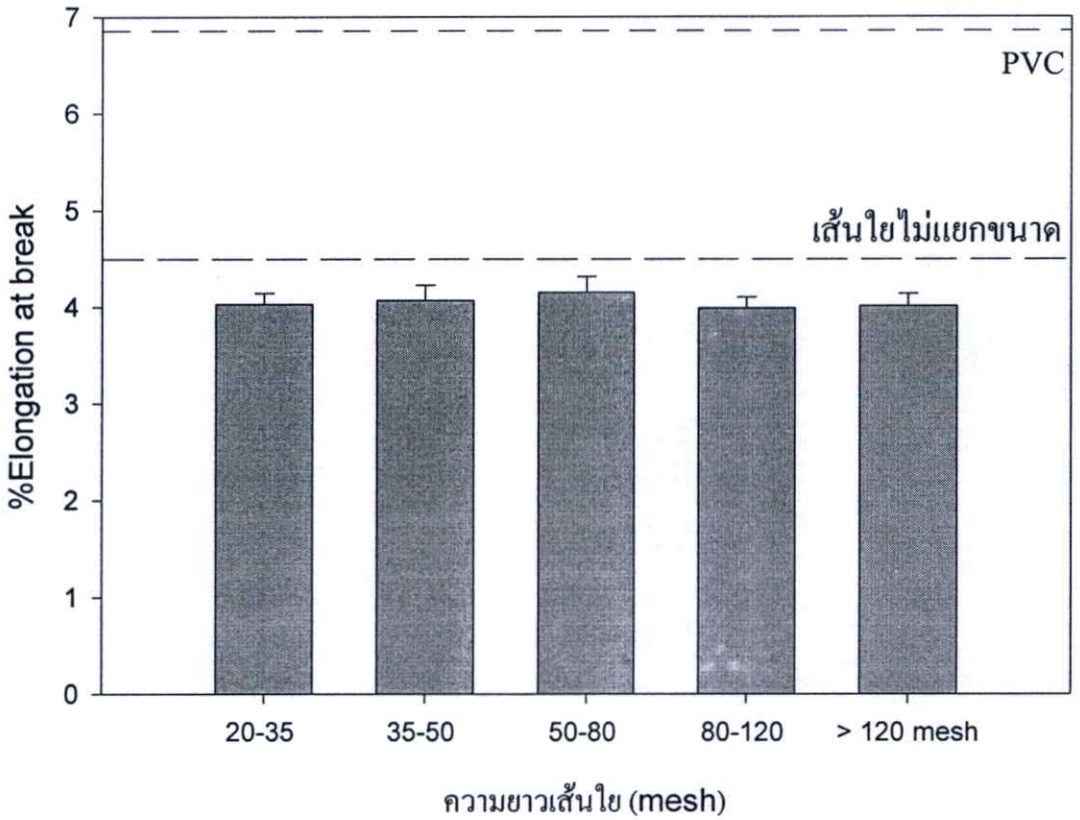
รูปที่ 4.11 ค่าความแข็งแรงดึงของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP ในปริมาณ 30 phr เมื่อทำการเปลี่ยนขนาดเส้นใยไม้ 20-35 mesh 35-50 mesh 50-80 mesh 80-120 mesh และมากกว่า 120 mesh

เพราะฉะนั้นไม้เทียมคอมโพสิตที่ใส่เส้นใยไม้ที่มีความยาวมากจึงมีค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดุลัสสูงกว่าไม้เทียมคอมโพสิตที่ใส่เส้นใยที่มีความยาวน้อยกว่า และเส้นใยไม้ที่ยาวเกินไป (20-35 mesh) จะทำให้ค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดุลัสลดลงเล็กน้อย ทั้งนี้อาจเนื่องมากจากเส้นใยไม้ที่ยาวเกินไป ทำให้การกระจายตัวของเส้นใยไม่ดี การผสมจึงเกิดได้ยาก จึงทำให้สมบัติดังกล่าวลดลงเล็กน้อย



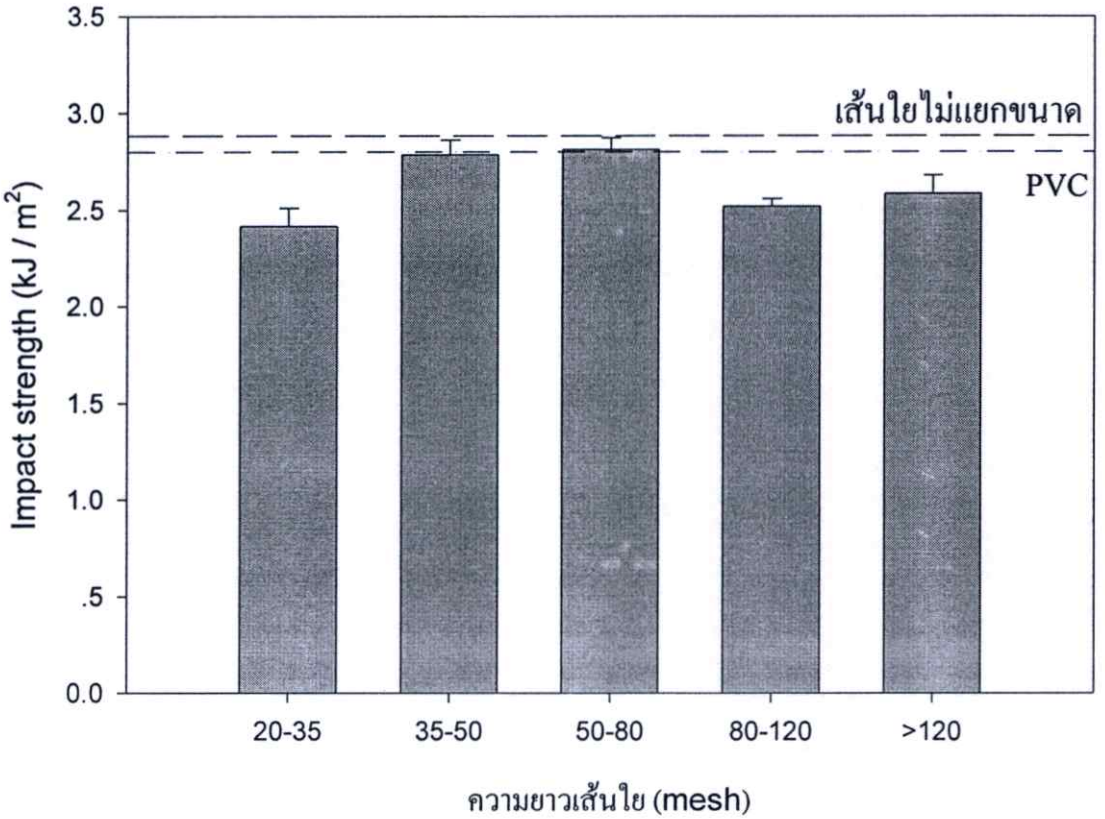
รูปที่ 4.12 ค่ามอดุลัสของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP ในปริมาณ 30 phr เมื่อทำการเปลี่ยนขนาดเส้นใยไม้ 20-35 mesh 35-50 mesh 50-80 mesh 80-120 mesh และมากกว่า 120 mesh

รูปที่ 4.13 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break) ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP 30 phr เมื่อทำการเปลี่ยนขนาดความยาวเส้นใยไม้ โดยจากผลการทดลองพบว่า ขนาดของเส้นใยไม้ที่เติมลงไปไม่มีผลต่อค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดทั้งนี้เป็นเพราะว่า ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดมีผลโดยตรงกับปริมาณเส้นใยไม้ที่เติมลงไป โดยเส้นใยไม้ที่ใส่ลงไป มีปริมาณเท่ากันตลอดการทดลอง (30 phr) เพราะฉะนั้นค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดจึงมีค่าไม่แตกต่างกัน



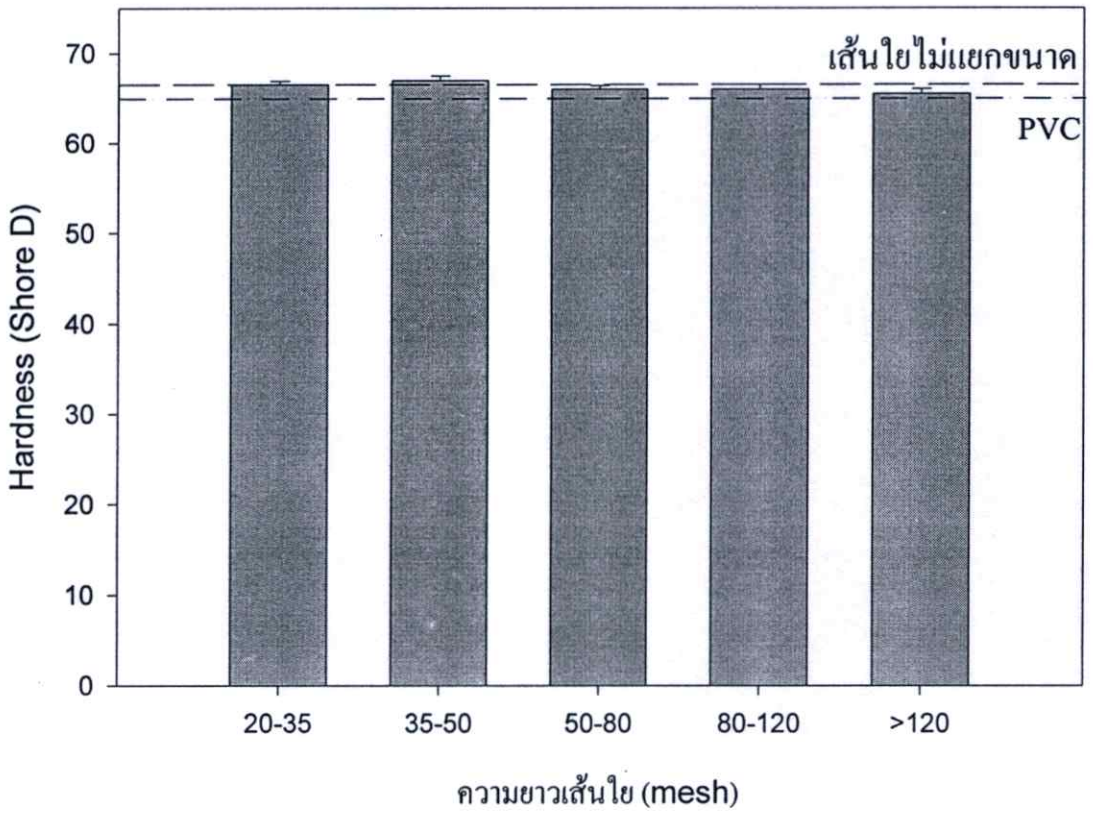
รูปที่ 4.13 ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP ในปริมาณ 30 phr เมื่อทำการเปลี่ยนขนาดเส้นใยไม้ 20-35 mesh 35-50 mesh 50-80 mesh 80-120 mesh และมากกว่า 120 mesh

ค่าความแข็งแรงกระแทก (Impact strength) ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP 30 phr เมื่อทำการเปลี่ยนขนาดความยาวเส้นใยไม้ แสดงดังรูปที่ 4.14 โดยจากผลการทดลองพบว่า ขนาดของเส้นใยไม้ที่ทำให้ความแข็งแรงกระแทกดีที่สุดคือ 50-80 mesh (180-300 micron) ทั้งนี้เป็นเพราะว่า ถ้าขนาดของเส้นใยไม้ที่ใส่ลงไปมีขนาดยาวเกินไป (20-35 mesh) การกระจายตัวของเส้นใยไม้ในพีวีซีเกิดขึ้นได้ไม่ดี และอาจเกิดช่องว่างภายในพีวีซีคอมโพสิตได้ พีวีซีคอมโพสิตจึงไม่สามารถรับแรงกระแทกได้ดี แต่ถ้าขนาดของเส้นใยไม้สั้นเกินไป เส้นใยทำหน้าที่เป็นสารตัวเติมเพื่อเพิ่มเนื้อ ไม่ช่วยเสริมแรง จึงทำให้พีวีซีคอมโพสิตรับแรงกระแทกได้ไม่ดี ค่าความแข็งแรงกระแทกจึงลดลง



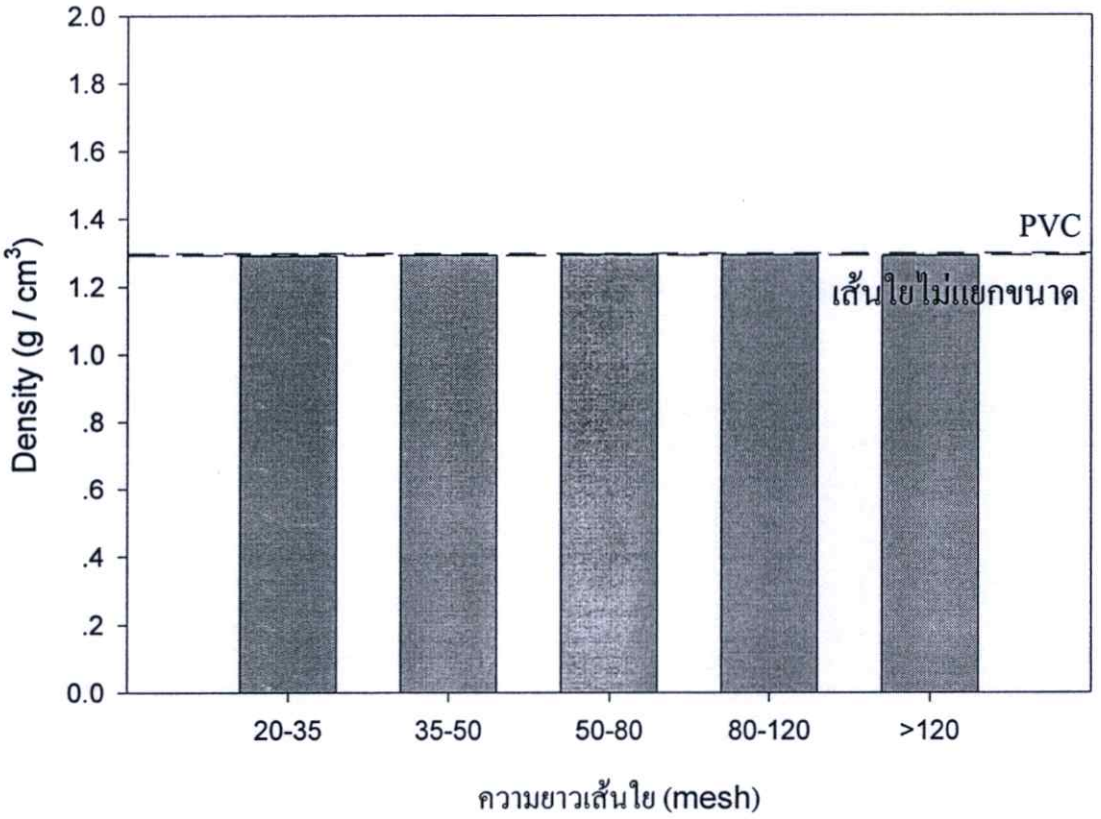
รูปที่ 4.14 ค่าความแข็งแรงกระแทกของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP ในปริมาณ 30 phr เมื่อทำการเปลี่ยนขนาดเส้นใยไม้ 20-35 mesh 35-50 mesh 50-80 mesh 80-120 mesh และมากกว่า 120 mesh

ค่าความแข็งกด (Hardness) ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP 30 phr เมื่อทำการเปลี่ยนขนาดความยาวเส้นใยไม้ แสดงดังรูปที่ 4.15 โดยจากผลการทดลองพบว่า ค่าความแข็งแรงกดมีค่าต่างกันไม่มาก โดยไม้เทียมที่เตรียมจากเส้นใยที่ยาวกว่าจะมีค่าความแข็งกดมากกว่าไม้เทียมที่เตรียมจากเส้นใยสั้นกว่าเล็กน้อย ทั้งนี้สามารถอธิบายได้ว่า เส้นใยไม้ที่มีความยาวสามารถรับแรงและกระจายแรงได้ดีกว่าเส้นใยไม้ที่สั้น เพราะฉะนั้นไม้เทียมที่เตรียมผลิตจากเส้นใยยาวจึงสามารถรับแรงกดได้ดี ค่าความแข็งกดจึงมีค่าที่มากกว่าไม้เทียมที่เตรียมผลิตจากเส้นใยสั้น แต่ก็มากกว่าในปริมาณไม่มากนัก



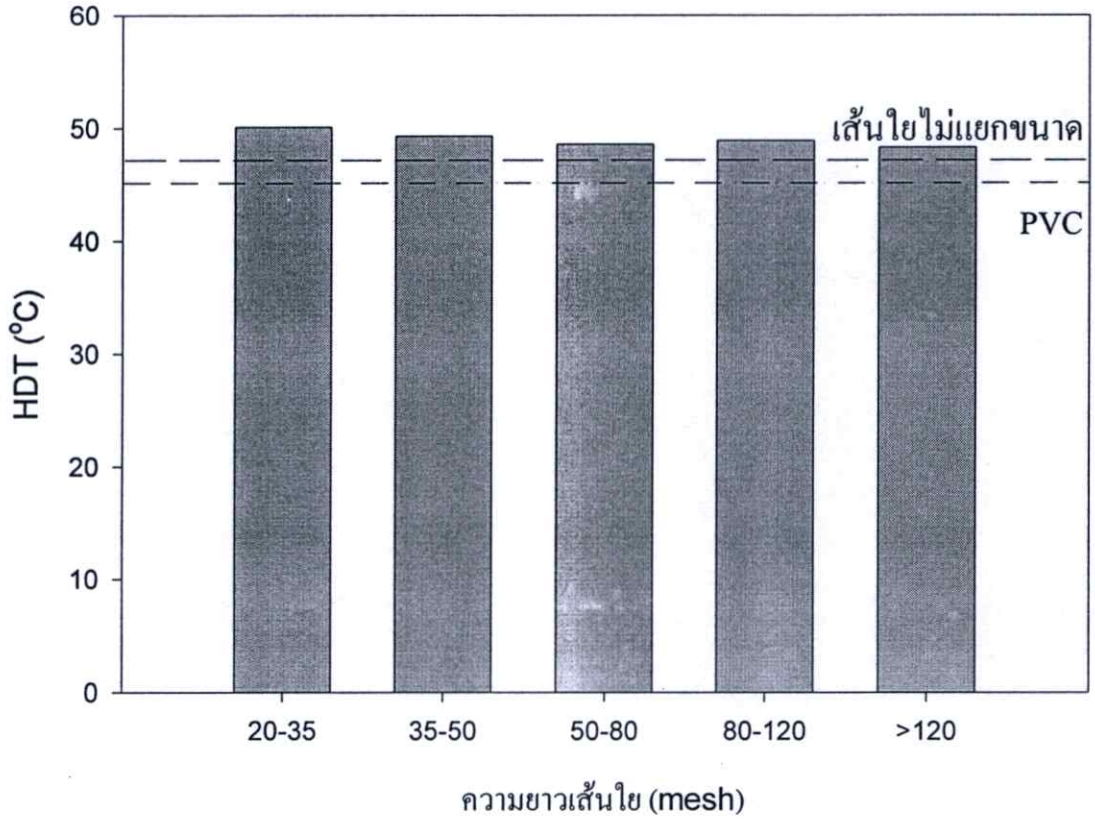
รูปที่ 4.15 แสดงค่าความแข็งกดของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP ในปริมาณ 30 phr เมื่อทำการเปลี่ยนขนาดเส้นใยไม้ 20-35 mesh 35-50 mesh 50-80 mesh 80-120 mesh และมากกว่า 120 mesh

ค่าความหนาแน่น (Density) ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP 30 phr เมื่อทำการเปลี่ยนขนาดความยาวเส้นใยไม้ แสดงดังรูปที่ 4.16 โดยผลการทดลองพบว่า ขนาดความยาวของเส้นใยไม้ที่เปลี่ยนแปลงไป ไม่มีผลต่อค่าความหนาแน่น ทั้งนี้เป็นเพราะว่า เส้นใยไม้มีความหนาแน่นใกล้เคียงกับพีวีซี (ดังผลการทดลองข้างต้นในรูปที่ 4.6) เพราะฉะนั้นเมื่อเปลี่ยนขนาดความยาวของเส้นใยที่ใส่ลงไปจึงไม่มีผลทำให้ความหนาแน่นของพีวีซีคอมโพสิตเปลี่ยนแปลงไป



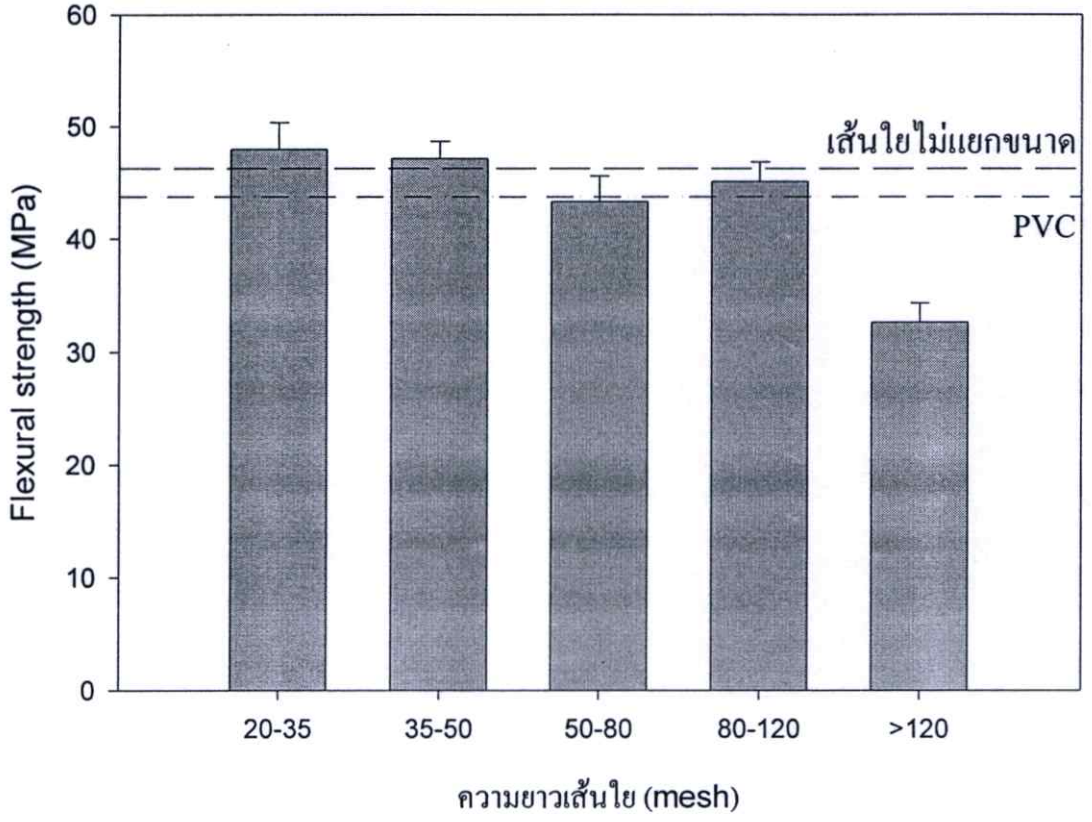
รูปที่ 4.16 ค่าความหนาแน่นของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP ในปริมาณ 30 phr เมื่อทำการเปลี่ยนขนาดเส้นใยไม้ 20-35 mesh 35-50 mesh 50-80 mesh 80-120 mesh และมากกว่า 120 mesh

ค่า HDT ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP 30 phr เมื่อทำการเปลี่ยนขนาดความยาวเส้นใยไม้ แสดงดังรูปที่ 4.17 โดยจากรูปพบว่า ค่า HDT ของพอลิเมอร์คอมโพสิตลดลงเล็กน้อย เมื่อ เส้นใยไม้มีขนาดสั้นลง ทั้งนี้เป็นเพราะว่า ที่น้ำหนักเส้นใยเท่ากัน เส้นใยไม้ที่สั้นมีพื้นที่ผิว (Surface area) มากกว่าเส้นใยที่มีความยาว เพราะฉะนั้นเส้นใยที่มีความสั้นจึงสามารถรับและส่งความร้อนได้ดีกว่าเส้นใยยาว พีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใยสั้น จึงสามารถกระจายความร้อนได้ดีกว่า และทนความร้อนได้ต่ำกว่า ค่า HDT ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใยสั้นจึงมีค่าต่ำกว่า แต่ก็อยู่ในปริมาณเล็กน้อย

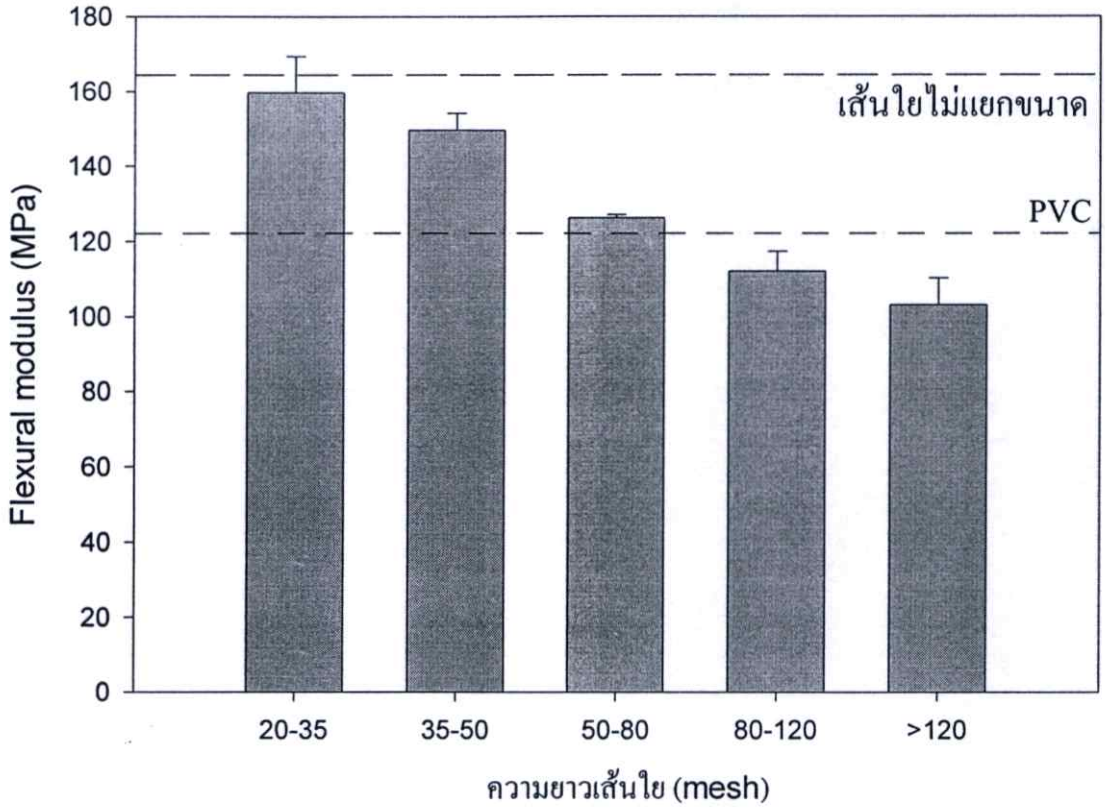


รูปที่ 4.17 ค่า HDT ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP ในปริมาณ 30 phr เมื่อทำการเปลี่ยนขนาด เส้นใยไม้ 20-35 mesh 35-50 mesh 50-80 mesh 80-120 mesh และมากกว่า 120 mesh

ค่าความแข็งแรงโค้งงอ (Flexural strength) และค่ามอดุลัสโค้งงอ (Flexural modulus) ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP 30 phr เมื่อทำการเปลี่ยนขนาดความยาวเส้นใยไม้ แสดงดังรูปที่ 4.18 และ 4.19 โดยจากผลการทดลองพบว่า ค่าความแข็งแรงโค้งงอและค่ามอดุลัสโค้งงอจะเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดเส้นใยไม้มีความยาวมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจาก เส้นใยที่มีความยาวมากกว่า จะมีพื้นที่ผิวสัมผัสที่ต่อเนื่องมากกว่า ส่งผลให้ความแข็งแรงยึดเกาะที่อินเตอร์เฟสระหว่างพีวีซีและเส้นใยไม้มากขึ้น ค่าความแข็งแรงโค้งงอและค่ามอดุลัสโค้งงอของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใยยาวจึงมีมากกว่า ความยาวของเส้นใยที่ให้ค่าความแข็งแรงโค้งงอและค่ามอดุลัสโค้งงอมากที่สุดคือ 20-30 mesh



รูปที่ 4.18 ค่าความแข็งแรงโค้งงอของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP ในปริมาณ 30 phr เมื่อทำการเปลี่ยนขนาดเส้นใยไม้ 20-35 mesh 35-50 mesh 50-80 mesh 80-120 mesh และมากกว่า 120 mesh



รูปที่ 4.19 ค่ามอดุลัสโค้งงอของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP ในปริมาณ 30 phr เมื่อทำการเปลี่ยนขนาดเส้นใยไม้ 20-35 mesh 35-50 mesh 50-80 mesh 80-120 mesh และมากกว่า 120 mesh

จากการศึกษาขนาดของเส้นใยที่เติมลงไปในพีวีซีคอมโพสิต สามารถสรุปได้ว่าเส้นใยไม้ที่เหมาะสมคือเส้นใยที่มีความยาวอยู่ในช่วง 35-50 mesh (300-500 micron) แต่เมื่อทำการเปรียบเทียบสมบัติต่างๆ ระหว่างคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใยที่มีการแยกขนาดในช่วง (20-50 mesh) กับคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใยไม่แยกขนาด พบว่า ให้สมบัติต่างๆ ใกล้เคียงกัน เพราะฉะนั้น ในอุตสาหกรรม และงานวิจัยในช่วงต่อไป จึงควรใช้เส้นใยไม่แยกขนาดในการทำคอมโพสิต เพราะสามารถลดต้นทุนในการแยกเส้นใย อีกทั้งสามารถผลิตไม้เทียมคอมโพสิตได้เร็วขึ้น

4.5 การศึกษาผลของปริมาณพลาสติไซเซอร์ (DOP) ที่เติมในพีวีซีคอมโพสิต

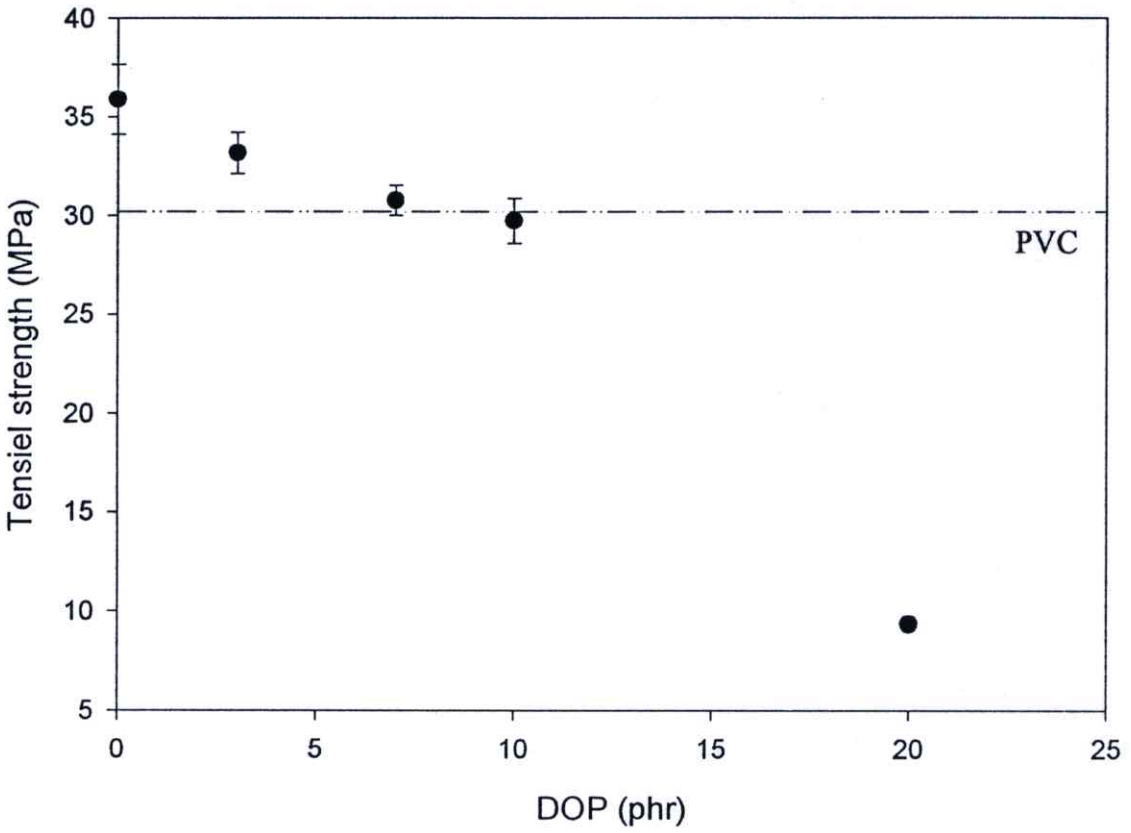
ปริมาณพลาสติไซเซอร์ในพีวีซีเป็นปัจจัยที่สำคัญในการศึกษา เนื่องจากปริมาณพลาสติ-ไซเซอร์มีผลอย่างมากต่อความนิ่มของพีวีซี สามารถปรับปริมาณการใส่พลาสติไซเซอร์เพื่อทำการผลิตผลิตภัณฑ์พีวีซีสูตรแข็ง หรือทำเป็นพีวีซีสูตรนิ่มได้

ในการศึกษาผลของปริมาณพลาสติไซเซอร์ (DOP) ที่เหมาะสมที่สามารถเติมเข้าไปในพีวีซี ได้ศึกษาการเติมปริมาณ DOP ที่ 0 3 7 10 และ 20 phr และใช้ปริมาณเส้นใยไม้ TMP ไม่แยกขนาดในปริมาณ 30 phr ตลอดการทดลอง โดยผลการทดลองที่ได้เป็นไปตาม ตารางที่ 4.4

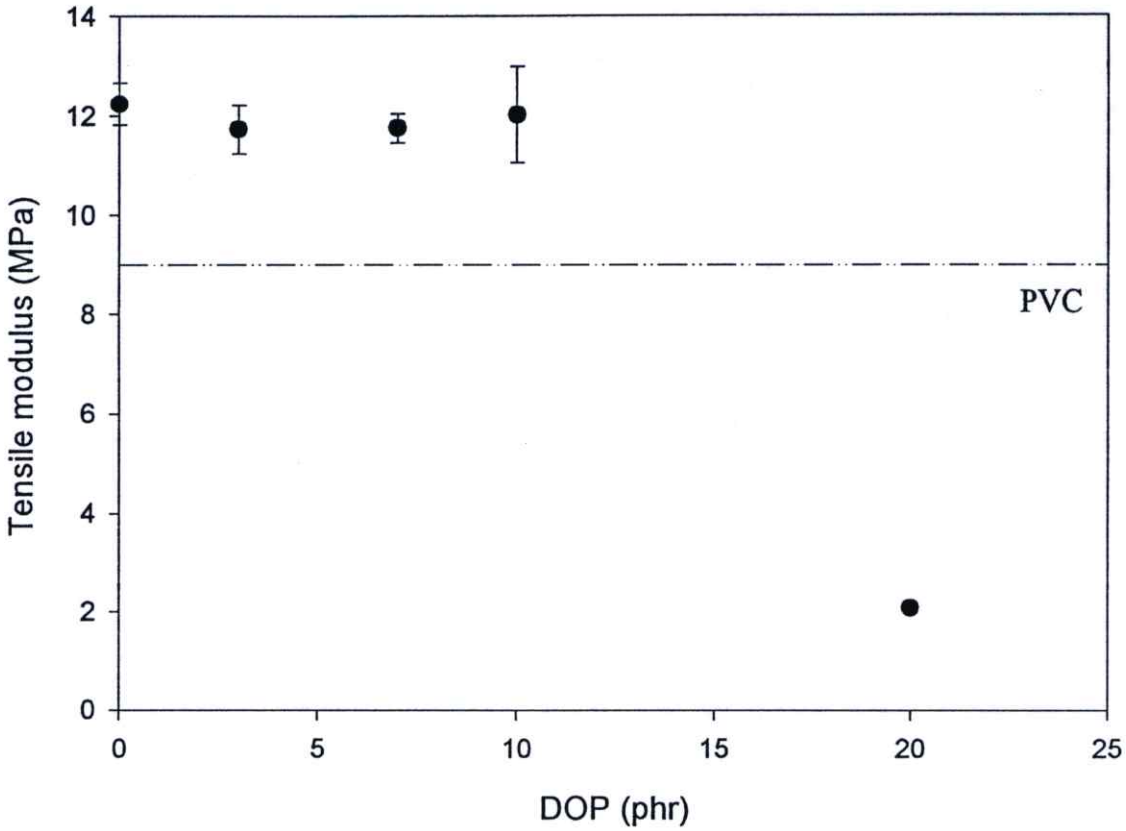
ตารางที่ 4.4 สมบัติต่างๆ ของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณ DOP

	PVC	DOP 0 phr	DOP 3 phr	DOP 7 phr	DOP 10 phr	DOP 20 phr
ความแข็งแรงดึง (MPa)	30.31	35.89	32.16	30.75	29.72	9.34
มอดุลัสที่ 3 % การยืด (MPa)	9.09	12.24	11.72	11.75	12.01	2.06
เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (%)	6.89	3.79	3.93	4.03	4.44	80.37
ความแข็งแรงกระแทก (kJ/m^2)	2.80	2.82	2.81	2.87	2.87	19.01
ความแข็งกด (Shore D)	65.0	70.5	68.0	67.0	66.5	39.0
ความหนาแน่น (g/cm^3)	1.30	1.33	1.32	1.30	1.29	1.23
HDT (องศาเซลเซียส)	45.0	63.7	53.3	52.1	47.3	N / A
ความแข็งแรงโค้งงอ (MPa)	43.77	62.53	52.37	48.21	46.42	10.66
มอดุลัสโค้งงอ (MPa)	122.23	169.56	168.72	166.21	164.68	31.27

ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) และ ค่ามอดุลัส (Tensile modulus) ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP 30 phr เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณ DOP แสดงได้ดังรูปที่ 4.20 และ 4.21 พบว่า ค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดุลัสลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณ DOP ในพีวีซีคอมโพสิต ทั้งนี้เนื่องมาจาก DOP ทำหน้าที่เป็นพลาสติไซเซอร์ เมื่อผสมกับพีวีซีแล้ว DOP จะเข้าไปขยายสายโซ่ของพีวีซี ทำให้สายโซ่ของพีวีซีอยู่ห่างกันมากขึ้น สายโซ่ของพีวีซีจึงสามารถเคลื่อนตัวได้ดี ทำให้พีวีซีอ่อนนุ่มขึ้น มีลักษณะคล้ายยางมากขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการรับแรงของพีวีซีคอมโพสิตลดลง เพราะฉะนั้นค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดุลัสจึงลดลง แต่ถ้าไม่มีการเติม DOP ในพีวีซี พีวีซีคอมโพสิตที่ได้จะความเปราะ ไม่สามารถนำไปใช้งานได้

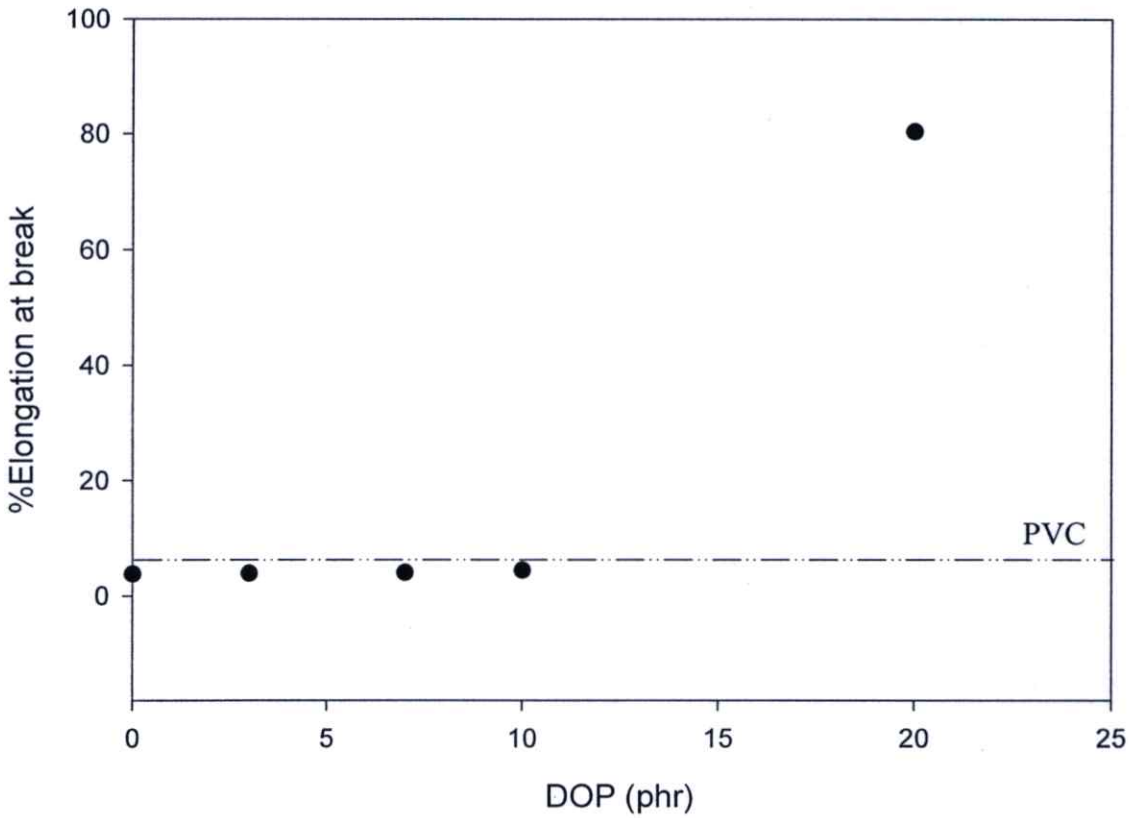


รูปที่ 4.20 ค่าความแข็งแรงดึงของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP โดยไม่มีการแยกขนาด 30 phr เมื่อทำการเพิ่มปริมาณ DOP ลงไปในปริมาณ 0 3 7 10 และ 20 phr



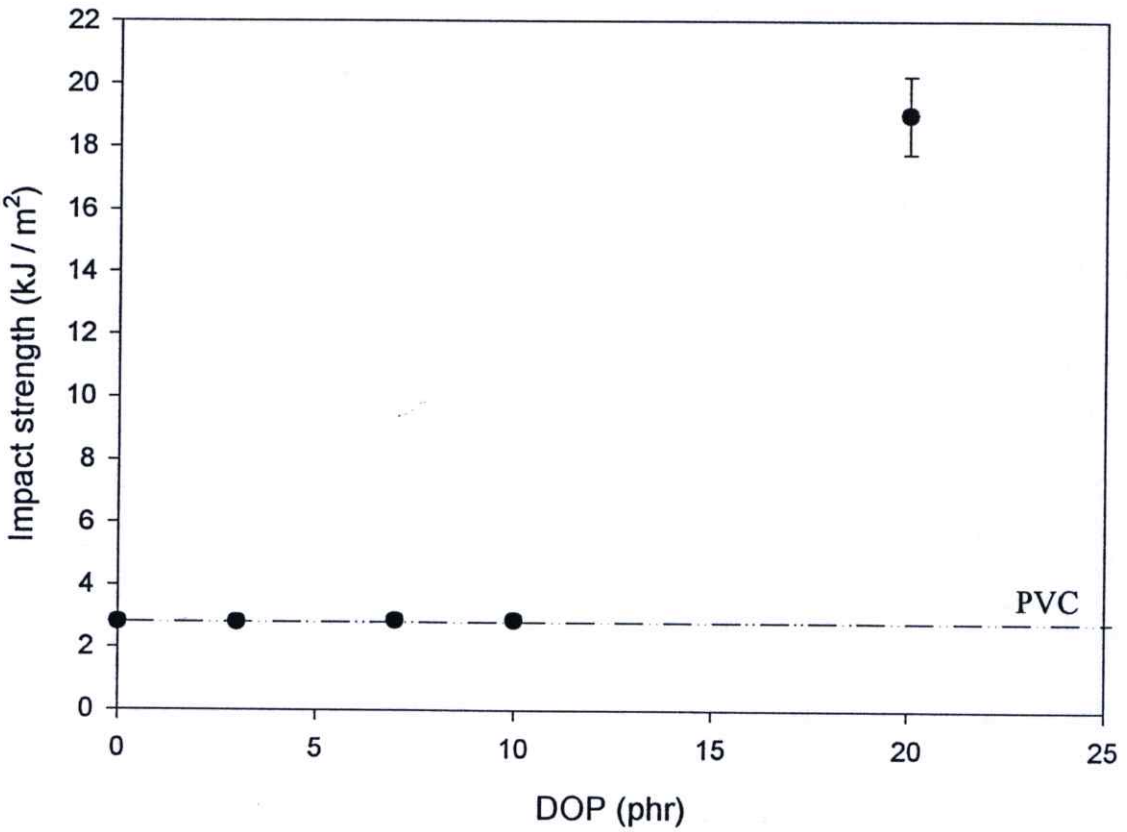
รูปที่ 4.21 ค่ามอดุลัสของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP โดยไม่มีการแยกขนาด 30 phr เมื่อทำการเพิ่มปริมาณ DOP ลงไปในปริมาณ 0 3 7 10 และ 20 phr

ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break) ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP 30 phr เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณ DOP แสดงได้ดังรูป 4.22 พบว่า ปริมาณ DOP ที่เพิ่มขึ้น ทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด เพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะ เมื่อเพิ่มปริมาณ DOP ลงไปในพีวีซี DOP ซึ่งทำหน้าที่เป็นพลาสติไซเซอร์ ทำให้สายโซ่ของพีวีซีสามารถเคลื่อนที่ได้ดีขึ้น เมื่อพีวีซีคอมโพสิตได้รับแรงดึง พีวีซีคอมโพสิตสามารถยืดได้มากขึ้น เพราะฉะนั้นค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด จึงมีค่าเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า ปริมาณ DOP ที่ 20 phr ให้ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดสูงมาก เนื่องมาจากว่า DOP ที่ 20 phr จะทำให้พีวีซีคอมโพสิตมีความนิ่มคล้ายยาง สามารถดึงยืดได้ดี เพราะฉะนั้นอัตราส่วนการผสมจึงไม่เหมาะสมที่จะนำมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ไม้เทียม



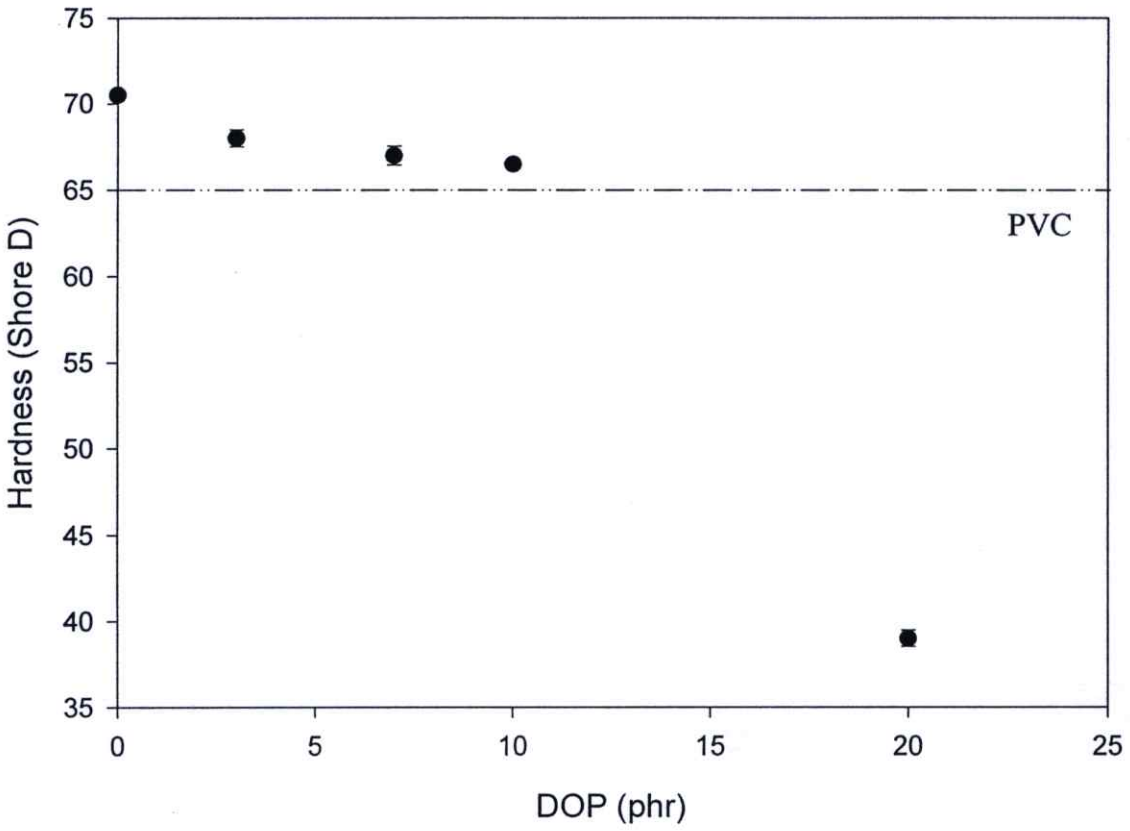
รูปที่ 4.22 ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP 30 phr โดยไม่มีการแยกขนาด เมื่อทำการเพิ่มปริมาณ DOP ลงไปในปริมาณ 0 3 7 10 และ 20 phr

ค่าความแข็งแรงกระแทก (Impact strength) ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP 30 phr เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณ DOP แสดงได้ดังรูปที่ 4.23 โดยจากรูปพบว่า เมื่อปริมาณ DOP เพิ่มมากขึ้นในช่วง 0-10 phr ค่าความแข็งแรงกระแทกจะไม่เปลี่ยนแปลงไปมากนักทั้งนี้เนื่องมาจากปริมาณ DOP ที่ 0-10 phr DOP ทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่นมากกว่า แต่เมื่อเพิ่มปริมาณ DOP เป็น 20 phr พบว่า ค่าความแข็งแรงกระแทกเพิ่มขึ้นอย่างมาก ทั้งนี้สามารถอธิบายได้ว่า คอมโพสิตที่เตรียมจาก DOP ที่ 20 phr จะมีลักษณะนิ่มคล้ายยาง เมื่อคอมโพสิตได้รับแรงกระแทก จึงสามารถรับแรงกระแทกได้มากขึ้น ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงกระแทกมีค่าที่สูงขึ้น



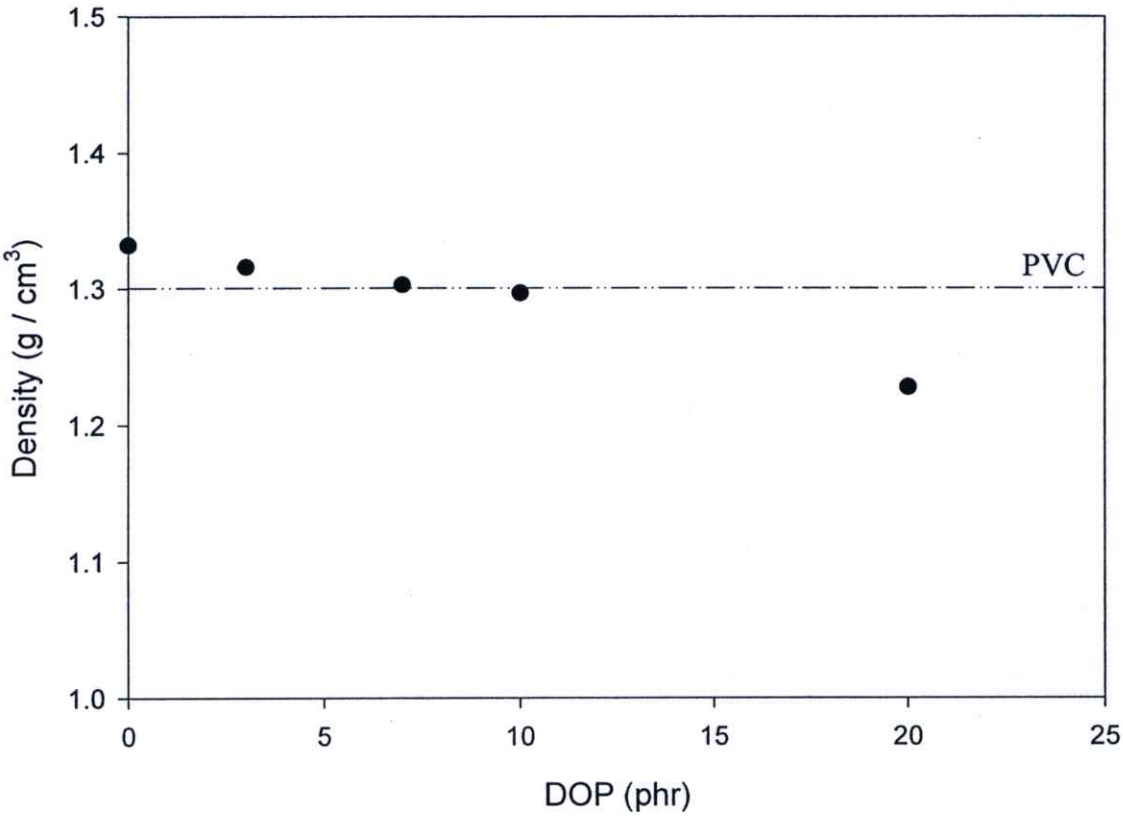
รูปที่ 4.23 ค่าความแข็งแรงกระแทกของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP 30 phr โดยไม่มีการแยกขนาด เมื่อทำการเพิ่มปริมาณ DOP ลงไปในปริมาณ 0 3 7 10 และ 20 phr

ความแข็งกด (Hardness) ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP 30 phr เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณ DOP แสดงได้ดังรูปที่ 4.24 โดยจากผลการทดลอง พบว่า ค่าความแข็งกดของพีวีซีคอมโพสิตมีค่าลดลง เมื่อปริมาณ DOP เพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากว่า DOP ทำหน้าที่ขยายสายโซ่ของพีวีซีให้แยกออกจากกัน ทำให้พีวีซีมีลักษณะนิ่ม คล้ายยางมากขึ้น (โดยเฉพาะที่ปริมาณ DOP 20 phr) เมื่อให้แรงกดลงไปแก่พีวีซีคอมโพสิต พีวีซีคอมโพสิตไม่สามารถต้านทานแรงกดได้ดี รับแรงกดได้น้อย ค่าความแข็งกดจึงมีค่าที่ลดลง



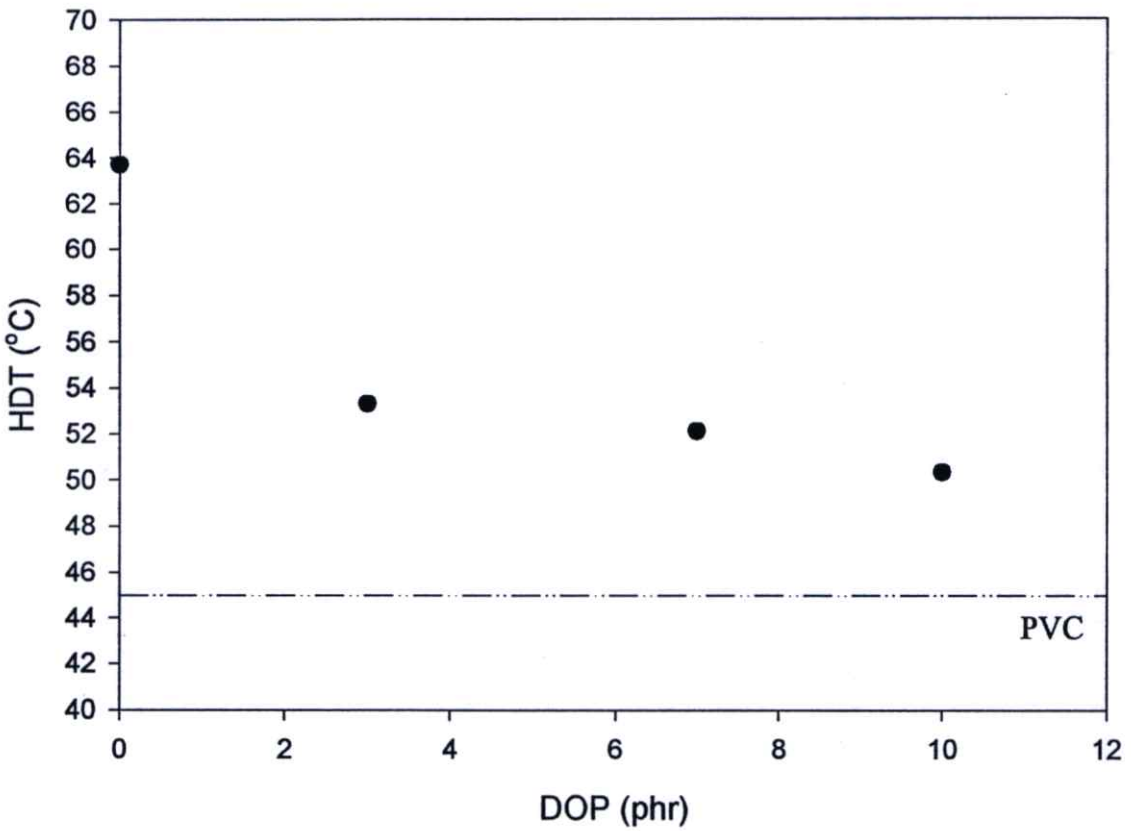
รูปที่ 4.24 ค่าความแข็งกดของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP 30 phr โดยไม่มีการแยกขนาด เมื่อทำการเพิ่มปริมาณ DOP ลงไปในปริมาณ 0 3 7 10 และ 20 phr

ค่าความหนาแน่น (Density) ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP 30 phr เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณ DOP แสดงได้ดังรูปที่ 4.25 โดยจากรูปพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณ DOP ลงไปในพีวีซีคอมโพสิต ทำให้ค่าความหนาแน่นของพีวีซีคอมโพสิตมีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องมาจาก DOP ไปขยายสายโซ่ของพีวีซี ทำให้สายโซ่ของพีวีซีอยู่ห่างกันมากขึ้น ส่งผลให้พีวีซีจึงมีปริมาตรอิสระ (Free volume) เพิ่มมากขึ้น เพราะฉะนั้น ค่าความหนาแน่นของพีวีซีคอมโพสิตจึงลดลงเมื่อมีการเพิ่มปริมาณ DOP ลงไป



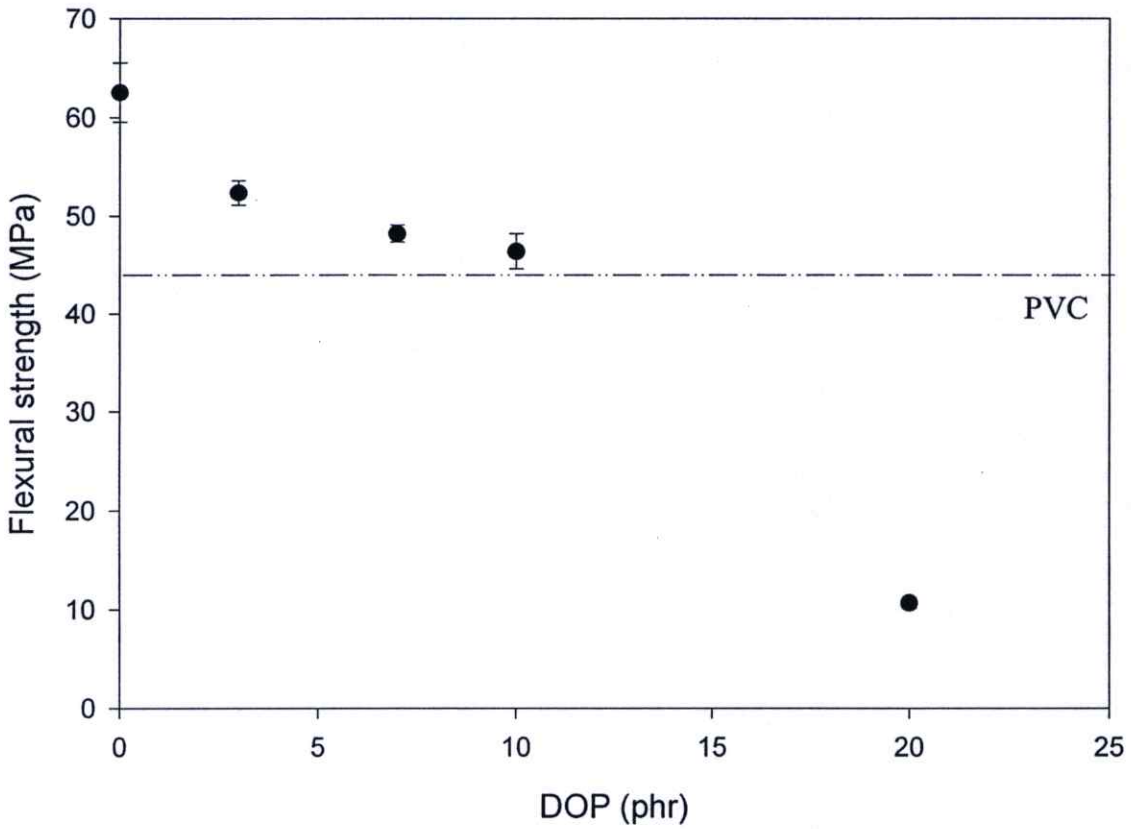
รูปที่ 4.25 ค่าความหนาแน่นของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP 30 phr โดยไม่มีการแยกขนาด เมื่อทำการเพิ่มปริมาณ DOP ลงไปในปริมาณ 0 3 7 10 และ 20 phr

ค่า HDT ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP 30 phr เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณ DOP แสดงได้ดังรูปที่ 4.26 โดยจากผลการทดลองพบว่า ค่า HDT ของพีวีซีคอมโพสิตลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณ DOP ลงไป ทั้งนี้เป็นเพราะว่า DOP มีผลโดยตรงต่อสมบัติทางความร้อนของพีวีซี เนื่องจากปริมาณ DOP ที่มากขึ้น ทำให้สายโซ่ของพีวีซีห่างกันมากขึ้น และสายโซ่จะเคลื่อนที่ได้ง่ายเมื่อได้รับแรง เมื่อให้ความร้อนแก่คอมโพสิต การเคลื่อนที่ของสายโซ่จึงดีขึ้น ส่งผลให้คอมโพสิตรับแรงได้น้อยลง ค่า HDT ของพีวีซีคอมโพสิตจึงลดลงด้วย

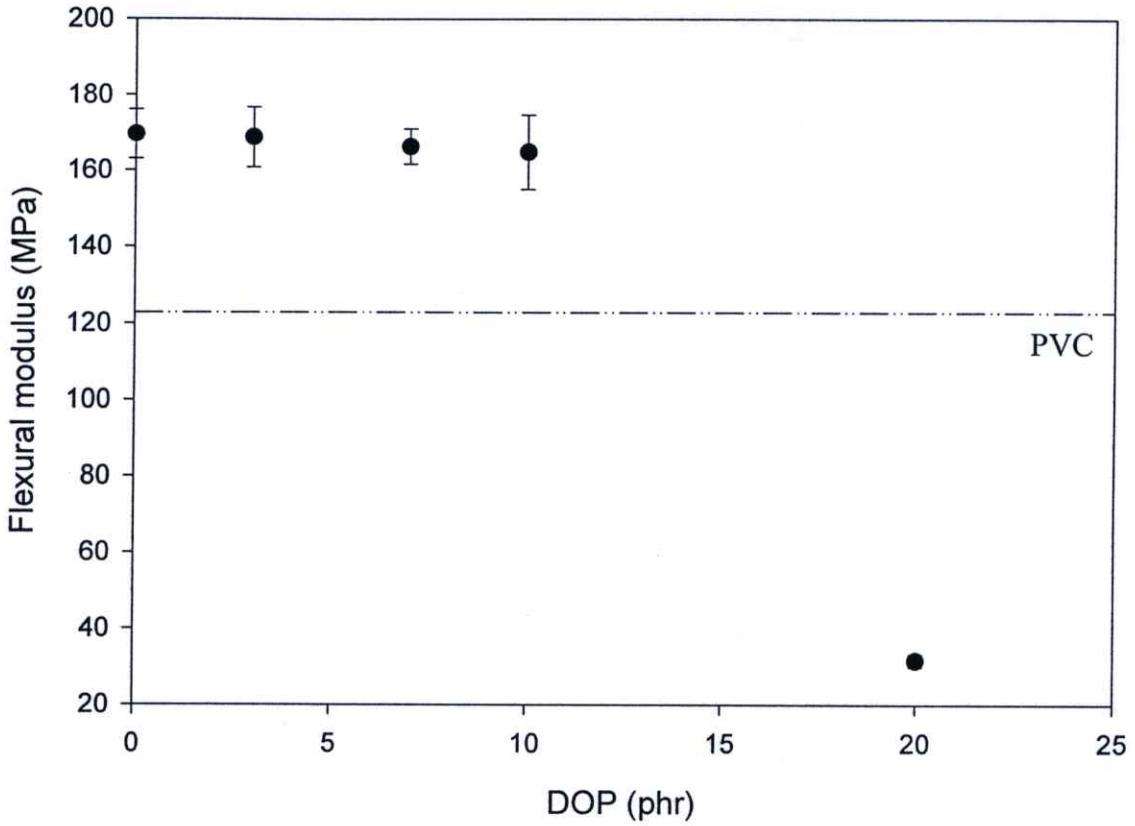


รูปที่ 4.26 ค่า HDT ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP 30 phr โดยไม่มีการแยกขนาด เมื่อทำการเพิ่มปริมาณ DOP ลงไปในปริมาณ 0 3 7 10 และ 20 phr

ค่าความแข็งแรงโค้งงอ (Flexural strength) และค่ามอดุลัสโค้งงอ (Flexural modulus) ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP 30 phr เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณ DOP แสดงได้ดังรูปที่ 4.27 และ 4.28 โดยจากรูปพบว่า ปริมาณ DOP ที่เพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าความแข็งแรงโค้งงอและค่ามอดุลัสโค้งงอของพีวีซีคอมโพสิตมีค่าลดลง ทั้งนี้เป็นเพราะว่า DOP จะทำหน้าที่ขยายสายโซ่ของพีวีซีให้อยู่ห่างกันมากขึ้น ทำให้พีวีซีคอมโพสิตนิ่มขึ้น ความแข็งแรงยึดเกาะที่อินเตอร์เฟสระหว่างพีวีซีและเส้นใยไม้จึงลดลง เมื่อให้แรงดึงต่อพีวีซีคอมโพสิต เส้นใยไม้จึงสามารถหลุดออกจากพีวีซีคอมโพสิตได้ง่าย ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงโค้งงอและค่ามอดุลัสโค้งงอมีค่าลดลง



รูปที่ 4.27 ค่าความแข็งแรงโค้งงอของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP 30 phr โดยไม่มีการแยกขนาด เมื่อทำการเพิ่มปริมาณ DOP ลงไปในปริมาณ 0 3 7 10 และ 20 phr



รูปที่ 4.28 ค่ามอดุลัสโค้งงอของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP 30 phr โดยไม่มีการแยกขนาด เมื่อทำการเพิ่มปริมาณ DOP ลงไปในปริมาณ 0 3 7 10 และ 20 phr

จากการศึกษาผลของปริมาณพลาสติไซเซอร์ (DOP) ที่เติมลงไปในพีวีซีคอมโพสิต สามารถสรุปได้ว่า การใส่ DOP ในช่วง 0-10 phr ทำให้ได้พีวีซีคอมโพสิตที่มีสมบัติต่างกันไม่มากนัก ปริมาณ DOP ที่เพิ่มขึ้น ทำให้คอมโพสิตมีลักษณะนิ่มขึ้น สมบัติเชิงกลลดลง แต่ขึ้นรูปได้ง่ายขึ้น ปริมาณของ DOP ที่ 20 phr จะทำให้พีวีซีคอมโพสิตมีลักษณะนิ่มมาก ไม่สามารถนำมาใช้งานเป็นไม้เทียมได้ และพีวีซีคอมโพสิตที่ไม่มีการเติม DOP ลงไป จะทำให้ ไม้เทียมที่ได้มีลักษณะแข็ง เปราะ มีปัญหาในการผลิต ไม่สามารถนำมาใช้งานได้ ดังนั้นจึงสรุปในงานวิจัยนี้ว่าปริมาณ DOP ที่เหมาะสมที่จะใช้ผลิตพีวีซีคอมโพสิตจากเส้นใยธรรมชาติคือ 10 phr

4.6 การศึกษาผลของปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต ที่เติมในพีวีซีคอมโพสิต

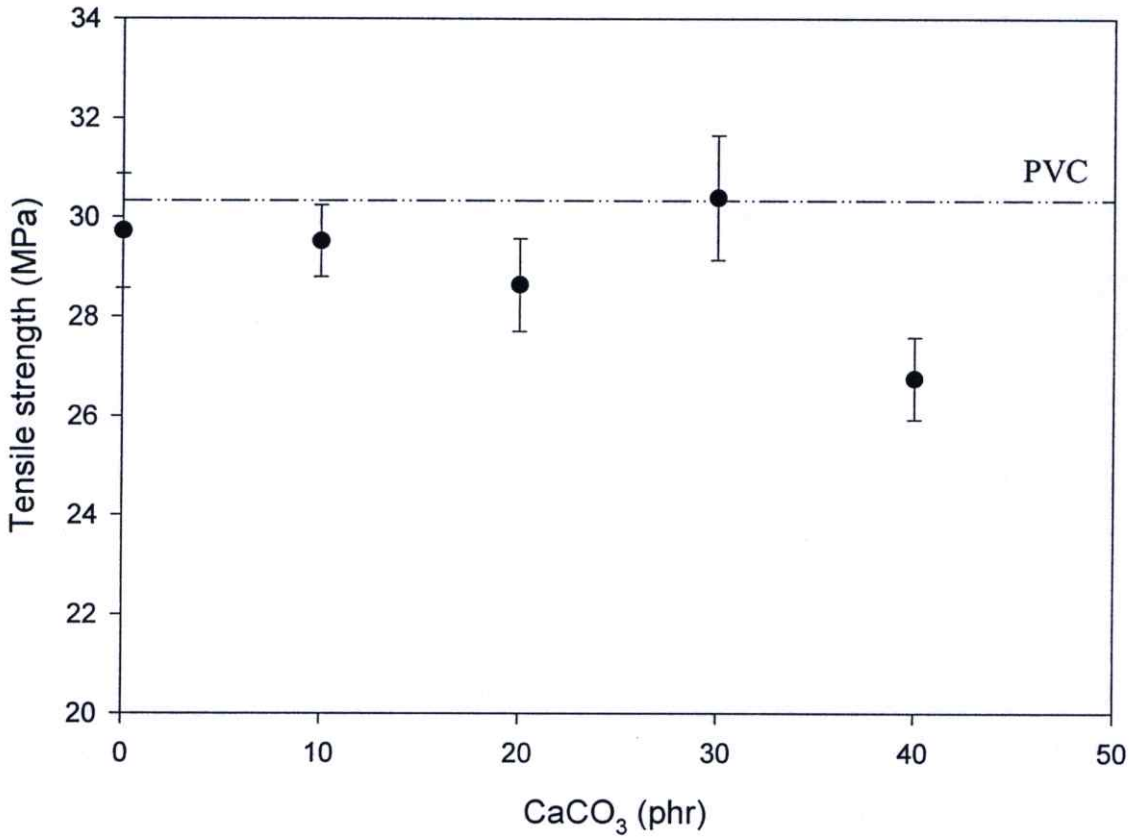
แคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารเพิ่มเนื้อที่สำคัญของพีวีซี เพราะจะช่วยเพิ่มปริมาณหรือลดต้นทุนในการผลิตพีวีซีคอมโพสิต และช่วยสมบัติบางอย่างเช่น ความแข็งกด สมบัติทางความร้อน เป็นต้น

การศึกษาผลของแคลเซียมคาร์บอเนต ที่เติมลงไปในพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP ไม่แยกขนาดปริมาณ 30 phr และ DOP 10 phr โดยในการศึกษาได้เติมปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่ 10 20 30 และ 40 phr ผลการทดลองที่ได้เป็นไปตาม ตารางที่ 4.5

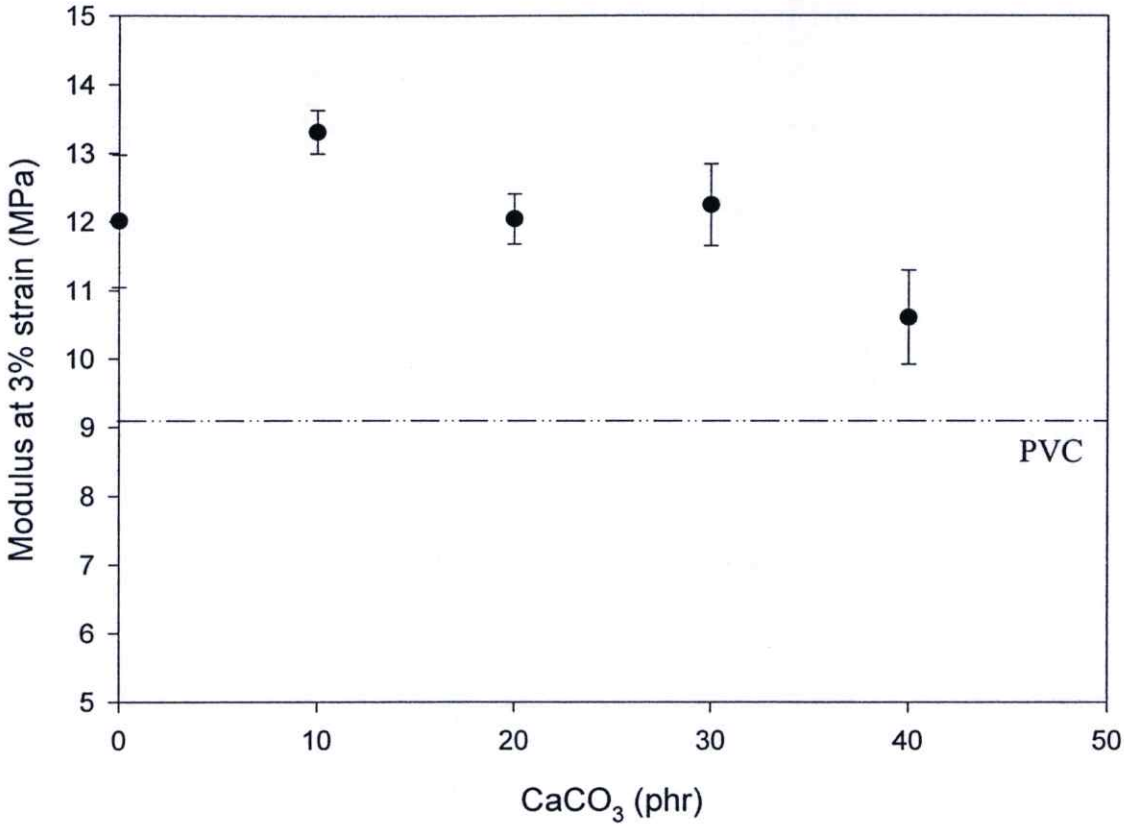
ตารางที่ 4.5 สมบัติต่างๆ ของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงแคลเซียมคาร์บอเนต

	$CaCO_3$ 0 phr	$CaCO_3$ 10 phr	$CaCO_3$ 20 phr	$CaCO_3$ 30 phr	$CaCO_3$ 40 phr
ความแข็งแรงดึง (MPa)	29.72	29.51	28.63	30.38	26.76
มอดุลัสที่ 3 % การยืด (MPa)	12.01	13.30	12.04	12.25	10.61
เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (%)	4.44	5.60	6.34	6.51	5.29
ความแข็งแรงกระแทก (kJ/m^2)	2.87	2.88	2.97	3.10	3.00
ความแข็งกด (Shore D)	66.5	70.5	71	72	72
ความหนาแน่น (g/cm^3)	1.29	1.39	1.41	1.43	1.44
HDT (องศาเซลเซียส)	47.3	50.4	49.3	48.6	48.9
ความแข็งแรงโค้งงอ (MPa)	46.42	46.63	46.87	46.95	44.01
มอดุลัสโค้งงอ (MPa)	164.68	139.02	129.63	124.92	123.22

ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) และค่ามอดุลัส (Tensile modulus) ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP ในปริมาณ 30 phr เมื่อทำการเพิ่มปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต แสดงดังรูปที่ 4.29 และ 4.30 จากกราฟจะเห็นได้ว่า ค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดุลัสไม่เปลี่ยนแปลงมากนักเมื่อเติมแคลเซียมคาร์บอเนตในปริมาณไม่มากนัก (10-30 phr) ทั้งนี้สามารถอธิบายได้ว่า แคลเซียมคาร์บอเนตจัดเป็นสารตัวเติมชนิดไม่เสริมแรง (Non-reinforcing filler) ทำหน้าที่เพิ่มเนื้อให้พีวีซีคอมโพสิตเพียงอย่างเดียว เพราะฉะนั้น เมื่อเติมแคลเซียมคาร์บอเนตลงไปในพีวีซีคอมโพสิต แคลเซียมคาร์บอเนตจึงไม่ช่วยเสริมแรง แต่เมื่อเติมแคลเซียมคาร์บอเนตมากเกิน (40 phr) ค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดุลัสจะลดลง ทั้งนี้เป็นเพราะว่า แคลเซียมคาร์บอเนตอาจกระจายตัวได้ไม่ดีในคอมโพสิต ทำให้เกิดช่องว่างหรือตำหนิ ซึ่งเป็นผลให้ค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดุลัสลดลง

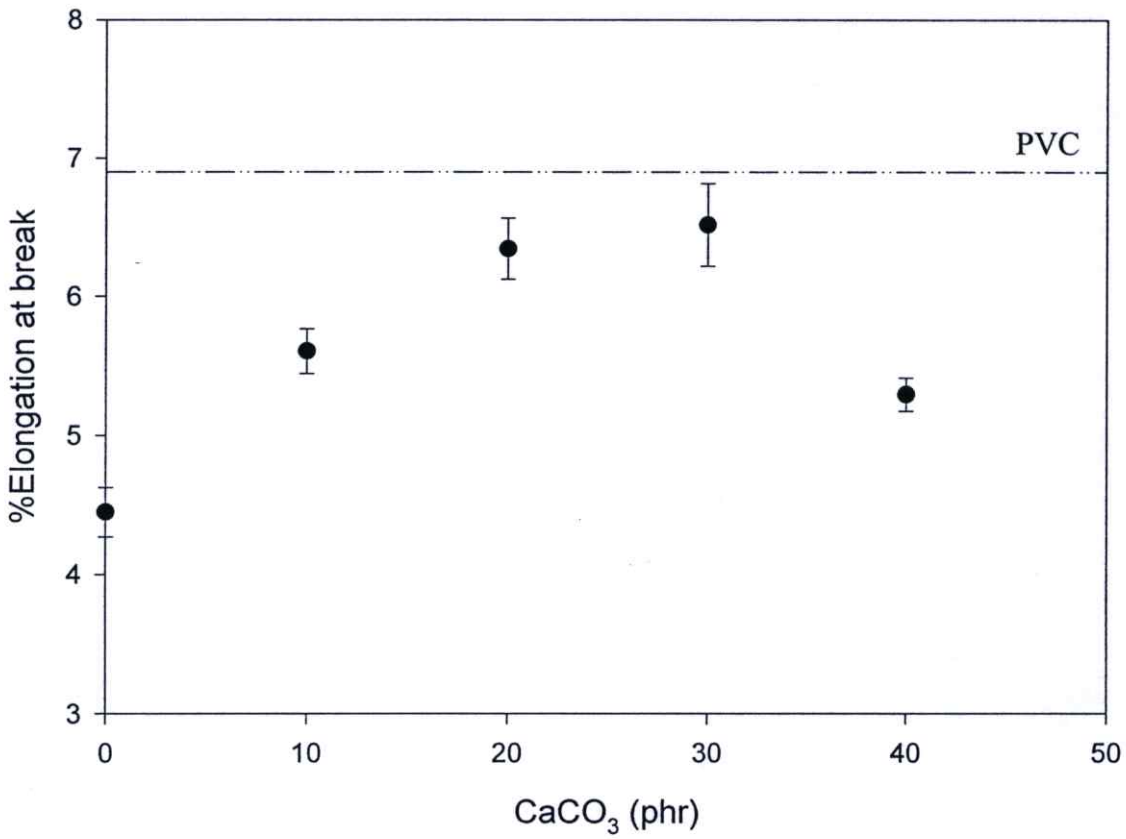


รูปที่ 4.29 ค่าความแข็งแรงดึงของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP ในปริมาณ 30 phr โดยไม่มีการแยกขนาด เมื่อทำการเพิ่มปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตลงไปในปริมาณ 0 10 20 30 และ 40 phr



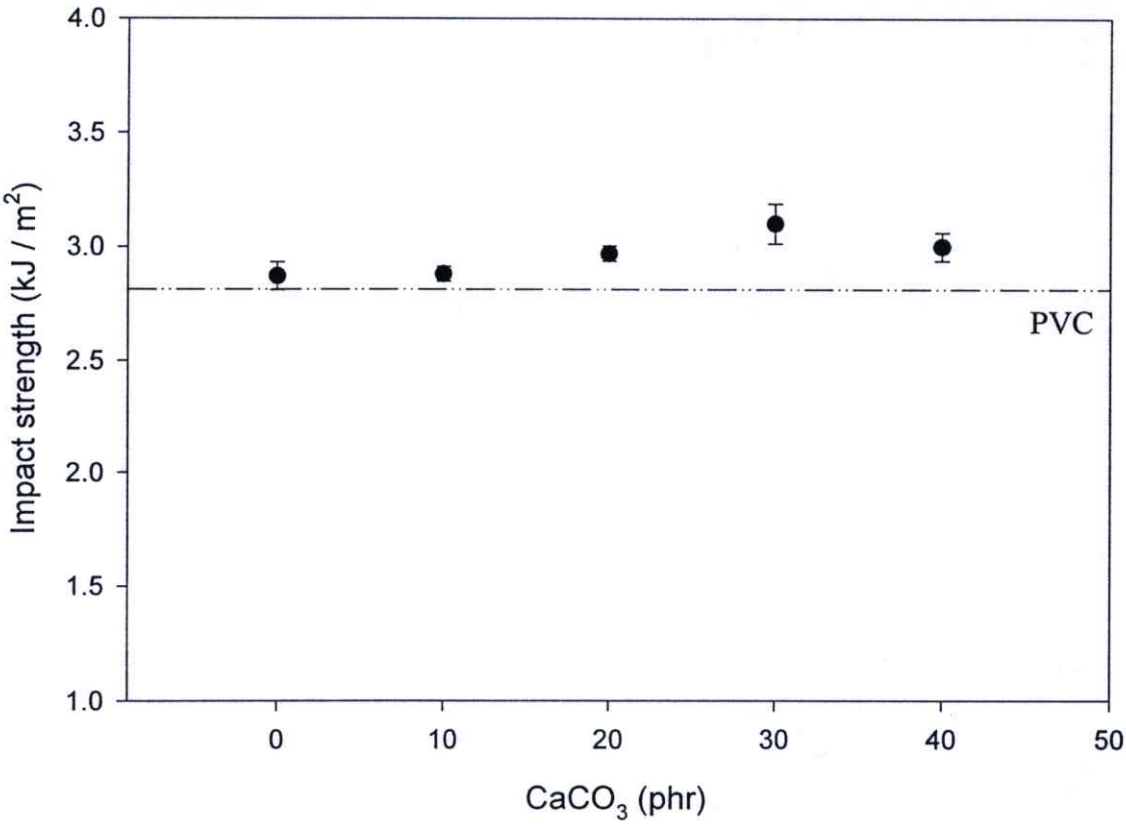
รูปที่ 4.30 ค่ามอดุลัสของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP ในปริมาณ 30 phr โดยไม่มีการแยกขนาด เมื่อทำการเพิ่มปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต ลงไปในปริมาณ 0 10 20 30 และ 40 phr

ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break) ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP ในปริมาณ 30 phr เมื่อทำการเพิ่มปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต แสดงดังรูปที่ 4.31 โดยผลการทดลองพบว่า ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่เพิ่มขึ้นทำให้ ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดเพิ่มมากขึ้น แต่การเติมแคลเซียมคาร์บอเนตที่มากเกินไป (40 phr) จะทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดมีค่าลดลง จากรูปที่ 4.29 4.30 และ4.31 พบว่า ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต ที่เหมาะสมที่สุดคือ 30 phr



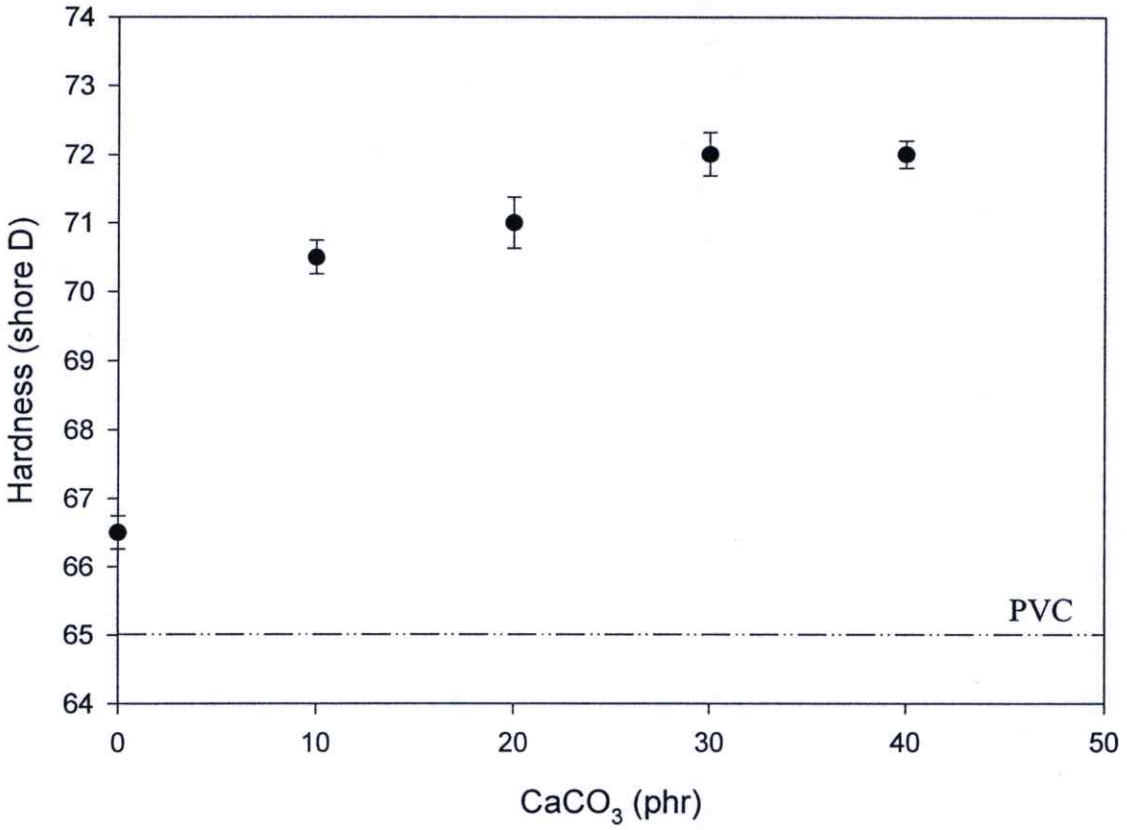
รูปที่ 4.31 ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP ในปริมาณ 30 phr โดยไม่มีการแยกขนาด เมื่อทำการเพิ่มปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตลงไปในปริมาณ 0 10 20 30 และ 40 phr

ความแข็งแรงกระแทก (Impact strength) ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP ในปริมาณ 30 phr เมื่อทำการเพิ่มปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต แสดงดังรูปที่ 4.32 โดยจากผลการทดลองพบว่า ค่าความแข็งแรงกระแทกไม่แตกต่างกันมากนักเมื่อปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะว่า แคลเซียมคาร์บอเนตไม่ช่วยเสริมแรง และไม่มีผลทำให้ค่าความแข็งแรงกระแทกลดลง แต่ช่วยเพิ่มเนื้อให้พีวีซีคอมโพสิตเท่านั้น



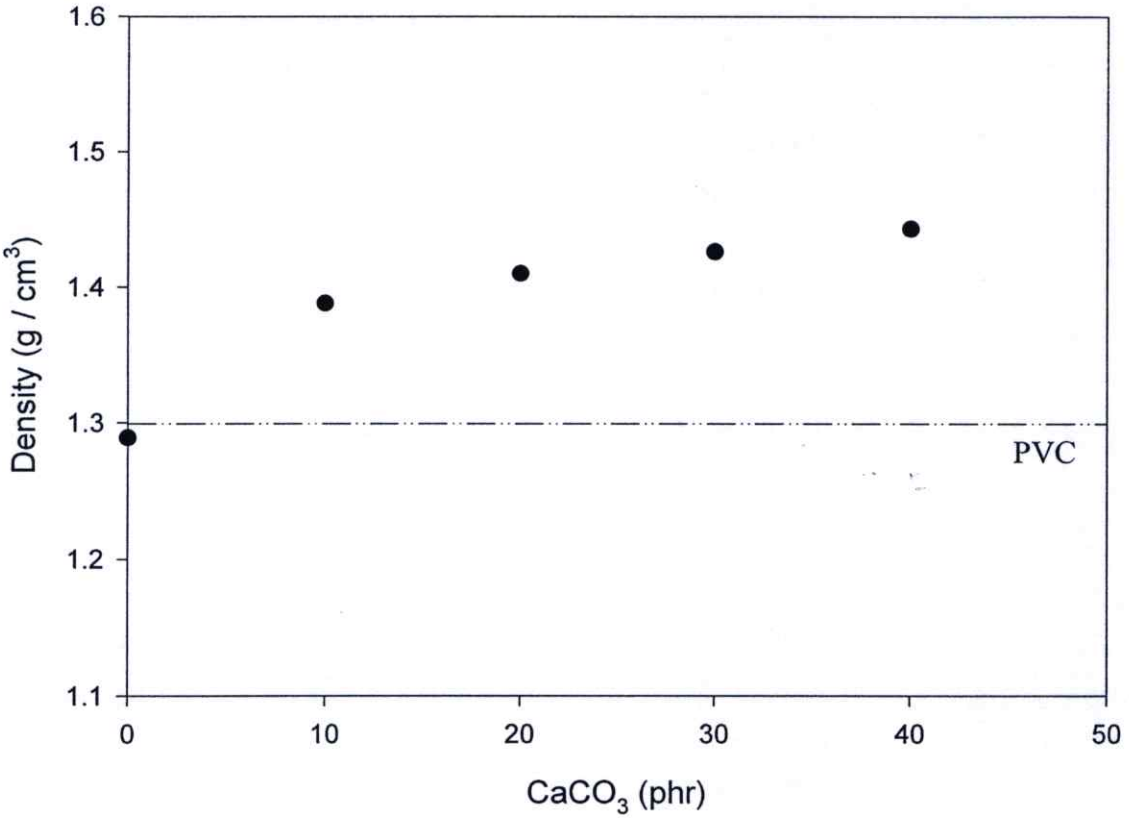
รูปที่ 4.32 ค่าความแข็งแรงกระแทกของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP ในปริมาณ 30 phr โดยไม่มีการแยกขนาด เมื่อทำการเพิ่มปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตลงไปในปริมาณ 0 10 20 30 และ 40 phr

ค่าความแข็งกด (Hardness) ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP ในปริมาณ 30 phr เมื่อทำการเพิ่มปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต แสดงดังรูปที่ 4.33 พบว่าค่าความแข็งกดของพีวีซีคอมโพสิตมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากว่า แคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารอนินทรีย์ที่มีความแข็งสูง เมื่อผสมแคลเซียมคาร์บอเนตลงไปในพีวีซีคอมโพสิตจะทำให้พีวีซีคอมโพสิตแข็งมากขึ้น สามารถทนแรงกดได้ดีขึ้น ส่งผลให้ค่าความแข็งกดเพิ่มมากขึ้น



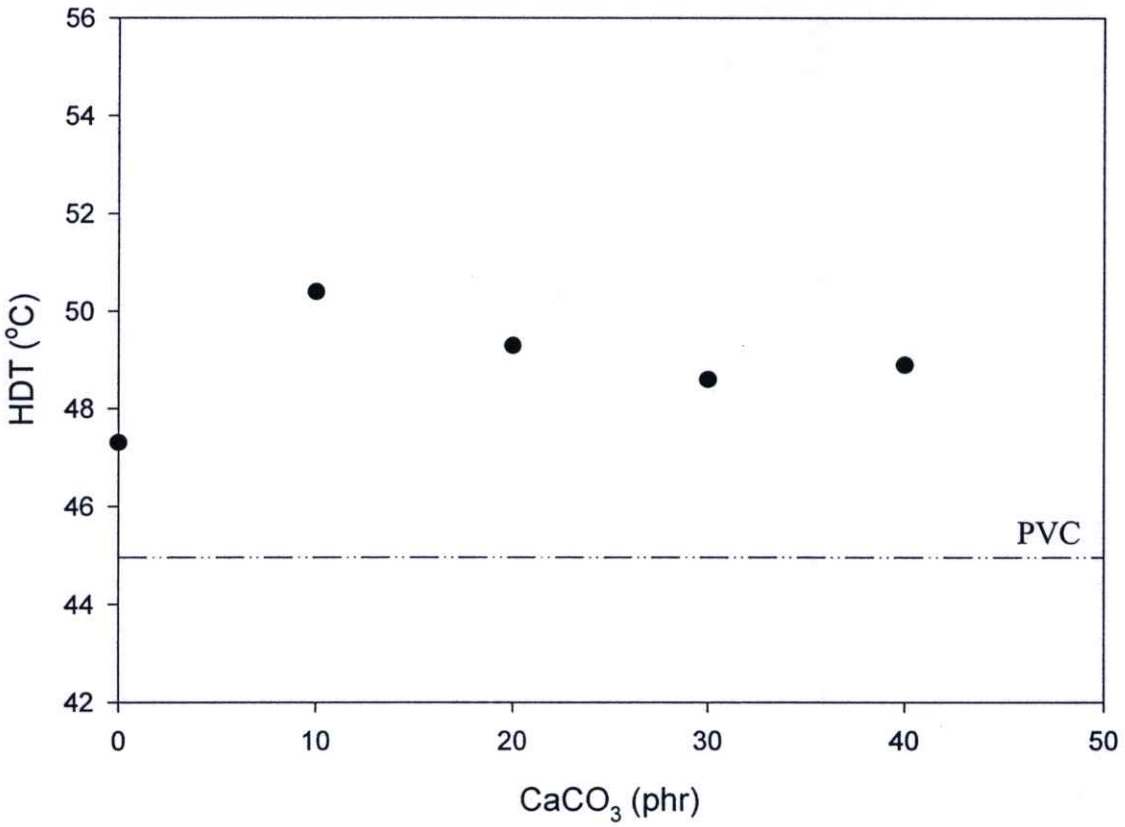
รูปที่ 4.33 ค่าความแข็งกดของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP ในปริมาณ 30 phr โดยไม่มีการแยกขนาด เมื่อทำการเพิ่มปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต ลงไปในปริมาณ 0 10 20 30 และ 40 phr

ค่าความหนาแน่น (Density) ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP ในปริมาณ 30 phr เมื่อทำการเพิ่มปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต แสดงดังรูปที่ 4.34 จากรูปพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต ลงไปในพีวีซีคอมโพสิต ทำให้ค่าความหนาแน่นมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากแคลเซียมคาร์บอเนตจัดเป็นสารที่มีความหนาแน่นต่อน้ำหนักสูง (แคลเซียมคาร์บอเนตมีความหนาแน่น 2.7 g/cm^3) เมื่อผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเข้ากับพีวีซีคอมโพสิต ทำให้พีวีซีคอมโพสิตมีค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้น



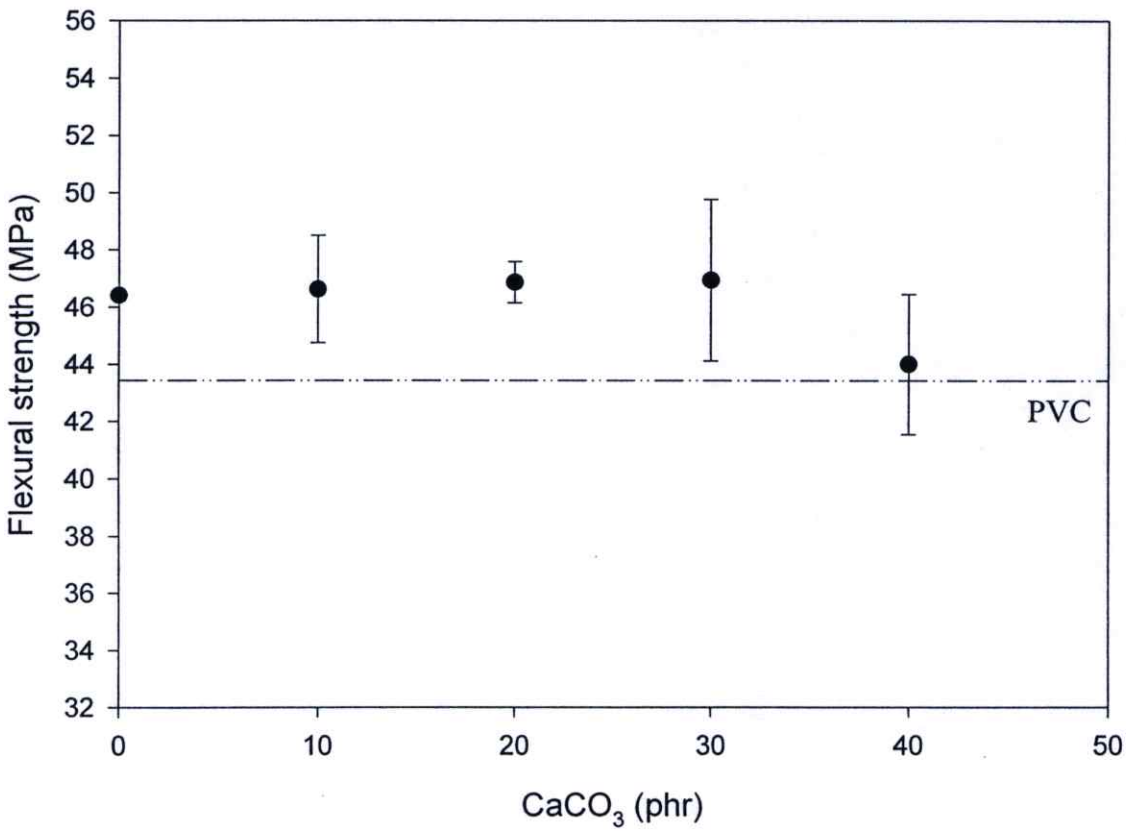
รูปที่ 4.34 ค่าความหนาแน่นของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP ในปริมาณ 30 phr โดยไม่มีการแยกขนาด เมื่อทำการเพิ่มปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตลงไปในปริมาณ 0 10 20 30 และ 40 phr

ค่า HDT ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP ในปริมาณ 30 phr เมื่อทำการเพิ่มปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต แสดงดังรูปที่ 4.35 จากการทดลองพบว่าค่า HDT ของพีวีซีคอมโพสิตเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเติมแคลเซียมคาร์บอเนตลงไป ทั้งนี้สามารถอธิบายได้ว่า แคลเซียมคาร์บอเนตมีสมบัติทางความร้อนที่ดี เมื่อเติมลงไปในพีวีซีคอมโพสิต จึงช่วยให้พีวีซีคอมโพสิตมีสมบัติทางความร้อนดีขึ้น แต่ปริมาณของแคลเซียมคาร์บอเนตไม่มีผลต่อค่า HDT มากนัก

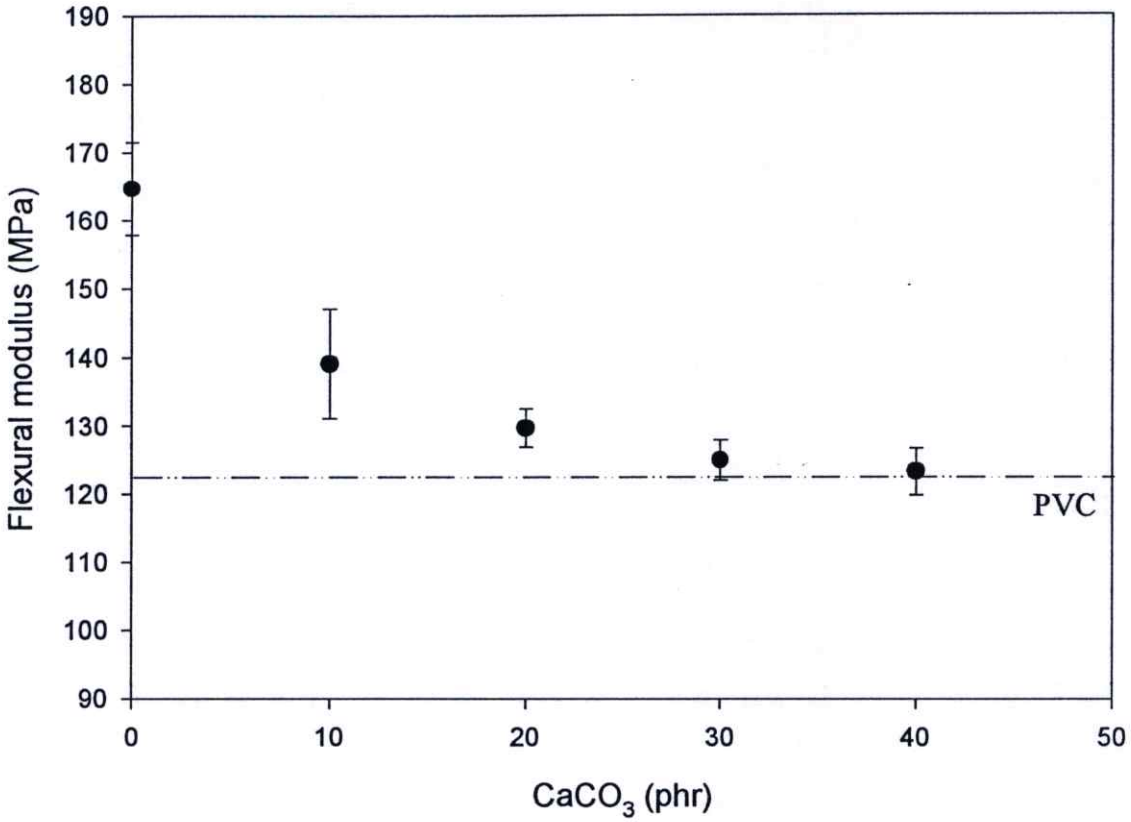


รูปที่ 4.35 ค่า HDT ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP ในปริมาณ 30 phr โดยไม่มีการแยกขนาด เมื่อทำการเพิ่มปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตลงไปในปริมาณ 0 10 20 30 และ 40 phr

ค่าความแข็งแรงโค้งงอ (Flexural strength) และค่ามอดุลัสโค้งงอ (Flexural modulus) ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP ในปริมาณ 30 phr เมื่อทำการเพิ่มปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต แสดงดังรูปที่ 4.36 และ 4.37 โดยจากการทดลองพบว่า ค่าความแข็งแรงโค้งงอจะไม่เปลี่ยนแปลงไปมากนักเมื่อปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเพิ่มขึ้น (10-30 phr) แต่จะลดลงเมื่อมีปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต 40 phr และค่ามอดุลัสโค้งงอจะลดลงเมื่อปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเพิ่มขึ้นทั้งนี้เนื่องมาจาก เมื่อแคลเซียมคาร์บอเนตมีปริมาณมากเกินไป จะกระจายตัวไม่ดี มักจับกันเป็นก้อน แทรกตัวอยู่ทั่วไปในพีวีซีและเส้นใยไม้ เพราะฉะนั้นทำให้ความแข็งแรงยึดเกาะที่อินเตอร์เฟสระหว่างพีวีซีและเส้นใยไม้ไม่ดี เส้นใยไม้สามารถหลุดได้ง่าย ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงโค้งงอและค่ามอดุลัสโค้งงอของคอมโพสิตจึงลดลง



รูปที่ 4.36 ค่าความแข็งแรงโค้งงอของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP ในปริมาณ 30 phr โดยไม่มีการแยกขนาด เมื่อทำการเพิ่มปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตลงไปในปริมาณ 0 10 20 30 และ 40 phr



รูปที่ 4.37 ค่ามอดุลัสโค้งงอของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP ในปริมาณ 30 phr โดยไม่มีการแยกขนาด เมื่อทำการเพิ่มปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตลงไปในปริมาณ 0 10 20 30 และ 40 phr

จากการศึกษาผลของปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่เติมลงไปในพีวีซีคอมโพสิต สามารถสรุปได้ว่า ปริมาณของแคลเซียมคาร์บอเนตที่เหมาะสมคือ 30 phr กล่าวคือที่อัตราส่วนนี้ พีวีซีคอมโพสิตสามารถใส่ปริมาณสารเพิ่มเนื้อในปริมาณที่มาก แต่คอมโพสิตยังมีสมบัติโดยรวมที่ดี สมบัติไม่ต่ำจนเกินไป

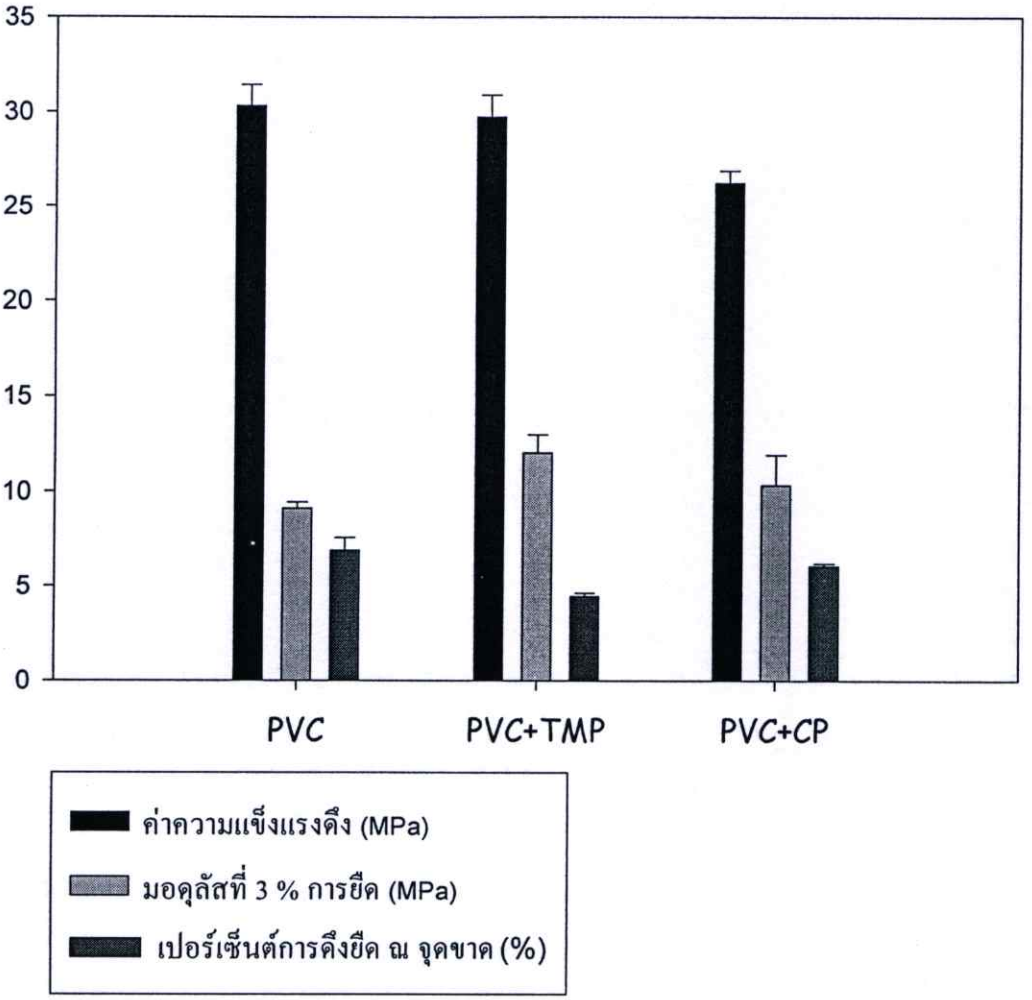
4.7 การศึกษาผลของวิธีเตรียมเส้นใยไม้ที่ผสมในพีวีซีคอมโพสิต

ในการศึกษาผลของชนิดของเส้นใยไม้ที่ผสมในพีวีซีคอมโพสิต ได้ทำการศึกษาเยื่อไม้ 2 ชนิด ได้แก่ เยื่อไม้ที่เตรียมได้จากขบวนการความร้อนเชิงกล (Thermomechanical pulp; TMP) และเยื่อไม้ที่เตรียมได้จากขบวนการทางเคมี (Chemical pulp; CP) โดยจากการทดลองได้ทำการเติมปริมาณเส้นใยไม้ไม่แยกขนาดในปริมาณ 30 phr และ DOP 10 phr ซึ่งผลการทดลองที่ได้เป็นไปดังตารางที่ 4.6 ดังนี้

ตารางที่ 4.6 การเปรียบเทียบสมบัติต่างๆ ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใยไม้ TMP และ CP

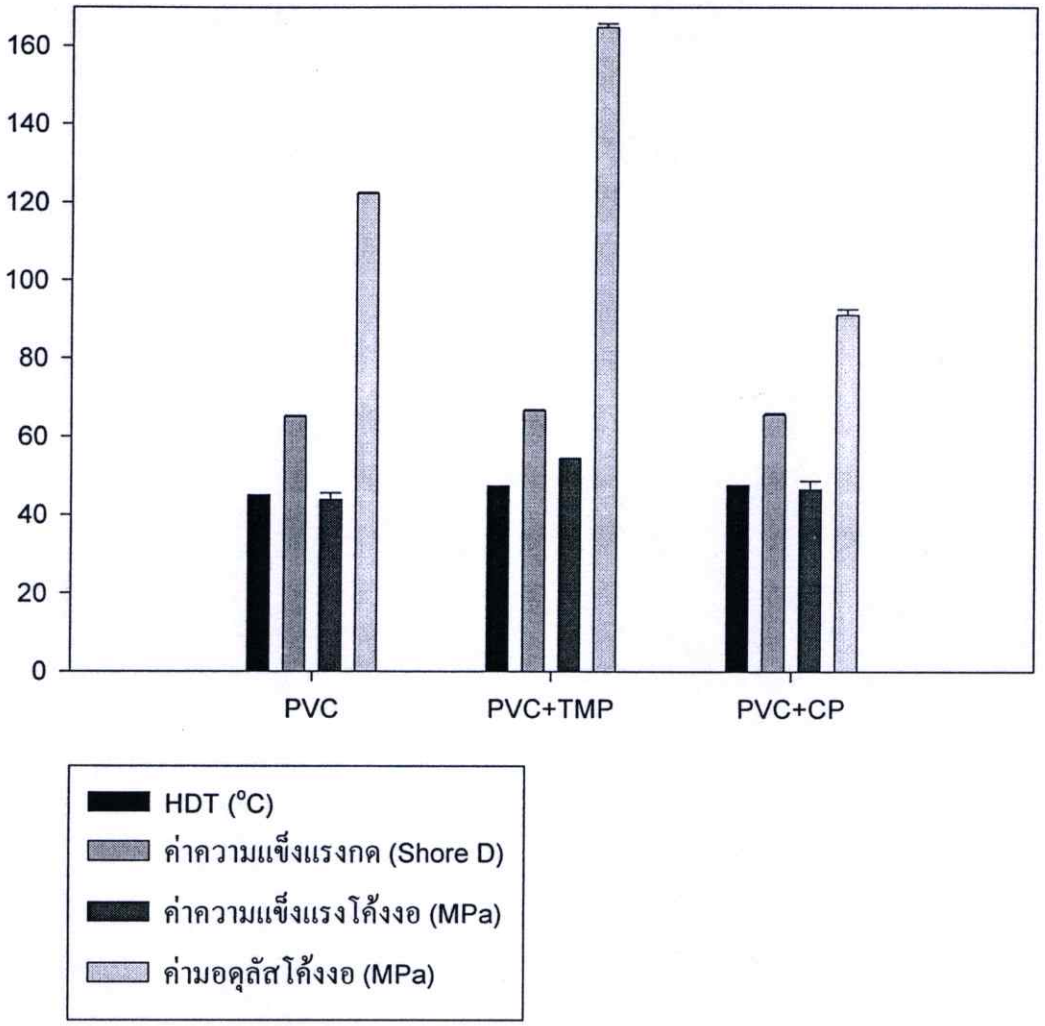
	PVC	PVC + TMP	PVC + CP
ความแข็งแรงดึง (MPa)	30.31	29.72	26.26
มอดุลัสที่ 3 % การยืด (MPa)	9.09	12.01	10.32
เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (%)	6.89	4.44	6.05
ความแข็งแรงกระแทก (kJ/m^2)	2.80	2.87	4.06
ความแข็งกด (Shore D)	65.0	66.5	65.6
ความหนาแน่น (g/cm^3)	1.30	1.29	1.29
HDT (องศาเซลเซียส)	45.0	47.3	47.6
ความแข็งแรงโค้งงอ (MPa)	43.77	54.32	46.42
มอดุลัสโค้งงอ (MPa)	122.23	164.68	91.10

รูปที่ 4.38 การเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงดึง ค่ามอดุลัส และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP และ เส้นใย CP ที่ปริมาณเส้นใยไม้ 30 phr พบว่าพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP มีค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดุลัสสูงกว่าพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย CP ทั้งนี้เนื่องมาจากการสังเกตด้วยตาเปล่าและการศึกษาสัณฐานวิทยาด้วย SEM จะเห็นได้ว่า การกระจายตัวของเส้นใย CP ในพีวีซีคอมโพสิต กระจายตัวได้ไม่ดี เส้นใยจับกันเป็นก้อน ซึ่งต่างจากคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP เพราะเส้นใย TMP เป็นเส้นใยที่มีความแข็ง มีความคงรูปเป็นเส้นใย และมีการกระจายตัวในพีวีซีคอมโพสิตดี เพราะฉะนั้น จึงส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดุลัสของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP มีค่ามากกว่า แต่ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP มีค่าต่ำกว่าเช่นเดียวกัน



รูปที่ 4.38 ค่าความแข็งแรงดึง มอดุลัส และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP และ เส้นใย CP ในปริมาณ 30 phr

เมื่อเปรียบเทียบค่า HDT ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP และ เส้นใย CP ในปริมาณ 30 phr พบว่า พีวีซีที่เตรียมจากเส้นใยทั้งสอง มีค่า HDT ใกล้เคียงกัน ทั้งนี้เป็นเพราะเส้นใยไม้ทั้งสองชนิดเป็นเส้นใยไม้ชนิดเดียวกัน สมบัติทางความร้อนจึงเหมือนกัน พีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใยทั้งสองชนิดจึงมีค่า HDT เท่ากันดังรูปที่ 4.39 และจากรูปยังพบว่า ค่าความแข็งกดของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP มีมากกว่าคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย CP ทั้งนี้สามารถอธิบายได้ว่า เส้นใย CP เป็นเส้นใยที่สกัดเอาลิกนินและสารแทรกออกจากเส้นใย (แสดงดังตารางที่ 4.1) ดังนั้น เส้นใย CP จึงมีความแข็งน้อยเมื่อเทียบกับเส้นใย TMP เพราะฉะนั้น เมื่อเติมเส้นใย CP ลงไปในพีวีซีคอมโพสิต คอมโพสิตที่ได้จึงมีค่าความแข็งกดน้อยกว่าคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP

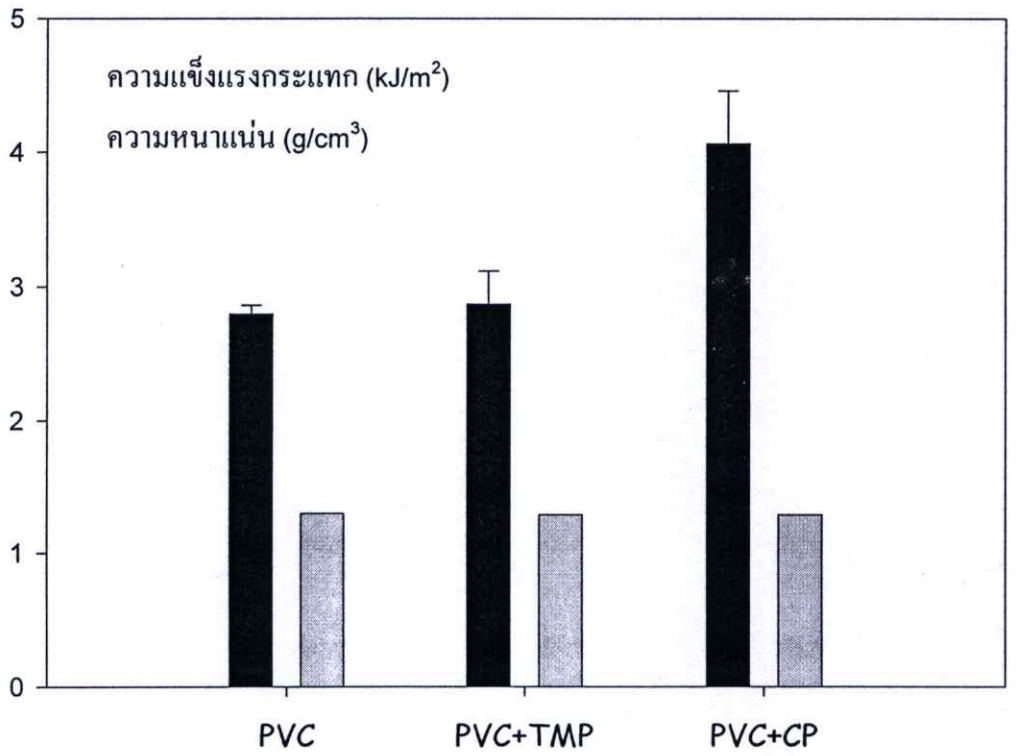


รูปที่ 4.39 เปรียบเทียบค่า HDT ค่าความแข็งกด ความแข็งแรงโค้งงอ และค่ามอดุลัสโค้งงอของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP และ เส้นใย CP ในปริมาณ 30 phr

เมื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงโค้งงอและค่ามอดุลัสโค้งงอของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP และ เส้นใย CP พบว่า ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP ให้ค่าสูงกว่า ทั้งนี้เป็นเพราะว่า การกระจายตัวของเส้นใย CP ในพีวีซีไม่ดี เส้นใยจับกันเป็นก้อน เพราะฉะนั้นค่าความแข็งแรงโค้งงอและค่ามอดุลัสโค้งงอของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย CP จึงต่ำกว่าพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP ดังรูปที่ 4.39

จากรูปที่ 4.40 เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงกระแทกระหว่างพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP และ เส้นใย CP ในปริมาณ 30 phr พบว่า พีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย CP ให้ค่าความแข็งแรงกระแทกสูงกว่าพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP ทั้งนี้เนื่องมาจากว่าเส้นใย CP เป็นเส้นใยที่มีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบในปริมาณที่มาก มีการสกัดเอาลิกนิน และสารอื่นๆ ออกจากเส้นใย เพราะฉะนั้นเส้นใย CP จึงนิ่มกว่าเส้นใย TMP เมื่อนำเส้นใย CP มาเติมในคอมโพสิตคอมโพสิตที่ได้จะมีความแข็งน้อยกว่าคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP (แสดงดังรูปที่ 4.39) คอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย CP จึงน่าจะสามารถรับแรงกระแทกได้ดีกว่า ค่าความแข็งแรงกระแทกจึงมีมากกว่า

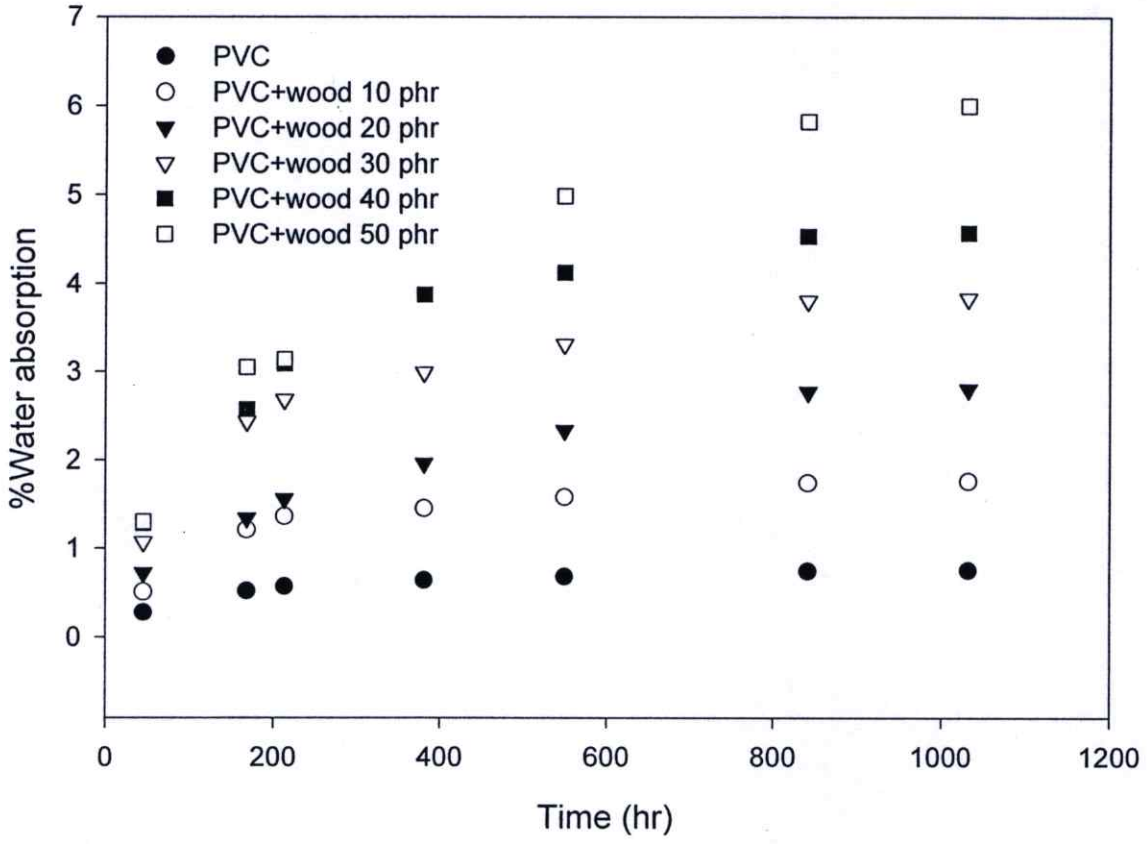
เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นระหว่างพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP และ เส้นใย CP ในปริมาณ 30 phr พบว่า พีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใยทั้ง 2 มีค่าความหนาแน่นที่เท่ากัน ทั้งนี้เป็นเพราะว่า เส้นใย TMP และเส้นใย CP มีความหนาแน่นเท่ากัน เพราะฉะนั้นเมื่อเติมเส้นใยทั้งสองลงไปในพีวีซีในปริมาณที่เท่ากัน พีวีซีคอมโพสิตที่ได้ จึงมีความหนาแน่นที่เท่ากันดังรูปที่ 4.40



รูปที่ 4.40 เปรียบเทียบค่าความแข็งแรงกระแทก และค่าความหนาแน่น ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP และ เส้นใย CP ในปริมาณ 30 phr

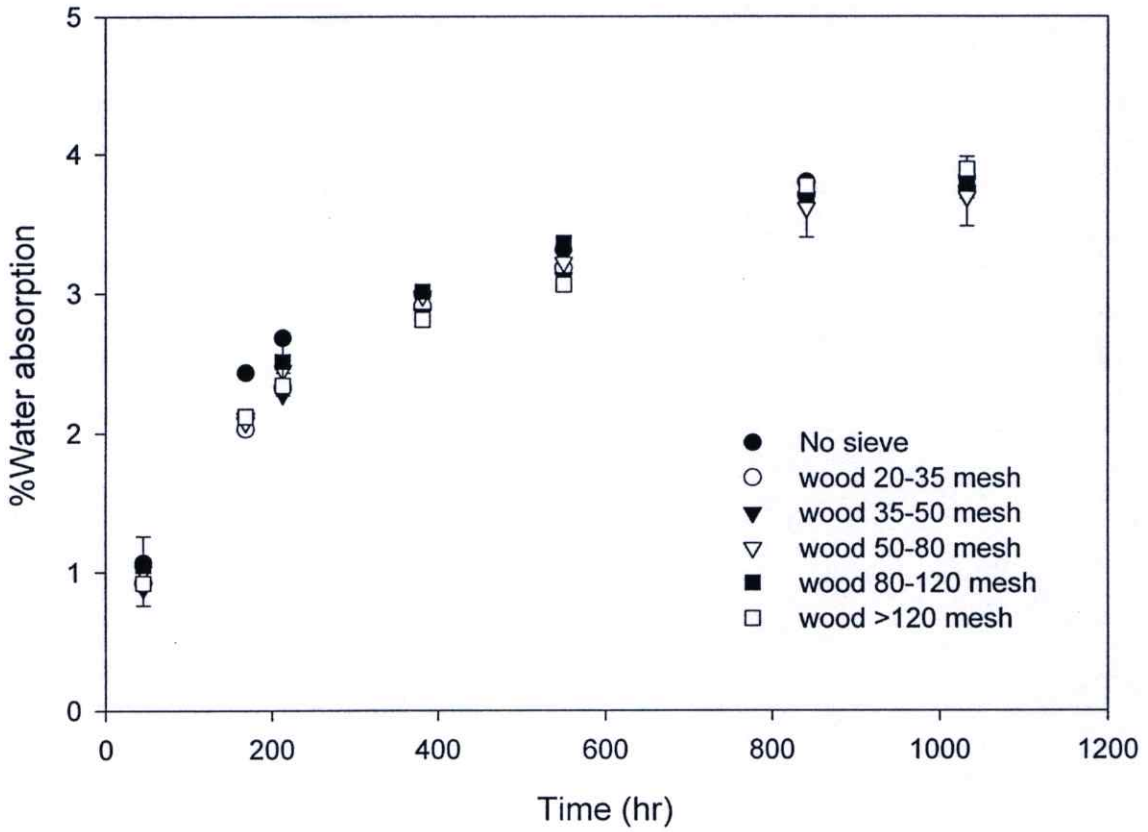
4.8 เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของพีวีซีคอมโพสิต

จากรูปที่ 4.41 แสดงเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณเส้นใยไม้ TMP ไม่แยกขนาดที่เติมลงไปโดยใช้ DOP 10 phr พบว่า เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเส้นใยไม้เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเส้นใยไม้มีองค์ประกอบของเซลลูโลสซึ่งประกอบไปด้วยหมู่ไฮดรอกซี (-OH) โดยหมู่ไฮดรอกซีสามารถดูดซับน้ำได้ดี เนื่องจากสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของน้ำ เพราะฉะนั้นเมื่อปริมาณเส้นใยไม้ในพีวีซีคอมโพสิตมีมากขึ้นคอมโพสิตจึงสามารถดูดซับน้ำได้มากขึ้น



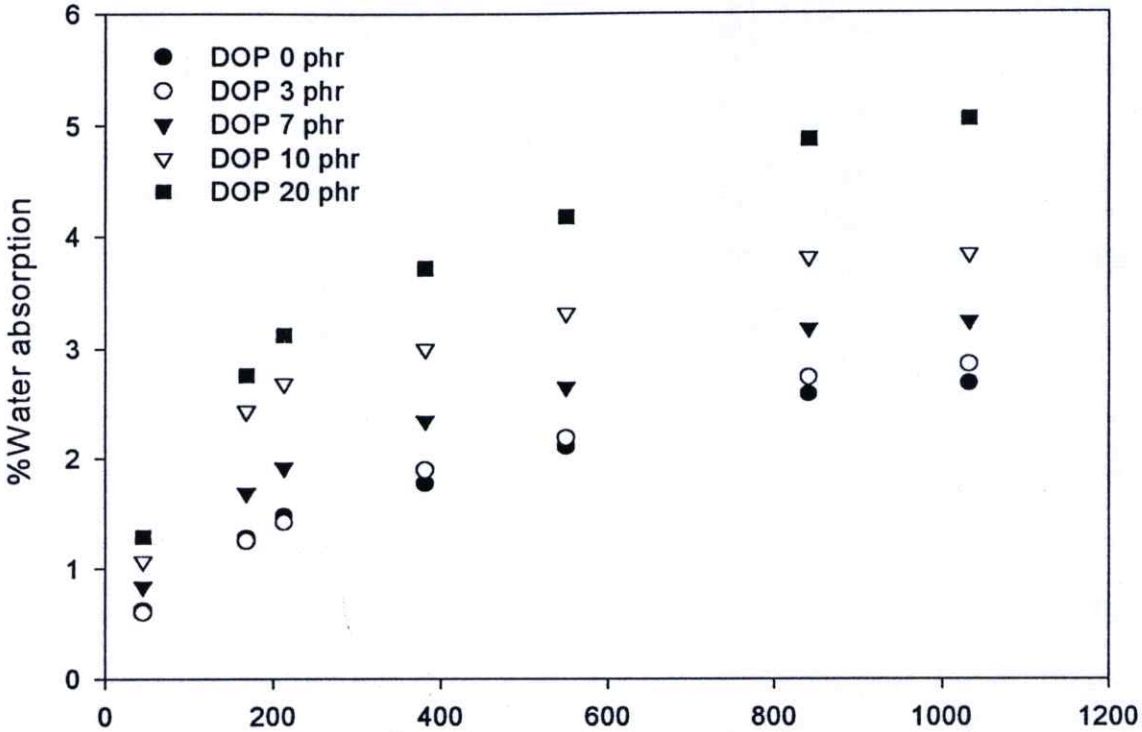
รูปที่ 4.41 เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใยไม้ TMP ไม่แยกขนาด โดยใส่ DOP 10 phr เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณไม้เป็น 10 20 30 40 และ 50 phr

รูปที่ 4.42 แสดงเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อทำการเปลี่ยนขนาดเส้นใยไม้ TMP ปริมาณ 30 phr และ DOP 10 phr พบว่า ความยาวของเส้นใยที่สั้นลง ทำให้เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำมีค่ามากขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจาก เส้นใยไม้ที่สั้นจะมีพื้นที่ผิว (Surface area) มากกว่าเส้นใยที่ยาว เพราะฉะนั้นเมื่อนำไปทดสอบ พอลิเมอร์คอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใยสั้น จึงสามารถดูดซับน้ำได้มากกว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใยยาว แต่จากการทดลอง พบว่า ขนาดของเส้นใยมีผลต่อเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ แต่อยู่ในปริมาณที่ไม่มากนักเมื่อเทียบกับปริมาณของเส้นใย ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.41

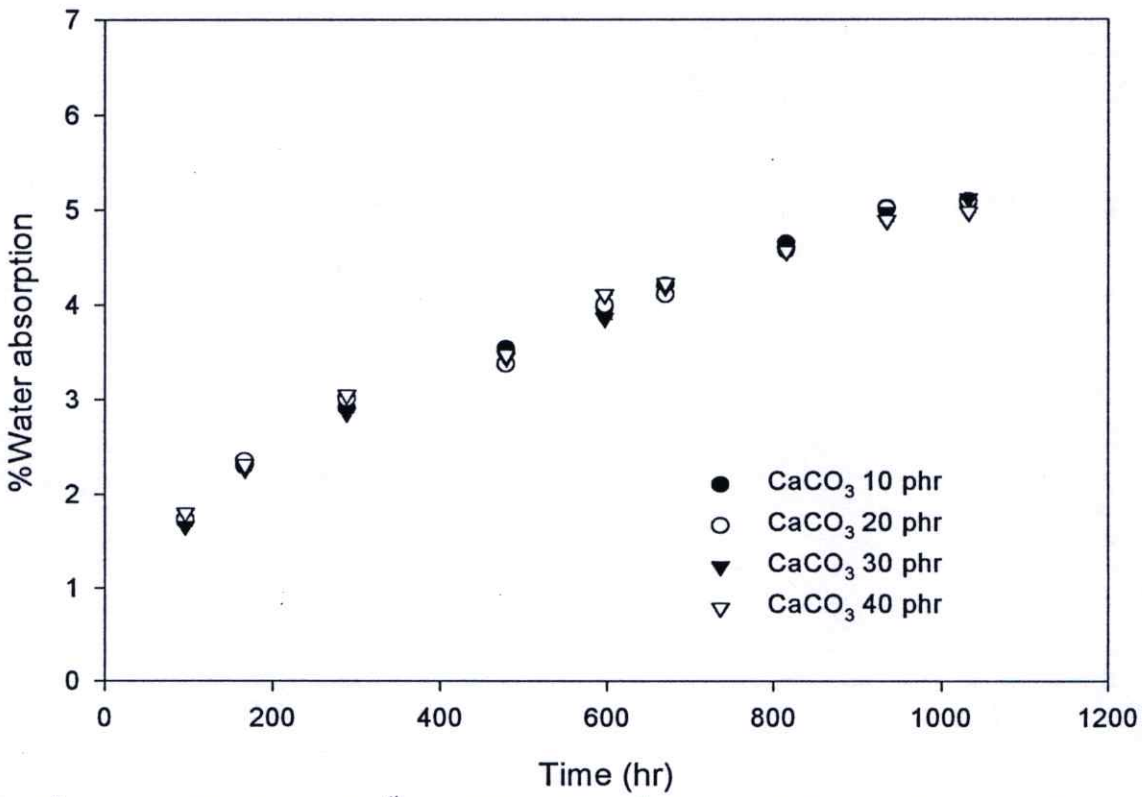


รูปที่ 4.42 เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใยไม้ TMP ในปริมาณ 30 phr และ DOP 10 phr เมื่อทำการเปลี่ยนขนาดเส้นใยไม้ 20-35 mesh 35-50 mesh 50-85 mesh 80-120 mesh และมากกว่า 120 mesh

เมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณพลาสติไซเซอร์ DOP โดยใช้เส้นใยไม้ TMP ไม่แยกขนาด 30 phr พบว่า เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของพีวีซีคอมโพสิตเพิ่มขึ้น เมื่อทำการเพิ่มปริมาณ DOP ทั้งนี้เนื่องมาจากว่า DOP ที่เติมลงไปเป็นพลาสติไซเซอร์ ทำหน้าที่ขยายสายโซ่ของพีวีซีให้ห่างกันมากขึ้น จึงทำให้น้ำสามารถเข้าไปแทรกตัวอยู่ระหว่างสายโซ่ของพีวีซีได้มากขึ้น พีวีซีคอมโพสิตจึงสามารถดูดซับน้ำได้มากขึ้น เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำจึงเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ DOP มีมากขึ้นดังรูปที่ 4.43

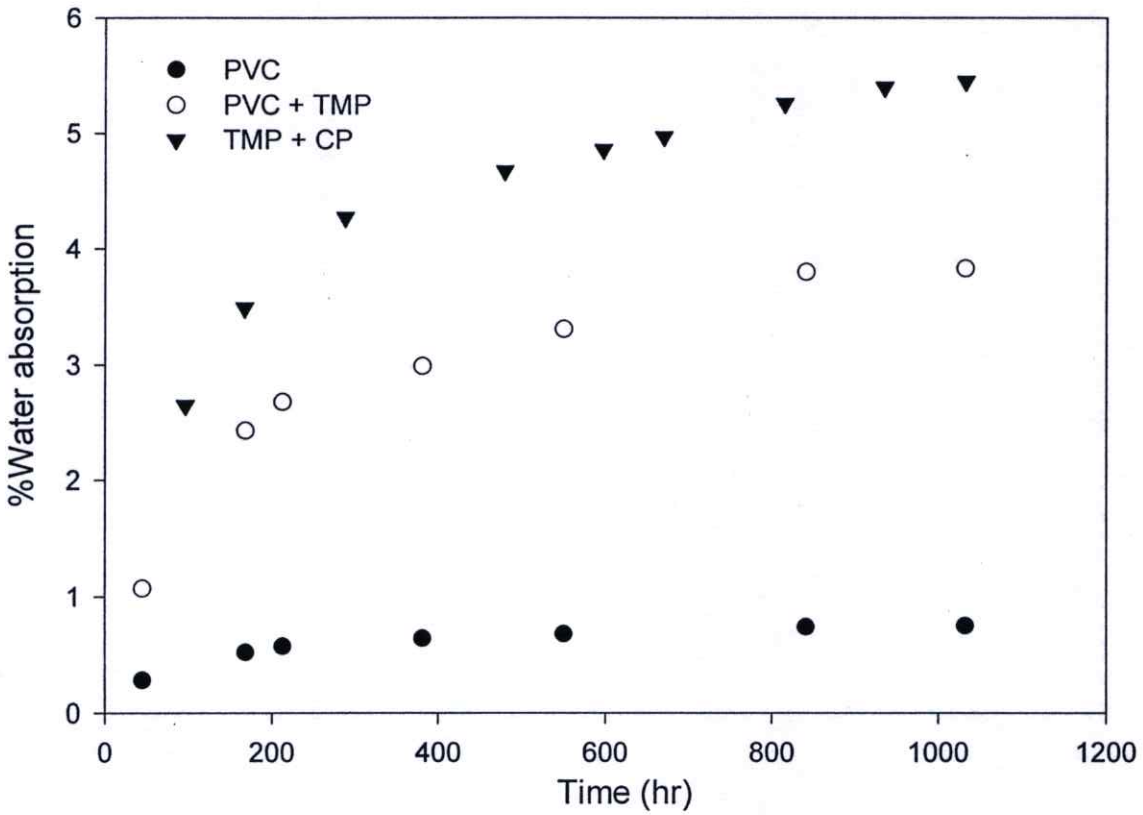


รูปที่ 4.43 เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใยไม้ TMP ไม่แยกขนาด ในปริมาณ 30 phr เมื่อทำการเพิ่มปริมาณ DOP ลงไปในปริมาณ 0 3 7 10 และ 20 phr



รูปที่ 4.44 เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP ไม่แยกขนาดใน ปริมาณ 30 phr และ DOP 10 phr เมื่อทำการเพิ่มปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตลงไปใน ปริมาณ 0 10 20 30 และ 40 phr

รูปที่ 4.44 แสดงเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของพีวีซีคอมโพสิตสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP ไม่แยกขนาดในปริมาณ 30 phr และ DOP 10 phr เมื่อทำการเพิ่มปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต พบว่าการดูดซับน้ำของพีวีซีคอมโพสิตไม่แตกต่างกัน ทั้งนี้เป็นเพราะว่า แคลเซียมคาร์บอเนต ดูดซับน้ำได้น้อยมาก เพราะฉะนั้น เมื่อเติมแคลเซียมคาร์บอเนตลงไปในพีวีซีคอมโพสิต จึงไม่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ



รูปที่ 4.45 เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อทำการเปลี่ยนชนิดของเส้นใยที่นำมาใช้ (เส้นใย TMP และ เส้นใย CP) ในปริมาณ 30 phr โดยใส่ DOP 10 phr

จากรูปที่ 4.45 แสดงเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อทำการเปลี่ยนชนิดของเส้นใยที่นำมาใช้คือ เส้นใยความร้อนเชิงกล (TMP) และเส้นใยทางเคมี (CP) โดยใส่เส้นใย 30 phr และ DOP 10 phr พบว่าพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย CP ให้เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำที่มากกว่าเส้นใย TMP ทั้งนี้เป็นเพราะว่า เซลลูโลสเป็นส่วนประกอบหลักที่สามารถการดูดซับน้ำได้ดี เส้นใย CP เป็นเส้นใยที่มีความบริสุทธิ์ของเซลลูโลสต่อน้ำหนักสูงกว่าเส้นใย TMP เพราะฉะนั้นเส้นใย CP จึงสามารถดูดซับน้ำได้มากกว่า ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย CP จึงมีมากกว่า

4.9 ผลจากเครื่องทดสอบทางความร้อน TGA (Thermogravimetric Analyzer)

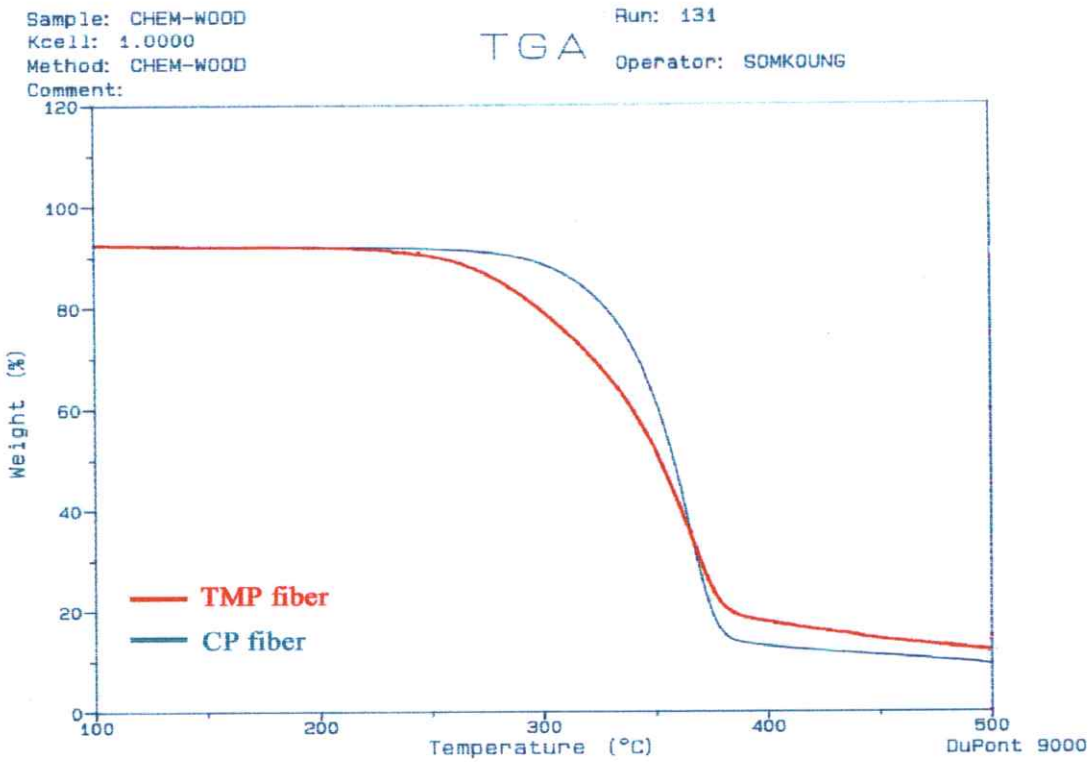
รูปที่ 4.46 แสดงกราฟ TGA ของเส้นใยไม้ TMP และ CP พบว่าเส้นใยไม้ TMP เกิดการเสียสภาพที่ประมาณ 250 องศาเซลเซียส โดยที่เส้นใยไม้ CP เกิดการเสียสภาพที่ประมาณ 300 องศาเซลเซียส ซึ่งเส้นใยทั้งสองชนิดเกิดการเสียสภาพที่อุณหภูมิสูงกว่าพีวีซี (รูปที่ 4.49) ซึ่งเริ่มเสียสภาพที่อุณหภูมิประมาณ 225 องศาเซลเซียส เพราะฉะนั้นอุณหภูมิในการขึ้นรูปของพีวีซีคอมโพสิตจึงไม่ควรมากกว่า 200 องศาเซลเซียส ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ 4.2 ที่ใช้อุณหภูมิของเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยวที่ 170 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิของเครื่องขึ้นรูปพลาสติกโดยวิธีกดอัดที่ 190 องศาเซลเซียส

รูปที่ 4.47 แสดงกราฟ TGA ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณเส้นใยไม้พบว่าเมื่อปริมาณเส้นใยไม้มากขึ้น พีวีซีคอมโพสิตสามารถเกิดการสลายตัว (Degrade) ได้ช้าลงเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องอาจเป็นเพราะ เส้นใยไม้สามารถทนความร้อนได้มากกว่าพีวีซี (เล็กน้อย) เมื่อพีวีซีคอมโพสิตได้รับความร้อน เส้นใยไม้จะช่วยรับและกระจายความร้อนที่ได้รับ ทำให้พีวีซีคอมโพสิตสามารถรับความร้อนได้มากขึ้น การเสียสภาพ จึงเกิดได้ช้าลง

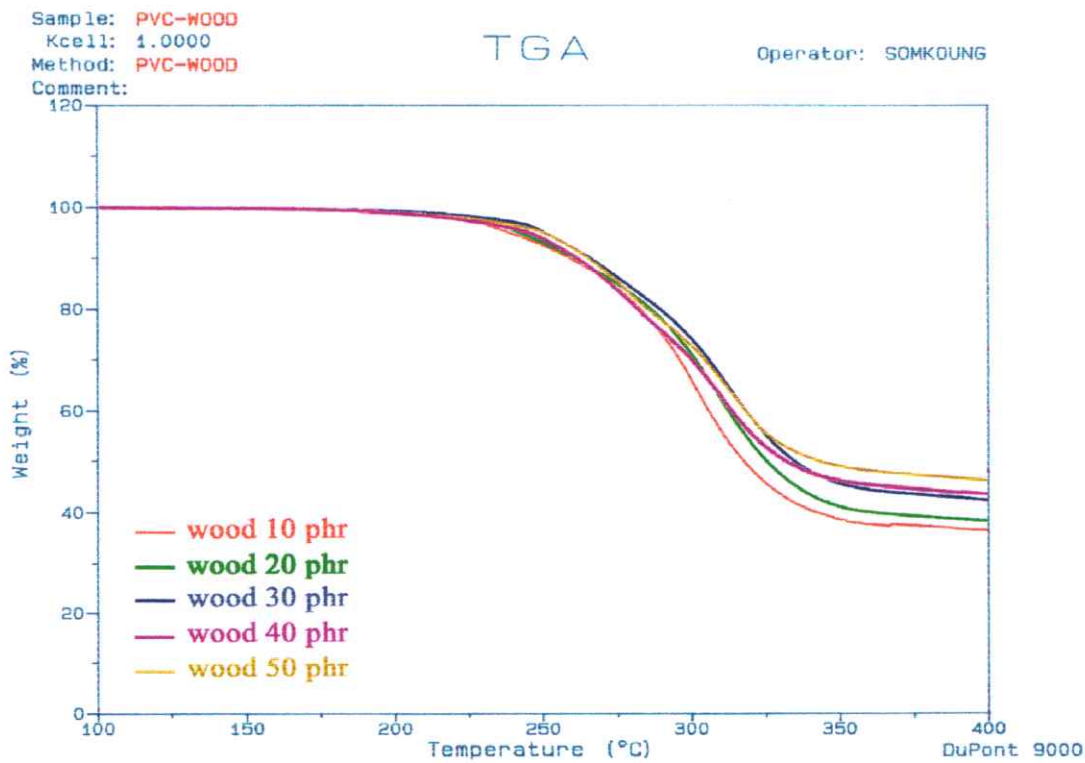
รูปที่ 4.48 แสดงกราฟ TGA ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP ในปริมาณ 30 phr เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณพลาสติไซเซอร์ DOP ซึ่งพบว่า ปริมาณ DOP ที่เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้พีวีซีคอมโพสิตสามารถทนต่อความร้อนได้น้อยลง ทั้งนี้เป็นเพราะว่า DOP ที่ใส่ลงไป ทำหน้าที่ขยายสายโซ่ของพีวีซีให้ห่างกันมากขึ้น เพราะฉะนั้น ความร้อนสามารถกระจายตัวในพีวีซีคอมโพสิตได้ง่ายและเร็วขึ้น ส่งผลให้พีวีซีคอมโพสิตเสียสภาพเร็วขึ้น

รูปที่ 4.49 แสดงกราฟ TGA ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP ในปริมาณ 30 phr เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต พบว่าพีวีซีคอมโพสิตเกิดการเสียสภาพได้ช้าลงเมื่อปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะว่า แคลเซียมคาร์บอเนตสามารถทนต่อความร้อนสูง เพราะฉะนั้นเมื่อผสมแคลเซียมคาร์บอเนตลงในพีวีซีคอมโพสิต แคลเซียมคาร์บอเนตจะไปช่วยรับ และกระจายความร้อน ส่งผลให้พีวีซีคอมโพสิตทนต่อความร้อนได้มากขึ้น พีวีซีคอมโพสิตจึงเกิดการเสียสภาพได้ช้าลง

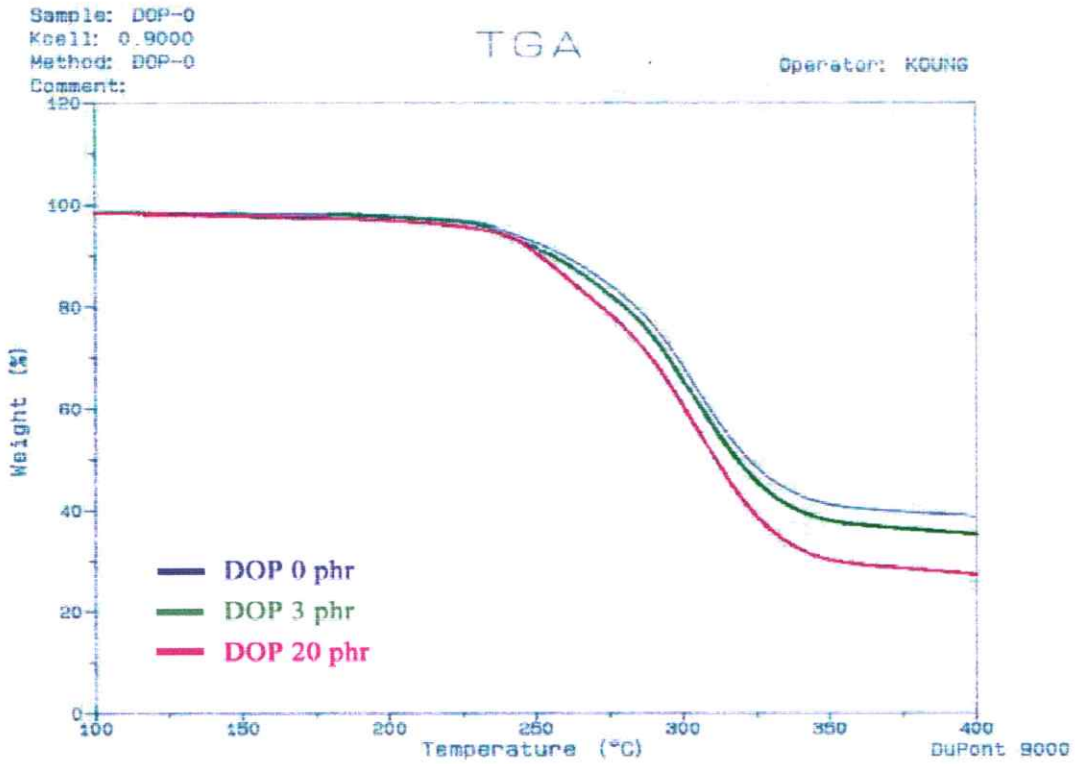
รูปที่ 4.50 แสดงกราฟ TGA เปรียบเทียบพีวีซีคอมโพสิตที่ใช้เส้นใย TMP และ CP ปริมาณ 30 phr ในการผลิต พบว่า พีวีซีคอมโพสิตที่ผลิตจากเส้นใย TMP สามารถเกิดการเสียสภาพได้เร็วกว่าคอมโพสิตที่ผลิตจากเส้นใย CP ทั้งนี้เนื่องมาจากว่าเส้นใย TMP ประกอบไปด้วยเซลลูโลส ลิกนิน เฮมิเซลลูโลส และสารประกอบอื่นๆ อีกมากมาย สารเจือปนเหล่านั้นสามารถเกิดการเสียสภาพได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิการสลายตัวของเซลลูโลส (พิจารณารูปที่ 4.46) จึงส่งผลให้พีวีซีคอมโพสิตที่ผลิตโดยเส้นใย TMP เกิดการเสียสภาพก่อนพีวีซีคอมโพสิตที่ผลิตโดยเส้นใย CP



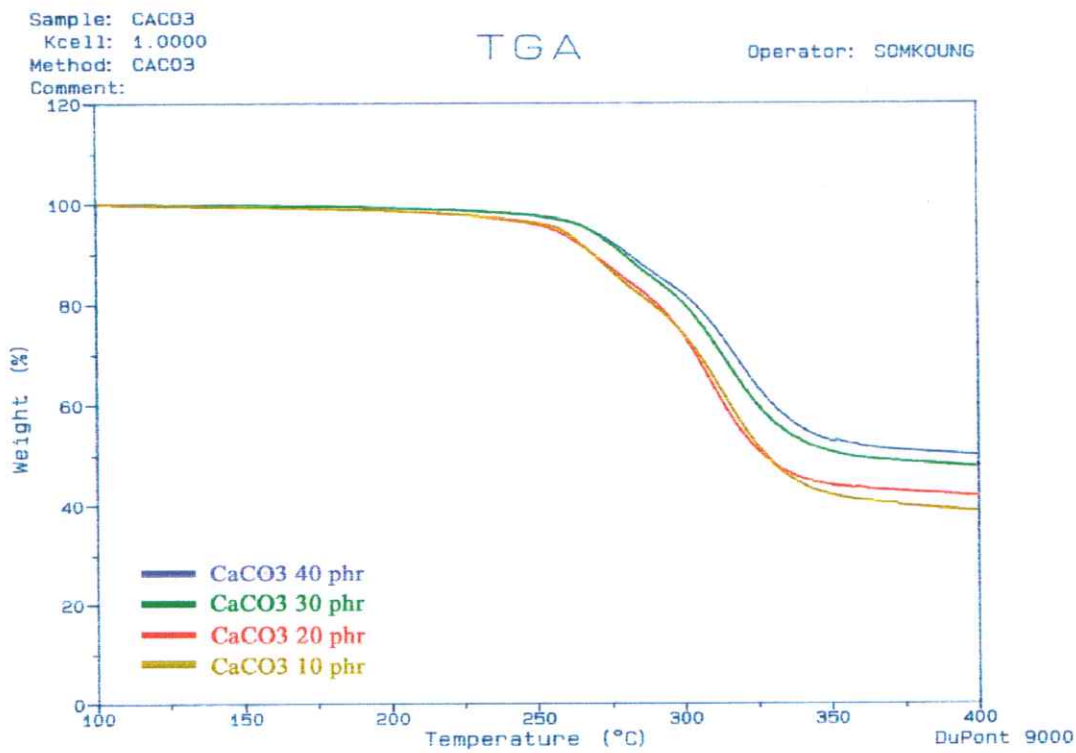
รูปที่ 4.46 กราฟ TGA ของเส้นใยไม้ TMP และเส้นใยไม้ CP



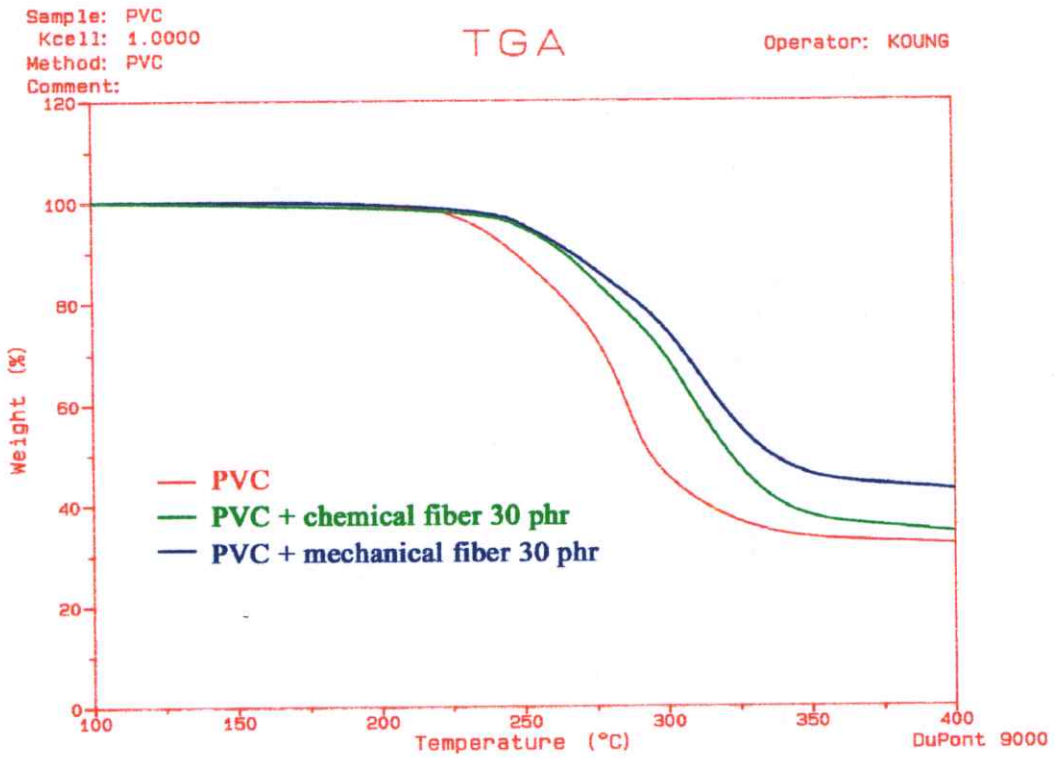
รูปที่ 4.47 กราฟ TGA ของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อทำการเติมปริมาณไม้ TMP 10 20 30 40 และ 50 phr



รูปที่ 4.48 กราฟ TGA ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP ในปริมาณ 30 phr เมื่อทำการเติมปริมาณ DOP 0 3 และ 20 phr



รูปที่ 4.49 กราฟ TGA ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP ในปริมาณ 30 phr เมื่อทำการเติมปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต 10 20 30 และ 40 phr



รูปที่ 4.50 กราฟ TGA ของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อทำการเปลี่ยนชนิดของเส้นใยไม้เป็น TMP และ CP ในปริมาณ 30 phr

4.10 ผลจากเครื่องทดสอบทางความร้อน DMTA (Dynamic Mechanical Thermal Analyzer)

ตารางที่ 4.7 แสดงอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature; T_g) และค่า Tan delta (Tan δ) ที่ได้จากการทดสอบคอมโพสิตด้วยเครื่อง DMTA เมื่อทำการเพิ่มปริมาณเส้นใยไม้ TMP ในพีวีซีคอมโพสิตโดยใส่ DOP 10 phr พบว่า ปริมาณเส้นใยไม้ที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้ T_g มีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณเส้นใยไม้ที่เติมลงไปจะไปขัดขวางสายโซ่ของพีวีซี ส่งผลให้สายโซ่ของพีวีซีคอมโพสิตเคลื่อนตัวได้ยากขึ้น พลังงานที่ใช้ในการทำให้คอมโพสิตเปลี่ยนสถานะจึงต้องใช้มากขึ้น ส่งผลให้ค่า T_g ของคอมโพสิตมีมากขึ้น (สอดคล้องกับรูปที่ 4.46)

แต่ค่า Tan δ ของพีวีซีคอมโพสิตมีค่าลดลงเมื่อปริมาณเส้นใยไม้เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากค่า Tan δ แสดงถึงความสามารถในการกระจายพลังงานของวัสดุ วัสดุที่มีค่า Tan δ ต่ำคือวัสดุที่มีความสามารถในการเก็บพลังงานดีและกระจายพลังงานที่ได้รับออกไปน้อย จากตารางพบว่า เมื่อใส่ปริมาณเส้นใยไม้เพิ่มขึ้น ทำให้ค่า Tan δ ลดลง ทั้งนี้เนื่องมาจากเส้นใยไม้ที่เพิ่มขึ้น ทำให้พีวีซีคอมโพสิตมีความแข็งแรงมากขึ้น เมื่อให้แรงแก่พีวีซีคอมโพสิต แรงสามารถกระจายแรงไปสู่เส้นใยไม้ ทำให้พีวีซีคอมโพสิตสามารถเก็บแรงได้มากขึ้น ส่งผลให้ค่า Tan δ มีค่าลดลง

ตารางที่ 4.7 ค่า T_g และค่า Tan δ จากเครื่อง DMTA เมื่อทำการเพิ่มปริมาณเส้นใยไม้ TMPในพีวีซีคอมโพสิตโดยใส่ DOP 10 phr

	T_g (^oC)	Tan δ
PVC	68.05	0.929
PVC+เส้นใย TMP 10 phr	68.71	0.664
PVC+เส้นใย TMP 20 phr	68.93	0.638
PVC+เส้นใย TMP 30 phr	69.74	0.532
PVC+เส้นใย TMP 40 phr	70.81	0.471
PVC+เส้นใย TMP 50 phr	70.69	0.431

ตารางที่ 4.8 แสดงค่า T_g และค่า Tan δ จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DMTA เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นใยไม้ TMP ปริมาณ 30 phr และใส่ DOP 10 phr พบว่า ค่า T_g และค่า Tan ไม่เปลี่ยนแปลงแสดงให้เห็นว่า ขนาดของเส้นใยมีผลน้อยมากต่อค่า T_g และค่า Tan δ เมื่อเทียบกับปริมาณเส้นใยที่เติมลงไป

ตารางที่ 4.8 ค่า T_g และค่า Tan δ จากเครื่อง DMTA เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นใยไม้ TMP ปริมาณ 30 phr และใส่ DOP 10 phr

	T_g (°C)	Tan δ
PVC	68.05	0.929
PVC + เส้นใย TMP 20-35 mesh	69.68	0.576
PVC + เส้นใย TMP 35-50 mesh	68.43	0.458
PVC + เส้นใย TMP 50-80 mesh	68.38	0.461
PVC + เส้นใย TMP 80-120 mesh	69.17	0.521
PVC + เส้นใย TMP มากกว่า 120 mesh	68.41	0.487

ตารางที่ 4.9 แสดงค่า T_g และค่า Tan δ จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DMTA ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP ไม่แยกขนาด 30 phr เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณ DOP พบว่า ค่า T_g ของพีวีซีคอมโพสิตลดลง เมื่อปริมาณ DOP เพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะว่า DOP ทำหน้าที่เป็นพลาสติไซเซอร์ ขยายสายโซ่ของพีวีซีให้ห่างกันมากขึ้น การเปลี่ยนโครงรูป (Conformation) ของโครงสร้างสายโซ่พีวีซีเกิดขึ้นได้ง่าย พลังงานที่ใช้เพื่อทำให้คอมโพสิตเปลี่ยนสถานะจึงน้อยลง ส่งผลให้ค่า T_g มีค่าน้อยลง และค่า Tan δ ของพีวีซีคอมโพสิตก็ลดลงเช่นเดียวกัน ทั้งนี้เป็นเพราะ DOP จะทำให้พีวีซีคอมโพสิตนิ่มขึ้น เพราะฉะนั้นเมื่อคอมโพสิตได้รับแรงจึงสามารถกระจายแรงไปสู่เส้นใยได้ดี ส่งผลให้คอมโพสิตเก็บแรงได้ ค่า Tan δ ของพีวีซีคอมโพสิตมีค่าที่ลดลง

ตารางที่ 4.9 ค่า T_g และค่า Tan δ จากเครื่อง DMTA ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP ไม่แยกขนาด 30 phr เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณ DOP

	T_g (°C)	Tan δ
PVC	68.05	0.929
PVC + เส้นใย TMP + DOP 0 phr	82.84	0.630
PVC + เส้นใย TMP + DOP 3 phr	79.22	0.607
PVC + เส้นใย TMP + DOP 7 phr	74.94	0.590
PVC + เส้นใย TMP + DOP 10 phr	69.74	0.531
PVC + เส้นใย TMP + DOP 20 phr	64.81	0.399

ตารางที่ 4.10 แสดงค่า T_g และค่า Tan δ จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DMTA ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP ไม่แยกขนาดในปริมาณ 30 phr และ DOP 10 phr เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต พบว่า ค่า T_g ของพีวีซีคอมโพสิตไม่เปลี่ยนแปลงแต่ค่า Tan δ มีค่าที่ลดลง ทั้งนี้เนื่องมาจากแคลเซียมคาร์บอเนตที่เติมลงไปมีความแข็ง เมื่อเติมลงไปในพีวีซีคอมโพสิต ทำให้คอมโพสิตมีความแข็งขึ้น เมื่อได้รับพลังงาน ไม่สามารถเปลี่ยนพลังงานเป็นพลังงานรูปอื่นได้ดี จึงส่งผลให้ค่า Tan δ มีค่าลดลง

ตารางที่ 4.10 ค่า T_g และค่า Tan δ จากเครื่อง DMTA ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP ไม่แยกขนาด 30 phr และ DOP 10 phr เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต

	T_g ($^{\circ}C$)	Tan δ
PVC	68.05	0.929
PVC + เส้นใย TMP + $CaCO_3$ 0 phr	69.74	0.532
PVC + เส้นใย TMP + $CaCO_3$ 10 phr	69.45	0.520
PVC + เส้นใย TMP + $CaCO_3$ 20 phr	70.23	0.515
PVC + เส้นใย TMP + $CaCO_3$ 30 phr	69.86	0.507
PVC + เส้นใย TMP + $CaCO_3$ 40 phr	70.29	0.438

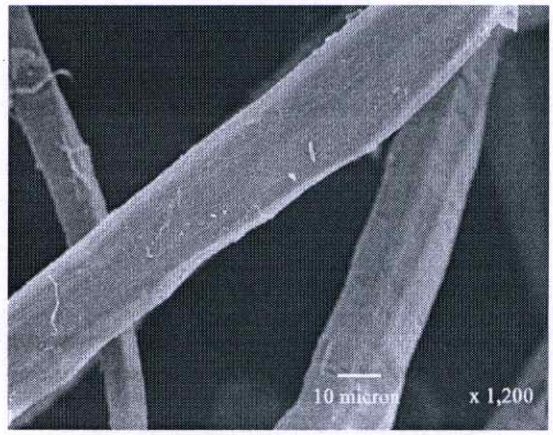
ตารางที่ 4.11 เปรียบเทียบค่า T_g และค่า Tan δ จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DMTA ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP หรือ CP ในปริมาณ 30 phr และ DOP 10 phr พบว่า พีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย CP ให้ค่า T_g และค่า Tan δ ใกล้เคียงกับพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP ทั้งนี้เป็นเพราะว่า เส้นใย TMP และเส้นใย CP ต่างก็ทนอุณหภูมิสูง เพราะฉะนั้น ค่า T_g ของพีวีซีคอมโพสิตทั้งสองชนิด จึงไม่แตกต่างกันมาก อีกทั้งปริมาณที่ใส่ในพีวีซีคอมโพสิตมีปริมาณที่เท่ากันคือ 30 phr

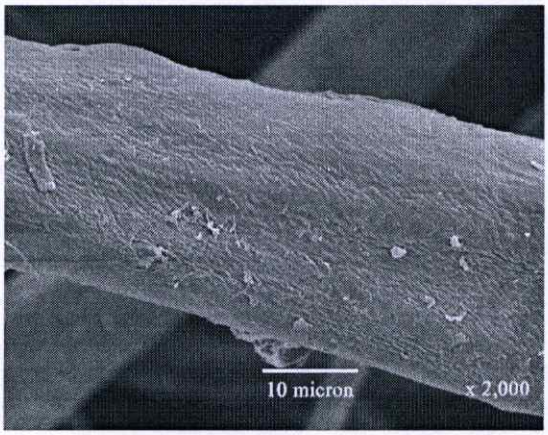
ตารางที่ 4.11 ค่า T_g และค่า Tan δ จากเครื่อง DMTA ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP หรือ CP ในปริมาณ 30 phr และ DOP 10 phr

	T_g ($^{\circ}C$)	Tan δ
PVC	68.05	0.929
PVC + เส้นใย TMP	69.74	0.532
PVC + เส้นใย CP	69.57	0.526

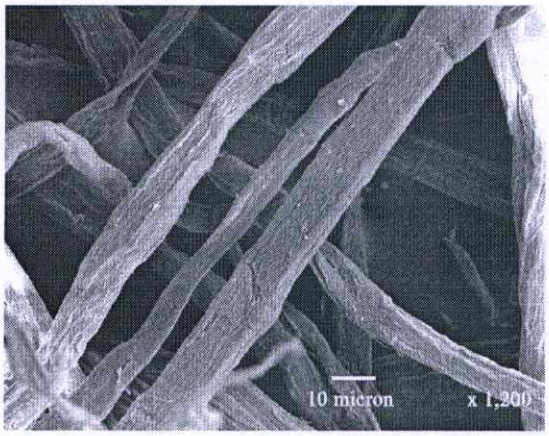
4.11 การศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM)

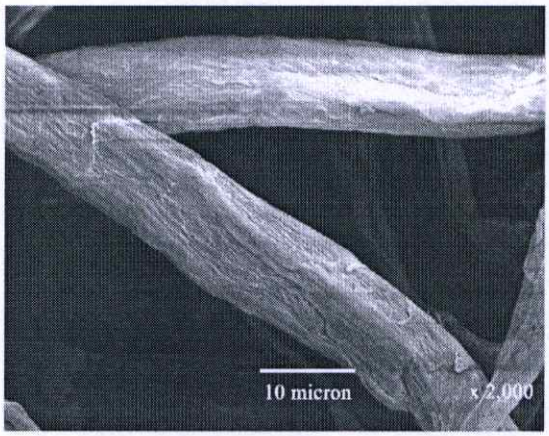
4.11.1 สัณฐานวิทยาของเส้นใย TMP เส้นใย CP และเส้นใย TMP หลังทำการสกัด



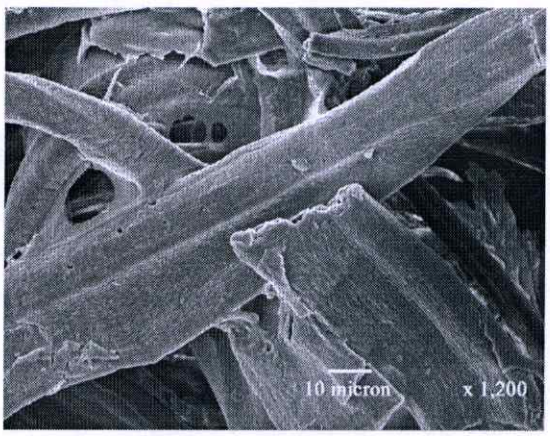


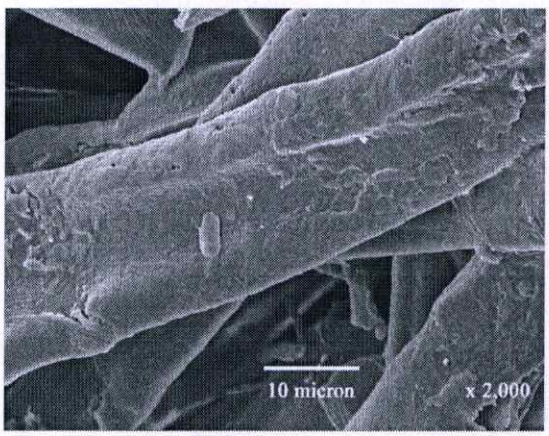
(a) เส้นใย TMP เมื่อทำการขยายที่ 1200 เท่าและ 2000 เท่า





(b) เส้นใย CP เมื่อทำการขยายที่ 1200 เท่าและ 2000 เท่า





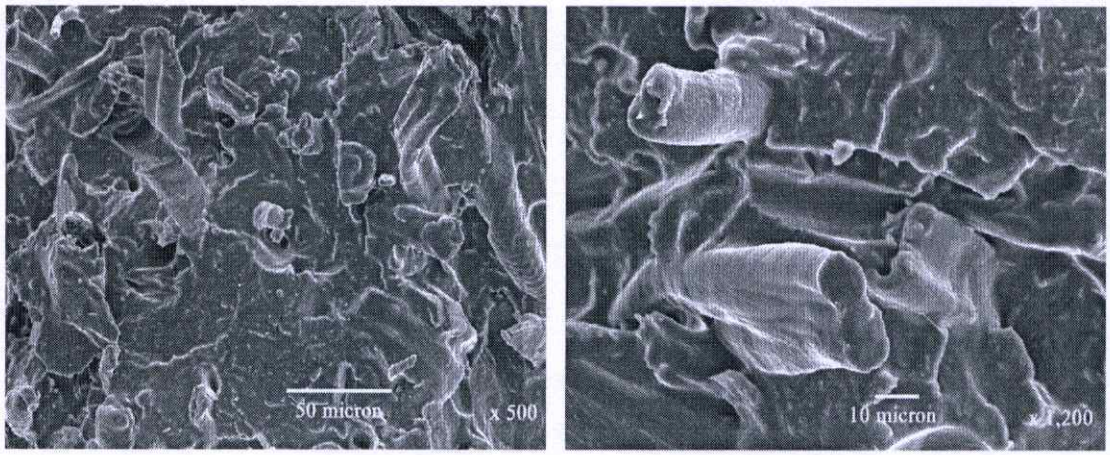
(c) เส้นใย TMP หลังการขึ้นรูปเป็นคอมโพสิต แล้วทำการสกัดพอลิเมอร์เมตริกซ์ออก ที่กำลังขยาย 1200 เท่าและ 2000 เท่า

รูปที่ 4.51 สัณฐานวิทยาของเส้นใย TMP CP และ TMP หลังการสกัดตามลำดับ

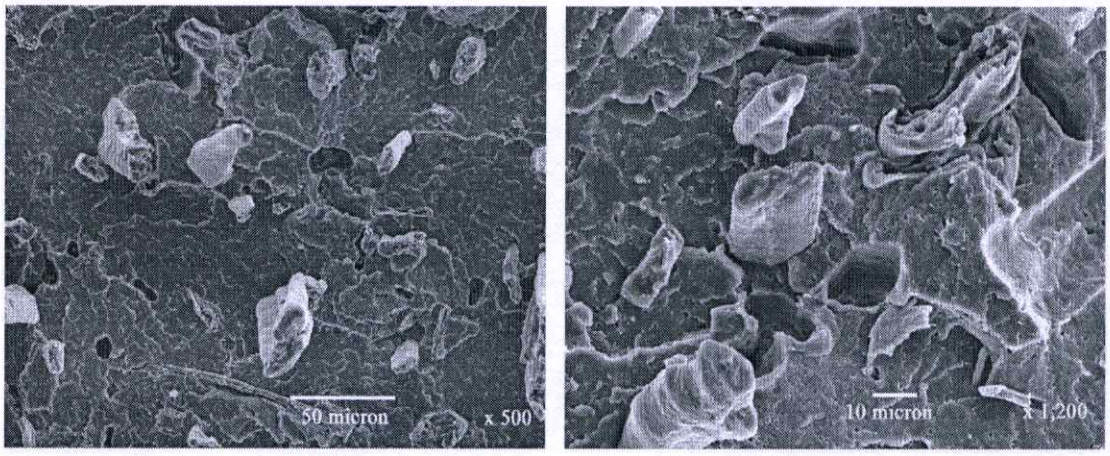
รูปที่ 4.51 แสดงสัณฐานวิทยาของเส้นใย TMP CP และเส้นใย TMP หลังทำการขึ้นรูปเป็นคอมโพสิต แล้วทำการสกัดเอาส่วนที่เป็นพอลิเมอร์เมตริกซ์ออกด้วยเตตระไฮโดรฟูราน (Tetrahydrofuran) ที่กำลังขยาย 1200 และ 2000 เท่าพบว่า เส้นใยก่อนทำการขึ้นรูปเป็นพีวีซีคอมโพสิต มีผิวเรียบ มีความสม่ำเสมอตลอดเส้นใย แต่เส้นใยหลังการขึ้นรูปเป็นคอมโพสิตแล้ว เส้นใยจะเกิดการเสียสภาพโดยการฉีกขาด ซึ่งเกิดจากการที่เส้นใยได้รับแรงขณะทำการขึ้นรูปเป็นพีวีซีคอมโพสิต ส่งผลให้ความยาวของเส้นใยสั้นลง นอกจากนี้ยังพบว่า พื้นผิวของเส้นใยไม่เรียบตลอดจนยังเกิดรูหรือช่องว่างภายในเส้นใยอีกด้วย เนื่องจากในขบวนการขึ้นรูปพีวีซีคอมโพสิตมีการให้แรงเฉือน เป็นผลให้เส้นใยเกิดการเสียสภาพ เกิดรอยตำหนิและเกิดการแตกหักของเส้นใยบางส่วน

4.11.2 สัณฐานวิทยาของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณเส้นใยไม้

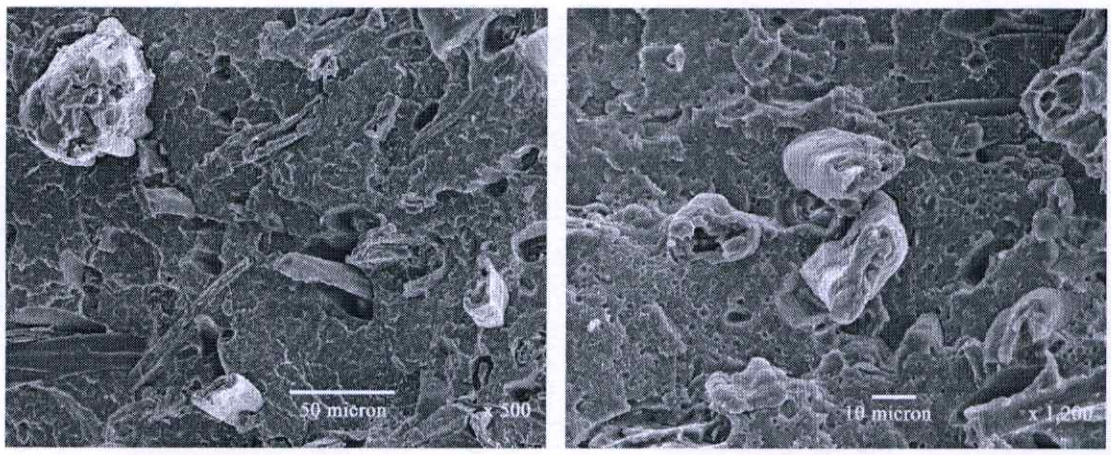
จากรูปที่ 4.52 แสดงสัณฐานวิทยาของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจาก DOP 10 phr และเส้นใย TMP เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณเส้นใยไม้ที่ใส่ลงไป โดยการเตรียมชิ้นงานจะใช้เทคนิคการหักชิ้นงานที่อุณหภูมิต่ำ พบว่า เส้นใยไม้ในพีวีซีคอมโพสิตสามารถกระจายตัวได้สม่ำเสมอในพีวีซีเมตริกซ์ และเมื่อทำการเปรียบเทียบกับเส้นใยในรูปที่ 4.51 พบว่า ในการหักชิ้นงานคอมโพสิต เส้นใยในคอมโพสิตจะถูกดึงออกมาจากพอลิเมอร์เมตริกซ์ (Fiber pull out) บางส่วน แสดงว่าเกิดการเสียสภาพของคอมโพสิตที่บริเวณรอยต่อระหว่างวัฏภาค (Interface) ระหว่างเส้นใยกับพอลิเมอร์เมตริกซ์ ในขณะเดียวกันก็เกิดการเสียสภาพแตกหักของพอลิเมอร์เมตริกซ์และเส้นใย แสดงว่าการยึดติดระหว่างเส้นใยไม้กับพีวีซียึดติดกันได้ดีพอสมควร โดยไม่พบช่องว่างบริเวณรอยต่อระหว่างเส้นใยกับพีวีซี ปริมาณเส้นใยไม้ที่เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้สมบัติเชิงกลเพิ่มมากขึ้น แต่ปริมาณเส้นใยที่มากเกินไปเส้นใยที่มาก จะทำให้เส้นใยไม่สามารถกระจายตัวได้หมด ดังนั้นพีวีซีไม่สามารถแทรกตัวระหว่างเส้นใยไม้ได้ในบางส่วน ทำให้เกิดช่องว่าง (Voids) ภายในชิ้นงานคอมโพสิต (โดยสังเกตได้จากรูปที่ 4.51 (d) และ (e)) ส่งผลให้สมบัติเชิงกลลดลง (สอดคล้องกับผลการทดลองตอนที่ 4.3) นอกจากนี้ ยังส่งผลให้ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำเพิ่มขึ้น (สอดคล้องกับรูปที่ 4.41)



(a) สัณฐานวิทยาของพีวีซีคอมโพสิตขนาด 500 และ 1200 เท่า เมื่อผสมเส้นใย TMP 10 phr

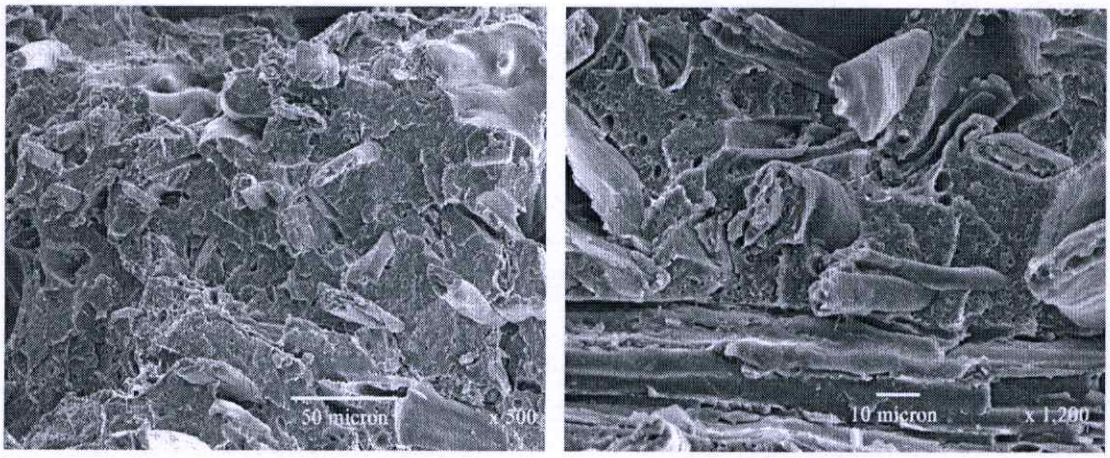


(b) สัณฐานวิทยาของพีวีซีคอมโพสิตขนาด 500 และ 1200 เท่า เมื่อผสมเส้นใย TMP 20 phr

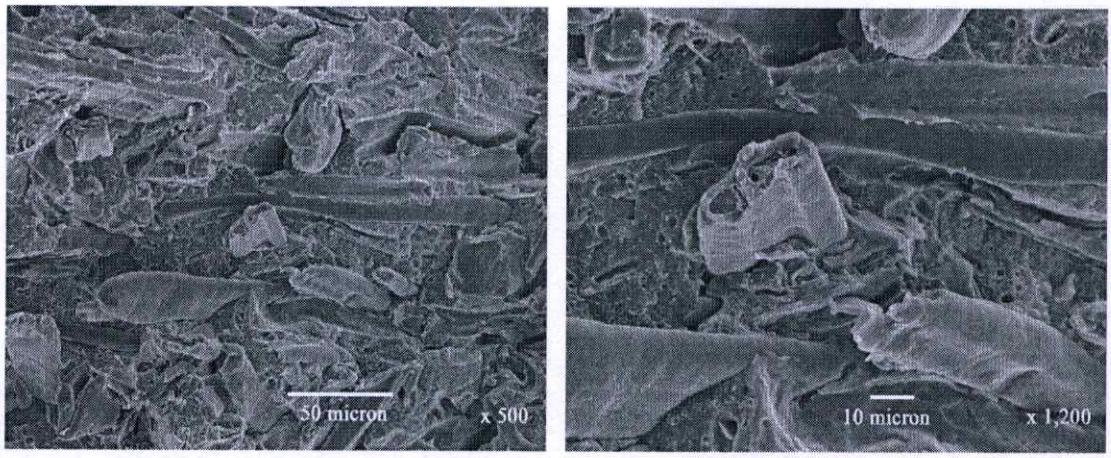


(c) สัณฐานวิทยาของพีวีซีคอมโพสิตขนาด 500 และ 1200 เท่า เมื่อผสมเส้นใย TMP 30 phr

รูปที่ 4.52 สัณฐานวิทยาของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณเส้นใยไม้



(d) สัณฐานวิทยาของพีวีซีคอมโพสิตขนาด 500 และ 1200 เท่า เมื่อผสมเส้นใย TMP 40 phr

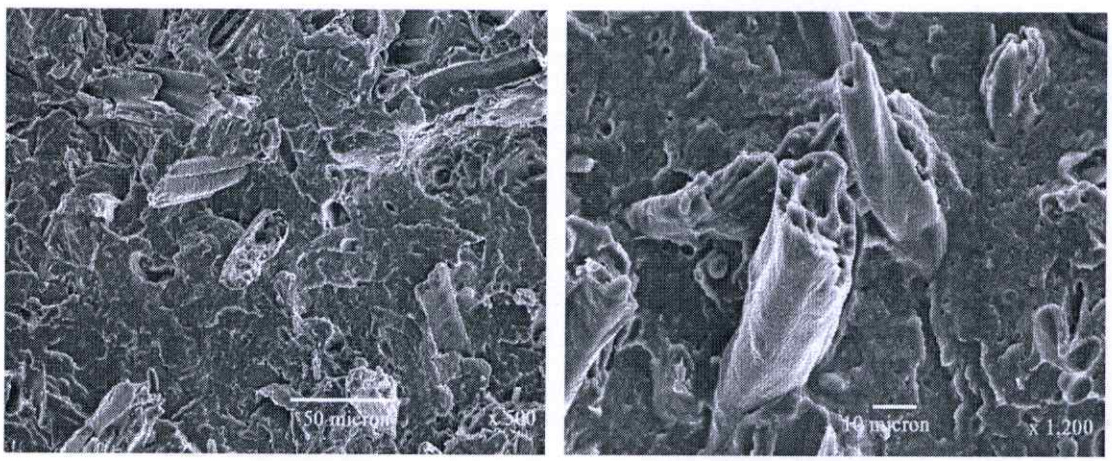


(e) สัณฐานวิทยาของพีวีซีคอมโพสิตขนาด 500 และ 1200 เท่า เมื่อผสมเส้นใย TMP 50 phr

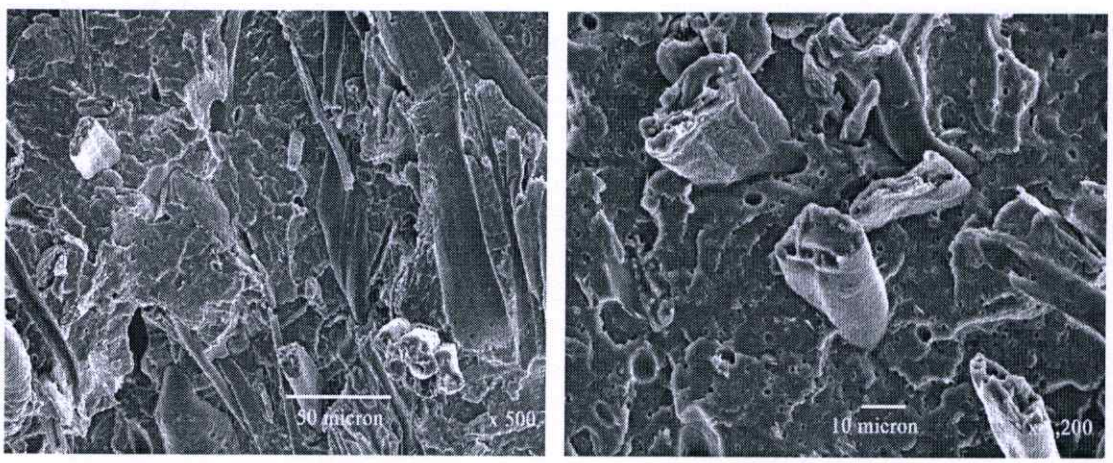
รูปที่ 4.52 (ต่อ)

4.11.3 สัณฐานวิทยาของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงขนาดความยาวเส้นใยไม้

จากรูปที่ 4.53 แสดงสัณฐานวิทยาของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP ในปริมาณ 30 phr และ DOP 10 phr โดยทำการเปลี่ยนแปลงขนาดความยาวเส้นใยไม้ที่ใส่ลงไป จากรูปพบว่าเส้นใยไม้มีการกระจายตัวในคอมโพสิตดี นอกจากนี้ยังไม่พบช่องว่างระหว่างเส้นใยกับพีวีซี แสดงว่าการยึดติดระหว่างเส้นใยไม้กับพีวีซียึดติดกันได้ดีพอสมควร

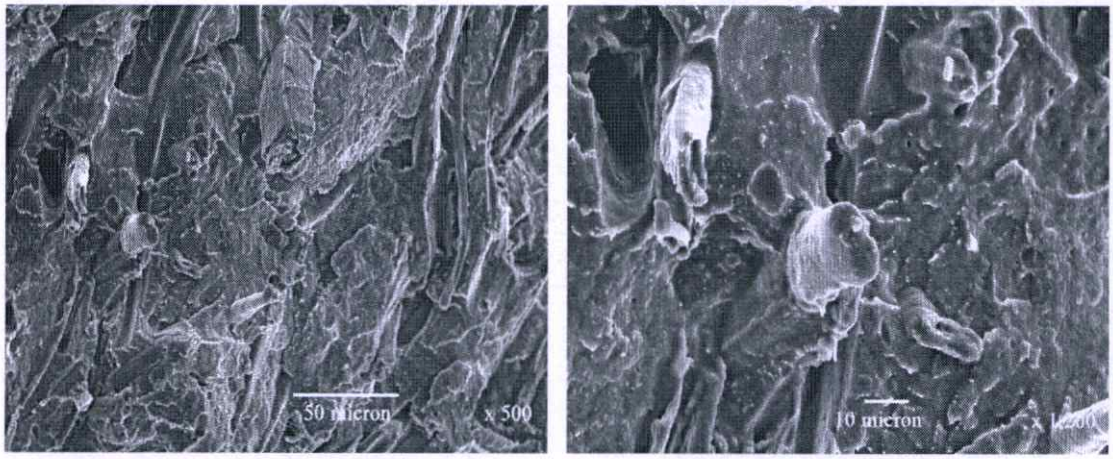


(a) สัณฐานวิทยาของพีวีซีคอมโพสิตขนาด 500 และ 1200 เท่า เมื่อผสมเส้นใย TMP ขนาด 20-35 mesh

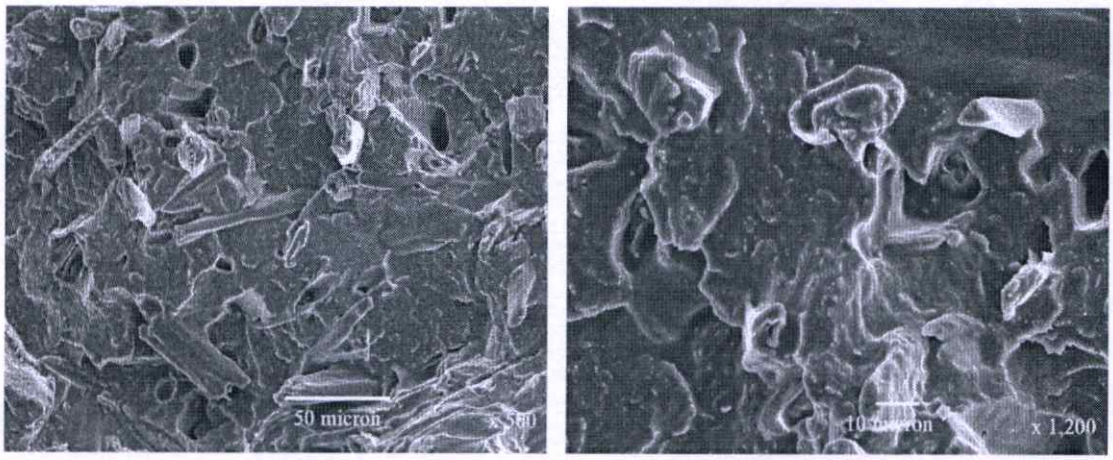


(b) สัณฐานวิทยาของพีวีซีคอมโพสิตขนาด 500 และ 1200 เท่า เมื่อผสมเส้นใย TMP ขนาด 35-50 mesh

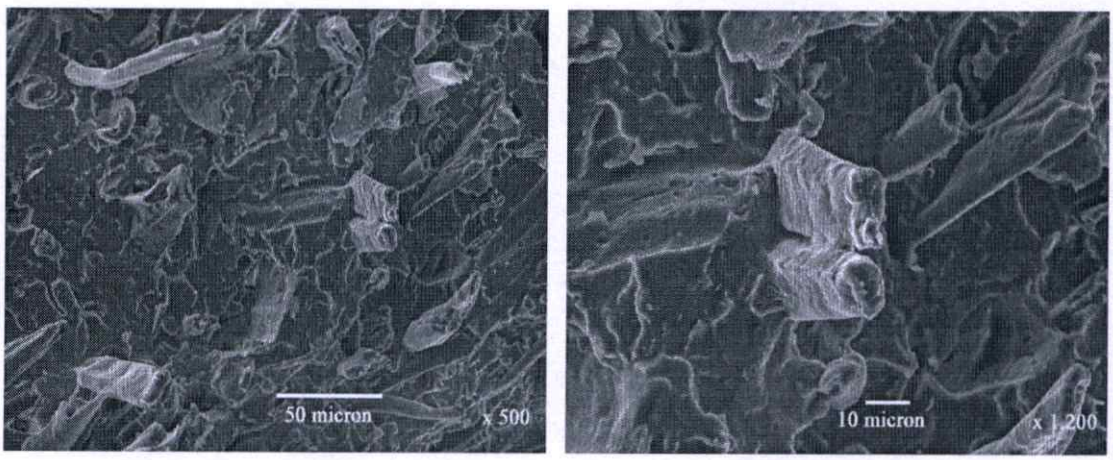
รูปที่ 4.53 สัณฐานวิทยาของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP ในปริมาณ 30 phr เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นใยไม้



(c) สัณฐานวิทยาของพีวีซีคอมโพสิตขนาด 500 และ 1200 เท่า เมื่อผสมเส้นใย TMP ขนาด 50-80 mesh



(d) สัณฐานวิทยาของพีวีซีคอมโพสิตขนาด 500 และ 1200 เท่า เมื่อผสมเส้นใย TMP ขนาด 80-120 mesh

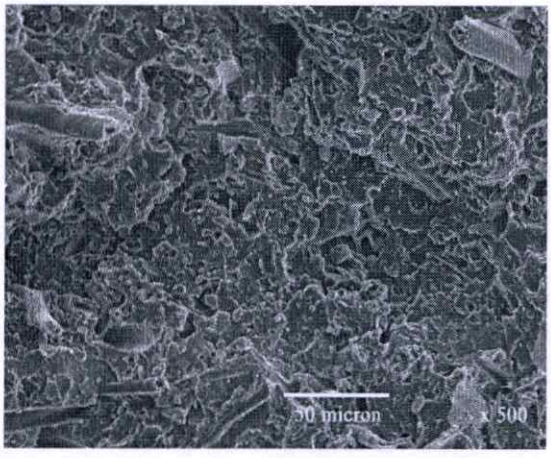


(e) สัณฐานวิทยาของพีวีซีคอมโพสิตขนาด 500 และ 1200 เท่า เมื่อผสมเส้นใย TMP ขนาดมากกว่า 120 mesh

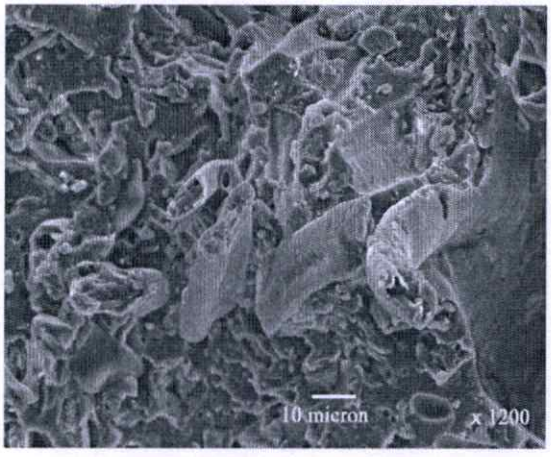
รูปที่ 4.53 (ต่อ)

4.11.4 สัณฐานวิทยาของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP เมื่อเติมแคลเซียมคาร์บอเนต 30 phr

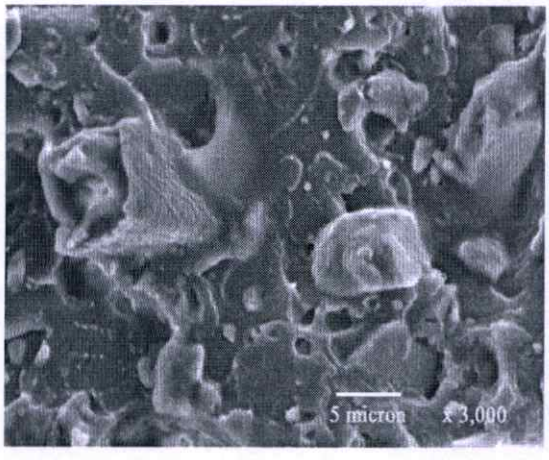
จากรูปที่ 4.54 แสดงสัณฐานของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP ไม่แยกขนาดในปริมาณ 30 phr และ DOP 10 phr โดยเติมแคลเซียมคาร์บอเนตลงไป 30 phr (แคลเซียมคาร์บอเนตที่ใช้มีขนาดอนุภาค 5 ไมครอน) จากรูปพบว่าการกระจายตัวของแคลเซียมคาร์บอเนตดี แคลเซียมคาร์บอเนตกระจายตัวอยู่ทั่วไปในพีวีซีคอมโพสิต โดยสังเกตได้จากกลุ่มก้อนกลมของแคลเซียมคาร์บอเนตในรูปที่ 4.53 (c) เพราะฉะนั้น การใส่แคลเซียมคาร์บอเนต 30 phr ไม่ส่งผลให้สมบัติเชิงกลของพีวีซีคอมโพสิตไม่เปลี่ยนไปมากนัก (สอดคล้องกับผลการทดลองที่ 4.5)



(a) ภาพขยาย 500 เท่า



(b) ภาพขยาย 1200 เท่า

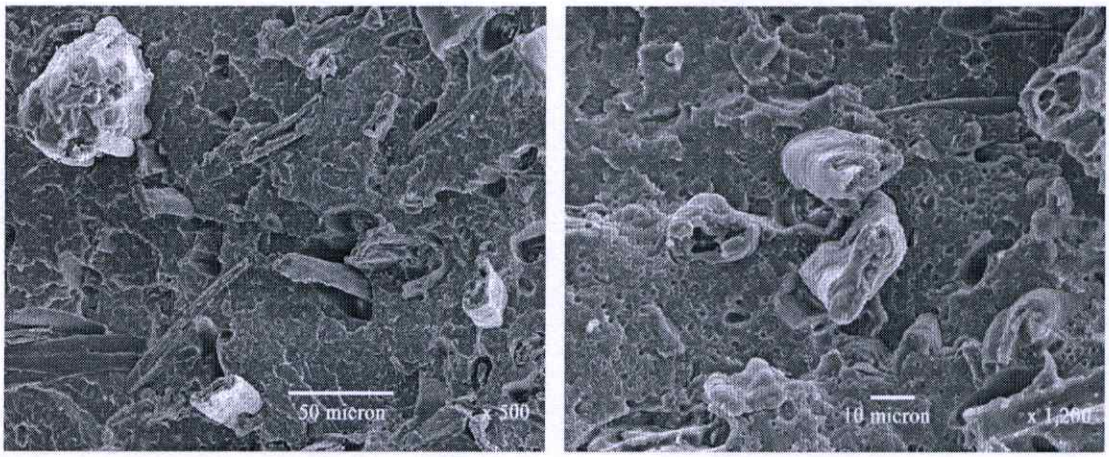


(c) ภาพขยาย 3000 เท่า

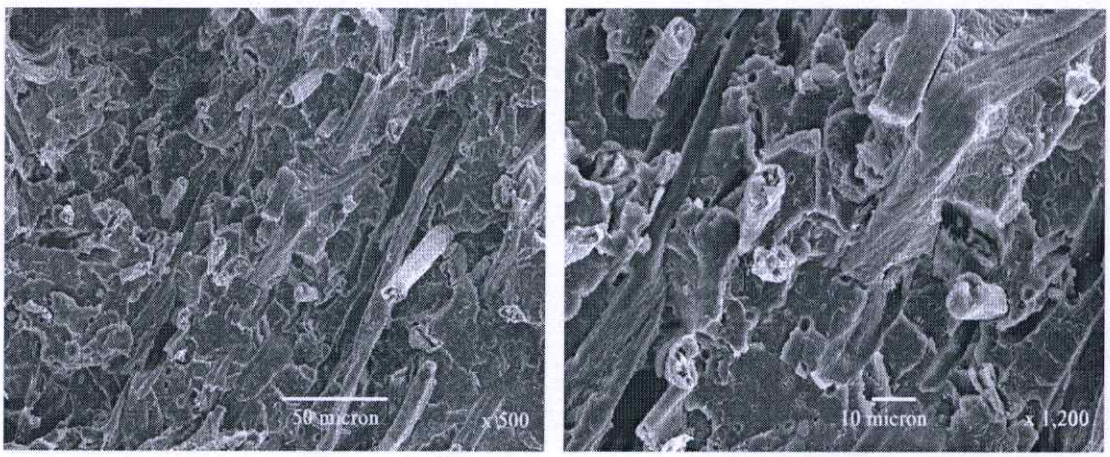
รูปที่ 4.54 สัณฐานวิทยาของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP ในปริมาณ 30 phr เมื่อทำการเติมแคลเซียมคาร์บอเนต ลงไป 30 phr

4.11.5 เปรียบเทียบสัณฐานวิทยาของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP และ CP

รูปที่ 4.55 แสดงการเปรียบเทียบสัณฐานของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP และ CP ในปริมาณ 30 phr และ DOP 10 phr จากการสังเกตลักษณะของเส้นใยด้วยตา (รูปที่ 3.1) พบว่า เส้นใย CP มักจับกับเป็นกลุ่มก้อน การกระจายตัวของเส้นใยไม่ดีเหมือนเส้นใย TMP และจากรูปที่ 4.55 (b) แสดงสัณฐานวิทยาของกลุ่มก้อนของเส้นใย CP ในคอมโพสิต พบว่า เกิดช่องว่าง (Voids) ภายในชิ้นงานคอมโพสิต ซึ่งต่างจากเส้นใย TMP ที่มีการกระจายตัวของเส้นใยในคอมโพสิตดี เส้นใยไม่จับกันเป็นก้อน เพราะฉะนั้น สมบัติเชิงกลของคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP จึงดีกว่าคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย CP



(a) สัณฐานวิทยาของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP ขนาด 500 และ 1200 เท่า



(b) สัณฐานวิทยาของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย CP ขนาด 500 และ 1200 เท่า

รูปที่ 4.55 สัณฐานของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP และ CP

บทที่ 5
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการผลิตและสมบัติของไม้เทียมพอลิเมอร์คอมโพสิตเส้นใยธรรมชาติจากพอลิไวนิลคลอไรด์และเส้นใยยูคาลิปตัส โดยทำการผสมสารตั้งต้นต่างๆ ในเครื่องผสมความเร็วสูง และเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยวที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส จากนั้นนำพีวีซีคอมพาวด์ที่ได้ไปบดในเครื่องบดพลาสติก นำคอมโพสิตที่ได้ไปขึ้นรูปเป็นชิ้นงาน เพื่อนำไปทดสอบโดยใช้เครื่องขึ้นรูปพลาสติกโดยวิธีกดอัดที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นทำให้เย็นด้วยเครื่องขึ้นรูปพลาสติกโดยวิธีกดอัดเป็นเวลา 2 นาที นำพีวีซีคอมโพสิตที่ได้ไปทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน สมบัติทางกายภาพ และสัณฐานวิทยา จากการทดสอบสมบัติต่างๆ สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ผลของปริมาณเส้นใย TMP ไม่แยกขนาดที่เติมลงไปในพีวีซีคอมโพสิต (DOP 10 phr)
   1.1 ปริมาณเส้นใยไม้ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้พอลิเมอร์คอมโพสิตมีความแข็งแรงมากขึ้น โดยค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดุลัสมีค่าเพิ่มมากขึ้น แต่ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด มีค่าลดลง
   1.2 ปริมาณเส้นใยไม้ ไม่มีผลให้ต่อค่าความหนาแน่น
   1.3 ปริมาณเส้นใยไม้ที่เพิ่มขึ้น ทำให้พีวีซีคอมโพสิตดูดซับน้ำได้มากขึ้น
   1.4 ปริมาณเส้นใยไม้ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้พีวีซีคอมโพสิตมีสมบัติทางความร้อนดีขึ้น โดยค่า HDT และ T_g เพิ่มขึ้นเล็กน้อย
   1.5 เส้นใยไม้ในพีวีซีคอมโพสิตมีการกระจายตัวที่ดี การยึดติดระหว่างพีวีซีและเส้นใยไม้ดีพอสมควร
   1.6 ปริมาณเส้นใยที่เหมาะสมที่สุดคือ 30 phr

2. ผลของขนาดเส้นใย TMP ที่เติมลงไปในพีวีซีคอมโพสิต (DOP 10 phr)
   2.1 เส้นใยไม้ที่มีความยาวมากกว่าให้สมบัติเชิงกลดีกว่าเส้นใยไม้ที่มีความสั้นกว่า โดยให้ค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดุลัสสูงกว่า แต่ไม่มีผลต่อค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด

2.2 ขนาดของเส้นใยไม้ ไม่มีผลต่อค่าความแข็งกด ความหนาแน่น และเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ

2.3 ขนาดของเส้นใยไม้ ไม่มีผลต่อสมบัติทางความร้อน

2.4 ขนาดของเส้นใยไม้ที่เหมาะสมที่สุดได้แก่ 35-50 mesh (300-500 micron)

3. ผลของปริมาณ DOP ที่เติมลงไปในพีวีซีคอมโพสิต (เส้นใย TMP ไม่แยกขนาด 30 phr)

3.1 ปริมาณ DOP ที่เพิ่มขึ้น ทำให้พีวีซีคอมโพสิตมีความอ่อนมากขึ้น สามารถดึงยืดได้ดีขึ้น ส่งผลให้ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดเพิ่มมากขึ้น แต่ค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดุลัสลดลง

3.2 ค่าความแข็งกด และความหนาแน่นลดลง เมื่อปริมาณ DOP เพิ่มมากขึ้น

3.3 ปริมาณ DOP ที่เพิ่มขึ้น ทำให้พีวีซีคอมโพสิตดูดซับน้ำได้มากขึ้น

3.4 ปริมาณ DOP ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้พีวีซีคอมโพสิตมีสมบัติทางความร้อนลดลง โดยทำให้ค่า HDT และ T_g ลดลง

3.5 ปริมาณ DOP ที่เหมาะสมในการผลิตพีวีซีคอมโพสิตคือ 10 phr

4. ผลของปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่เติมลงไปในพีวีซีคอมโพสิต (เส้นใย TMP ไม่แยกขนาด 30 phr และ DOP 10 phr)

4.1 ค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดุลัสลดลงเมื่อปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตมีค่าเพิ่มมากขึ้น

4.2 ค่าความแข็งกด และความหนาแน่นเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตมีค่าเพิ่มขึ้น

4.3 ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต ไม่มีผลต่อค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ

4.4 สมบัติทางความร้อนของพีวีซีคอมโพสิตเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเพิ่มมากขึ้น

4.5 แคลเซียมคาร์บอเนตมีการกระจายตัวในพีวีซีคอมโพสิตไม่ดี เกิดการจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อน ส่งผลให้สมบัติเชิงกลลดลง

4.6 ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่เหมาะสมที่สุดคือ 30 phr

5. ผลของวิธีการเตรียมเส้นใยไม้ที่เติมลงไปในพีวีซีคอมโพสิต (เส้นใย TMP หรือ CP ไม่แยกขนาด 30 phr และ DOP 10 phr)
   5.1 สมบัติเชิงกลของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย CP มีค่าน้อยกว่าพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP เนื่องจากการกระจายตัวของเส้นใย CP ไม่ดี เกิดการจับตัวเป็นกลุ่มก้อน
   5.2 ค่าความแข็งแรงกระแทกของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย CP มีค่าสูงกว่าพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP แต่ค่าความแข็งกดมีค่าน้อยกว่า
   5.3 ชนิดของเส้นใยไม้ ไม่มีผลต่อค่าความหนาแน่น
   5.4 พีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย CP ดูดซับน้ำมากกว่าพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP
   5.5 ชนิดของเส้นใยไม้ ไม่มีผลต่อสมบัติทางความร้อน
   5.6 เส้นใย TMP เป็นเส้นใยที่เหมาะสมในการเตรียมพีวีซีคอมโพสิตจากเส้นใยยูคาลิปตัสมากกว่าเส้นใย CP

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ทำการผลิตพีวีซีคอมโพสิตในรูปของแผ่นลามิเนต เพื่อใช้ประโยชน์ในงานเคลือบผิว หรือทำเป็นโฟม เพื่อให้ประโยชน์ในการลดแรง หรือเก็บเสียง
2. ทดลองโดยปรับปรุงด้วยสารปรับสภาพผิว เพื่อทำให้การยึดติดระหว่างพีวีซีและเส้นใยไม้ดีขึ้น
3. ปรับปรุงสมบัติทางความร้อน ให้สามารถทนต่อความร้อนได้ดีขึ้น
4. ทดลองขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์อื่นๆ เช่น กรอบประตู กรอบหน้าต่าง และทำไปทดสอบการใช้งานจริงๆ
5. ปรับปรุงสีของไม้เทียมคอมโพสิตให้มีสีสันความสวยงามมากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

1. ผศ.ดร.มาลินี ชัยศุภกิจสินธ์. 2541. เคมีพอลิเมอร์. กรุงเทพฯ : โครงการตำรา คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
2. ผศ.ดร.อิทธิพล แจ้งชัด. 2543. พอลิเมอร์คอมโพสิต. กรุงเทพฯ : เอกสารประกอบการศึกษา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
3. Methews, F.L. and Rawlings, R.D. 1994. **Composite Materials : Engineering and Science.** 1 st ed. Oxfrod.
4. Akhtar, S. et.al. 1986. **J.Appl.Polym.Sci.** 32 : 5123
5. Titow, W.V. 1926. **PVC plastics properties, processing and applications.** New York : McGraw-Hill.
6. Charles, A. 1996. **Handbook of plastic elastomers and composites.** 3 rd ed. New York : McGraw-Hill.
7. คมฤทธิ์ ร่วมฤกษ์ และนันทพล จรรโลงศิริชัย. 2542. "ผลของสารปรับสภาพพลาสติกทุติยภูมิที่มีผลต่อพอลิไวนิลคลอไรด์ และ การผสมพอลิไวนิลคลอไรด์กับพอลิโอเลฟินที่ผ่านการใช้งานแล้วเพื่อการประยุกต์ใช้ในงานพื้นทำรองเท้า" โครงงานพิเศษ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
8. Fred, W. 1984. **Textbook of polymer science.** 3 rd ed. New York : Troy.
9. Brydson, J.A. 1995. **Plastics materials.** 6 London : Sthed-Butterworths.
10. ทัศนีย์ รัตวานิช อรรณพ อภิชาตบุตร์ และรัตนา หม้อมณี. กันยายน-ตุลาคม 2531. "อนุสารไม้อัดบางนา" 17(96), 25-28.
11. ประพนธ์ เลี่ยวสมบูรณ์ และสมภพ เลิศลักขณากุล. 2541. "การหาตัวทำละลายที่เหมาะสมในการสังเคราะห์คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส" โครงงานพิเศษ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
12. กรมป่าไม้และกรมพัฒนาที่ดิน ยูคาลิปตัส คามาดูเลนซีส (โครงการไม้ใช้สอยชุมชน). 2527. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.
13. Kokta, B.V. et.al. 1989. "Use of Wood Flour as Filler in Polypropylene : Studies on Mechanical Properties." **Polym.-Plast.Technol.Eng.** 28(3) : 247-259.
14. Joseph, K. et.al. 1993. "Tensile Properties of Shot Sisal Fiber-Reinforced Polyethylene Composites." **J.Appl.Polym.Sci.** 49 : 1731-1739.

15. George, J. et.al. 1994. **Mechanical and Viscoelastic Properties of Shot Pineapple Fiber Peinforaced Low-Dendity Polyethylene Composite, Polymer Science Recent Advances, (Bharwaj,I.S.ed.)** India : Allied Publishers Limited.

16. Xian, X.J. et.al. 1993. "Mechanical Behavior and Microstructure of Nature Plant Fiber Reinforced Composite Material." **Proc.Int.Conf.Compos.Master.** 2 : 858-863.

17. เฉลิมพล อิทธิวิวัฒน์ และสกุล บรรจงวุฒิ. 2537. "การใช้เส้นใยเซลลูโลสผสมกับเส้นใยแก้วเพื่อเป็นสารเสริมแรงในพอลิเอทิลีน" โครงงานพิเศษ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

18. พิชัย พนัสพัฒนา และศิริพงศ์ โรจน์วีระ. 2533. "วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรในการปรับปรุงสมบัติทางกายภาพของพลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงและพอลิพรอพิลีน" โครงงานพิเศษ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

19. Rodney, J.S. et.al. 1992. "Composite Materials from Recycled Miltilayer Polypropylene Bottles and Wood Fiber." **American Chemical Society.** 232-240.

20. ณะภัทรพวศ์ สุวรรณชัย และณัฐพร เด่นนินนาท. 2538. "การใช้ประโยชน์จากเส้นใยสลาบหลวงเป็นสารตัวเติมในพอลิพรอพิลีน" โครงงานพิเศษ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

21. Nagaty, A. et.al. 1983. **J.Apply.Polym.Sci.** 21 : 715.

22. Woodhams, R.t. et.al. 1984 "Wood Fiber as Reinforcing Filler in Polyethylene : Studies on Mechanical Properties." **Polym.Eng.Sci.** 24(15) : 77-81.

23. Yam. K.L. et. al. 1990. "Composites from Compounding Wood Fibers with Recycled HDPE." **Polym.Eng.Sci.** 30(11) : 693-700.

24. Raj, R.G. et. al. 1989. "Use of Wood Fiber as a Filler in Polyethylene : Studies on Mechanical Properties." **Plastic and Rubber Processing and Application.** 11 : 215-221.

25. George, J. et. al. 1994. "Mechanical and Viscoelastic Properties of Short Pineapple Fiber Reinforces Low-Density Polyethylene Composites." **Polymer Science Recent Advances.** 2 : 526-531.

26. Kokta, B.V. et. al. 1989. "Use of Wood Flour as a Filler in Polypropylene : Studies on Mechanical Properties." **Polym.-Plast.Technol.Eng.** 28(3) : 247-259.

27. รัชดา ขวัญตน. 2541. "คอมโพสิตจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ใช้แล้วและเส้นใยอ้อย" วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

28. Piyawan, T. 1998. "Studies of natural fiber / polymer composites from bamboo (Bambusa blumeana schult)" Master, Thesis King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang.
29. นางสาววัชรี อธิปัญญาสฤษดิ์ นายวัฒนเกียรติ เลื่องลือเจริญกิจ และนางสาววิศณีย์ ตั้งยืนยง. 2540. "การศึกษาการปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยธรรมชาติ (ชานอ้อย) เพื่อใช้ประโยชน์ในพอลิเมอร์คอมโพสิต" โครงงานพิเศษ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
30. นางสาวนันทพร พันธุ์ภักดี และนางสาวเรวดี สกุลอาริยะ. 2540. "วัสดุคอมโพสิตจากพอลิพรอพิลีนและเส้นใยอ้อย" โครงงานพิเศษ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
31. นางสาวปิยะวรรณ เจียวก๊ก และนายพงศ์ศักดิ์ แพน้อย. 2543. "การศึกษาพอลิเมอร์คอมโพสิตไม้เทียมจากพอลิพรอพิลีน และไม้ยูคาลิปตัส" โครงงานพิเศษ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
32. ดร.อิทธิพล แจ้งชัด 2543. ฟิสิกส์พอลิเมอร์. กรุงเทพฯ. เอกสารประกอบการศึกษา : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
33. ASTM D 638 Committee on standard "Standard Test Methods for Tensile Properties of Plastic (Metric)", *Philadephia : American Society for testing and Materials.*, **1993.**
34. ASTM D 256 Committee on standard "Standard Test Methods for Impcat Resistance of Plastic and Electrical Insulating Materials", *Philadephia : American Society for testing and Materials.*, **1993.**
35. ASTM D 785 Committee on standard "Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Plastic and Electrical Insulating Materials", *Philadephia : American Society for testing and Materials.*, **1993.**
36. ASTM D 790 Committee on standard "Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforce Plastic and Electrical Insulating Materials", *Philadephia : American Society for testing and Materials.*, **1993.**
37. ASTM D 1505-85 Committee on standard "Standard Test Methods for Density of Plastic by the Density-Gradient Technique", *Philadephia : American Society for testing and Materials.*, **1993.**
38. ASTM D 570 Committee on standard "Standard Test Methods water abrorption of plastic", *Philadephia : American Society for testing and Materials.*, **1988.**
39. Balaguru, P.N. and Shah, S.P. 1992. **Fiber Reinforcement Cement Composite.** Singapore : McGraw-Hill.

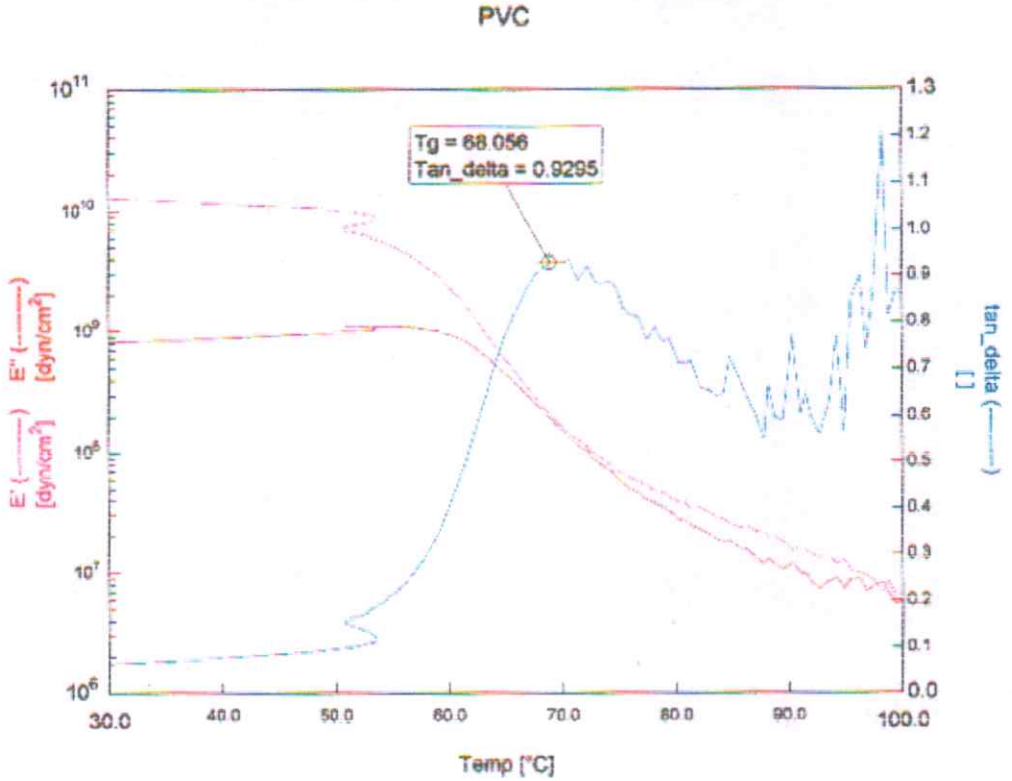
40. Derek, H. 1981. **An introduction to composite materials.** New York : Cambridge.

41. วรธรรม อุ่นจิตติชัย. 2541. อุตสาหกรรมการผลิตแผ่นปาร์ติเกิล. กรมป่าไม้

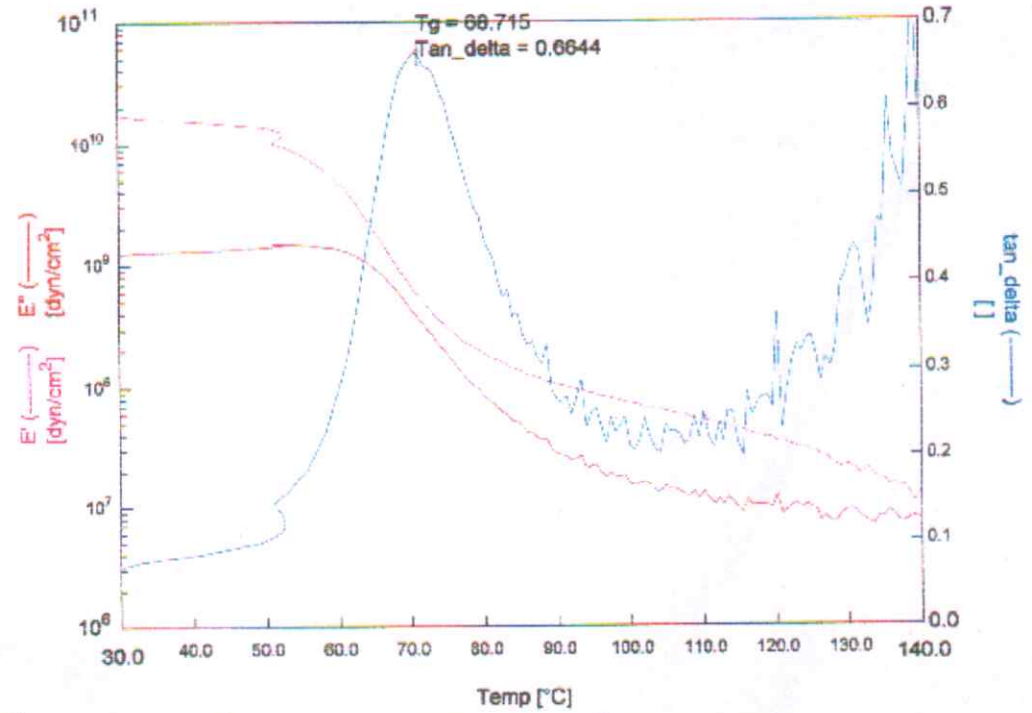
42. สุรพร กิตติสารวัณโณ. 2542. "การปรับปรุงการรับแรงกระแทกของแผ่นพีวีซีโดยใช้ยางธรรมชาติ" วิทยานิพนธ์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ภาคผนวก

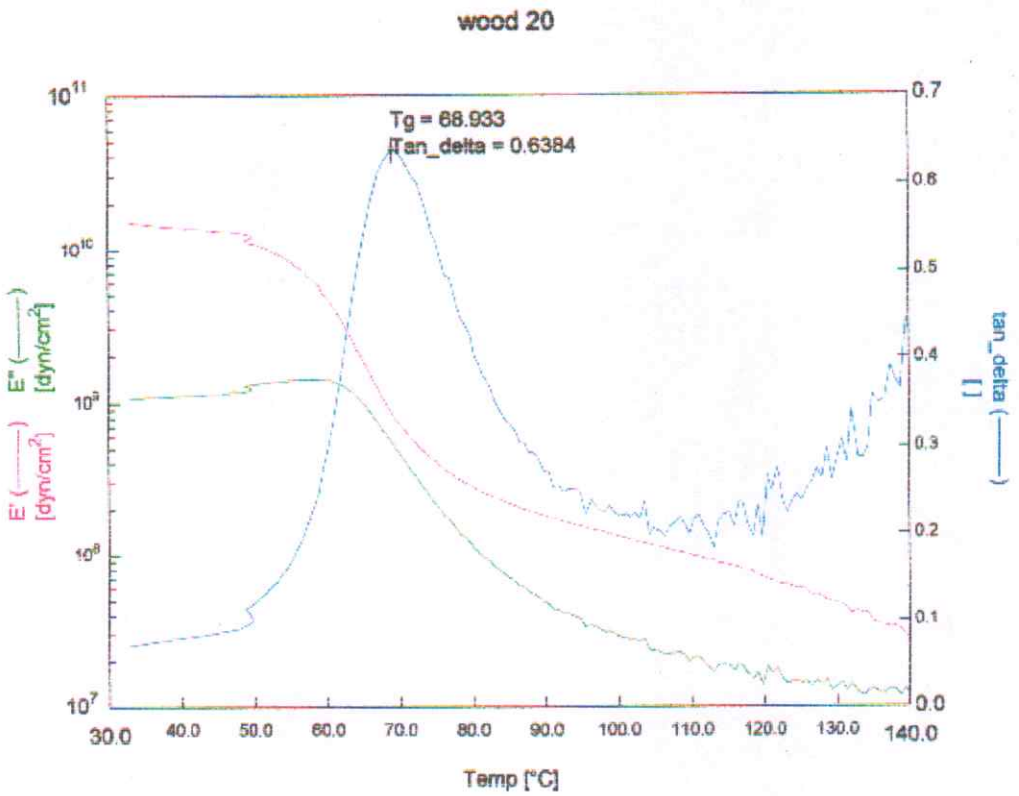
ภาคผนวก ก. กราฟที่ได้จากเครื่อง DMTA ของพีวีซีคอมโพสิต



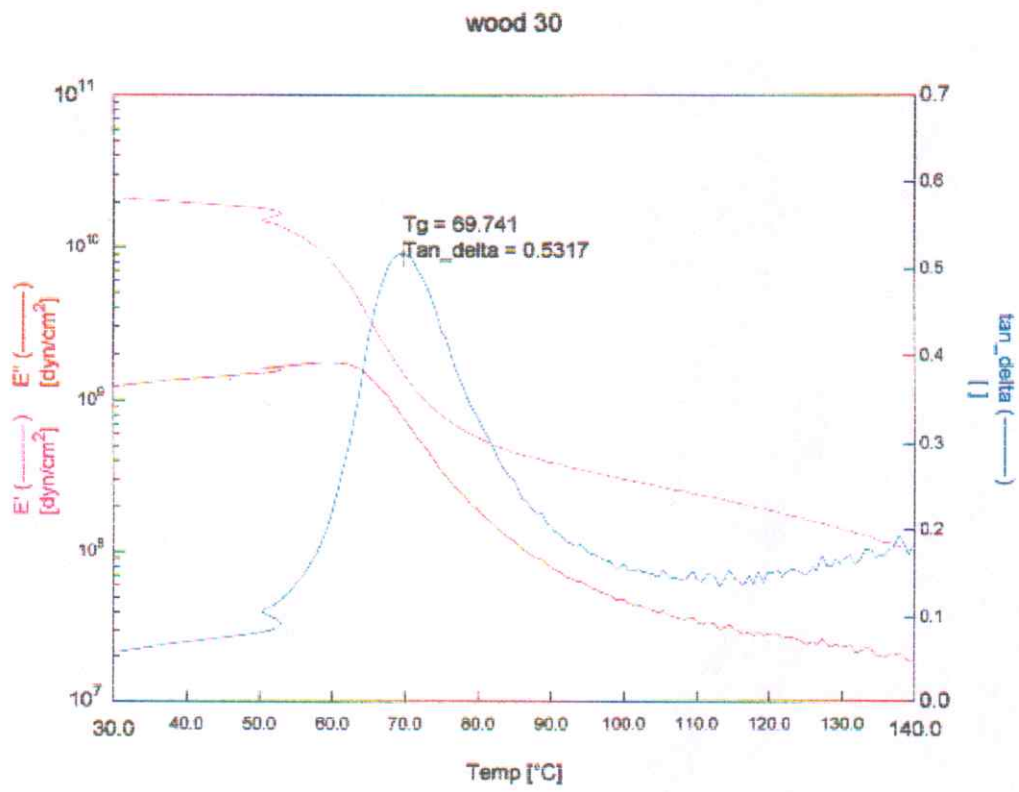
รูปที่ ก-1 กราฟจากเครื่อง DMTA ของพีวีซี



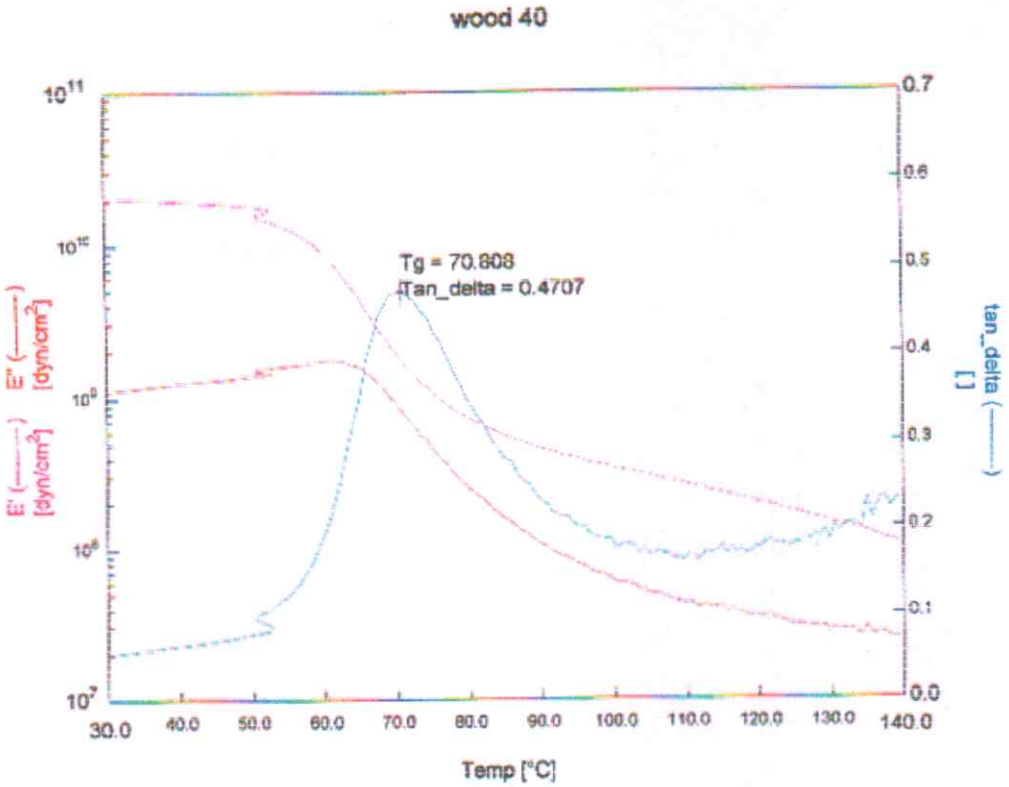
รูปที่ ก-2 กราฟจากเครื่อง DMTA ของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อเติมเส้นใยไม้ TMP 10 phr



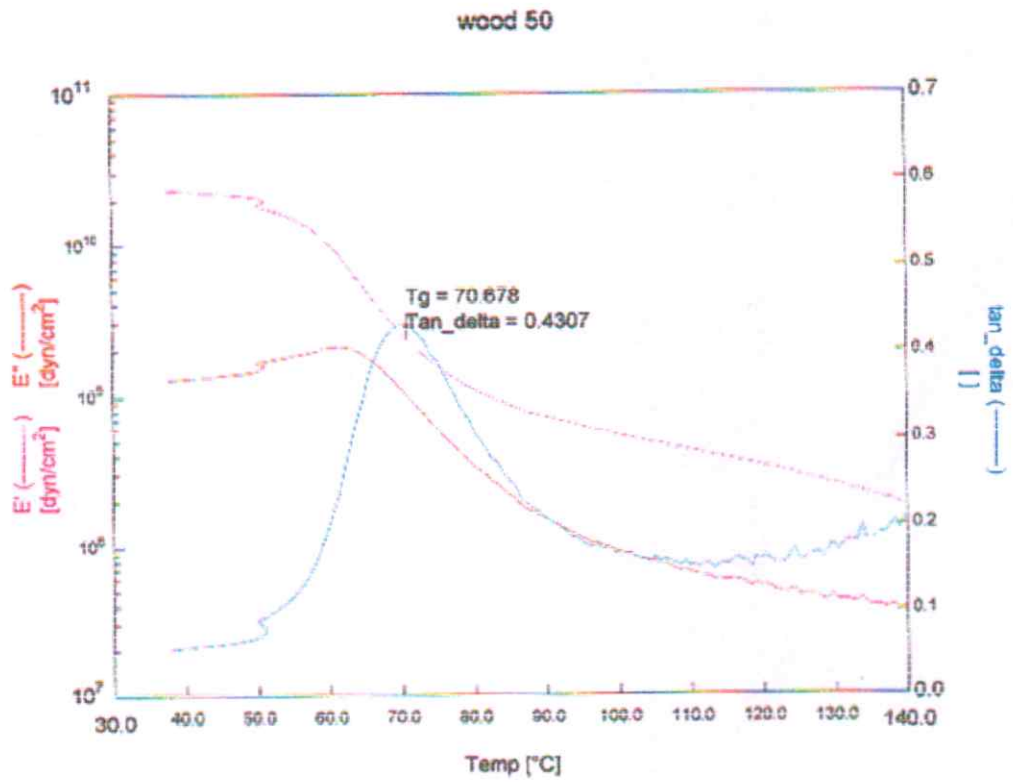
รูปที่ ก-3 กราฟจากเครื่อง DMTA ของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อเติมเส้นใยไม้ TMP 20 phr



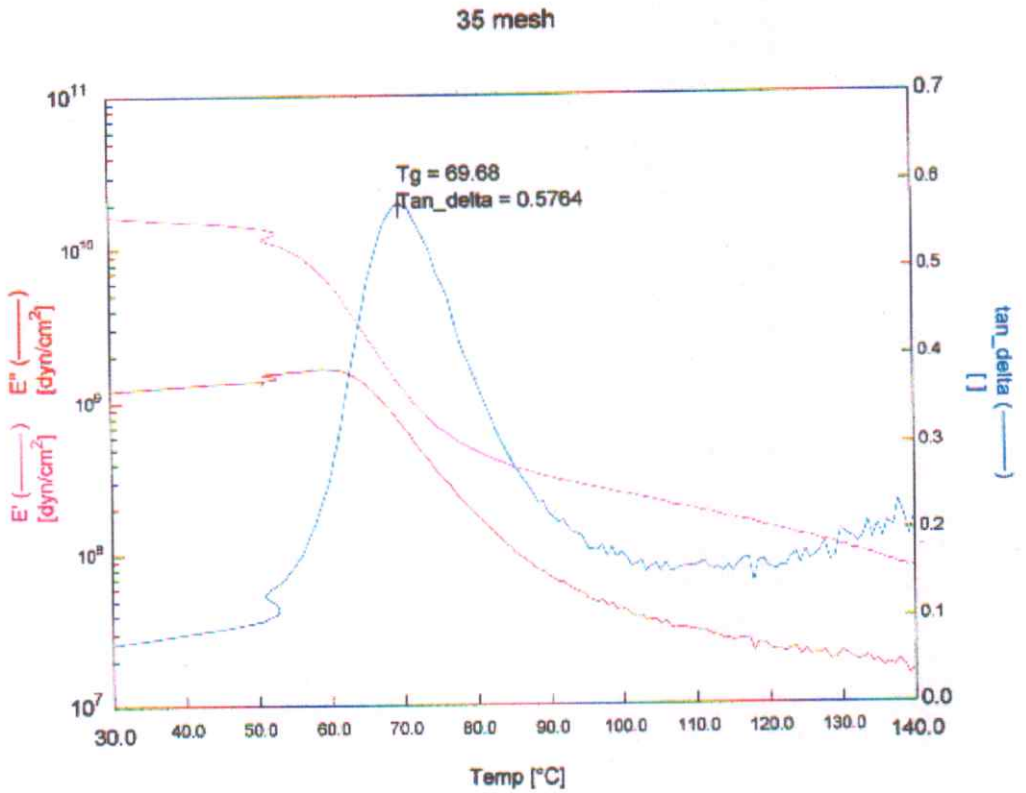
รูปที่ ก-4 กราฟจากเครื่อง DMTA ของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อเติมเส้นใยไม้ TMP 30 phr



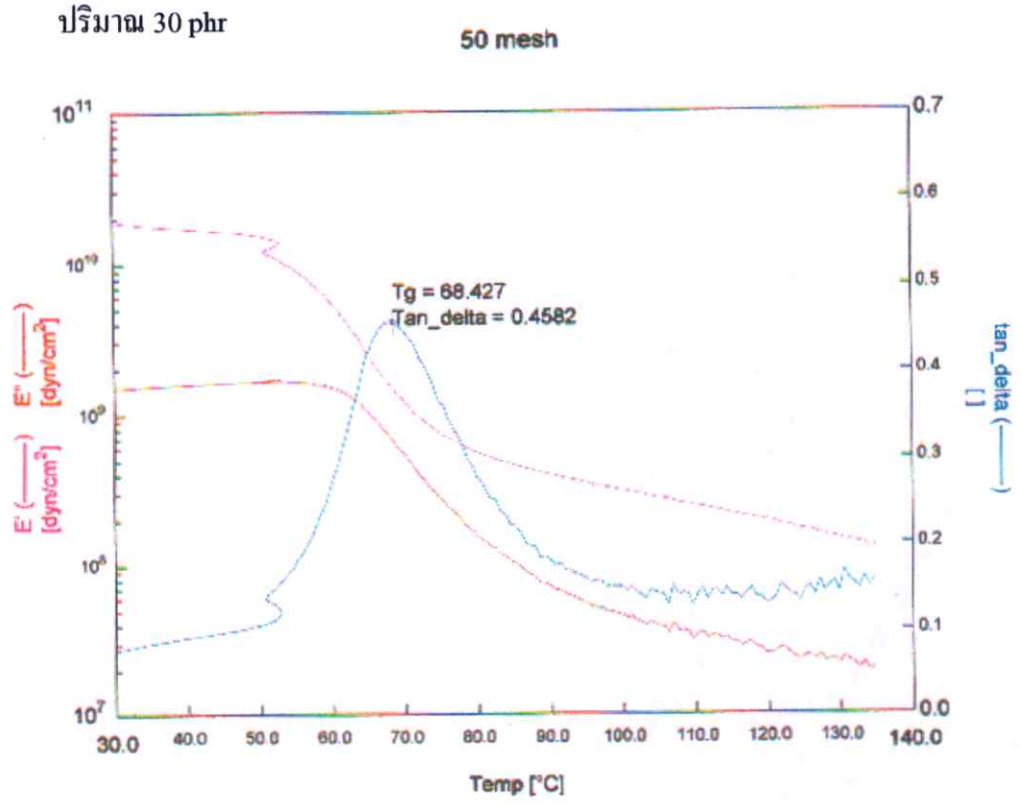
รูปที่ ก-5 กราฟจากเครื่อง DMTA ของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อเติมเส้นใยไม้ TMP 40 phr



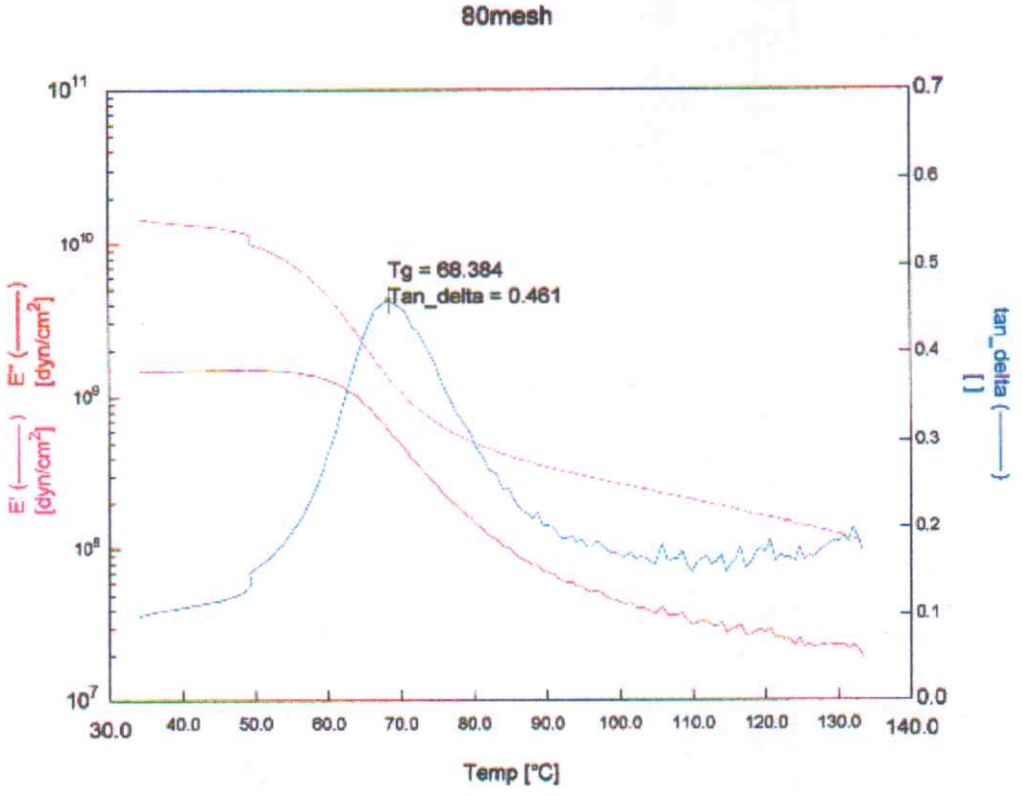
รูปที่ ก-6 กราฟจากเครื่อง DMTA ของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อเติมเส้นใยไม้ TMP 50 phr



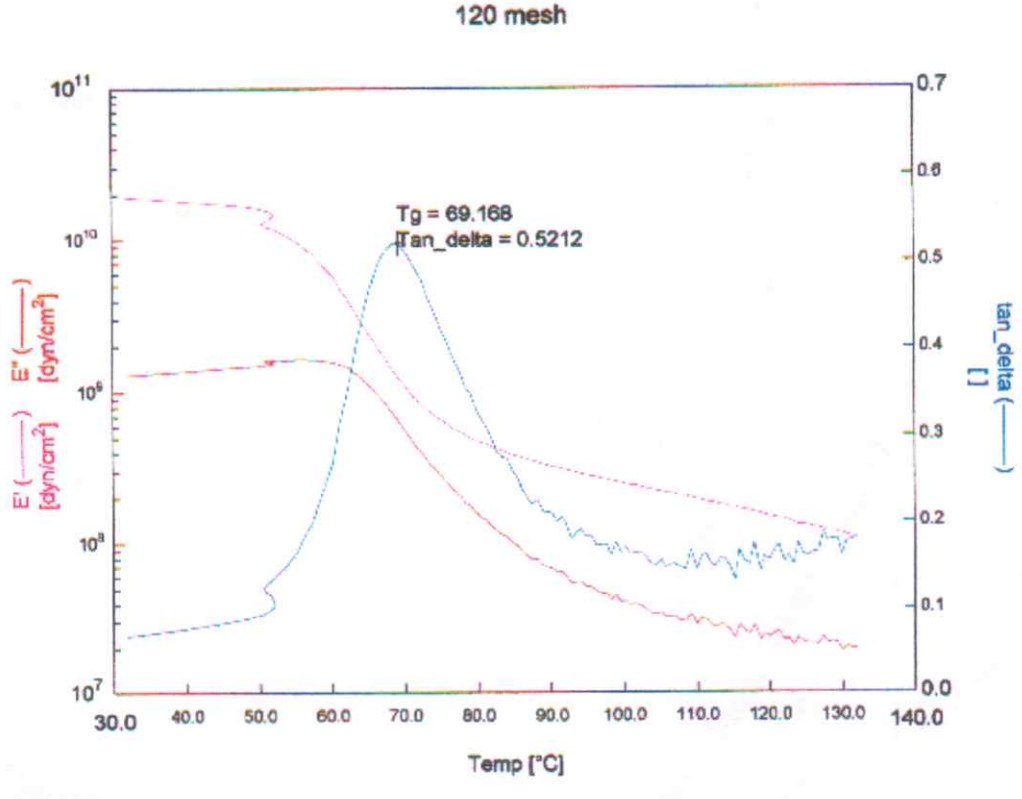
รูปที่ ก-7 กราฟจากเครื่อง DMTA ของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อเติมเส้นใยไม้ TMP ขนาด 20-35 mesh ปริมาณ 30 phr



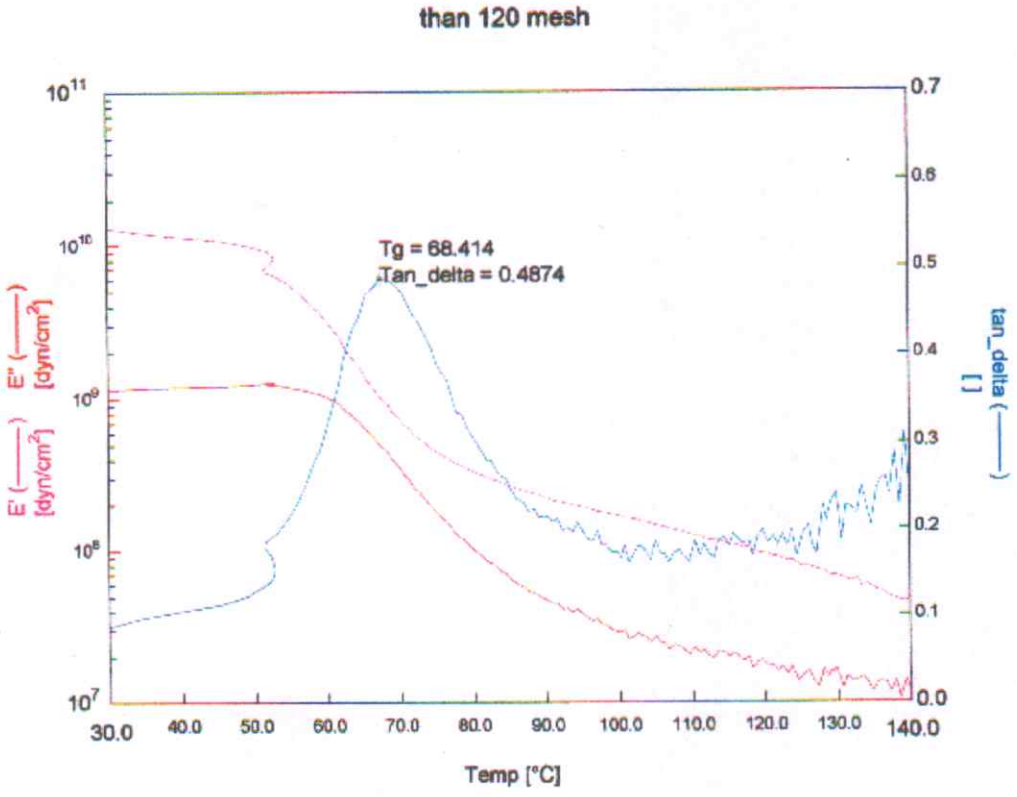
รูปที่ ก-8 กราฟจากเครื่อง DMTA ของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อเติมเส้นใยไม้ TMP ขนาด 35-50 mesh ปริมาณ 30 phr



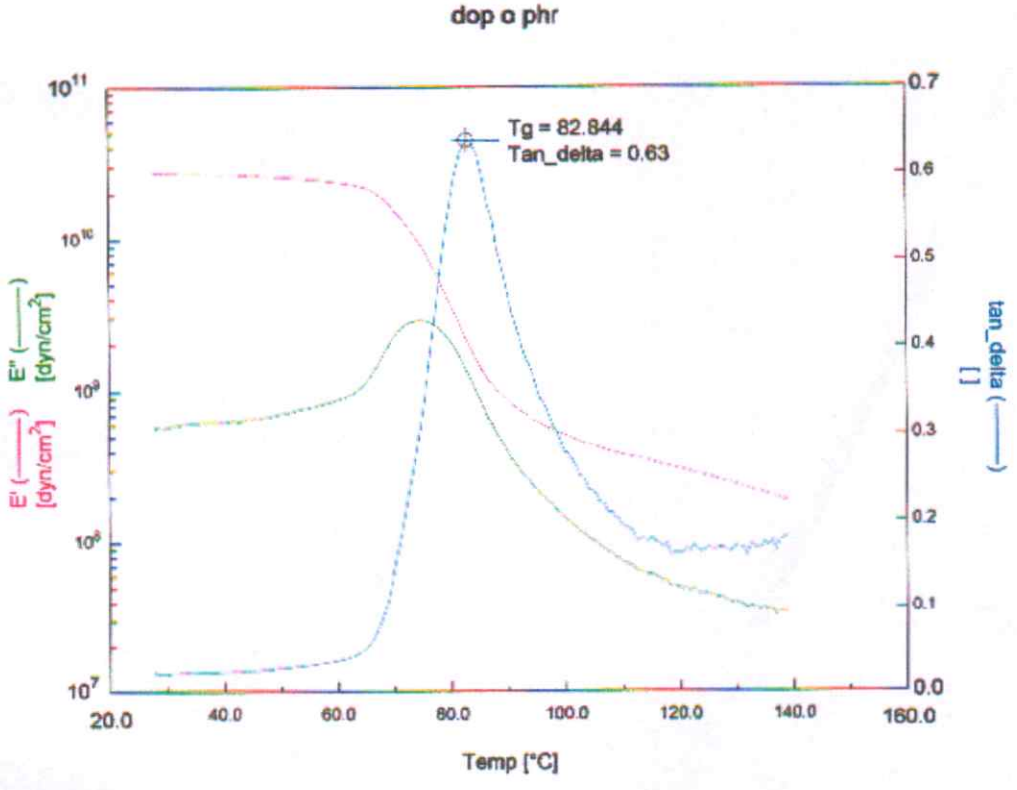
รูปที่ ก-9 กราฟจากเครื่อง DMTA ของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อเติมเส้นใยไม้ TMP ขนาด 50-80 mesh ปริมาณ 30 phr



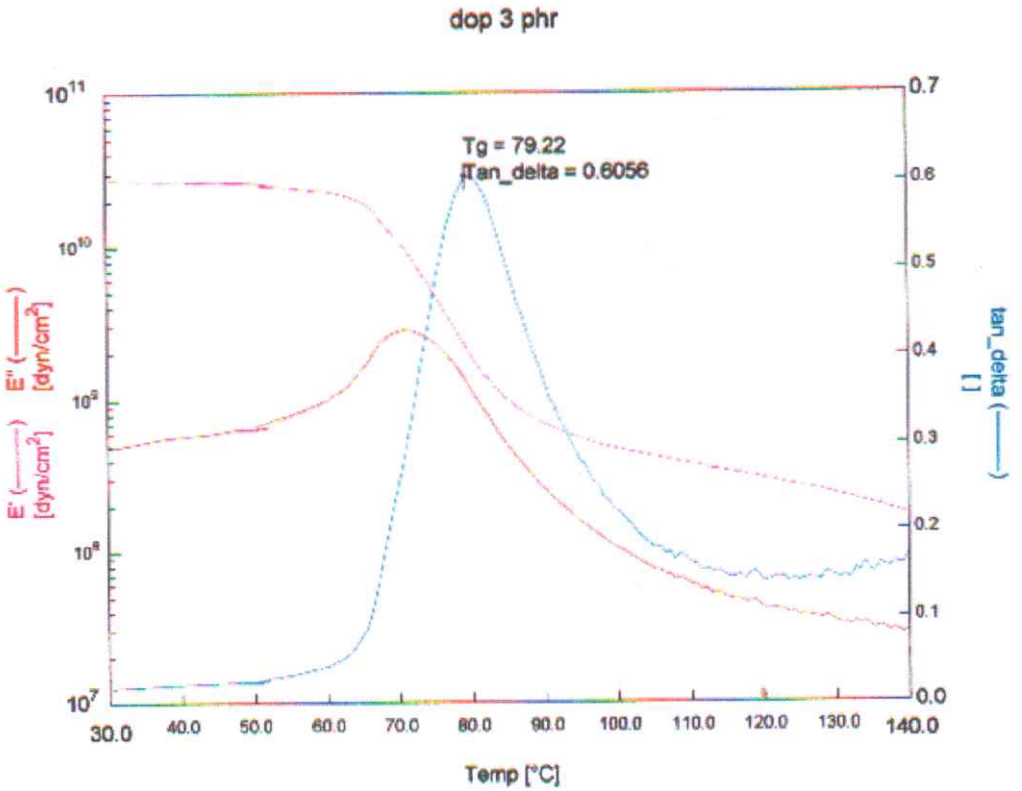
รูปที่ ก-10 กราฟจากเครื่อง DMTA ของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อเติมเส้นใยไม้ TMP ขนาด 80-120 mesh ปริมาณ 30 phr



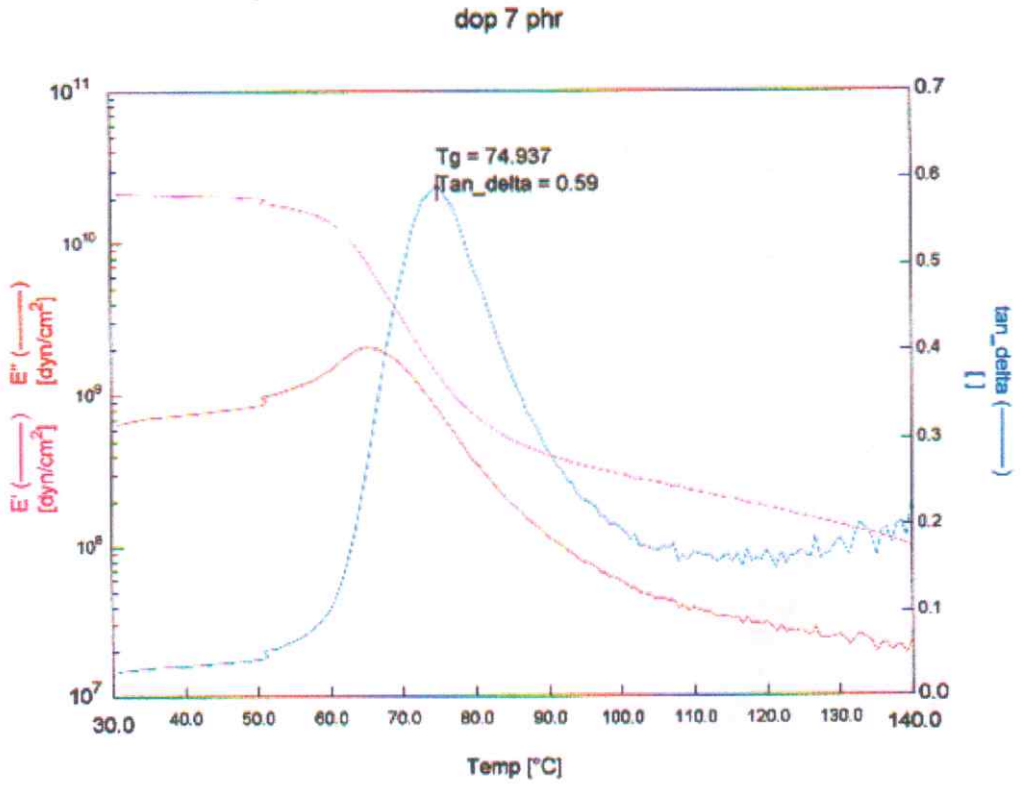
รูปที่ ก-11 กราฟจากเครื่อง DMTA ของพีวีซีคอมโพสิตเมื่อเติมเส้นใยไม้ TMP ขนาดมากกว่า 120 mesh ปริมาณ 30 phr



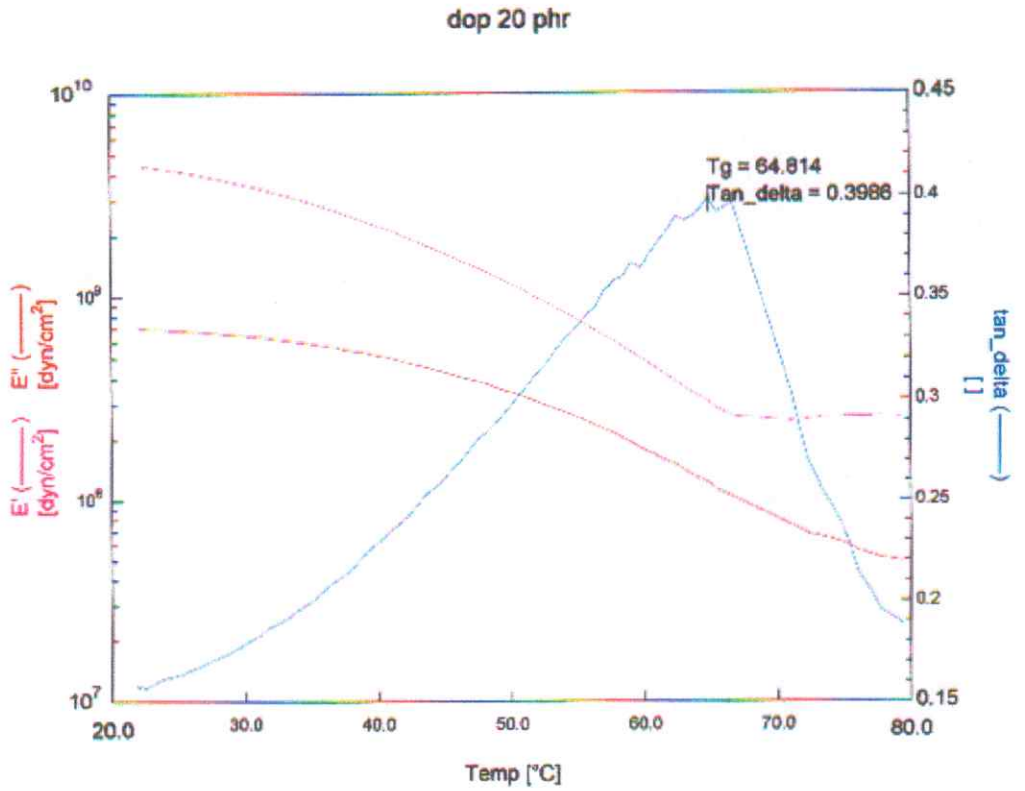
รูปที่ ก-12 กราฟจากเครื่อง DMTA ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP ปริมาณ 30 phr เมื่อไม่เติม DOP



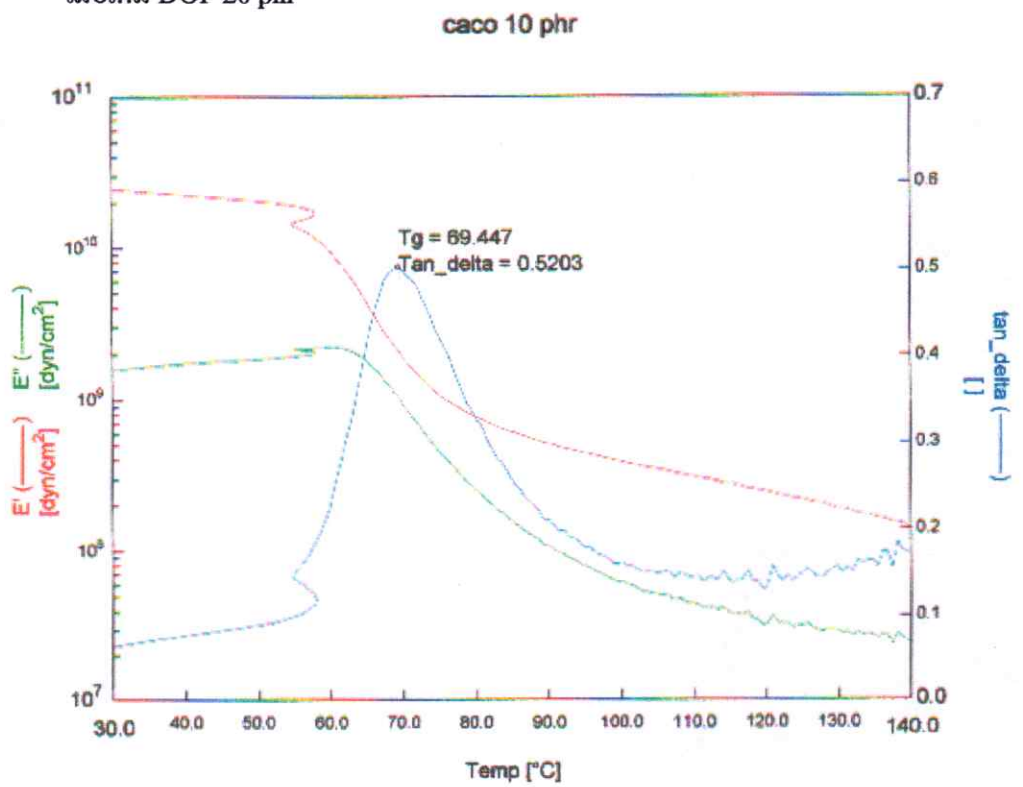
รูปที่ ก-13 กราฟจากเครื่อง DMTA ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP ปริมาณ 30 phr เมื่อเติม DOP 3 phr



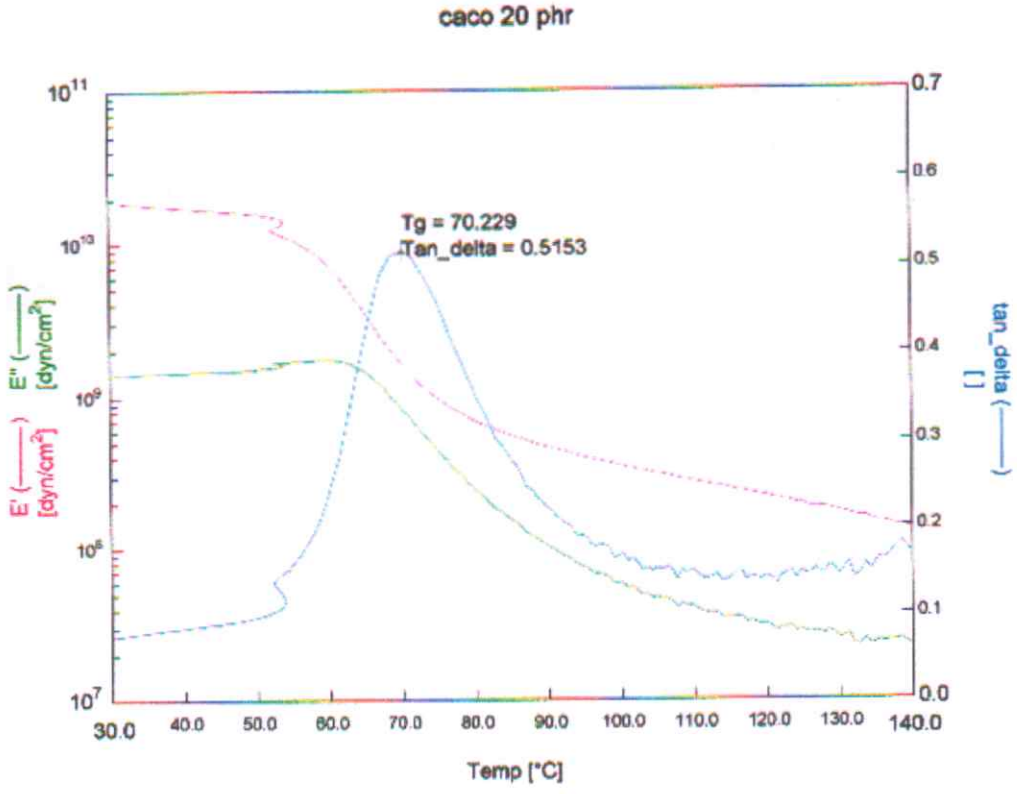
รูปที่ ก-14 กราฟจากเครื่อง DMTA ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP ปริมาณ 30 phr เมื่อเติม DOP 7 phr



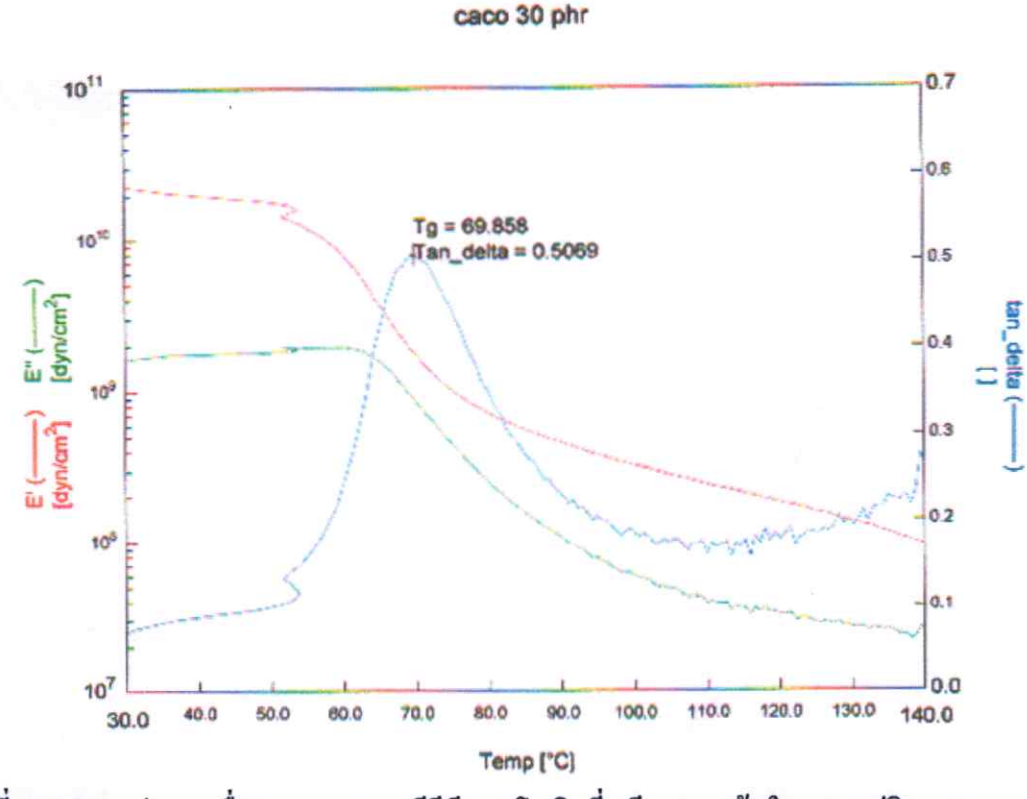
รูปที่ ก-15 กราฟจากเครื่อง DMTA ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP ปริมาณ 30 phr เมื่อเติม DOP 20 phr



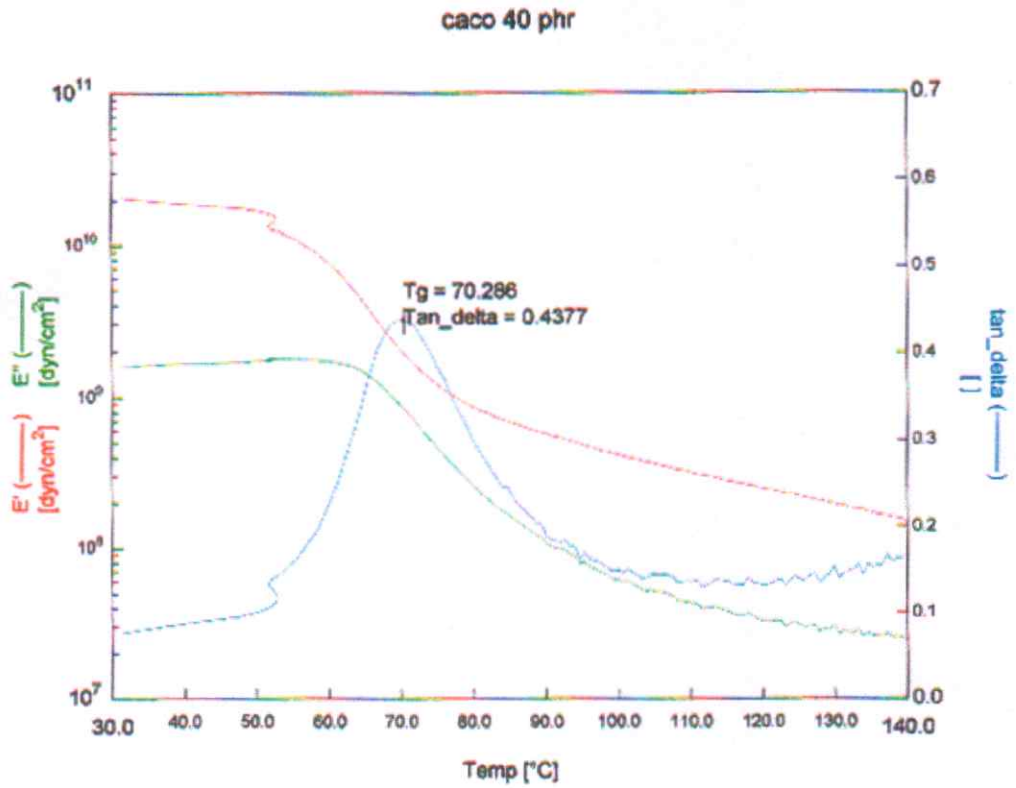
รูปที่ ก-16 กราฟจากเครื่อง DMTA ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP ปริมาณ 30 phr เมื่อเติมแคลเซียมคาร์บอเนต 10 phr



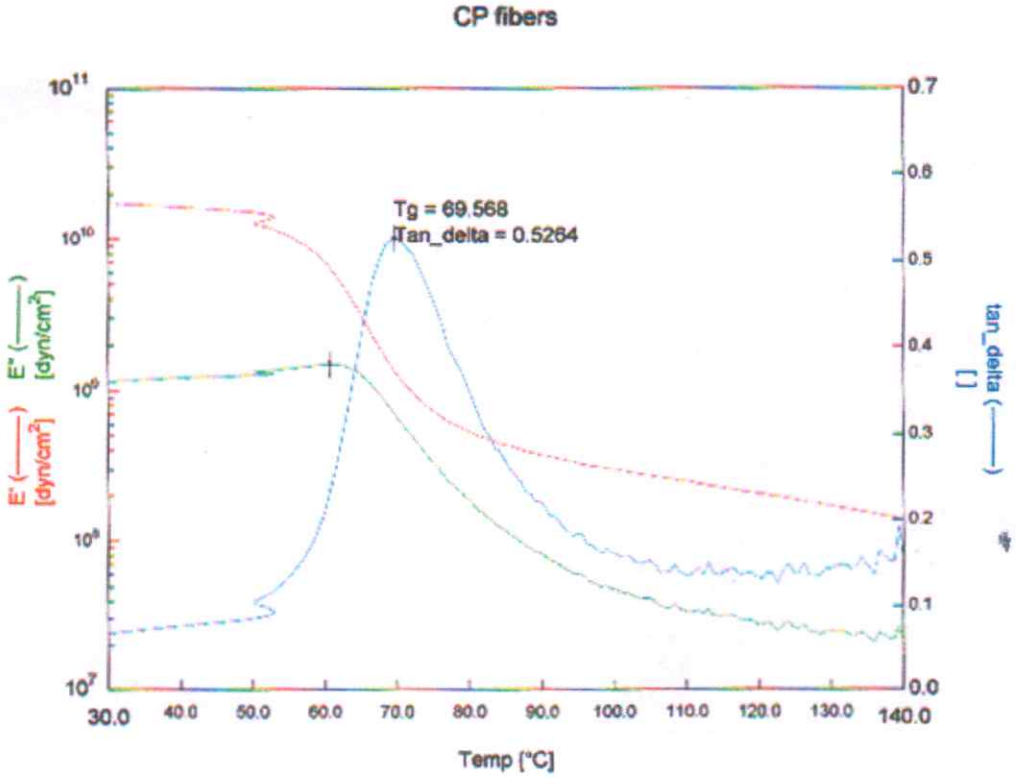
รูปที่ ก-17 กราฟจากเครื่อง DMTA ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP ปริมาณ 30 phr เมื่อเติมแคลเซียมคาร์บอเนต 20 phr



รูปที่ ก-18 กราฟจากเครื่อง DMTA ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP ปริมาณ 30 phr เมื่อเติมแคลเซียมคาร์บอเนต 30 phr



รูปที่ ก-19 กราฟจากเครื่อง DMTA ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย TMP ปริมาณ 30 phr เมื่อเติมแคลเซียมคาร์บอเนต 40 phr



รูปที่ ก-20 กราฟจากเครื่อง DMTA ของพีวีซีคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใย CP ปริมาณ 30 phr

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	สมภพ เลิศลักขณากุล
วันเกิด	23 พฤศจิกายน พ.ศ. 2521
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย
การศึกษา	- ระดับมัธยมจาก โรงเรียนอัสสัมชัญ ธนบุรี พ.ศ. 2533-2537
	- ระดับปริญญาตรี (วท.บ. เคมีอุตสาหกรรม) จากภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พ.ศ. 2538-2541